



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica

"DISEÑO Y CONSTRUCCION
DE UN SECADOR EXPERIMENTAL
DE PRODUCTOS AGRICOLAS."

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentada por:
MARCO GAIBOR ERAZO

GUAYAQUIL

ECUADOR

AÑO
1993

AGRADECIMIENTO.

Al Ing. Víctor Hugo González
por su acertada dirección
para la realización del pre-
sente trabajo.

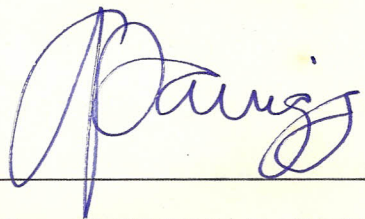
Al Personal de Apoyo de los
laboratorios por su colabo-
ración dada para mis pruebas
experimentales del proyecto.

DEDICATORIA.

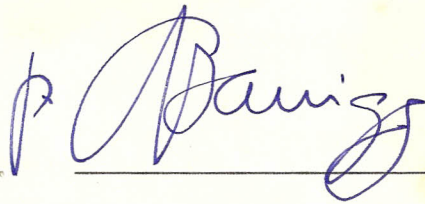
A DIOS.



A mis padres y Hermanos.



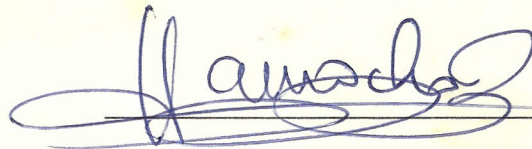
DR. ALFREDO BARRIGA
DECANO DE LA FIM



ING VICTOR H. GONZALEZ
DIRECTOR DE TESIS



ING. FRANCISCO ANDRADE
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

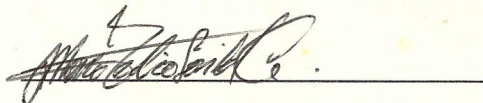


ING. FEDERICO CAMACHO
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

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 ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

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



MARCO GAIBOR ERAZO

RESUMEN

El Secador está compuesto de un ventilador centrífugo que absorbe aire desde el ambiente y lo impulsa através de la cámara de un calentador de resistencias eléctricas en forma de espiras, montadas en orden de tubos escalonados para alcanzar la temperatura requerida en la cámara de secado. Este aire caliente pasa através de unos deflectores que distribuyen horizontalmente y verticalmente con ayuda de una expansión gradual hacia las nueve bandejas con grano, distribuídas y espaciadas una sobre otra, de tal manera que a partir de una velocidad mínima de 30 m/min se produce flujo turbulento en el interior de la cámara de secado. Se realizaron pruebas para obtener las presiones y caídas de presión a lo largo del secador, alcanzando una presión de 11.13 cmH₂O con un flujo próximo de 1293.53 cfm a la entrada del calentador, incluyendo pruebas con recirculación de aire, de vacío para determinar las temperaturas máximas. Con estos datos de velocidades y temperaturas se realizaron curvas que sirven para fijar parámetros de secado para un producto determinado.

INDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN

INDICE GENERAL.....	
INDICE DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	
INDICE DE TABLAS.....	
INDICE DE GRAFICOS.....	
INDICE DE FORMULAS.....	

INTRODUCCION.....	
-------------------	--

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DE SECADO

1.1 Justificación del proyecto.....	
1.2 Factibilidad del proyecto.....	

CAPITULO II

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DEL SECADO

2.1 Introducción: Conceptos básicos....	
2.2 Propiedad de los productos que deben secarse.....	
2.3 El movimiento de la humedad en los productos.....	



- 2.4 Humedades recomendadas para un almacenamiento sin riesgo.....
- 2.5 Diferentes modos de propagación de calor en el secado.....
- 2.6 Períodos de desecación
- 2.7 Influencia del producto que va a secarse.....
- 2.8 Técnicas del secado.....
- 2.9 Problemas especiales del secado....

CAPITULO III

DISEÑO Y PROCESO DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA

- 3.1 Selección del tipo de secador.....
- 3.2 Dimensionamiento de la cámara de secado.....
- 3.3 Balance de masa.....
- 3.4 Balance de Energía.....
- 3.5 Cálculo.....
- 3.6 Diseño del sistema de calentamiento de aire.....

CAPITULO IV

EVALUACION EXPERIMENTAL DEL SECADOR

- 4.1 Partes principales del secador.....

4.2 Funcionamiento y operación del
equipo.....

4.3 Pruebas experimentales.....

4.4 Análisis experimental de los
resultados.....

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....

APENDICES.....

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.....



INDICE DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.



Wa	=	Humedad inicial base húmeda.
ρ_{gw}	=	Densidad del Grano húmedo.
Tea	=	Temperatura de entrada del aire.
Ts	=	Temperatura que debe mantener el grano.
Tb	=	Temperatura de la masa principal del aire.
Tf	=	Temperatura de película.
Q	=	Caudal de aire.
V	=	Velocidad de aire.
Re	=	Número de Reynolds.
D	=	Diámetro del ducto para la cámara.
Γ_f	=	Viscosidad cinemática a la temperatura de superficie.
N	=	Número de bandejas.
A	=	Ancho de bandeja.
Eb	=	Espacio entre bandejas.
L	=	Espesor de la capa de grano.
H	=	Altura de la cámara.
Ep	=	Espesor de la lámina de la bandeja.
DH	=	Diámetro Hidráulico.
Lt	=	Longitud de la bandeja.
ρ_a	=	Densidad del aire.
K	=	Conductividad del grano.
hc	=	Coeficiente convectivo.

Nt = Número de Unidades de transferencia.
V = Volúmen del aire entre las bandejas.
Tsa = Temperatura de salida del aire.
Ww = Contenido de humedad final.
Wc =
Contenido crítico de humedad del
producto a secarse.
We =
Contenido medio de humedad en equi-
librio.
X = Contenido de humedad en base seca.
Mt = Masa de grano a secarse.
MgHc = Masa de grano húmedo de cacao.
GgHcf = Masa de grano húmedo de café.
[gwc = Densidad del cacao húmedo.
[gsc = Densidad del cacao seco.
Mw =
Masa de agua en el aire húmedo (Kg. de
vapor).
Mas = Masa de aire seco (Kg de aire seco).
Mwas = Masa de agua en el aire a la salida.
Mwae = Masa de agua en el aire a la entrada.
Mwge = Masa de agua en el grano a la entrada.
Mwgs = Masa de agua en el grano a la salida.
Wa = Humedad del grano en base húmeda.
Mgh = Masa de grano húmedo.
Ww = Humedad final del grano.
φ = Humedad relativa.



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
81 F.I.M.C.P.

- Ma_{1,2,3} = Masa de aire seco.
- X =
Coeficiente específico de humedad del
aire a la temperatura T.
- h_{1+x} = Entalpía del aire.
- Cp^{aire} = Calor específico del aire.
- Q_{vent} = Calor despedido por ventilación.
- Q_{neto} =
Calor neto necesario para el calenta-
miento de cámara y grano.
- Q_{perd} = Calor perdido a través de las paredes.
- Mn = Masa de material.
- CPM = Calor específico del material.
- U = Coeficiente global de transferencia.
- Ao =
Area de transferencia en las paredes de
la camara de secado.
- K =
Resistencia térmica del material de la
cámara.
- Xm = Espesor del material de la cámara.
- Km =
Conductividad térmica del material de
la cámara.
- h = Coeficiente convectivo.
- MH₂₀ = Masa de Agua destilada.

N = Número de hileras transversales.
f = Densidad del fluido.
Gmax = Velocidad máxima en área máxima.

INDICE DE TABLAS.



Número

Pág.

- Tabla 1.1.-
Producción de arroz en cáscara húmeda por provincias.....
- Tabla 1.2.-
Rendimiento por Hectárea de la producción de arroz.....
- Tabla 1.3.-
Evaluación Agrícola 1986.....
- Tabla 1.4.-
Evaluación Agrícola 1988 Verano.....
- Tabla 1.5.-
Distribución de piladoras, capacidad de pilado y producción de arroz en cáscara (1982).....
- Tabla 1.6.-
Agrupación de piladoras según capacidad de pilado (1989).....

Tabla 1.7.-

Programa nacional del café, superficie sembrada, cosechada, rendimiento y producción de café por provincias. (1989).....

Tabla 2.1.-

Contenidos de humedad para un almacenamiento sin riesgo.....

Tabla 2.2.-

Consideraciones para calcular el tiempo según la forma del producto.....

Tabla 2.3.-

Temperatura de funcionamiento un secador de capas delgadas..

Tabla 3.1.-

Tamaño de secador según la longitud y el número de bandejas..

Tabla 3.2.-

Tamaño de secador según la longitud.....

Tabla 3.3.-

Resultados haciendo variar el
flujo de aire en el secador....

Tabla 3.4.-

Coefficientes para calcular el
coeficiente promedio de trans-
ferencia de calor de un cilin-
dro.....

Tabla 3.5.-

Potencias de trabajo en función
del número de resistencias.....

Tabla 3.6.-

Presiones en los elementos del
secador.....

Tabla 4.1 - 4.7.-

Presiones salida ventilador -
entrada calentador.....

Tabla 4.8.-

Presiones y velocidades salida
calentador - entrada del calen-
tador.....

Tabla 4.9.-

Consumo de energía del motor que
impulsa el ventilador.....

Tabla 4.10 - 4.12.-

Presiones a la salida del calen-
tador y deflectores.....

Tabla 4.13.-

Caudal a la salida del calentador
y velocidad a la entrada de la
cámara de secado.....

Tabla 4.14.-

Presiones salida secador.....

Tabla 4.15.-

Presiones salida secador.....

Tabla 4.16.-

Presiones a lo largo del secador.

Tabla 4.17.-

Caída de presiones a lo largo del
secador.....

Tabla 4.18.-

Temperaturas a la salida del calentador.....

Tabla 4.19.-

Eficiencia del calentador.....

Tabla 4.20.-

Temperaturas en la cámara de secado en vacío.....

Tabla 4.21.-

Temperaturas en la cámara de secado en vacío.....

Tabla 4.22.-

Temperatura promedio a la entrada de la cámara en vacío.....

Tabla 4.23.-

Consumo de energía del calentador.

Tabla 4.24.-

Temperatura en la cámara de secado con recirculación de aire.....

Tabla 4.25.-

Prueba de secado # 1.....

Tabla 4.26.-

Humedad del aire ambiente y a la salida del secador, Prueba # 1....

Tabla 4.27.-

Humedades en las bandejas. Prueba # 1.....

Tabla 4.28.-

Cantidad de agua retirada. Prueba # 1.....

Tabla 4.29.-

Velocidad de secado. Prueba # 1..

Tabla 4.30.-

Factor de utilización de calor UHF Prueba # 1.....

Tabla 4.31.-

Prueba de secado # 2.....

Tabla 4.32.-

Humedad del ambiente a la entrada del ventilador y humedad del aire a la salida del secador.....

Tabla 4.33.-

Humedad del grano en las bandejas.
Prueba # 2.....

Tabla 4.34.-

Humedad Promedio del grano en las
bandejas. Pruebas # 2.....

Tabla 4.35.-

Agua retirada en Prueba #2.....

Tabla 4.36.-

Velocidad de secado prueba # 2...

Tabla 4.37.-

Factor de Utilización de calor UHF.
Prueba # 2.....

Tabla 4.38.-

Análisis del secador con la prueba
de secado, tomando en cuenta el
área de flujo de aire.....



INDICE DE GRAFICOS

Número

Pág.

Fig. 2.1.-

Carta Psicométrica.....

Fig. 2.2.-

Peso de Bióxido de Carbono liberado en un día por 100 gr de materia seca en función de la temperatura y de la humedad relativa del grano.

Fig. 2.3.-

Temperaturas y contenidos de humedad para un almacenamiento sin riesgo.....

Fig. 2.4.-

Temperatura estacionaria en la superficie de una sustancia mojada por evaporación en aire completamente seco.....

Fig. 2.5.-

Variaciones características de la conductividad térmica de una materia húmeda a diferentes temperaturas.....

Fig. 2.6.-

Humedad X del producto en función del tiempo.....

Fig. 2.7.-

Modificación en el tiempo de la humedad del producto en función del tiempo.....



Fig. 2.8.-

Modificación en el tiempo de la humedad del producto.....

Fig. 2.9.-

Hidrosecador de grano Steinecker.

Fig.2.10.-

Parrillas de secado montadas en paralelo con ventilación cruzada.....

- Fig. 2.11.-
Estufas de secado de ventilación
cruzado montadas en serie.....
- Fig. 2.12.-
Secador de toberas.....
- Fig. 2.13.-
Canales de secado.....
- Fig. 2.14.-
Relación entre humedad relativa
del grano y la temperatura máxi-
ma admisible para el maiz y
arroz.....
- Fig. 2.15.-
Curvas de equilibrio aire-grano
para diferentes temperaturas....
- Fig. 3.1.-
Modelo del secador.....
- Fig. 3.2.-
Flujo másico en la cámara de
secado.....

- Fig. 3.3.-
Distribución de la temperatura en
un evaporador.....
- Fig. 3.4.-
Flujo de energía en el secador..
- Fig. 3.5.-
Arreglo de tubos escalonados....
- Fig. 3.6.-
Vista Superior del arreglo de
tubos escalonados en el calenta-
dor de aire.....
- Fig. 3.7.-
Vista frontal del arreglo de tu-
bos escalonados en el calentador
de aire.....
- Fig. 3.8.-
Conexión Trifásica.....
- Fig. 3.9.-
Circuito de resistencia en paralelo.



Fig. 3.10.-

Variación de Temperatura a través
de una pared de cemento refracta-
rio.....

Fig. 3.11.-

Expansión gradual en el cono
truncado.....

Fig. 3.12.-

Rejillas desviadoras de flujo en
posición horizontal.....

Fig. 3.13.-

Rejillas desviadoras de flujo en
posición vertical.....

Fig. 3.14.-

Expansión gradual a la cámara de
secado.....

Fig. 3.15.-

Disposición de las bandejas en la
cámara de secado.....

Fig. 3.16.-

Aglomeración de grano en una ban-
deja.....

Fig. 3.17.-
Contracción gradual a la salida
de la cámara de secado.....

Fig. 3.18.-
Presiones en los elementos del
secador.....

Fig. 4.1.-
Vista frontal del secador.....

Fig. 4.2.-
Ubicación de sonda para determi-
nar presiones salida ventilador
- Entrada Calentador..

Fig. 4.3.-
Ubicación de sonda para determi-
nar presiones salida calentador.

Fig. 4.4.-
Ubicación de sonda para toma de
presiones salida secador.....

Fig. 4.5.-
Ubicación de termocuplas salida
calentador.....

- Fig. 4.6.-
Ubicación de termocuplas entrada
de la cámara.....
- Fig. 4.7.-
Velocidad y temperaturas vs. Z %
succión ventilador.....
- Fig. 4.8.-
Recirculación de aire en el secador.
- Fig. 4.9.-
Velocidad de secado P1 - B1....
- Fig. 4.10.-
Velocidad de secado P1 - B2.....
- Fig. 4.11.-
Velocidad de secado P1 - B3.....
- Fig. 4.12.-
Velocidad de secado P1 - B4....
- Fig. 4.13.-
Velocidad de secado P1 - B5....
- Fig. 4.14.-
Velocidad de secado P1 - B6.....

Fig. 4.15.-

Velocidad de secado P1 - B7.....

Fig. 4.16.-

Velocidad de secado P1 - B8.....

Fig. 4.17.-

Velocidad de secado P1 - B9.....

Fig. 4.18.-

Velocidad de secado P1 - Bpromedio.....

Fig. 4.19.-

Velocidad de secado en (KgH₂O/hr)
vs. Tiempo en base al promedio de
las pruebas.....

Fig. 4.20.-

Velocidad de secado P2 - B1.....

Fig. 4.21.-

Velocidad de secado P2 - B2.....

Fig. 4.22.-

Velocidad de secado P2 - B3.....

Fig. 4.23.-

Velocidad de secado P2 - B4

Fig. 4.24.-

Velocidad de secado P2 - B5.....

Fig. 4.25.-

Velocidad de secado P2 - B6.....

Fig. 4.26.-

Velocidad de secado P2 - B7.....

Fig. 4.27.-

Velocidad de secado P2 - B8.....

Fig. 4.28.-

Velocidad de secado P2 - B9.....

Fig. 4.29.-

Velocidad de secado P2 - BPromedio.....

Fig. 4.30.-

Velocidad de secado en (KgH₂O/hr)
vs. Tiempo en base al promedio de
las pruebas.....

Foto 4.1.-

Disposición de las resistencias en
calentador de aire.....

Foto 4.2.-

Secador con aire calentado por
resistencias eléctricas sin re-
recirculación de aire.....

Foto 4.3.-

Secador con recirculación de aire.

Foto 4.4.-

Plantación de arroz en estado de
cosecha.....

Foto 4.5.-

Arroz con cosecha cosechado y listo
para ser transportado al secadero.

Foto 4.6.-

Secadero de arroz aprovechando la
energía natural del sol durante el
verano.....

Foto 4.7.-

Bandejas en que reposa el producto
durante el secado.....

Foto 4.8.-

Bandejas con producto a ser secado.

Foto 4.9.-

Secador e instrumentos utilizados durante la prueba de secado.....

Foto 4.10.-

Producto después de haber alcanzado la humedad requerida para su almacenamiento.....



INDICE DE FORMULAS

Fórmula:

Pág.

- 2.1 .- Coeficiente específico de humedad...
- 2.6.- Coeficiente de Transferencia de Calor.....
- 2.7.- Coeficiente de Transferencia de Calor.....
- 3.2.- Caudal mínimo en función de velocidad recomendada y diámetro asumido
- 3.12.- Coeficiente total de transferencia de calor considerando convección, radiación y conducción.....
- 3.18.- Contenido de humedad en el aire en función del coeficiente específico y la cantidad de aire seco.....
- 3.29.- Tiempo aproximado de secado.....
- 3.39.- Entalpía del aire en función del calor específico, la temperatura y el coeficiente específico de la humedad.

3.43.- Calor necesario para calentar el grano seco desde la temperatura de entrada hasta la temperatura del secado.....

3.73.- Presión estática en función de la presión y velocidad y un factor adimensional que es característico de la geometría del sistema.....

4.2.- Determinación de la Velocidad de Secado.....

4.4.- Determinación del factor de utilización del calor.

INTRODUCCION

El objetivo de esta tesis es diseñar y construir un secador experimental, para estudiar el efecto de algunas variables como son, la temperatura, la humedad y la velocidad del medio secante sobre los productos agrícolas.

El diseño se basará en el producto de mayor humedad fijando la capacidad del secador para una masa determinada y como agente secador aire de un ventilador centrífugo, el cual se calienta mediante resistencias eléctricas para pasar al interior de nuestro secador.

Una vez diseñado y construido el equipo, realizar pruebas en vacío para obtener el comportamiento de las variables dentro de la cámara de secado en función de la cantidad de energía suministrada al medio secante para su calentamiento y el porcentaje de flujo de aire que absorbe esta energía, considerando las condiciones del medio ambiente. En base a estos datos realizar curvas que ayudarán a fijar parámetros dentro de la cámara de secado, para estudiar el comportamiento de un

producto determinado en distintos puntos y para diferentes espesores de la capa de grano.

Este secador servirá como base para el estudio del comportamiento del grano a diferentes parámetros de secado, mejorando con esto el diseño de secadores, lo cual será de mucha ayuda para el pequeño agricultor en épocas del año en las cuales es difícil el secado con energía Solar.



CAPITULO I

FUNDAMENTOS DE SECADO

1.1 JUSTIFICACION DEL PROYECTO

La deshidratación o secado artificial implica el control sobre las condiciones climáticas y sanitarias dentro de una cámara o micro medio circundante, obteniendo una mejora calidad en el producto. Obviamente, la deshidratación es un proceso más caro sobre la base de costos, pero sobre la base de tiempo, espacio, y calidad, la deshidratación tiene sus ventajas. Además el secado solar no puede ser practicado ampliamente, debido a condiciones desfavorables del tiempo en muchas áreas en que vive el hombre y la agricultura es remunerativo.

Esto lo demuestra el siguiente estudio realizado en base al arroz y café. El arroz se siembra en la zona costanera del país, principalmente en las provincias del Guayas y los Ríos con una participación del 95 % del total del área, Manabí, El

Oro, Esmeraldas, Loja, Cañar y el Oriente son productores en menores escalas, como se comprueba en la tabla 1.1. La Tabla 1.2 indica como se duplicó el proceso, del cultivo en términos de área sembrada y producción. Además haciendo una comparación de rendimiento durante el invierno (Tabla 1.3) y en el verano (Tabla 1.4), se comprueba que en el invierno el rendimiento es del 7.7 % menor que en el verano. La tabla 1.7 muestra un estudio similar con la producción y el rendimiento por Hectárea de distintas clases de café en cáscara.

En este país, la capacidad de pilado determina el tamaño de la industria, por tal motivo se calculó dicha capacidad a nivel de las principales provincias para compararla con la participación en la producción de arroz cáscara verde. Se encontró una alta correlación en Guayas, los Ríos, Manabí y El Oro, entre la capacidad de Pilado y producción de arroz en cáscara como lo muestra la Tabla 1.5; sin embargo, los porcentajes de producción resultaron mayores en las provincias de

1977 - 1989

AÑO	GUAYAS	LOS RIOS	MANABI	EL CRO	OTROS
1977	218.733	82.440	7.743	6.715	3.669
1978	166.340	67.638	5.870	2.640	5.415
1979	200.619	103.072	3.633	2.753	7.003
1980	221.511	144.509	3.436	356	10.682
1981	268.075	160.673	2.335	412	8.139
1982	238.270	133.398	—	200	6.218
1983	158.859	99.919	6.091	189	5.152
1984	243.599	169.985	3.535	1.065	12.627
1985	195.530	163.183	1.922	724	10.227
1986	294.778	239.550	5.802	1.492	24.447
1987	225.418	193.761	8.512	1.690	25.987
1988	300.781	205.383	3.813	389	44.996
1989	282.480	208.277	8.863	2.010	50.734

**TABLA 1.1 - PRODUCCION DE ARROZ EN CASCARA HUMEDO
POR PROVINCIAS.**

TABLA 1.2. - RESUMEN POR HECTÁREA DE LA PRODUCCION DE ARROZ

AÑO	AREA DESEMPEÑADA	SUBVENCIONES	PRODUCCION
	Hectáreas	Millones de Pesos	Ton.
1970	87.513	2.880	266.874.7
1971	75.765	2.854	
1972	87.762	2.829	
1973	80.774	3.194	
1974	129.817	2.851	
1975	148.240	2.070	
1976	126.090	2.881	
1977	115.000	2.776	
1978	94.000	2.884	
1979	119.749	2.739	
1980	124.875	2.820	
1981	126.278	3.174	
1982	152.520	2.479	
1983	107.547	2.512	
1984	143.241	3.007	
1985	159.832	2.327	
1986	142.012	3.150	
1987	161.872	2.745	
1988	149.031	2.982	
1989	147.080	2.757	



TABLA 1.3.- EVALUACION AGRICOLA 1966

PROVINCIA	AREA PROGRAMADA	AREA SEMBRADA	AREA PERDIDA	AREA COSECHADA	PRODUCCION (TON)	RENDIMIENTO PRODUCCION
GRAYAS	57.167	46.696	1.396	39.296	139.226	3.285 1'352.046
LOS RIOS	37.604	40.732	1.754	38.978	121.069	3.106 1'421.576
ORINO	2.432	680	20	660	2.063	3.129 25.915
ESMERALDAS	2.059	2.159	132	2.027	5.374	2.650 26.215
MANABI	2.434	1.367	83	1.284	3.184	2.480 33.231
EL CAJA	616	146	13	133	325	2.444 4.004
LOJA	537	505	—	505	2.676	5.300 32.975
COTACACHI	448	315	—	315	970	3.080 11.953
NAPO	2.148	2.016	—	2.016	4.321	2.150 53.243
PASTAZA	173	160	—	160	308	2.050 3.768
MORONA	179	150	—	150	269.049	2.154 3'324.544

INVIERNO

Area Pérdida = Area Sembrada - Area Cosechada

Rendimiento = Producción / Area Cosechada

TABLA 1.4.-EVALUACION AGRICOLA 1988 VERANO

PROVINCIA	AREA PROGRAMADA	AREA SEMBRADA	AREA PERDIDA	AREA COSECHADA	PRODUCCION BRUTO (TON)	RENDIMIENTO	PRODUCCION
GUAYAS	35.155	36.878	2.429	34.449	121.929	3.539,37	1'676.506
LOS RIOS	16.345	16.340	498	15.842	50.427	3.183,10	693.368
CAÑAR	450	164	—	164	521,11	3.177,50	7.166
LOJA	400	570	—	570	2.589,60	4.543,16	35.607
ESMERALDAS	200	—	—	—	—	—	—
MANABI	200	—	—	—	—	—	—
NAPO	110	65	—	66	171,60	2.600	2.359,50
PASTAZA	50	25	—	25	64,75	2.530	890,31
MORONA	50	28	—	28	72,52	2.530	997,15

Rendimiento en Invierno = 2.98

Rendimiento en Verano = 3.23

Rendimiento Anual = 3.10

TABLA 1.5. -

DISTRIBUCION DE PILADORAS, CAPACIDAD DE PILADO Y PRODUCTOS DE ARROZ EN CASCARA

1.989

PROVINCIAS	Nº	%	ton/hr	%	%
GUAYAS	632	53,7	457,3	57,4	55,1
LOS RIOS	400	37,0	298,7	37,4	39,1
MANABI	52	4,4	22,7	2,9	2,6
EL ORO	8	0,7	3,4	0,4	0,2
OTROS	84	7,2	15,3	1,9	4,6
		100,		100,	100,

TABLA 1.6. -

AGRUPACION DE PILADORAS SEGUN CAPACIDAD DE PILADO (1989)

AGRUPACION	PORCENTAJE CAPACIDAD TOTAL DE PILADO %	PROMEDIO PICOLO ARROZ CASCARA SECA Ton/hr	PROMEDIO SECAMIENTO CASCARA HUMIDA Ton/hr	PROMEDIO ALMACENAMIENTO CASCARA SECA Ton/hr	RELACION SECA PILADO Ton/hr
I	12	0,418	0,154	100,0	0,368
II	40	0,863	0,522	161,7	0,604
III	48	1,966	2,149	807,8	1,093

TABLA 1.7

PROGRAMA NACIONAL DEL CAFE

DEPARTAMENTO DE PROGRAMACION Y EVALUACION

SUPERFICIE SEMBRADA, OBRERA, RENDIMIENTO Y PRODUCCION DE CAFE POR PROVINCIAS 1989

PROVINCIAS	SUPERFICIE SEMBRADA HAS.	SUPERFICIE OBRERA HAS.	SUPERFICIE ADICION HAS.	RENDIMIENTO qq. HAS.	PRODUCCION qq.	SUPERFICIE OBRERA HAS.	RENDIMIENTO qq. HAS.	PRODUCCION qq.
MANABI	141.453	139.480	134.655	6.3	949.386	4.625	8.0	37.000
ESMERALDES	31.902	27.806	6.398	5.6	35.828	21.208	5.3	112.498
GUAYAS	33.756	32.648	38.461	6.0	152.305	2.184	6.0	13.472
LOS RIOS	82.853	30.484	27.959	5.5	153.939	52.495	4.8	251.876
EL ORO	19.016	18.248	16.122	4.5	81.549	127	10.2	1.295
PIGUAICH	54.711	51.350	10	4.0	40	51.350	7.0	359.450
COTOPAXI	11.695	11.274	17	3.5	59	11.257	8.5	39.399
BOLIVAR	15.096	14.647	7.775	5.0	6.875	12.872	5.2	67.393
CAMBUSAZO	650	644	630	4.9	3.687	14	10.6	204
CANAR	669	667	522	4.0	2.388	145	6.9	1.290
AZUAY	360	362	340	4.8	1.632	22	3.5	197
LOJA	20.456	20.416	20.415	5.9	123.448	1	3.0	8
IMBO	62.789	43.706	2.120	4.0	8.480	41.585	5.5	353.472
PRATAZ	754	462	42	7.2	302	420	18.9	5.796
MORONA SANTIAGO	394	291	183	5.0	915	98	7.9	774
MORONA CHONCHIPE	3.639	3.215	2.570	7.0	18.690	545	9.3	5.395
GALAPAGOS	1.084	1.048	1.048	5.0	5.240	-	-	-
LOJA DE LITIGIO								
PECHINCHA-ESMERAL								
DAS	10.432	10.239	98	5.4	490	10.141	6.0	60.846
MANABI-GUAYAS	7.153	6.948	4.134	6.0	35.564	2.754	6.0	16.524
OTROS	495.078	463.732	251.623	-	1'469.117	211.843	-	1'330.881

ESTIMACIONES

FUENTE: DEPARTAMENTO TECNICO

ELABORACION: SECCION ESTADISTICA.

los Ríos y el grupo de otras provincias, lo cual demuestra un déficit de estos servicios, especialmente en zonas marginales de producción.

Para analizar el tamaño de las industrias se procedió a agruparlas por capacidad relativa de pilado en tres rangos:

I.- Molinos de baja capacidad con un promedio de 0.418 Ton/hr.

II.- Molinos de capacidad media con un promedio de 0.863 Ton/hr.

III.- Molinos de alta capacidad con un promedio de 1.966 Ton/hr.

Dentro de los mismos rangos determinados por la capacidad de pilado se calcularon las capacidades de secamiento promedio y almacenamiento. De la Tabla 1.6 se desprende que en las piladoras medias y pequeñas la capacidad de secado es más reducida que en las piladoras grandes, para corroborar esta información, se calculó la relación de secamiento-pilado, encontrándose en todas las categorías coeficientes inferiores a los estándares

internacionales de 1.5.

Con esto se comprueba que 223 industrias de 1176 no disponen de facilidades para secamiento, principalmente en zonas marginales, siendo en invierno el uso intensivo de estos equipos, por las lluvias permanentes durante la época.

Tanto el arroz como el café se pueden pilar en la misma máquina solo con cambiar la criba, por lo tanto este estudio realizado para el arroz también demuestra que no se dispone con la capacidad de secado suficiente por lo que el agricultor recurre a métodos rudimentarios de secado con el fin de disminuir la Humedad del producto al máximo permitido por el "INEN", por lo que el producto llega a los intermediarios o industrias con diferentes tratamientos y humedad, los mismos que son mezclados ocasionando daños en el producto bueno.

Esta incomodidad que presenta el estado del tiempo climático al agricultor sobre el almacenamiento o procesamiento de los

diferentes productos agrícolas de mayor consumo interno y externo, hace que sea necesario estudiar el comportamiento del secado bajo diferentes parámetros de secado, como es la velocidad del aire que lo seca y, * la temperatura del medio secante con el producto en sí.

1.2 Factibilidad del Proyecto.

Debido a que el equipo es de baja capacidad, se puede obtener sin dificultad muestras de diferentes productos, en distintas localidades sin dificultades de transportación por el volúmen y peso de la muestra que se requiere para una o varias pruebas. Además el medio de calentamiento de aire es por energía eléctrica, que está disponible en diferentes épocas del año y, los elementos que se requieren para la construcción y mantenimiento del equipo se adquieren facilmente en el mercado.

Este análisis demuestra que es factible la construcción del equipo.

CAPITULO II

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DEL SECADO.

2.1 Introducción : Conceptos básicos.

Los productos agrícolas almacenados durante el secado pierden humedad através del aire circundante mientras éste sea relativamente seco. La medida que indica la capacidad del aire para absorber la humedad del grano es su "humedad relativa" ϕ , que indica cuánto se aparte el estado del aire húmedo del estado de saturación.

La Humedad relativa del aire necesita ser menor del 70 % a 21 °C para estar en equilibrio con la mayoría de los granos con un contenido de humedad del 12 al 13 %. Las propiedades de retención de humedad del aire a diferentes temperaturas están representados en una carta psicrométrica (gráfico #2.1). Siendo la temperatura de bulbo seco T_{bs} , la que se registra en termómetros comunes y la temperatura de bulbo húmedo T_{bh} , la que se

DIAGRAMA PSICROMETRICO

Humedad, Kg de vapor/Kg aire seco

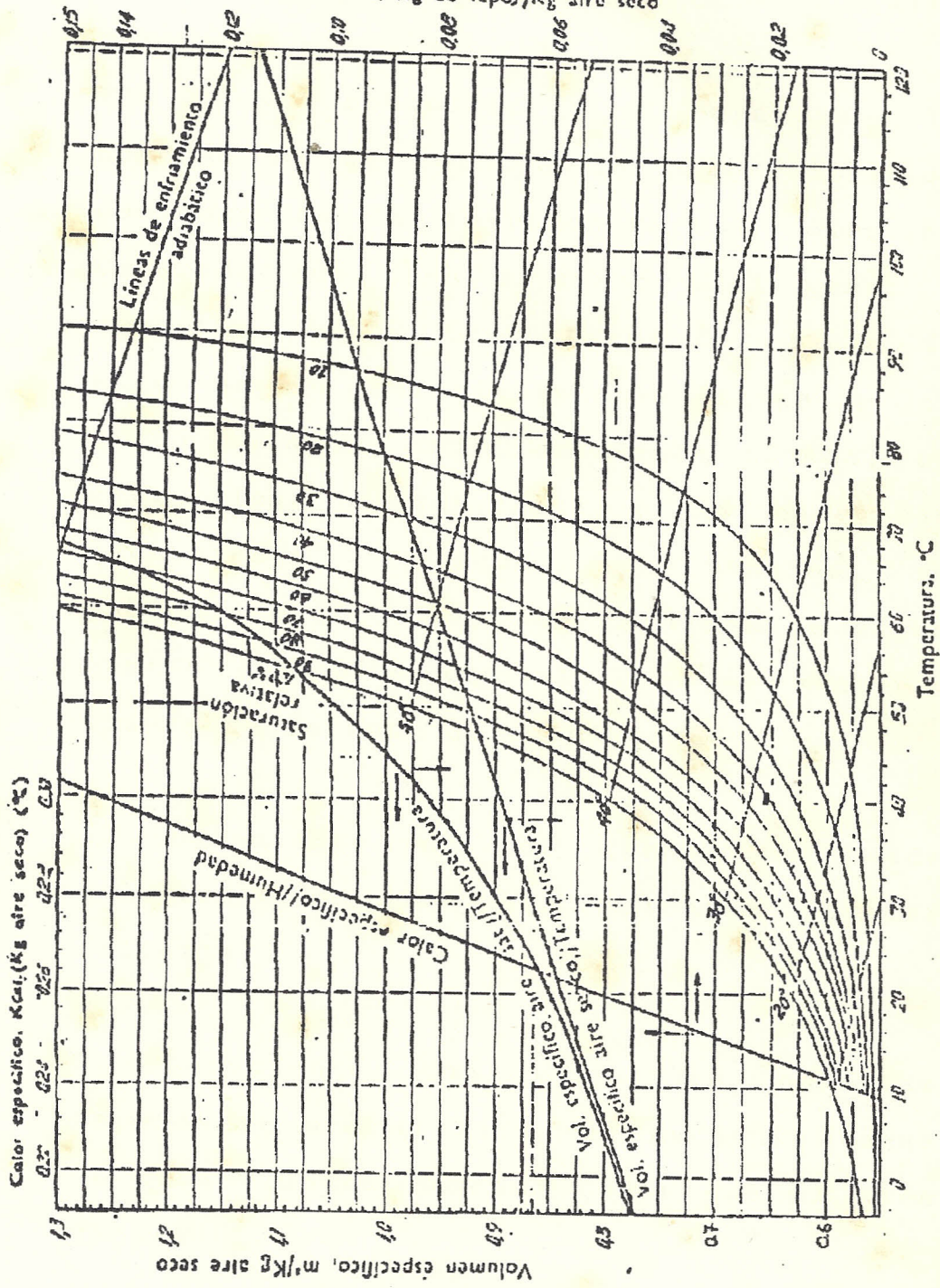


FIG. 2.1 Diagrama psicrométrico del sistema aire vapor de agua.

indica con un termómetro con su bulbo de mercurio cubierto con un paño húmedo que está evaporando humedad en el aire circundante.

El calor necesario para evaporar la humedad de un cultivo lo proporciona un descenso de la temperatura del aire no saturado que pasa a través del grano a secarse. Si la trayectoria del flujo de aire es lo suficientemente larga y el grano está lo suficientemente húmedo, el aire llega a saturarse y no hace más "secamiento", porque su humedad se incrementa a lo largo de la línea de bulbo húmedo a medida que el aire se mueve a través de la zona de secamiento.

El secamiento de un grano se puede efectuar con aire sin calentar y aire caliente.

El secamiento con aire sin calentar depende de que el aire del ambiente tenga un contenido de humedad menor que el aire saturado..

El secamiento con aire caliente se usa

para lograr un secado más rápido, agregando calor al aire para elevar su temperatura de bulbo seco y disminuir su humedad relativa.

Esta acción de calentamiento se traza horizontalmente en la gráfica psicrométrica en un contenido de humedad constante.

La capacidad de eliminación de humedad es más de cuatro veces la del aire sin calentar.

En la técnica del secado, se calcula por lo general el aire seco con la relación de masa designada como "coeficiente específico de humedad".

$$X = \frac{W}{L}$$

(fórmula 2.1)

W = Cantidad de vapor en kg contenido en

el aire húmedo

L = Cantidad de aire seco en kg.

Los cambios de estado del aire húmedo pueden calcularse de forma simple con ayuda del diagrama H, X de Mollier. La entalpía h se refiere a (1+x) kg de aire húmedo y se compone de la suma de la entalpía h_{aire} del aire seco y la del vapor que contiene:

$$h_{1+x} = h_{\text{aire}} + x h_{\text{vapor}}$$

(fórmula 2.2)

La entalpía del aire seco se obtiene de la igualdad

$$h_{\text{aire}} = (C_{\text{paire}} + 0,46X) T + 597X$$

(Krol/kg)

(fórmula 2.3)

2.2 Propiedad de los productos que deben secarse.

Los productos están compuestos de hidrato de carbono, proteínas, vitaminas, minerales, materias grasas, fibras y agua. Las proporciones de estos componentes varían según el tipo de producto y también según el tratamiento a que haya sido sometido durante la manipulación y la elaboración para el empleo de este, sea semilla, alimentación o uso industrial.

Las características más importantes que se consideran para estos casos son el poder germinativo y el valor alimenticio, que corresponden a diferentes procesos de secado y conservación.

Entre las propiedades comunes a los productos agrícolas se tiene: la respiración, conductividad, fluidez, presión, naturaleza física y química de la superficie de los granos y humedad.

Respiración.- Mientras el grano no haya sufrido alguna elaboración después de

cosecha, este suele estar vivo, por lo tanto respira y desprende calor, humedad y anhídrido carbónico en función de la temperatura, la respiración de los granos oleaginosos es más rápida que los fibrosos, disminuyendo al reducir la misma.

Los granos no pueden ser normalmente conservados en las condiciones de cosecha, sino después de haber reducido su actividad biológica a través del secado.

No obstante todas las precauciones tomadas, el peso del producto almacenado se reduce de 3 % al 5 % por año, atribuyendo esta pérdida a la respiración de los granos.

En la siguiente figura (Figura 2.2) se indican la cantidad de bióxido de carbono CO_2 liberados por día cada 100 gr. de materia seca, en función de la temperatura y la humedad relativa del producto. Y se obtiene lo siguiente:

La producción de bióxido de carbono aumente, ya sea con la temperatura y con



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

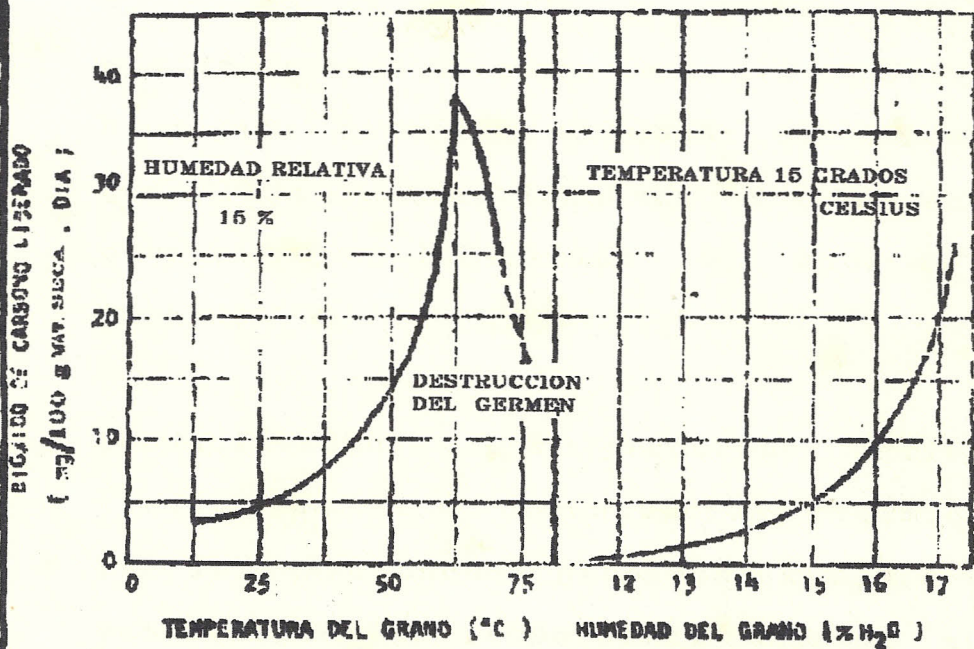


FIG. 2.2. - Plan del Dioxido de Carbono liberado en un dia por 100 g. de materia seca, en funcion de la temperatura y de la humedad relativa del grano.

la humedad relativa del producto.

El aumento de la respiración es parabólica, en función de la humedad relativa.

La respiración toma un valor máximo, en función de la temperatura más o menos a 60 % - 65 % o gC. Si se aumenta posteriormente la temperatura la actividad biológica disminuye a causa de fenómenos que baja matemáticamente y de manera parcial la liberación de bióxido de carbono.

Conductividad.- Los productos agrícolas tienen una baja conductividad térmica y por lo tanto buenas propiedades aislantes, manteniendo su temperatura durante mucho tiempo. Su conductividad es aproximadamente 300 veces menos que la de los metales, por lo tanto el grano es autoaislante por esta razón, no puede haber un intercambio de calor de la parte interior hacia la exterior del producto almacenado.

Fluidez.- Cada tipo de grano almacenado tiene un ángulo de reposo de 30 o mas grados según el tamaño, forma, humedad y limpieza del grano; las mismas que poseen una fluidez diferentes de los líquidos.

Presión.- Los granos depositados o almacenados en un recipiente ejercen presión vertical y lateralmente, sobre el fondo y contra los muros en forma diferente de los líquidos, por sus características físicas, dependiendo también del contenido de humedad que afecta sobre la densidad.

2.3 El movimiento de la humedad en los productos.

La naturaleza de unión entre la humedad y la materia seca está predeterminada por el líquido de hinchado, líquido capilar y el líquido adherente.

El líquido adherente se presenta en forma de una película unida a los fragmentos gruesos de la superficie exterior del sólido, existiendo en toda la superficie contacto libre entre la superficie húmeda y el agente secador.

El líquido capilar queda retenido por los "Intersticios" de una materia porosa y que en el momento del secado, se desplaza hacia la superficie bajo la acción de las "fuerzas capilares".

Se entiende como líquido de hinchado toda la humedad que provoca en el grano un hinchamiento o aumento de volúmen.

La humedad en los productos agrícolas se encuentra en dos formas principales, como

agua de composición y agua absorvida.

La humedad se traslada de un lugar a otro por efecto de la presión variable del vapor, siendo las presiones más altas en el grano que en el aire que lo rodea y existiendo un intercambio de humedad con el medio ambiente circundante, para mantener el equilibrio que siempre ha de existir entre la humedad del producto y la atmósfera.

La humedad puede transportarse por el aire caliente que lo absorbe ayudado por la corriente de convección, arrastrando hacia zonas de baja temperatura y haciendo que se conduzca sobre la superficie de las mismas.



2.4 Humedades recomendadas para un almacenamiento sin riesgo.

Los productos atacados por Hongos y Bacterias son dañinos para el consumo de animales y el hombre, ocasionando una baja de peso y aumentando el riesgo de enfermedades.

La figura 2.3 muestra como es necesario que la humedad exceda de cierto nivel para el desarrollo de microorganismos. Por lo tanto el deterioro ocasionado por hongos y bacterias se evita admitiendo en los almacenes unicamente productos cuyos contenidos de humedad y temperatura sea inferior a ciertos niveles, así solo habría que combatir a el deterioro que pueden ocasionar los insectos y roedores.

Además en la compra y venta se paga o se cobra cantidades considerables por el agua que contiene cuando este se vende al peso.

En la tabla 2.1 se dan el contenido de humedades recomendables para un almacenamiento sin riesgo segun el Ministerio de Agricultura.

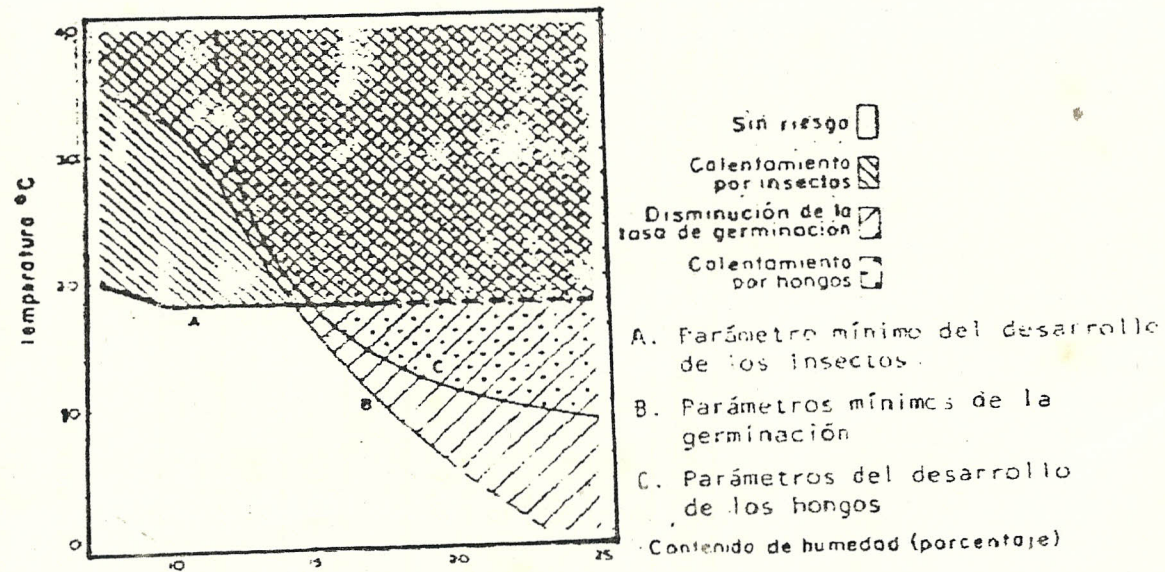


FIGURA 2.3.— Temperaturas y contenidos de humedad para el almacenamiento sin riesgos, para el desarrollo de los insectos y hongos, y para que disminuya la tasa de germinación.

PRODUCTO	HUMEDAD/COSECHA		HUMEDAD/ALMACENAJE
Maiz	25-20	18-16	13,5
Trigo	25-20	18-16	13,5
Arroz	25-25		13,0
Cacao	64		7,0
Cafe	56		
Cebada	25-20	18-16	13,0
Avena	25-20	18-16	13,0
	Invierno	Verano	

Tabla 2.1.- Contenidos de Humedad para un almacenamiento sin riesgo. "Recomendaciones del Ministerio de Agricultura".

2.5 Diferentes modos de propagación de calor en el secado.

PROPAGACION POR CONVECCION.

El fenómeno de la evaporación se caracteriza por un intercambio simultáneo de calor y materia. Por causa de una corriente de aire que pasa sobre la superficie del líquido, el calor se transporta al líquido en situación de evaporación, mientras que simultáneamente una parte de sus elementos pasa a la atmósfera en estado de vapor.

Esta transferencia por "difusión" como la transferencia del vapor, es un fenómeno molecular que se explica por los movimientos de las moléculas más calientes hacia las partes más frías de un gas o un líquido; existiendo una completa analogía entre el movimiento calorífico y el movimiento de materia obedeciendo ambos fenómenos a los mismos principios. La transferencia de calor es causada por un gradiente de temperatura y cesa cuando el gradiente es cero; la transferencia de

masa es causada por un gradiente de concentración y cesa cuando este es cero.

La similitud de las ecuaciones diferenciales para la transferencia de calor y la difusión ha sido demostrada por N. Nusselt y E. Schmidt. Después de un severo análisis físico llegan a obtener la siguiente relación entre el coeficiente de transferencia de calor y de masa para una corriente turbulenta.

$$hc\beta = \rho C_p$$

(fórmula 2.4)

Denominada principio de Lewis, este principio para la evaporación del agua en el aire puede expresarse en función del Coeficiente de evaporación o como:

$$C_p = \frac{hc}{\beta f} = \frac{hc}{\sigma}$$

(fórmula 2.5)

Por lo tanto se puede determinar el coeficiente de transmisión de masa, a partir del coeficiente de transferencia de

AcuI

69
A

calor que se obtiene de las siguientes relaciones:

Para el flujo paralelo al grano:

$$h_c = 0.06 \left(\frac{V}{L} \right)^{0.22} \left(V \sqrt{C_p 3600} \right)^{0.78}$$

(fórmula 2.6)

$$h_c = 0.0176 C^{0.8}$$

(fórmula 2.7)

Para Flujo cruzado:

$$h_c = 0.45 Re^{0.38} v \sqrt{c_p / Pr}^{2/3}$$

(fórmula 2.8)

$$h_c = 0.37 G^{0.37}$$

(fórmula 2.9)

V = Velocidad libre en la sección transversal (m/s)

Mediante la siguiente relación "Krisher"
(El Secado)

$$T_{\text{aire}} - T_s = (\sigma / h_c) l v (x_o - x_{\text{aire}})$$

(fórmula 2.10)



Con esto obtuvo la gráfica 2.4 que se presenta a continuación.

A temperatura inferiores a 70 °C, la temperatura del producto es más baja en temperatura laminar que en turbulencia completa, así el diseño de la cámara de secado se preocupó en obtener flujo turbulento.

PROPAGACION POR CONDUCCION.

La propagación por conducción, según Krischer, es afectada en cuanto a variaciones características de la conductividad térmica de una materia húmeda a diferentes temperaturas. En la figura 2.5 se aprecia la variación hallada por Krisner.

PROPAGACION POR RADIACION.

Cierta cantidad de energía se envía en forma de nidos electromagnéticos a través

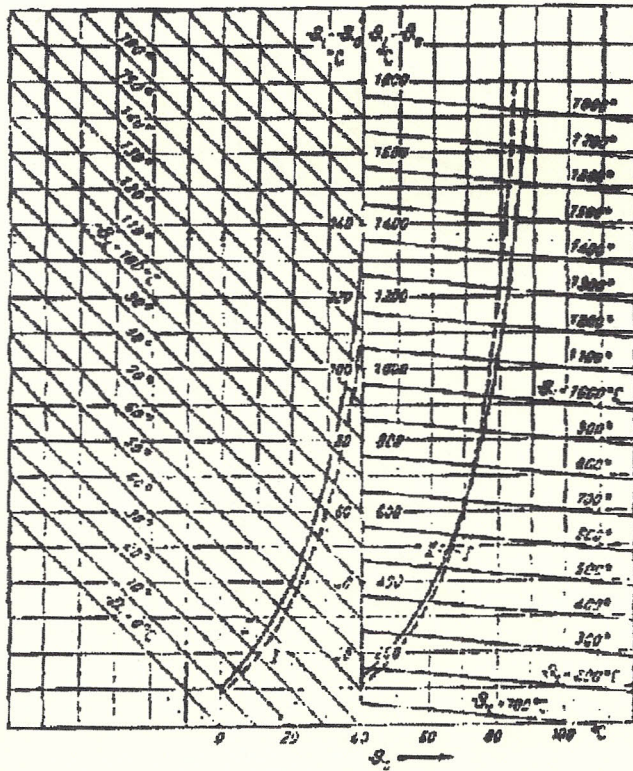


Fig. 2.4.- Temperatura estacionaria en la superficie de una substancia mojada por evaporación en aire completamente seco. Curva I: Corriente Turbulenta pura. Curva II: Corriente laminar pura.

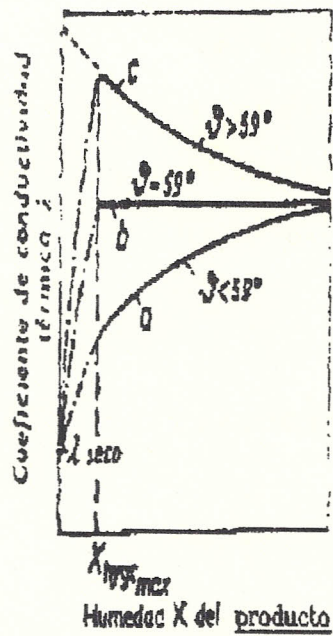


Fig. 2.5.- Variaciones características de la conductividad térmica de una materia húmeda a diferentes temperaturas según Krischer.

de un recinto vacío o bien lleno de gases más o menos permeables a las radiaciones; esta energía engendrada por el calor sensible se transforma de nuevo parcialmente en calor sensible al incidir sobre el cuerpo irradiado. El coeficiente equivalente de transmisión de calor por radiación se obtiene para superficies independientes una de otra mediante la relación.

$$h_r = 4.925 \frac{\epsilon \{ (T_r/100)^4 - (T_s/100)^4 \}}{(T_r - T_s)}$$

(fórmula 2.11)

Donde:

T_r = Temperatura de la superficie radiante

T_s = Temperatura de la superficie del producto sometido a la radiación.

PROPAGACION DEL CALOR POR CONVECCION, CONDUCCION Y RADIACION.

La cantidad de calor necesario para la evaporación de la humedad llega a la superficie del producto en parte por conducción q_k , convección q_{hc} , por radiación q_r , considerando que la

temperatura de la superficie radiante puede considerarse igual a la temperatura del aire, pueden sumarse los coeficientes de transferencia de calor y obtenerse así un coeficiente total de transferencia mediante la siguiente relación:

$$HT = h_e + h_r.$$

(fórmula 2.12)

2.6 Períodos de desecación.

Cuando un producto en reposo sometido a un pase de aire que lo seca, se pesa a intervalos determinados, se toma una curva que da el contenido de humedad de este producto en función del tiempo, figura(2.6)

Al diferenciar esta curva se obtiene una imagen rica en datos, dando la modificación de la humedad del producto en función del tiempo denominado "velocidad de secado".

Las curvas de las figuras 2.7 y 2.8 muestran claramente que el fenómeno del secado en dos períodos característicos, el primero velocidad de secado constante bc, el punto de inflexión c y el período de intensidad decreciente co.

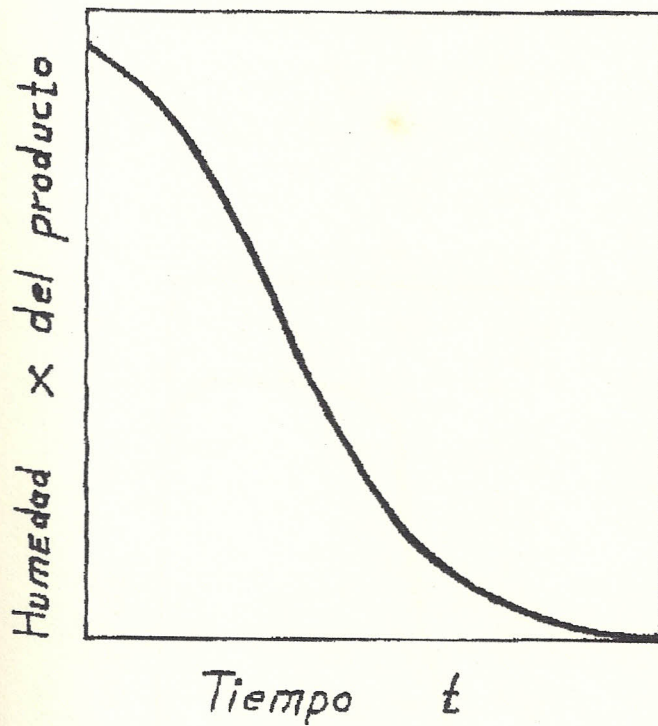


Fig. 2.6.- Humedad del producto en función del tiempo.

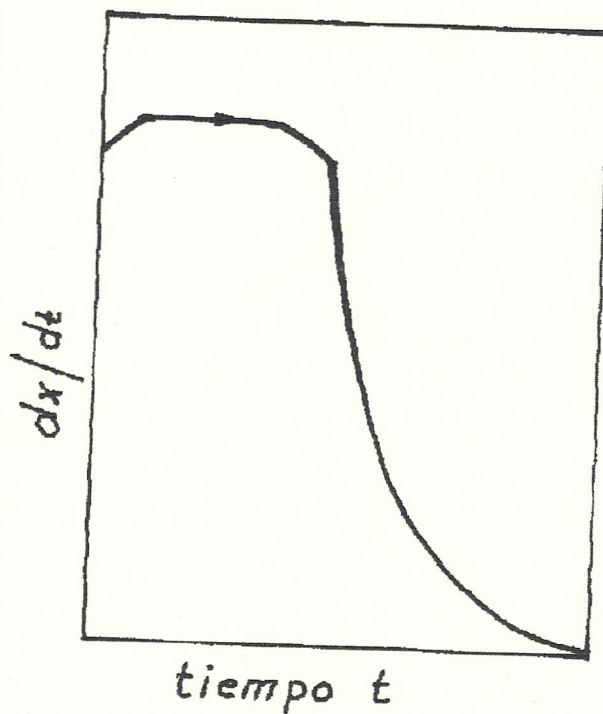


Fig. 2.7.- Modificación en el tiempo de la
humedad del producto (dx/dt) en
función del tiempo.

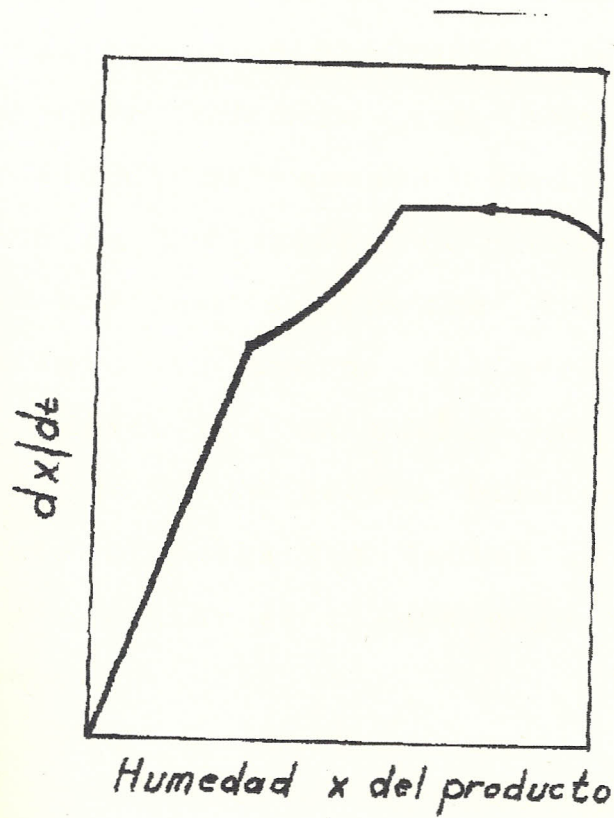


Fig. 2.8.- Modificación en el tiempo de la
humedad (dx/dt) del producto.

2.7 Influencia del producto que va a secarse.

Para determinar el tiempo de secado aproximado que deducen en las referencias 1. y 2. , se considera la influencia del producto que debe secarse.

De consideraciones referentes al movimiento y distribución de la humedad "Kaischer" dedujo que para una misma velocidad de secado emplazamiento del punto de inflexión, un cuerpo esférico de diámetro L , se secaba tres veces más rápido y un cuerpo cilíndrico dos veces más rápido que un cuerpo de espesor L en forma de placa secado bilateralmente, La siguiente tabla 2.2 indica consideraciones para calcular el tiempo según la forma del producto.

PLACA PLANA		ESFERA CILINDRO	
ESPESOR		DIAMETRO L	
POR UN	POR DOS	POR TODOS LOS	
LADO	LADOS	LADOS	
L	L/2	L/6	L/4

Tabla 2.2.- Consideraciones para calcular el tiempo de secado según la forma del producto.

2.8 Técnicas del Secado.

Se tiene dos técnicas de secado para los granos que son; el "Secado Natural" y el "Secado Artificial", existiendo varios sistemas dentro de cada uno de ellos.

Cada grano tiene diferentes características de desecación, por lo tanto esta se efectúa de acuerdo a la forma que proporcione los mejores resultados que se desean tener de un producto agrícola.

SECADO NATURAL.

La desecación puede comenzar antes de la "siega", por ejemplo las mazorcas de maíz se dejan en pie durante 3 o 4 semanas después de la madurez, antes de recogerlas. Son muchos productos que se dejan sin separar de sus espigas para que pierdan humedad antes de su almacenamiento. La práctica más corriente es la de extender la cosecha, una vez recogida, trillada o desgranada, sobre el suelo o en un lugar especialmente preparado. Estos lugares pueden ser con

sacos, hormigón o tendales de gadúa, el grano se expone al sol y al aire libre que circula por efectos naturales sobre o a través de estos, un cierto número de días, y muchas veces quedan expuestos a la lluvia lo cual no es recomendable durante el período de secado o después, porque las tensiones creadas dentro de ellos pueden ser revertidas. En la desecación natural además deben eliminarse el polvo y las impurezas por ser materias extrañas que aceleran el deterioro y permite el aumento del contenido de humedad facilitando la contaminación por hongos.

SECADO ARTIFICIAL.

Secado por convección natural.- Este método se basa en la utilización de aire a la temperatura ambiente y medios mecánicos para hacerlo circular a través del producto, o la utilización de pequeños volúmenes de aire caliente a una temperatura de 5 a 10 °C mayor que la del ambiente y la seca se efectúa con el fin de impedir el deterioro del grano, utilizandose para algunos granos grandes

masas de aire caliente entre 15 a 60 °C por encima de la temperatura ambiente y el secado se efectúa en pocos minutos. En el secado a presión normal puede ser que el producto descansa sobre base fija o móvil.

a.- Secado sobre una base fija.- Se tiene estufas y armarios de secado, las dimensiones de los armarios son reducidas por lo que se cargan y se vacían desde el exterior, mientras que en las estufas se pueden ingresar dentro de ellos. (Figura 2.9) El principio de la técnica de secado es la misma, sea por ventilación horizontal o transversal a la capa del grano.

a.a.- Ventilación horizontal.- En las cámaras de secado que trabajan en forma intermitente, se deja que el aire caliente pase por encima del producto húmedo hasta que alcance el contenido final de humedad que se desea obtener. Los productos se colocan en bandejas o parrillas, los fondos de las parrillas son enrejados

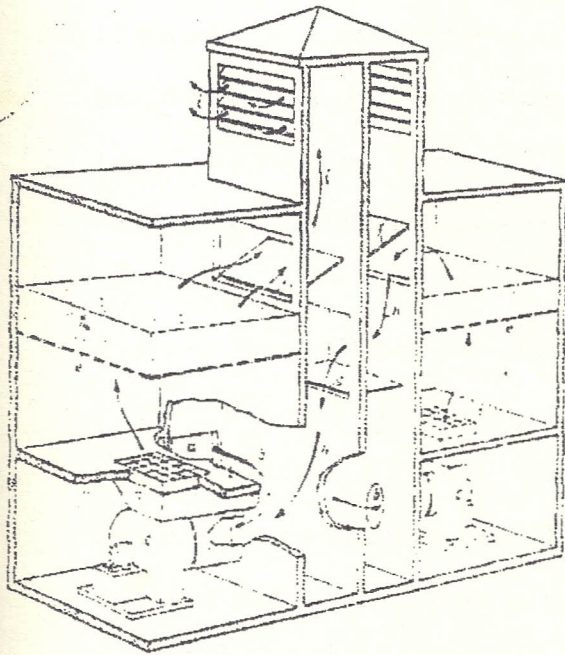


Fig. 2.9.- Hidrosecador de grano Steinecker, a) Entrada de aire fresco, b) Aire fresco, c) Ventilador, d) regulador de temperatura, e) rejilla de secado, f) tablero de regulación, g) tablero de separación, h) aire de circulación, i) aire de evacuación.

metálicos o chapas agujereadas constituidas por materiales resistentes a la corrosión y al calor. Puede producirse un secado irregular del contenido de las bandejas cuando como consecuencia de un llenado incompleto, la parte de un producto que se encuentra en el borde de la bandeja no está suficientemente expuesta a las líneas ligeras.

a.b.- Ventilación transversal.- Cuando el aire se dirige a través de las chapas perforadas o los enrejados de hilo de hierro que forma la base de la rejilla, la superficie de contacto es mucho mayor y por consiguiente la velocidad de secado aumenta.

En este caso, la resistencia al paso del aire, es mayor pero disminuye en el curso de secado cuando se trata de una materia contractil. La posibilidad que se formen canales en el interior de la capa atravezada aumenta con la profundidad del lecho y las dimensiones de la superficie de la rejilla. Figura 2.10

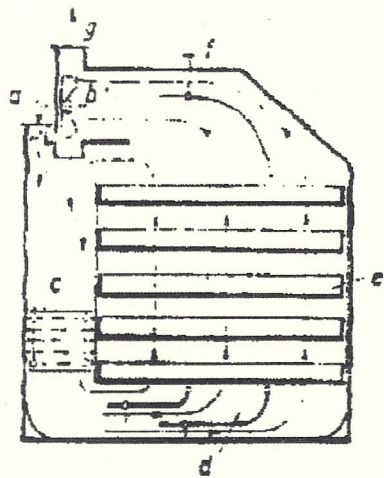
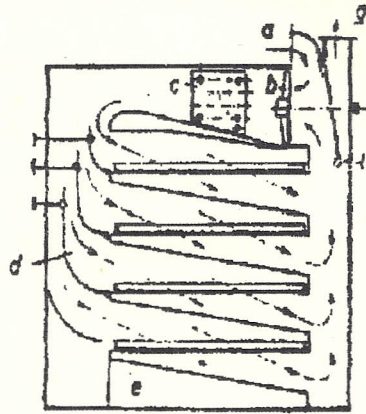


Fig. 2.10 - 2.11.- Parrillas de secado montadas en serie y paralelo con ventilación cruzada.

En la ventilación transversal según la figura 2.11, no todas las parrillas se secan al mismo tiempo, se secan las que se encuentran antes en la misma dirección de la corriente de aire después de las otras, por esta razón las parrillas deben ser móviles y cambiarse por posición relativa con respecto a la corriente de aire.

a.c.- Secado Transversal por toberas.- Por encima y por debajo de las rejillas asegura elevados coeficientes de transmisión de calor y materia, por lo que la capa límite está enérgicamente separada del soporte mediante la corriente perpendicular; a esto es preciso añadir una distribución muy uniforme del aire, que permite alcanzar grandes velocidades de evaporación. (Figura 2.12)

b.- Secado sobre base móvil.- Se emplea cuando se debe secar grandes cantidades de producto homogéneo. Por lo cual se emplea un canal de secado o bandas transportadoras, la temperatura y la velocidad del medio secante se adapta a

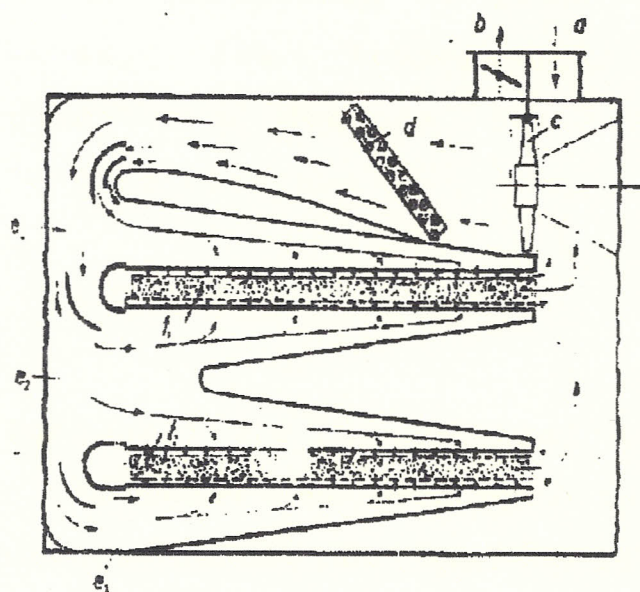


Fig. 2.12.- Secador de toberas: a) entrada de aire fresco, b) salida del aire, c) ventilador, d) cuerpo de calentamiento, e) Cajas de las toberas, d) Rejillas llenas de producto.

las propiedades del producto.

La ventilación se efectúa longitudinalmente o transversalmente y paralelo, o en contracorriente. (Figura 2.13)

En la desecación de granos extendidos en capas, las temperaturas que pueden permitirse depende del uso a que se destine el grano.

Independiente de la técnica de secado que se aplique, el aire debe mantenerse a los granos dentro de cierto límite de nivel térmico.

En la figura (2.14) se muestra la temperatura máxima admisible para el maíz semilla y para el arroz, en función de la humedad relativa del cereal. Estas temperaturas son peligrosas si son mantenidas durante cierto tiempo; la intensidad o una breve permanencia a una temperatura determinada de alarma no

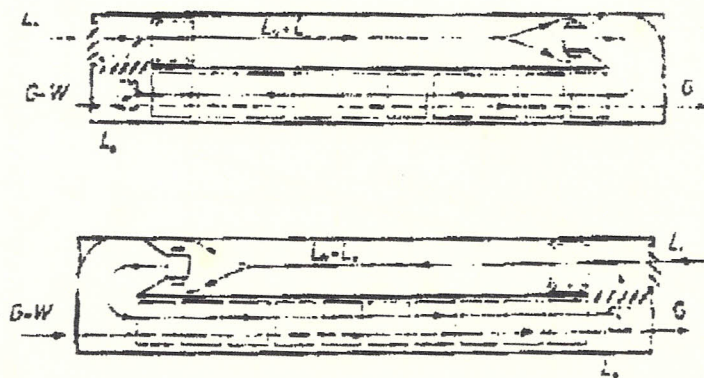


Fig. 2.13.- Canales de secado para explotación en contracorriente y paralelo.

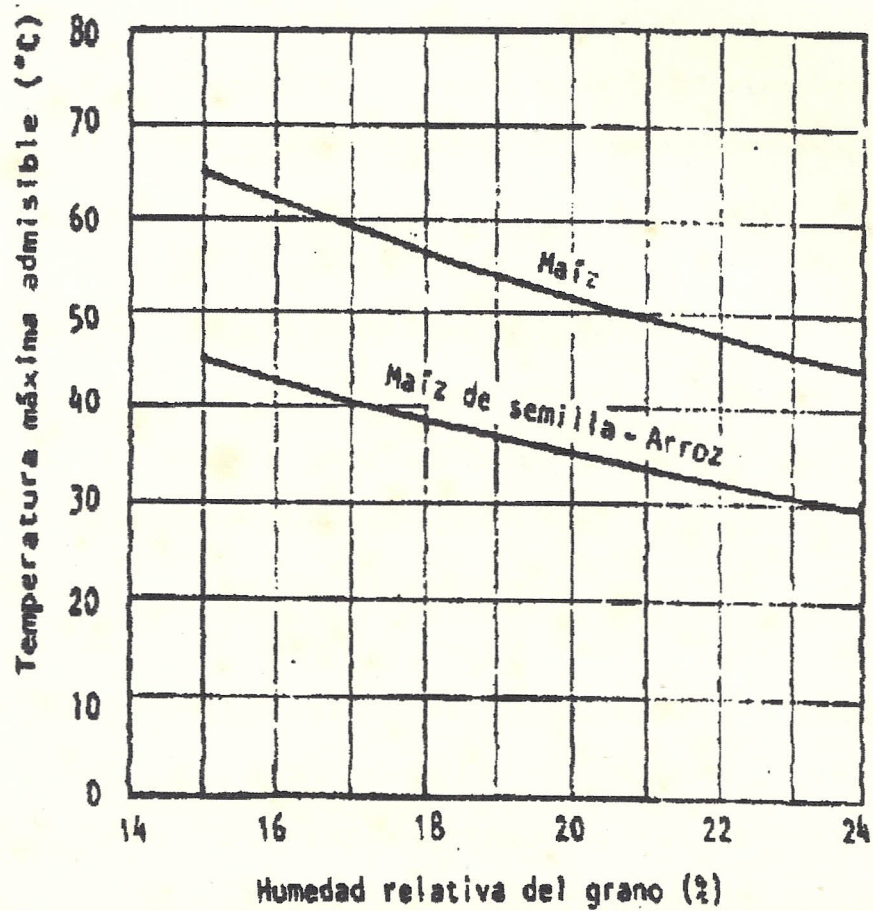


FIG. 2.14. — Relación correspondiente al maíz, maíz de semilla y arroz entre la humedad relativa del grano y la temperatura máxima admisible.

alteran las características biológicas del producto. Se puede apreciar que un grano genérico de arroz con un 15 % de Humedad muere y termina su actividad biológica si es llevado a temperaturas superiores a los 47 °C.

Por consiguiente, es oportuno, para no matar a los granos más débiles; limitar la temperatura a los niveles correspondientes al arroz en cáscara, ya que altos niveles de temperaturas producen fragilidad en los granos y por consiguiente un menor rendimiento en el sucesivo proceso industrial. Se pueden así determinar los límites de temperaturas para el secado llegando a decir que las temperaturas para el arroz se encuentra como máximo a 43 grados Celcius.

El peso del agua que se puede evaporar teóricamente se determina en el diagrama psicrométrico. En la práctica la evaporación es inferior, por cuanto el aire y los granos deben respetar las curvas de equilibrio.



La figura 2.15 muestra las curvas de equilibrio entre el aire y los granos a diferentes temperaturas. El gráfico puede ser utilizado de diferentes maneras.

Por ejemplo, cuando la temperatura del aire y del producto son iguales. Cuando esto sucede a una humedad del aire del 60 % corresponde, un contenido de agua de equilibrio del grano del 13 % (punto A).

Si la humedad del producto es del 15 %, parte del grano se evapora; si es del 12 % se incorpora agua. De igual forma si la diferencia de temperatura entre el aire y el grano se mantiene durante el proceso, la humedad relativa del producto es llevada al punto específico de esta diferencia. (Suponiendo la temperatura del aire 4 grados Celsius mayor que el grano y humedad del 50 %, el grano no puede secarse más de 13.7 % o 13.8 % en el punto B)

La temperatura del aire difiere de la del cereal, pero la diferencia tiende a anularse durante el secado, se adquiere humedades del grano sumamente bajas de

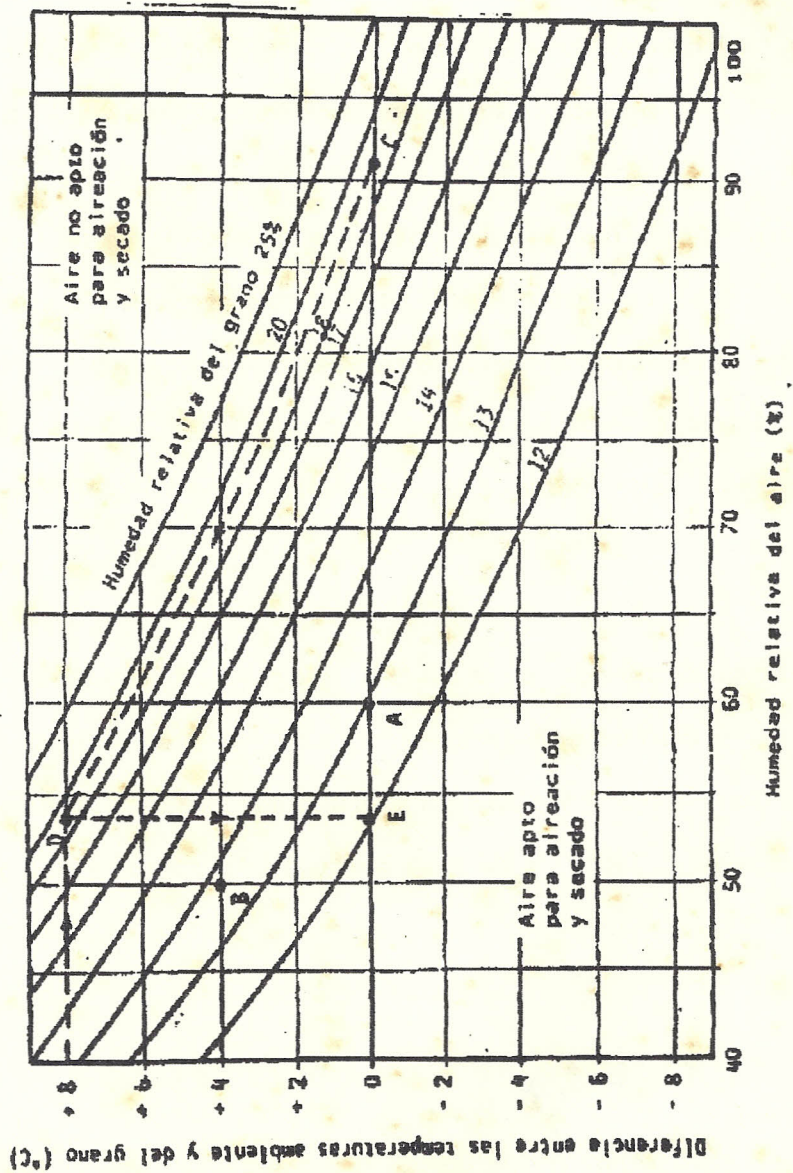


FIG. 2.15. — Curvas de equilibrio aire-grano para diferentes temperaturas.

acuerdo al calentamiento del aire, debido a que el grano adquiere la temperatura del aire.

De esto se deduce que el rendimiento de una secadora aumenta con la temperatura del aire insuflado, siempre y cuando no pase del nivel térmico del grano. Para aumentar lo más que se puede la temperatura del producto, hay que reducir al máximo el gradiente térmico entre los granos, en los diferentes puntos del secador por medio del reciclado continuo con espesores de capa no mayores de 50 cms.

En la tabla 2.3 que se da a continuación se muestra las temperaturas de funcionamiento de un secador con capas delgadas recomendadas para el secado eficiente.



PRODUCTO Y USO AL QUE SE DESTINA.	TEMPERATURA MAX. RECOMENDADA PARA LA DESECACION °C
GRANO PARA CONSUMO HUMANO	57
GRANO PARA ELABORACION	60
GRANO PARA SEMILLA	43
ARROZ PARA EL CONSUMO HUMANO	43
FRIJOLES PARA EL CONSUMO HUMANO	43
CACAO	75

Tabla 2.3.- Temperaturas de funcionamiento de un secador de capas delgadas.

2.9 Problemas especiales del secado.

Granos excesivamente secos.- La excesiva humedad hace a los granos demasiado quebradizos, lo que origina granos partidos, que afectan la naturaleza y la calidad del grano, significando pérdidas y deficiencia de presentación, otro efecto es que, si sobrepasa un cierto punto, el agradable aroma de ciertos granos desaparece.

Granos deficientemente secos.- Esto ocurre generalmente con la desecación natural, quedando el grano "correoso" en esta condición, el grano es invadido por los mohos.

Grano cubierto.- Se llama así al grano cuya superficie está cubierta de un "polvillo" blanquesino, que desaparece frotándolo fuértemente entre los dedos, y que en gran escala, y a falta de pulidores, se elimina agitando el grano dentro de sacos, lo que a veces se aprovecha para aumentar el brillo del grano mejorando su presentación.

CAPITULO III

DISEÑO Y PROCESO DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA

PROCESO DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA

Este proceso se divide en dos etapas.

*> Etapa en la cual se entrega desde una fuente disponible toda la energía necesaria para:

a.- Calentar el aire desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de entrada a la cáscara de secado.

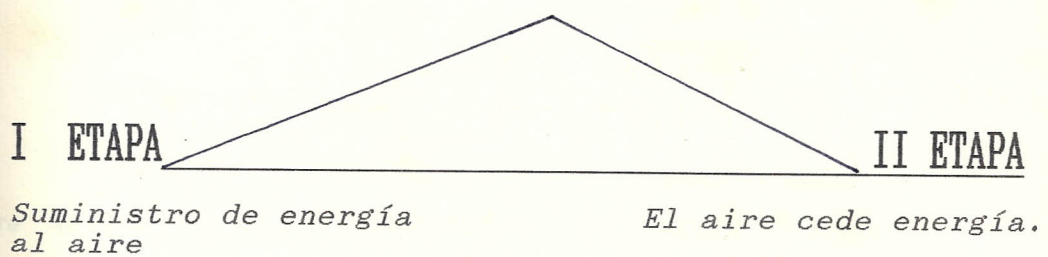
b.- Mantener el ambiente de la cámara a la temperatura adecuada para el secado y considerandolo pérdidas.

c.- Evaporar la cantidad de agua que se va a remover del grano.

d.- Elevar la temperatura del agua contenida en el grano hasta la temperatura de secado de grano.

e.- Calentar el grano desde la temperatura de entrada hasta la temperatura de secado del mismo.

*> Etapa en la que el aire entrega energía absorbida en la primera etapa, para calentar y remover el agua contenida en el grano manteniendo la temperatura del grano y el ambiente de la cámara en condiciones propias para el secado, como lo muestra la figura 3.1.



I ETAPA

II ETAPA

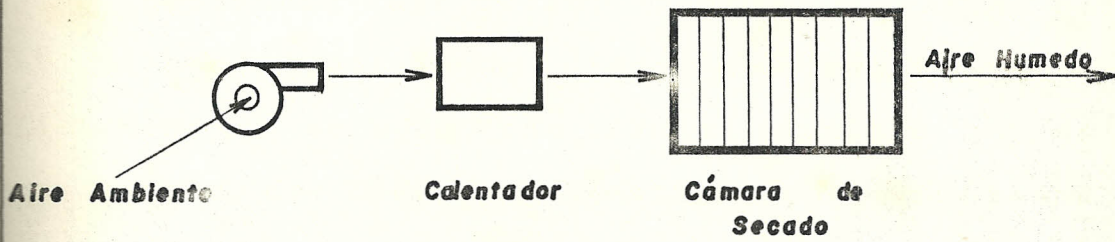
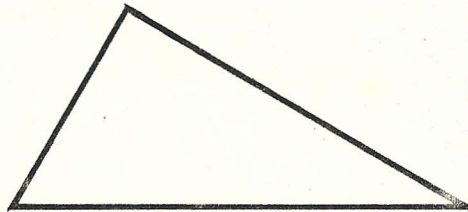


Fig. 3.1 MODELO DEL SECADOR

3.1 Selección del tipo de secador.

En el punto anterior se analizó los métodos y las formas de secado, diferenciando las ventajas y desventajas que ofrece cada equipo secador de grano cuando se trata de pequeñas cantidades, siendo el más eficiente en cuanto a velocidad de secado el secador de toberas.

En este proyecto el objetivo es diseñar un secador para estudiar el efecto de los parámetros de secado sobre los diferentes productos agrícolas; por esta razón se escoje partir del diseño más sencillo que es el secador con flujo paralelo y, en caso de futuras investigaciones el mismo secador se puede adaptar su cámara de secado a formas diferentes que cambien la dirección del aire respecto al grano, sea flujo cruzado o por toberas y en base a esto seleccionar el secador que proporcione los mejores resultados en función de las características del producto a secar.



3.2 Dimensionamiento de la cámara de secado.

Uno de los objetivos de nuestro proyecto es variar la velocidad de flujo de aire, por lo tanto su diseño se basa en un caudal mínimo; de tal forma que el flujo a partir de este caudal Q (m^3/hr) y velocidad (m/min) sea completamente turbulento por las razones indicadas en la gráfica de la figura 2.4.

Para que cumpla con éstas condiciones se determina un ducto de diámetro $D(m)$:

$$D = \frac{4 Q_{min}}{5 Re \gamma}$$

(fórmula 3.1)

Con un número de Reynolds $Re = 10.000$ para el aire entrando a régimen completamente turbulento. Partiendo de un ducto conocido y considernado el más adecuado, asumo el diámetro, tomando como referencia las tablas de ashrae mediante la siguiente secuencia:

Asumo D y dispongo de una velocidad V_{min} entre los rangos recomendados para el

secado, que pueden variar entre 1.5 y 92 m/min, aunque en forma práctica se encuentra en los límites de 30 a 75 m/min, con lo que se obtiene el caudal mínimo:

$$Q_{\min} = V\pi D^2/4 \text{ (m}^3/\text{hr)}$$

(formula 3.2)

Con Q_{\min} . y Reynolds determino D para que el flujo sea turbulento:

$$D(m) = 4 Q_{\min}/\tau_f \pi Re$$

(fórmula 3.3)

Si $D = D$ asumido, el diseño de la cámara se calcula en base a éste diámetro.

Luego se define la forma del recipiente en que va a reposar el grano durante el proceso de secado, para este diseño se va a formar capas o lechos de grano sobre bandejas rectangulares, por lo tanto la cámara de secado estará compuesta de columna de N bandejas de ancho A (m), espaciadas entre sí por un espacio $E_b(m)$, cada bandeja soportará una capa de grano de espesor $l(m)$, las mismas que pueden variar desde 1 cm. hasta 30 cm de espesor.

Ahora bien, la cámara de secado debe ser rectangular de ancho A(m) y altura H(m) debido a:

- La forma de las bandejas y su esparcimiento
- El espesor de la capa de grano.
- El espesor de la plancha que forma la bandeja $E_p(m)$.

El diámetro determinado por la fórmula, es el diámetro de un ducto circular equivalente a un diámetro hidráulico que está en función de los lados de un ducto rectangular.

$$D = DH = 1.30 \left(\frac{(AB)^5}{(A+B)^2} \right)^{1/8}$$

(Fórmula 3.4)

Se pueden determinar los lados despejando la fórmula por el método de prueba y error, o tomando directamente de las tablas ya tabuladas.

Para mantener el diámetro hidráulico determinado anteriormente, se encuentra la separación entre bandejas en función de los lados A y B, manteniendo fijo A y B igual a la suma de la separación entre bandejas.

$$E_b = B / (N + 1)$$

(Fórmula 3.5)

Siendo la altura de la cámara:

$$H = N (E_p + 1) + (N + 1) E_b$$

(Fórmula 3.6)

Para determinar la longitud de la bandeja, es necesario fijar la cantidad de grano que se va a secar definida como:

$$M_t = \text{Masa del grano húmedo}$$

Es importante determinar la densidad del grano que se va a secar mediante pruebas sencillas, tomando una muestra recién cosechada, midiendo su volumen V (m^3), determinando su peso M_g (kg) y calculando su densidad con la relación:

$$\rho_{gw} = M_w / V_{gw}$$

(Fórmula 3.7)

En igual forma la densidad del sólido seco:

$$\rho_{gs} = (\text{kg} / \text{m}^3)$$

Con estos datos se determina la longitud de la bandeja L_t (m):

$$L_t = M_t / \rho_{gw} \cdot L \cdot A \cdot N$$

(Fórmula 3.8)

Con ayuda del coeficiente total de transferencia de calor y un balance de masa se determinan las condiciones de salida del aire desde la cámara de secado en función del caudal, espesor de la capa de grano, longitud de la bandeja, masa de grano a secar, condiciones de entrada y salida del grano y tiempo teórico de secado.

Para esto es importante conocer, las temperaturas recomendadas para el secado, previas recomendaciones indicadas en la sección anterior, que permiten escoger la temperatura de entrada del aire T_{ea} ($^{\circ}\text{C}$),

la temperatura que debe mantener el grano durante el secado $T_s(^{\circ}\text{C})$ y la temperatura de salida del aire desde la cámara de secado $T_{sa}(^{\circ}\text{C})$.

Considerando la cámara de secado como un intercambiador de calor, con cambio de fase de líquido a vapor de agua contenido en el grano a temperatura constante T_s , se tiene la temperatura de la masa principal de aire, asumiendo T_{sa} .

$$T_b = \frac{1}{2} (T_{ea} + T_{sa})$$

(Fórmula 3.9)

Y la temperatura de película para determinar las propiedades del aire a esa temperatura:

$$T_f = \frac{1}{2} (T_b + T_s)$$

(Fórmula 3.10)

El flujo másico de aire que pasa a través de este secador está dado por:

$$G = Q / A.B \text{ (kg/hr-m}^2\text{)}$$

(Fórmula 3.11)

Conocidos estos parámetros se obtiene los diferentes coeficientes transferencia de

calor que se explican en el párrafo anterior.

El coeficiente convectivo de la fórmula 2.6 o 2.7, el coeficiente por radiación de las bandejas al grano de la fórmula 2.11.

Para calcular el coeficiente total de transferencia de calor considerando conducción se estima un valor de conducción del grano:

$$K = 1.8 \text{ (Kcal/hr-m}^2\text{-}^\circ\text{C)}$$

$$H_t = (h_c + h_r) A_u + \left(\frac{A_u}{1 + L (h_c + h_r) / K} \right)$$

(Fórmula 3.12)

Donde A_u es la relación de la superficie exterior no mojada a la superficie interior mojada (Adimensional).

Con esto se procede a determinar el número de unidades de transferencia o platos

teóricos N_t (Adimensional)

$$N_t = L_t \cdot h_t / G \cdot C_p \cdot E_b$$

(Fórmula 3.13)

Conociendo N_t se puede estimar la temperatura de salida del aire T_{sa} desde la cámara de secado con la fórmula:

$$T_{sa} = t_s + (T_{ea} - T_s) e^{-N_t}$$

(Fórmula 3.14)

Esta temperatura anteriormente fue asumida por lo tanto mediante interacción y por el procedimiento de prueba y error, se repite el procedimiento de cálculo hasta que el error entre la temperatura T_{sa} anterior con el nuevo valor sea practicamente cero.



3.3 Balance de masa

Mediante un esquema de la cámara de secado con sus respectivos fuerzas másicas de agua contenidos tanto en el aire como en el grano desapareciendo cualquier acumulación de masa durante el proceso de secado. (Ver figura 3.2)

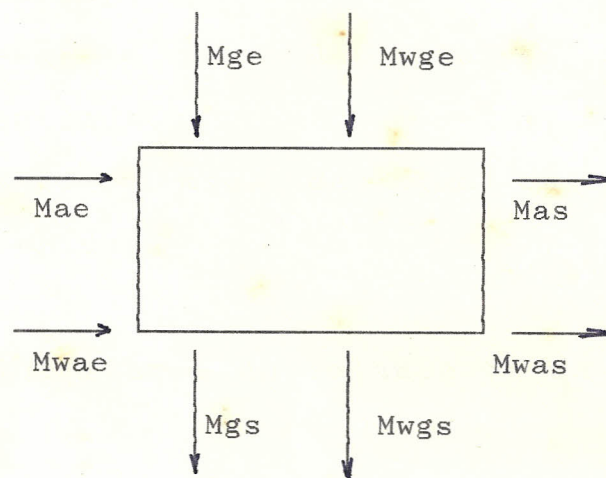


Fig. 3.2.- Esquema de la cámara de secado con sus respectivas fuerzas másicas.

Se tiene:

$$M_{ae} = M_{as}$$

Masa del aire seco a la entrada y salida

$$M_{ge} = M_{gs}$$

Masa del grano seco a la entrada y salida

M_{wae} = masa de agua en el aire a la entrada.

M_{was} = masa de agua en el aire a la salida.

M_{wge} = masa de agua en el grano a la entrada.

M_{wgs} = masa de agua en el grano a la salida.

Realizando un balance de masa se tiene.

$$M_{ae} + M_{wae} + M_{ge} + M_{wge} = M_{as} + M_{was} + M_{gs} + M_{wgs}$$

(Fórmula 3.15)

Simplificando queda:



$$M_{was} - M_{wae} = M_{wge} - M_{wgs}$$

(Fórmula 3.16)

A partir del coeficiente específico de humedad definido como:

$$X = M_w / M_{as} \text{ (kg vapor / kg aire seco)}$$

(Fórmula 3.17)

Se puede expresar el contenido de agua en función de la humedad o coeficiente específico y la cantidad de aire seco.

$$M_{was} = X_s * M_{as}$$

(Fórmula 3.18)

$$M_{wae} = X_e * M_{ae}$$

(Fórmula 3.19)

En forma análoga se puede hacer para el grano:

$$M_{wge} = X_{ge} * M_{ge}$$

(Fórmula 3.20)

$$M_{wgs} = X_{gs} * M_{gs}$$

(Fórmula 3.21)

Reemplazando en la ecuación 3.16 queda:

$$\text{Mas } (X_s - X_e) = M_{ge} (X_{ge} - X_{gs})$$

(Fórmula 3.22)

$$M_{ge} (X_{ge} - X_{gs}) = W_{H^2O}$$

(Fórmula 3.23)

Siendo W_{H^2O} la cantidad de agua a eliminarse desde el grano al pasar el flujo de aire.

Cuando no se conoce con exactitud la cantidad de grano seco a la entrada, se puede determinar la cantidad de agua a eliminarse mediante las siguientes expresiones:

$$W_a = \frac{M_{gh} - M_{gs}}{M_{gh}} \text{ (kg de agua / kg sólido húmedo)}$$

(Fórmula 3.24)

$$X_g = \frac{M_{gh} - M_{gs}}{M_{gs}} \text{ (kg de agua / kg sólido seco)}$$

(Fórmula 3.25)

De las dos igualdades se tiene:

$$X_g = \frac{W_a}{1 - W_a}$$

(Fórmula 3.26)



Reemplazando en la Ecuación 3.23:

$$W_{H^2O} = Mge [(Wa/100 - Wa) - (Ww/100 - Ww)]$$

(Fórmula 3.27)

$$W_{H^2O} = Mgh \left(\frac{Wa - Ww}{100 - Ww} \right)$$

(Fórmula 3.28)

$$Mgh = MT$$



De la ecuación 3.27 se determina la cantidad de agua a eliminarse por unidad de tiempo, dividiendo W_{H^2O} para el tiempo aproximado de secado.

TIEMPO APROXIMADO DE SECADO

El tiempo aproximado necesario para vaporizar y extraer el agua contenida en el grano durante el secado viene dado por:

$$t = \frac{L * \int g_s * Lv (X_o - X_w)}{ht * AV_m}$$

(Fórmula 3.29)

L_v = Calor latente de vaporización

X_o = Humedad inicial del grano en base seca.

X_w = Humedad final del grano en base Seca

seca.

L = Espesor de la capa de grano.

AVm = Diferencia media logaritmica, debido a que se considera la cámara de secado como un intercambiador de calor con cambio de fase. (figura 3.3)

Para este diseño se considera la humedad final del producto la menor entre los productos agrícolas.

$$W_{H^2O} = \frac{Mt}{\text{tiempo}} \left[\frac{(W_a - W_w)}{100 - W} \right] \text{ (kg agua/hr)}$$

(Fórmula 3.30)

Haciendo un balance de masa del aire a la entrada:

$$M_{\text{aire húmedo}} = M_{as} + M_{wae}$$

(Fórmula 3.31)

$$X_e = M_{wae} / M_{as} \quad \text{(Fórmula 3.32)}$$

Despejando y reemplazando queda:

$$M_{as} = \frac{M_{\text{aire húmedo}}}{1 + X_e}$$

(Fórmula 3.33)

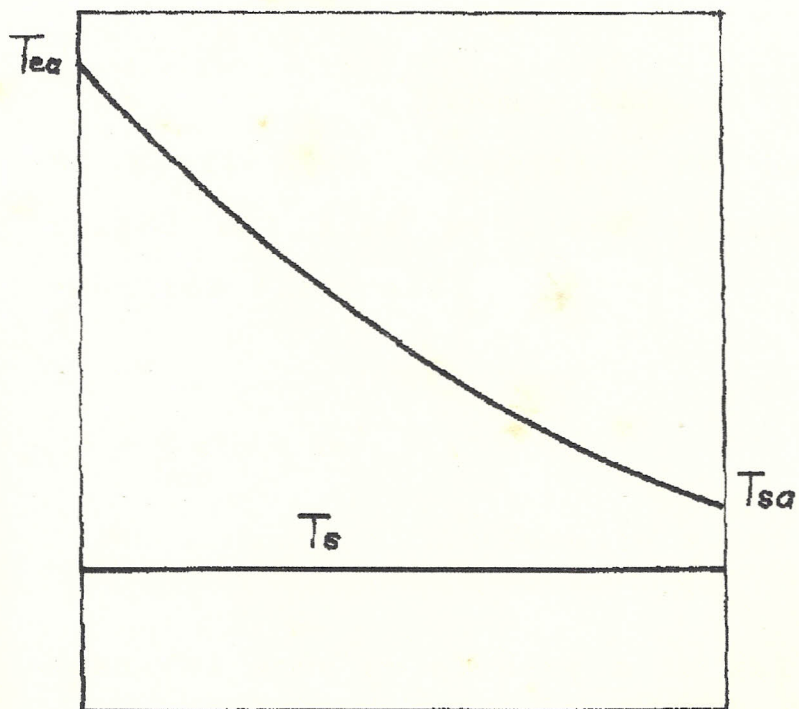


Fig. 3.3.- Distribución de temperatura en un evaporador. (Transferencia de calor de Kreit)

La masa del aire en función del caudal de diseño es la siguiente:

$$M_{\text{aire Húmedo}} = \int aQ$$

(Fórmula 3.34)

Reemplazando en 3.33 tenemos:

$$M_{\text{as}} = \frac{\int aQ}{1 + X_e}$$

(Fórmula 3.35)

El coeficiente específico de humedad de salida del aire se tiene al despejar la ecuación 3.23, así,

$$X_s = \frac{W_{\text{H}^2\text{O}}}{M_{\text{as}}} + X_e$$

(Fórmula 3.36)

Masa del agua en el aire a la salida de la cámara

$$M_{\text{was}} = X_s \cdot M_{\text{as}} \quad (\text{kg H}^2\text{O /hr})$$

(Fórmula 3.37)

Masa de aire húmedo a la salida de la cámara:

$$M_{\text{ahs}} = M_{\text{as}} + M_{\text{was}}$$

(Fórmula 3.38)

3.4 Balance de Energía.

Una vez determinados los parámetros en la sección anterior se puede realizar un esquema de la parte del calentador de aire y la cámara de secado para poder hacer un análisis del balance térmico de la energía que entra y sale del mismo. (Ver fig. 3.4)

De aquí:

$$Ma_1 = Ma_2 = Ma_3 = Ma$$

Las condiciones de aire ambiente se obtiene de datos estadísticos de diferentes localidades, dados por los institutos meteorológicos (Ver Tabla final). Con estos datos y con ayuda de la tabla Psicométrica se pueden determinar las condiciones de estado de aire ambiente.

Para determinar las condiciones de estado de aire la entalpía que es más importante para el balance energético se obtiene de la siguiente igualdad:

$$H_{1+x} = (C_{\text{aire}} + 0.46 x) T + 597 X$$

(Fórmula 3.39)

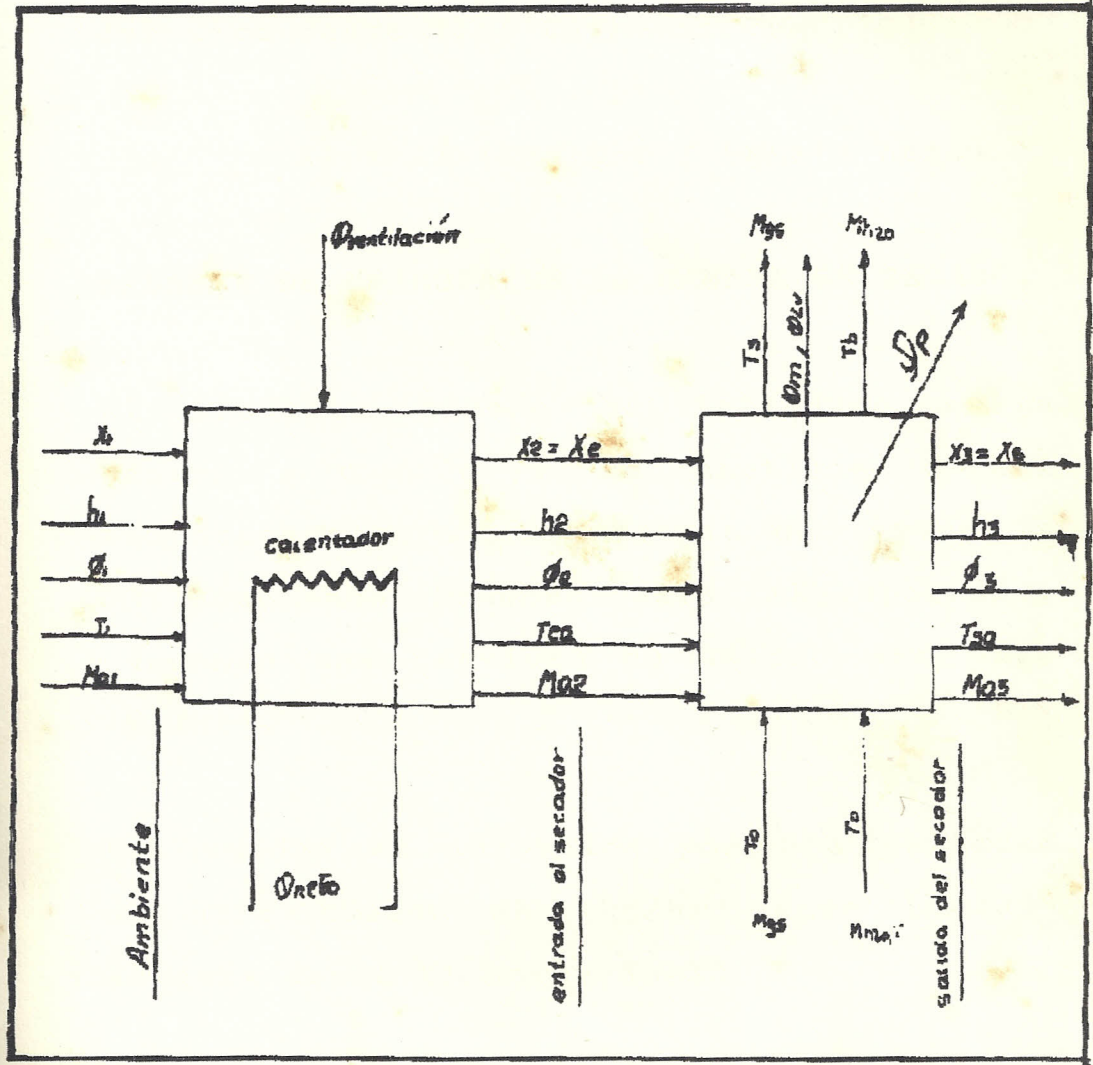


Fig. 3.1.- Flujo de Energía en el secador.

Donde C_{aire} se obtiene del cuadro # 3.3.

El coeficiente específico de humedad del aire durante el calentamiento se mantiene constante, por un calentamiento sensible del aire desde T_1 ($^{\circ}\text{C}$) hasta T_{ea} ($^{\circ}\text{C}$)

$$X_1 = X_2 \text{ (Kgvapor / kgaire seco)}$$

BALANCE DE ENERGIA EN LA CAMARA DE SECADO.

El producto húmedo se introduce a la cámara a T_0 $^{\circ}\text{C}$ y se mantiene a una temperatura de secado propia del grano T_s $^{\circ}\text{C}$, cediendo humedad W_{H_2O} (Kgvapor/hr), quedando una cantidad de sólido seco M_g (Kg/hr).

La humedad es absorbida por una cantidad de aire húmedo M_h (kg/hr) cuya humedad aumenta desde X_1 hasta $X_s = X_3$

Q_p = Calor perdido a través de la pared de la cámara por convección, conducción desde la temperatura interna hacia la temperatura exterior de la cámara.

Q_m = Calor que cede el aire para calentar la estructura de la cámara desde la

temperatura ambiente hasta la temperatura de la atmósfera dentro de la cámara.

Q_{lv} = Calor que cede el aire para evaporar la cantidad de agua que se va a remover desde el interior del grano.

Para facilidad de comprensión en el balance de energía se asume que el grano y el agua fluyen a través de la cámara, a las temperaturas respectivas de entrada y salida. (Calentamiento o secado)

Balance de Energía en la Cámara de secado;

De esto se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 &M_{a2} \cdot h_2 + M_{gs} \cdot C_{pg} \cdot T_o + M_{H_2O} \cdot C_{pH_2O} \cdot T_o = \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots = M_{a3} \cdot h_3 + M_{gs} \cdot C_{pg} \cdot T_s + M_{H_2O} \cdot C_{pH_2O} \cdot T_b \\
 &+ \dots \\
 &\dots + M_{H_2O} \cdot L_v + Q_p + Q_m.
 \end{aligned}$$

De donde:

$$\begin{aligned}
 M_{a2} \cdot h_2 = &M_{a3} \cdot h_3 + M_{gs} \cdot C_{pg} (T_s - T_o) \\
 &+ \dots\dots\dots \\
 &M_{H_2O} \cdot C_{pH_2O} \cdot (T_b - T_o) + M_{H_2O} L_v + Q_m + Q_p.
 \end{aligned}$$

(Fórmula 3.40)

Donde:

$$Q_s = M_{H_2O} * C_{pH_2O} * (T_b - T_o)$$

(Fórmula 3.41)

Siendo Q_s el calor sensible necesario para elevar la temperatura del agua a evaporar desde la temperatura del sólido a secar hasta la temperatura del aire que lo seca.

$$Q_{lv} = M_{H_2O} * L_v \quad (\text{Kcal})$$

(Fórmula 3.42)

$$Q_g = M_{gs} * C_{pg} * (T_s - T_o) \quad (\text{Kcal})$$

(Fórmula 3.43)

$$Q_m = M_m * C_{pm} * (T_b - T_o) \quad (\text{Kcal})$$

(Fórmula 3.44)

$$Q_p = U * A_o * T \quad (\text{Kcal})$$

(Fórmula 3.45)

Donde:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{X_m}{K_m} + \frac{X_{lv}}{K_{lv}} + \frac{1}{h_{ex}}}$$

A_o = Area de Transferencia (m²)

T = $T_b - T_a$ (°C)

La resistencia térmica R ((hr-m²-°C/Kcal)) está expresado por:

$$R = \frac{1}{h} \quad \text{o} \quad \frac{X_m}{K_m}$$



$$U = \frac{1}{R_i + R_m + R_{lv} + R_{ext}}$$

(Fórmula 3.46)

$$W_{H_2O} = M_a(X_s - X_e) \quad (\text{Kgvapor/hr})$$

Dividiendo para M_{H_2O}

$$h_2 = h_3 + (X_s - X_e) \left\{ \frac{q_g}{M_{H_2O}} + C_{pH_2O} (T_b - T_o) + L_v + \dots + \frac{q_m}{M_{H_2O}} + \frac{q_p}{M_{H_2O}} \right\}$$

(Fórmula 3.47)

$$\text{Siendo } q = Q/t \quad (\text{Kcal / Hr})$$

Donde $Q_{lv} = 0$, debido a que la temperatura del medio secante no debe llegar a 100°C .

BALANCE DE ENERGIA EN EL CALENTADOR DE AIRE.

$$M_{a1} * h_1 + Q_{neto} + Q_{vent} = M_{a2} * h_2$$

$$Q_{neto} = M_a (h_2 - h_1) \quad (\text{Kcal})$$

(Fórmula 3.48)

Q_{neto} = Calor para obtener la entalpía en la entrada de la cámara de secado h_2 .

3.5 Cálculo.

En la parte anterior se explicó la secuencia a seguir para proceder con el cálculo.

De las informaciones recogidas, el producto de mayor humedad es el cacao como se verifica en las tablas, con el fin de verificar este dato se realizó una prueba de cacao y café, el cacao obtenido de un racimo extraído de una mazorca recién cosechada y una cantidad de café recién recogido de un cafetal, se los pesó en una balanza digital, dando los siguientes resultados:

$$\text{MgHc} = 2.630 \text{ (kg)}$$

$$\text{MgHcf} = 1.460 \text{ (kg)}$$

Seguido de esto se los expuso al sol, sobre una base de cemento aproximadamente 15 días, cuando la variación de su peso era insignificante, quedando como pesos finales:

$$\text{Mgc} = 0.985 \text{ (kg)}$$

$$M_{gcf} = 0.640 \text{ (kg)}$$

Con la ayuda de la igualdad 3.24 se obtienen humedades iniciales en base húmeda:

$$W_{ac} = 64 \% \text{ (kg agua / kgsólido húmedo)}$$

Para el cacao:

$$W_{af} = 56 \% \text{ (Kg agua / kg sólido húmedo)}$$

Para el café:

$$W_w = 7 \% \text{ (kg agua / kg sólido húmedo)}$$

Humedad final recomendada para el cacao.

Existiendo una concordancia aproximada con la información;

Además se determinó la densidad del cacao seco y húmedo,

$$\rho_{gw} = 591 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_{gs} = 587.7 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

La temperatura de entrada del aire a la cámara se estima en:

$$T_{ea} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

Y la temperatura que debe mantener el sólido durante el secado según la información, previo a la experiencia dados anteriormente,

$$T_s = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con una temperatura ambiente $T_a = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ considerando la menor en Guayaquil.

Para facilitar los cálculos se estructuró un programa en tres partes:

I. Dimensionamiento del ducto en base al número de Re y caudal mínimo.

II. Tomando como base el caudal mínimo y los lados A y B del ducto obtenidos en la primera parte, se determina para diferentes espesores de grano y número de bandejas los siguientes datos:

- Longitud y altura de la cámara de secado.
- Espacio entre bandejas.
- Temperatura a la salida de la cámara, y
- Tiempo aproximado de secado (Ver tabla de resultados # 3.1 y 3.2)

III. Una vez seleccionada la longitud y altura de la cámara, se hace variar el caudal para:

- Determinar la velocidad del aire a través de la cámara.
- Temperatura de salida del aire.
- Cantidad de agua extraída por unidad de

tiempo.

- Masa de agua en el aire a la salida (Ver tabla de resultados 3.3)

A partir de un previo tanteo se selecciona un caudal mínimo de diseño:

$$Q_{\min} = 175 \text{ (m}^3\text{/hr)}$$

$$D = 0.28 \text{ m}$$

Como la cámara de secado es de sección transversal rectangular, se elige un medio de bandeja.

$$A = 0.23 \text{ m}$$

$$B = 0.28 \text{ m}$$

El material de las bandejas a construir de hierro galvanizado con una emisividad (ϵ) de 0.23 y un espesor de plancha $E_p = 0.001$ m.

Una vez que se ha establecido las dimensiones del ducto, el programa varía los espesores de capa de grano L que están entre 0.01 a 0.05 m, manteniendo fijo el caudal mínimo determinado anteriormente.

Obteniendo los resultados de las tablas 3.1 y 3.2.

En base a estos resultados se selecciona

PROGRAMA # 1

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>

#define TRUE 1
#define FALSE 0

float l[8];
float datos[8][10][8];
float mt,tae,ts,wa,ww,rgs,rgw,qmin,ra,a,b,ta,tai;
int n,nb;
int i,j;
float au,lt,eb,ep,h,al,g,hc,e,tr,hr,k,ht,cp,nt,tai;
float dif,xa,xw,mlcd,lv,tiempo,v,huf;
FILE *file;
char *data="file1.dat";

void inicio_matriz( void );
void graba_datos ( void );
main()
{
    clrscr();
    inicio_matriz();

    printf("Primer programa de Calculo\n\n");
    printf("Ingrese masa de trabajo (Kg.): ");
    scanf("%f",&mt);
    printf("Ingrese temperatura de entrada del aire (C.): ");
    scanf("%f",&tae);
    printf("Ingrese temperatura que debe soportar el grano
    (C.): ");
    scanf("%f",&ts);
    printf("Ingrese humedad de entrada del grano en base humeda
    (Kg.vapor/Kg.masa humeda): ");
    scanf("%f",&wa);
    printf("Ingrese humedad que debe salir en el grano base
    humeda (Kg.vapor/Kg.masa humeda): ");
    scanf("%f",&ww);
    printf("Ingrese desidad del solido seco y solido humedo
    (Kg./m3): ");
    scanf("%f %f",&rgs,&rgw);
    printf("Ingrese el caudal minimo de trabajo (m3/hora): ");
    scanf("%f",&qmin);
    printf("Ingrese la densidad del aire ambiente (Kg./m3): ");
    scanf("%f",&ra);
    printf("Ingrese el lado A del ducto (m.): ");
    scanf("%f",&a);
    printf("Ingrese el lado B del ducto (m.): ");
```

```

scanf("%f",&b);
printf("Ingrese la temperatura del aire ambiente (C.): ");
scanf("%f",&ta);
printf("Asuma la temperatura de salida del aire desde la
camara de secado (C.): ");
scanf("%f",&tsa);
printf("Ingrese el numero de capas de grano (<=8): ");
scanf("%d",&n);
printf("Ingrese los espesores de las capas de grano
(m.)\n");

for (i=0;i<8;i++) {
    printf("Capa %d: ",i+1);
    scanf("%f",&l[i]);
}
printf("Ingrese el numero de bandejas que desea trabajar
(<=10): ");
scanf("%d",&nb);

printf("\nProcesando...\n");
for (j=0;j<n;j++)
    for (i=0;i<nb;i++) {
        lt=mt/(rgw*l[j]*a*(i+1));
        eb=b/(i+2);
        ep=0.001;
        h=(i+1)*(ep+l[j])+(i+2)*eb;
        al=a*b;
        g=ra*qmin/al;
        hc=0.0176*pow(g,0.8);
        e=0.23;
        while (TRUE) {
            tr=(tae+tsa)/2;
            hr=4.925*e*(pow((tr+273)/100,4)-pow((ts+273)/
            100,4))/(tr-ts);
            k=1.8;
            au=1;
            ht=(hc+hr)*au+(1+1/(1+(hc+hr)/k));
            cp=0.241;
            nt=lt*ht/(g*cp*eb);
            tsai=ts+(tae-ts)*exp(-nt);
            dif=sqrt(pow((tsai-tsa),2));
            if (dif<0.01)
                break;
            else
                tsa=tsai;
        }
        if ((tsai-ts)!=0.00) {
            xa=wa/(100-wa);
            xw=ww/(100-ww);
            mlcd=(tae-tsai)/log((tae-ts)/(tsai-ts));
            lv=587.9;
            tiempo=(l[j]*rgs*lv/(ht*mlcd))*(xa-xw);
            v=qmin/(a*b*60);
        }
    }
}

```

```

        huf=(tae-tsai)/(tae-ta);

        datos[j][i][0]=l[j];
        datos[j][i][1]=(float) (i+1);
        datos[j][i][2]=eb;
        datos[j][i][3]=h;
        datos[j][i][4]=lt;
        datos[j][i][5]=tiempo;
        datos[j][i][6]=huf*100;
        datos[j][i][7]=v;
    }
    else {
        datos[j][i][0]=0.0;
        datos[j][i][1]=0.0;
        datos[j][i][2]=0.0;
        datos[j][i][3]=0.0;
        datos[j][i][4]=0.0;
        datos[j][i][5]=0.0;
        datos[j][i][6]=0.0;
        datos[j][i][7]=0.0;
    }
}
printf("\nGrabando datos en archivo...\n");
graba_datos();
printf("Fin de ejecucion\n");
}
void inicio_matriz ( void )
{
    int i,j,k;

    for ( i=0; i<8; l[i++] = (float) 0.00 );

    for ( i=0; i<8; i++ )
        for ( j=0; j<10; j++ )
            for ( k=0; k<8; datos[i][j][k++] = (float) 0.00 );
}

/* Esta funcion graba los Datos de entrada y los resultados
en un archivo */
void graba_datos ( void )
{
    int i,j,k,l,len;
    char str[11],strhead[100];

    if ((file = fopen ( data, "w" ))==NULL) {
        printf("Error en archivo apertura de archivo de datos");
        return;
    }
    strcpy ( strhead, "Datos de Problema\n\n");
    fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );

    strcpy ( strhead, "Ingrese masa de trabajo (Kg.): ");
    fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
}

```

```

gcvt ( (double) mt, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese temperatura de entrada del aire
(C.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) tae, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese temperatura que debe soportar el
grano (C.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) ts, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese humedad de entrada del grano en
base humeda (Kg.vapor/Kg.masa humeda): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) wa, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese humedad que debe salir en el
grano base humeda (Kg.vapor/Kg.masa humeda): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) ww, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese desidad del solido seco y solido
humedo (Kg./m3): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) rgs, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]=',';
fwrite ( str, 12, 1, file );
gcvt ( (double) rgw, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el caudal minimo de trabajo
(m3/hora): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) qmin, 4, str );

```

```

for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese la densidad del aire ambiente
                (Kg./m3): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) ra, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el lado A del ducto (m.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) a, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el lado B del ducto (m.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) b, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese la temperatura del aire ambiente
                (C.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) ta, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Asuma la temperatura de salida del aire
                desde la camara de secado (C.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) tsa, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el numero de capas de grano
                (<=8): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) n, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "\n\nResultados del Problema\n\n");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );

```

```

strcpy ( strhead, "-ESP. CAPA - # BAND. - ESP.BAN.
-ALT.CAMARA- LONG.BAN. - T.SECADO - HUF - V AIRE
CAM.\n");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
strcpy ( strhead, "- m      - c/u.  - m.  - m.
- m.  - horas - %  - m/min  .\n");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
fwrite ( " ", 1, 1, file );

for ( i=0; i<8; i++ )
  for ( j=0; j<10; j++ ) {
    for ( k=0; k<8; k++ ) {
      strcpy(str," ");
      gcvt ( (double) datos[i][j][k], 4, str );
      for (l=strlen(str);l<12;str[l++]=32);
      str[l]='\0';
      fwrite ( str, 11, 1, file );
    }
    fwrite ( "\n", sizeof("\n"), 1, file );
  }

flushall();
fcloseall();
}

```



TABLA 3.1.- Tamaño del secador según longitud y el número de bandejas.

Datos de Problema

Ingreso masa de trabajo (Kg.): 25
 Ingreso temperatura de entrada del aire (C.): 100
 Ingreso temperatura que debe soportar el grano (C.): 60
 Ingreso humedad de entrada del grano en base húmeda (Kg.vapor/Kg.masa húmeda): 64
 Ingreso humedad que debe salir en el grano base húmeda (Kg.vapor/Kg.masa húmeda): 7
 Ingreso densidad del sólido seco y sólido húmedo (Kg./m³): 587.7, 591
 Ingreso el caudal mínimo de trabajo (m³/hora): 175
 Ingreso la densidad del aire ambiente (Kg./m³): 1.23
 Ingreso el lado A del ducto (m.): 0.2286
 Ingreso el lado B del ducto (m.): 0.2794
 Ingreso la temperatura del aire ambiente (C.): 23.6
 Asuma la temperatura de salida del aire desde la cámara de secado (C.): 91.44
 Ingreso el número de capas de grano (<=8): 8

Resultados del Problema

- ESP. CAPA -	# BAND.	ESP.BAN.	ALT.CAMARA-LONG.BAN.	T.SECADO	HUF	-V AIRE CAM.
- m	- c/u.	- m.	- m.	- m.	- horas	- % -m/min.
0.02	1	0.1397	0.3004	9.252	34.36	36.54 45.67
0.02	2	0.09313	0.3214	4.626	30.33	31.05 45.67
0.02	3	0.06985	0.3424	3.084	29.05	28.82 45.67
0.02	4	0.05588	0.3634	2.313	28.42	27.62 45.67
0.02	5	0.04657	0.3844	1.85	28.04	26.87 45.67
0.02	6	0.03991	0.4054	1.542	27.79	26.35 45.67
0.02	7	0.03492	0.4264	1.322	27.62	25.98 45.67
0.02	8	0.03104	0.4474	1.157	27.48	25.7 45.67
0.02	9	0.02794	0.4684	1.028	27.38	25.48 45.67
0.02	10	0.0254	0.4894	0.9252	27.3	25.3 45.67
0.025	1	0.1397	0.3054	7.402	38.9	32.28 45.67
0.025	2	0.09313	0.3314	3.701	35.05	26.87 45.67
0.025	3	0.06985	0.3574	2.467	33.82	24.75 45.67
0.025	4	0.05588	0.3834	1.85	33.21	23.63 45.67
0.025	5	0.04657	0.4094	1.48	32.85	22.94 45.67
0.025	6	0.03991	0.4354	1.234	32.61	22.46 45.67
0.025	7	0.03492	0.4614	1.057	32.44	22.12 45.67
0.025	8	0.03104	0.4874	0.9252	32.31	21.86 45.67
0.025	9	0.02794	0.5134	0.8224	32.21	21.66 45.67
0.025	10	0.0254	0.5394	0.7402	32.13	21.49 45.67
0.03	1	0.1397	0.3104	6.168	43.57	28.82 45.67
0.03	2	0.09313	0.3414	3.084	39.85	23.63 45.67
0.03	3	0.06985	0.3724	2.056	38.65	21.66 45.67
0.03	4	0.05588	0.4034	1.542	38.06	20.62 45.67
0.03	5	0.04657	0.4344	1.234	37.71	19.98 45.67
0.03	6	0.03991	0.4654	1.028	37.48	19.55 45.67
0.03	7	0.03492	0.4964	0.8812	37.31	19.23 45.67
0.03	8	0.03104	0.5274	0.771	37.18	18.99 45.67
0.03	9	0.02794	0.5584	0.6854	37.09	18.81 45.67
0.03	10	0.0254	0.5894	0.6168	37.01	18.66 45.67

TABLA 3.2.- Tamaño del secador según longitud y el número de bandejas.

0.035	1	0.1397	0.3154	5.287	48.33	25.98	45.67
0.035	2	0.09313	0.3514	2.643	44.7	21.07	45.67
0.035	3	0.06985	0.3874	1.762	43.53	19.23	45.67
0.035	4	0.05588	0.4234	1.322	42.95	18.27	45.67
0.035	5	0.04657	0.4594	1.057	42.6	17.69	45.67
0.035	6	0.03991	0.4954	0.8812	42.37	17.29	45.67
0.035	7	0.03492	0.5314	0.7553	42.21	17	45.67
0.035	8	0.03104	0.5674	0.6609	42.09	16.78	45.67
0.035	9	0.02794	0.6034	0.5874	41.99	16.61	45.67
0.035	10	0.0254	0.6394	0.5287	41.91	16.48	45.67
0.04	1	0.1397	0.3204	4.626	53.14	23.63	45.67
0.04	2	0.09313	0.3614	2.313	49.58	18.99	45.67
0.04	3	0.06985	0.4024	1.542	48.42	17.29	45.67
0.04	4	0.05588	0.4434	1.157	47.85	16.4	45.67
0.04	5	0.04657	0.4844	0.9252	47.51	15.86	45.67
0.04	6	0.03991	0.5254	0.771	47.28	15.49	45.67
0.04	7	0.03492	0.5664	0.6609	47.12	15.23	45.67
0.04	8	0.03104	0.6074	0.5783	47	15.03	45.67
0.04	9	0.02794	0.6484	0.514	46.91	14.87	45.67
0.04	10	0.0254	0.6894	0.4626	46.83	14.75	45.67
0.045	1	0.1397	0.3254	4.112	57.98	21.66	45.67
0.045	2	0.09313	0.3714	2.056	54.48	17.29	45.67
0.045	3	0.06985	0.4174	1.371	53.34	15.69	45.67
0.045	4	0.05588	0.4634	1.028	52.77	14.87	45.67
0.045	5	0.04657	0.5094	0.8224	52.43	14.37	45.67
0.045	6	0.03991	0.5554	0.6854	52.21	14.03	45.67
0.045	7	0.03492	0.6014	0.5874	52.05	13.79	45.67
0.045	8	0.03104	0.6474	0.514	51.93	13.6	45.67
0.045	9	0.02794	0.6934	0.4569	51.84	13.46	45.67
0.045	10	0.0254	0.7394	0.4112	51.76	13.34	45.67
0.05	1	0.1397	0.3304	3.701	62.85	19.98	45.67
0.05	2	0.09313	0.3814	1.85	59.39	15.86	45.67
0.05	3	0.06985	0.4324	1.234	58.26	14.37	45.67
0.05	4	0.05588	0.4834	0.9252	57.7	13.6	45.67
0.05	5	0.04657	0.5344	0.7402	57.37	13.13	45.67
0.05	6	0.03991	0.5854	0.6168	57.14	12.82	45.67
0.05	7	0.03492	0.6364	0.5287	56.99	12.59	45.67
0.05	8	0.03104	0.6874	0.4626	56.87	12.42	45.67
0.05	9	0.02794	0.7384	0.4112	56.78	12.29	45.67
0.05	10	0.0254	0.7894	0.3701	56.7	12.18	45.67
0.055	1	0.1397	0.3354	3.364	67.74	18.54	45.67
0.055	2	0.09313	0.3914	1.682	64.31	14.64	45.67
0.055	3	0.06985	0.4474	1.121	63.19	13.25	45.67
0.055	4	0.05588	0.5034	0.8411	62.64	12.53	45.67
0.055	5	0.04657	0.5594	0.6729	62.31	12.09	45.67
0.055	6	0.03991	0.6154	0.5607	62.08	11.8	45.67
0.055	7	0.03492	0.6714	0.4806	61.93	11.59	45.67
0.055	8	0.03104	0.7274	0.4206	61.81	11.43	45.67
0.055	9	0.02794	0.7834	0.3738	61.72	11.3	45.67
0.055	10	0.0254	0.8394	0.3364	61.64	11.2	45.67

la cámara de secado más adecuada evaluando las siguientes características:

Al aumentar el número de bandejas se observa que disminuye la longitud de bandeja, aumenta la temperatura de salida del aire, y disminuye el tiempo de secado.

Si se aumenta el espesor de la capa de grano sobre una bandeja, la longitud de la misma disminuye y aumenta la temperatura de salida de aire, la eficiencia de secado y el tiempo de secado.

Para seleccionar el diseño más adecuado, se considera lo siguiente que tenga el mayor número de bandejas para poder analizar los datos de humedad y de temperatura del grano según la altura del secador.

Que sea de corta longitud con el fin de tener una caída de temperatura baja. Que el espesor de la capa de grano sea pequeña con el fin de que haya poca caída de presión al paso del aire y que tenga una eficiencia media.

Siendo el diseño que más encaja con estos requerimientos el prototipo de:

Espesor de capa de granos = 0.02 m

Ancho de bandeja A = 0.2286 m

Longitud de bandeja Lt = 1 m

Número de Bandejas N = 9

Una vez hecho este estudio se reestructuró el programa de tal manera que proporcionarse datos suficientes al hacer variar el flujo de aire, esto es haciendo variar el caudal, ingresando a la memoria del computador datos del estado de entrada y salida del grano y el estado de entrada de aire, que se obtiene de datos estadísticos de diferentes localidades, dados por los institutos metereológicos.

Con estos datos y con ayuda de la carta Psicométrica se determinaron las condiciones de estado del aire ambiente.

Según la estación metereológica de Guayaquil, dirección de aviación civil, las condiciones metereológicas de ambiente

PROGRAMA # 2

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>

#define TRUE 1
#define FALSE 0

float  datos[10][11];
float  mt,tae,ts,wa,ww,rgs,rgw,ra,a,b,ta,tsa;
int    n,nb;
int    i,j;
float  au,ep,h,a1,g,hc,e,tr,hr,k,ht,cp,nt,tsai;
float  dif,xa,xw,mlcd,lv,tiempo,v,huf;

float  l,xe,cpgs,tes,eb,lt,mahe,mas,mawe,mgh,mh2o,xs,mwas;
float  mahs,h1,h3,mgs,qg,qm,cph2odt,qp,dx,mh,h2,qnet,calor;
int    nq;
int    q[10];
FILE   *file;
char   *data="file2.dat";

void inicio_matriz( void );
void graba_datos ( void );
main()
{
    clrscr();
    inicio_matriz();

    printf("Segundo programa de calculo\n\n");

    printf("Ingrese masa de trabajo (Kg.): ");
    scanf("%f",&mt);
    printf("Ingrese temperatura de entrada del aire (C.): ");
    scanf("%f",&tae);
    printf("Ingrese temperatura que debe soportar el grano
           (C.): ");
    scanf("%f",&ts);
    printf("Ingrese humedad de entrada del grano en base humeda
           (Kg.vapor/Kg.masa humeda): ");
    scanf("%f",&wa);
    printf("Ingrese humedad que debe salir en el grano base
           humeda (Kg.vapor/Kg.masa humeda): ");
    scanf("%f",&ww);
    printf("Ingrese desidad del solido seco y solido humedo
           (Kg./m3): ");
    scanf("%f %f",&rgs,&rgw);
    printf("Ingrese la densidad del aire ambiente (Kg./m3): ");
    scanf("%f",&ra);
```

```

printf("Ingrese el lado A del ducto (m.): ");
scanf("%f",&a);
printf("Ingrese el lado B del ducto (m.): ");
scanf("%f",&b);
printf("Ingrese la temperatura del aire ambiente (C.): ");
scanf("%f",&ta);
printf("Asuma la temperatura de salida del aire desde la
camara de secado (C.): ");
scanf("%f",&tsa);
printf("Ingrese el espesor de la capa de grano (m.): ");
scanf("%f",&l);
printf("Ingrese la humedad del aire ambiente en base seca
(Kg.vapor/Kg.aire seco): ");
scanf("%f",&xe);
printf("Ingrese el calor especifico del grano seco
[Kcal/(Kg.C.)]: ");
scanf("%f",&cpgs);
printf("Ingrese la temperatura de entrada del grano
(C.): ");
scanf("%f",&tes);
printf("Ingrese el espacio entre bandejas (m.): ");
scanf("%f",&eb);
printf("Ingrese longitud de la bandeja (m.): ");
scanf("%f",&lt);
printf("Ingrese el numero de caudales (<=10): ");
scanf("%f",&nq);
printf("Ingrese caudales de aire (m3/hora)\n");

for (i=0;i<nq;i++) {
    printf(" Caudal %d: ",i+1);
    scanf("%f",&q[i]);
}

printf("\nProcesando...\n");
for (j=0;j<nq;j++) {
    a1 =a*b;
    g =ra*q[j]/a1;
    hc =0.0176*pow(g,0.8);
    e =0.23;
    while (TRUE) {
        tr =(tae+tsa)/2;
        hr =4.925*e*(pow((tr+273)/100,4)-
            pow((ts+273)/100,4))/(tr-ts);
        k =1.8;
        au =1;
        ht =(hc+hr)*au+(1+1/(1+(hc+hr)/k));
        cp =0.241;
        nt =lt*ht/(g*cp*eb);
        tsai=ts+(tae-ts)*exp(-nt);
        dif =sqrt(pow((tsai-tsa),2));

        if (dif<0.01)
            break;
    }
}

```



```

else
    tsa=tsai;
}
if ((tsai-ts)!=0.00) {
    xa =wa/(100-wa);
    xw =ww/(100-ww);
    mlcd=(tae-tsai)/log((tae-ts)/(tsai-ts));
    lv =587.9;
    tiempo=(l*rgs*lv/(ht*mlcd))*(xa-xw);
    v =q[j]/(a*b*60);
    huf =(tae-tsai)/(tae-ta);
    mahe=ra*q[j];
    mas =mahe/(1+xe);
    mawe=mahe-mas;
    mgh =mt;
    mh2o=mgh*(wa-ww)/(100-ww);
    xs =mh2o/(tiempo*mas)+xe;
    mwas=xs*mas;
    mahs=mas+mwas;
    h1 =(cp+0.46*xe)*ta+597.0*xe;
    h3 =(cp+0.46*xs)*tsai+597.0*xs;
    mgs =mgh-mh2o;
    qg =mgs*cpgs*(ts-tes)/tiempo;
    qm =26.7*((tae+tsai)/2-ta)/tiempo;
    cph2odt=1.0*((tae+tsai)/2-tes)/tiempo;
    qp =380.76;
    dx =sqrt(pow((xs-xe),2));
    mh =mh2o/tiempo;
    h2 =h3+dx*(qg/mh+cph2odt+qm/mh+qp/mh);
    qnet=mahs*(h2-h1);
    calor=qnet*0.0012;

    datos[j][0] =q[j];
    datos[j][1] =v;
    datos[j][2] =tsai;
    datos[j][3] =tiempo;
    datos[j][4] =huf*100;
    datos[j][5] =mh;
    datos[j][6] =h1;
    datos[j][7] =h2;
    datos[j][8] =h3;
    datos[j][9] =xs;
    datos[j][10]=calor;
}
else {
    datos[j][0] =0.0;
    datos[j][1] =0.0;
    datos[j][2] =0.0;
    datos[j][3] =0.0;
    datos[j][4] =0.0;
    datos[j][5] =0.0;
    datos[j][6] =0.0;
    datos[j][7] =0.0;
}

```

```

        datos[j][8] =0.0;
        datos[j][9] =0.0;
        datos[j][10]=0.0;
    }
}
printf("\nGrabando datos en archivo...\n");
graba_datos();
printf("Fin de ejecucion\n");
}
void inicio_matriz ( void )
{
    int i,j;

    for ( i=0; i<10; q[i++] = (float) 0.00 );

    for ( i=0; i<10; i++ )
        for ( j=0; j<11; datos[i][j++] = (float) 0.00 );
}

/* Graba los datos en un archivo tipo ASCII */
void graba_datos ( void )
{
    int i,j,k;
    char str[12],strhead[122];

    if ((file = fopen ( data, "w" ))==NULL) {
        printf("Error en archivo apertura de archivo de datos");
        return;
    }
    strcpy ( strhead, "Datos de Problema\n\n");
    fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );

    strcpy ( strhead, "Ingrese masa de trabajo (Kg.): ");
    fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
    gcvt ( (double) mt, 4, str );
    for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
    str[11]='\n';
    fwrite ( str, 12, 1, file );

    strcpy ( strhead, "Ingrese temperatura de entrada del aire
        (C.): ");
    fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
    gcvt ( (double) tae, 4, str );
    for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
    str[11]='\n';
    fwrite ( str, 12, 1, file );

    strcpy ( strhead, "Ingrese temperatura que debe soportar el
        grano (C.): ");
    fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
    gcvt ( (double) ts, 4, str );
    for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
    str[11]='\n';
}

```

```

fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese humedad de entrada del grano en
                base humeda (Kg.vapor/Kg.masa humeda): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) wa, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese humedad que debe salir en el
                grano base humeda (Kg.vapor/Kg.masa humeda): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) ww, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese desidad del solido seco y solido
                humedo (Kg./m3): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) rgs, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]=',';
fwrite ( str, 12, 1, file );
gcvt ( (double) rgw, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese la densidad del aire ambiente
                (Kg./m3): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) ra, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el lado A del ducto (m.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) a, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el lado B del ducto (m.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) b, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese la temperatura del aire ambiente

```

```

                (C.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) ta, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Asuma la temperatura de salida del aire
                desde la camara de secado (C.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) tsa, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el espesor de la capa de grano
                (m.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) l, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese la humedad del aire ambiente en
                base seca (Kg.vapor/Kg.aire seco): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) xe, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el calor especifico del grano
                seco [Kcal/(Kg.C.)]: ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) cpgs, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese la temperatura de entrada del
                grano (C.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) tes, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el espacio entre bandejas
                (m.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) eb, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';

```

```

fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese longitud de la bandeja (m.): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) lt, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "Ingrese el numero de caudales (<=10): ");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );
gcvt ( (double) nq, 4, str );
for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
str[11]='\n';
fwrite ( str, 12, 1, file );

strcpy ( strhead, "\n\nResultados del Problema\n\n");
fwrite ( strhead, strlen(strhead), 1, file );

strcpy ( strhead, "- CAUDAL -VELOCIDAD -T.SAL.AIRE-TIEMPO
      APR- HUF -AGUA/HORA - H1 - H2 -
      H3 - XS - CALOR -\n");
fwrite ( strhead,122, 1, file );
strcpy ( strhead, "- m3/hora - m./min. - C. -
      horas - % - Kg./hora- K.cal/Kg.V-
      K.cal/Kg.V-K.cal/Kg.V- Kg.V/Kg.AS- K.watios-\n");
fwrite ( strhead,122, 1, file );
fwrite ( " ", 1, 1, file );

for ( i=0; i<10; i++ ) {
  for ( j=0; j<11; j++ ) {
    strcpy(str," ");
    gcvt ( (double) datos[i][j], 4, str );
    for (k=strlen(str);k<12;str[k++]=32);
    str[11]='\0';
    fwrite ( str, 11, 1, file );
  }
  fwrite ( "\n", sizeof("\n"), 1, file );
}

flushall();
fcloseall();
}

```

nos dan:

$$T = 23.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$\Phi = 91 \%$ y con ayuda de la tabla
Psycométrica la humedad del aire $X_e =$
0.01875 (kgvapor / kg aire seco)

A partir de esto se obtienen los
resultados de la tabla 3.3.



TABLA 3.3.- Resultados haciendo variar el flujo de aire en el secador.

Datos de Problema

Ingreso masa de trabajo (Kg.): 25
 Ingreso temperatura de entrada del aire (C.): 100
 Ingreso temperatura que debe soportar el grano (C.): 60
 Ingreso humedad de entrada del grano en base humeda (Kg.vapor/Kg.masa humeda): 64
 Ingreso humedad que debe salir en el grano base humeda (Kg.vapor/Kg.masa humeda): 7
 Ingreso desidad del solido seco y solido humedo (Kg./m3): 587.7,591
 Ingrese la densidad del aire ambiente (Kg./m3): 1.23
 Ingrese el lado A del ducto (m.): 0.2286
 Ingrese el lado B del ducto (m.): 0.2794
 Ingrese la temperatura del aire ambiente (C.): 23.6
 Asuma la temperatura de salida del aire desde la camara de secado (C.): 87.2
 Ingrese el espesor de la capa de grano (m.): 0.02
 Ingrese la humedad del aire ambiente en base seca (Kg.vapor/Kg.aire seco): 0.01875
 Ingrese el calor especifico del grano seco [Kcal/(Kg.C.)]: 0.77
 Ingrese la temperatura de entrada del grano (C.): 30
 Ingrese el espacio entre bandejas (m.): 0.028
 Ingrese longitud de la bandeja (m.): 1
 Ingrese el numero de caudales (<=10): 10

Resultados del Problema

CAUDAL	VELOCIDAD	T.SAL.AIRE	TIEMPO APR	HUF	AGUA/HORA	H1	H2	H3	XS	CALOR
m3/hora	m./min.	C.	horas	%	Kg./hora	K.cal/Kg.V	K.cal/Kg.V	K.cal/Kg.V	Kg.V/Kg.AS	K.Watios
175	45.67	80.94	27.14	24.95	0.5645	17.08	35.25	33.09	0.02142	4.705
200	52.19	81.59	24.58	24.1	0.6233	17.08	35.12	33.2	0.02133	5.338
300	78.28	83.34	18.12	21.8	0.8457	17.08	34.85	33.48	0.02108	7.885
400	104.4	84.43	14.53	20.38	1.054	17.08	34.75	33.66	0.02093	10.45
500	130.5	85.19	12.22	19.39	1.254	17.08	34.7	33.78	0.02083	13.03
600	156.6	85.76	10.6	18.63	1.446	17.08	34.68	33.87	0.02075	15.61
700	182.7	86.22	9.388	18.03	1.632	17.08	34.67	33.95	0.02068	18.21
800	208.8	86.6	8.447	17.53	1.814	17.08	34.67	34.01	0.02063	20.8
900	234.8	86.93	7.694	17.11	1.992	17.08	34.68	34.06	0.02058	23.41
1000	260.9	87.2	7.075	16.75	2.166	17.08	34.68	34.1	0.02054	26.02

3.6 Diseño del sistema de calentamiento de aire.

Entre los sistemas de calentamiento de aire tenemos:

- Colectores solares.
- Intercambiadores de calor.
- Calentadores de resistencia.

Si se analiza los diferentes calentadores, el calentamiento por resistencia eléctrica es de mayor costo. En el prototipo experimental, uno de los objetivos es regular la temperatura y la cantidad de calor según el flujo de aire, el medio de calentamiento que brinda mayor facilidad para una regulación automática es el de resistencias eléctricas, por esta razón se elige diseñar un calentador con resistencias. El tipo de calentadores por resistencias mencionadas anteriormente requieren para su diseño un estudio más profundo y costo elevado, para facilitar esto se procede a un diseño más sencillo con el uso de filamentos que en el mercado son fáciles de encontrar y reponer en caso

de algún daño. Con esto se analiza si el filamento alcanza temperaturas muy altas, la misma que causa que la energía en forma de calor se disipe a la misma velocidad que se produce.

Para evitar que el filamento se quemé el fluido frío debe ser capaz de recibir calor a una velocidad tal que mantenga este filamento por debajo de la temperatura permisible.

El análisis de diseño se realiza en una forma análoga a un intercambiador de calor con tubos escalonados que presentan un alto coeficiente convectivo, a medida que el flujo de aire que cruza las hileras de tubos subsecuentes cuando está en un régimen completamente turbulento además permite una mezcla completa de aire unificando su temperatura. Para que el análisis sea similar a este tipo de intercambiador el filamento que es la fuente de calor está enrollado en forma de espinas alrededor de una base de refractario simulando el fluido que calienta el aire. La figura 3.5 muestra

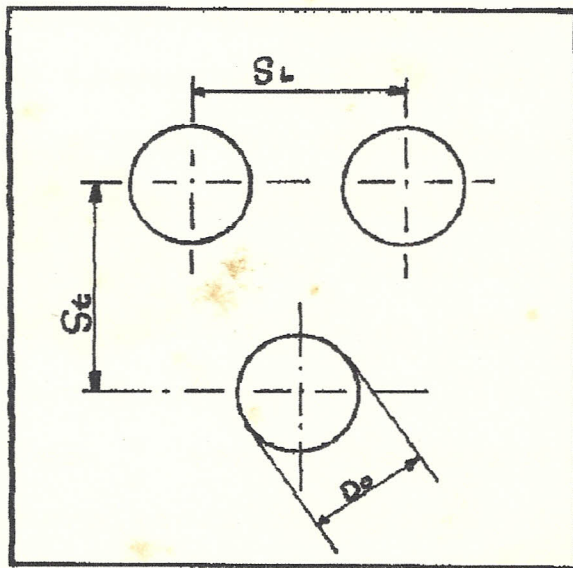


Fig. 3.5.- Arreglo de los tubos escalonados.

la forma de distribución de los tubos escalonados.

Estudios prácticos realizados por Kuzmet Zokof y lokshin encontraron razones de paso y diámetro de mayor interés práctico para cambiadores de calor entre 1.25 a 1.5. El ducto de paso de aire se diseñó en forma rectangular así:

L_c = Longitud del calentador

A_c = Ancho del calentador

H_c = Altura del calentador

D_o = Diámetro de un tubo de calentamiento

D_o = 6 mm

Como son resistencias eléctricas enrolladas en forma de espiral y muy débiles de soportar esfuerzos debido a la presión que ejerce el aire, se estima un paso transversal $S_t = 17$ mm y un paso longitudinal $S_l = 27$ mm, quedando suficiente espacio en caso de grandes esfuerzos mecánicos y térmicos, que en caso de contacto entre resistencias ocasionaría un corto circuito. Se procede a calcular el número de tubos longitudinales basándose en las medidas del calentador:

Ac = 120 mm

Hc = 160 mm

Por las razones mencionadas la distribución de los tubos queda de la siguiente manera: (Ver figura 3.6 y 3.7). Se puede apreciar con más detalle en la foto 3.1.

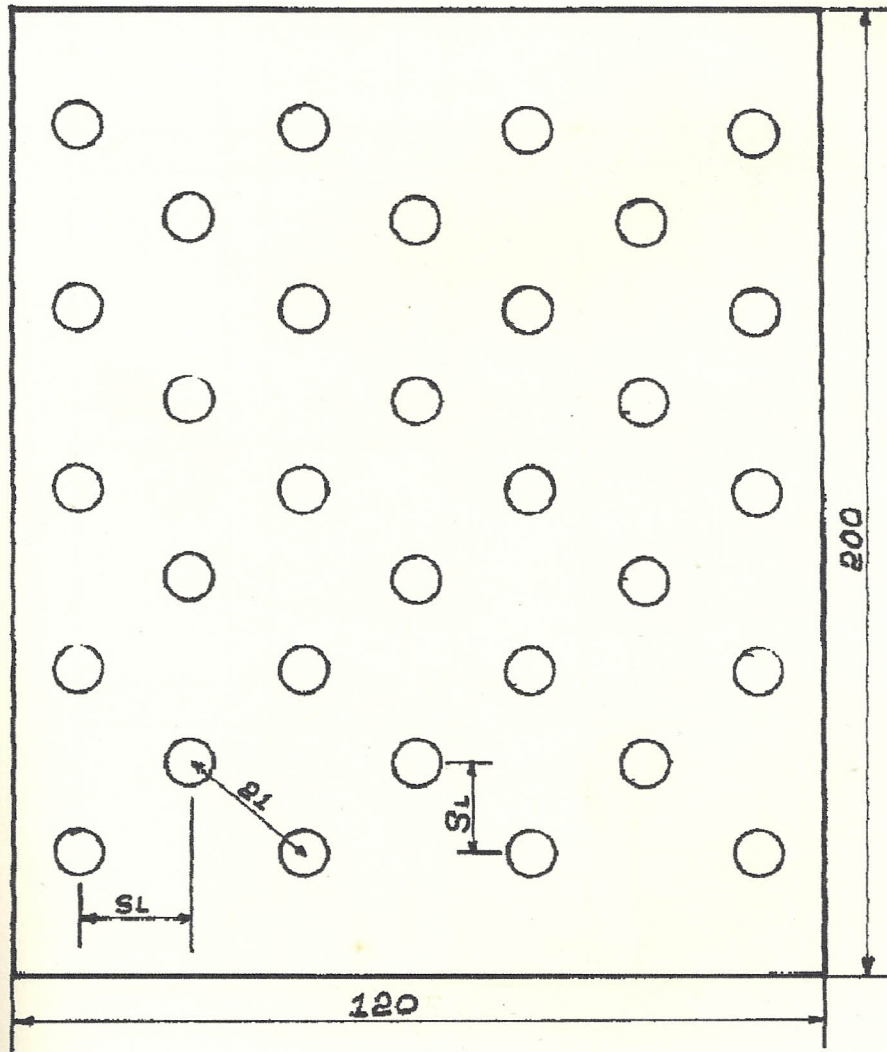


Fig. 3.6.- Vista superior del arreglo de tubos escalonados en el calentador de aire.

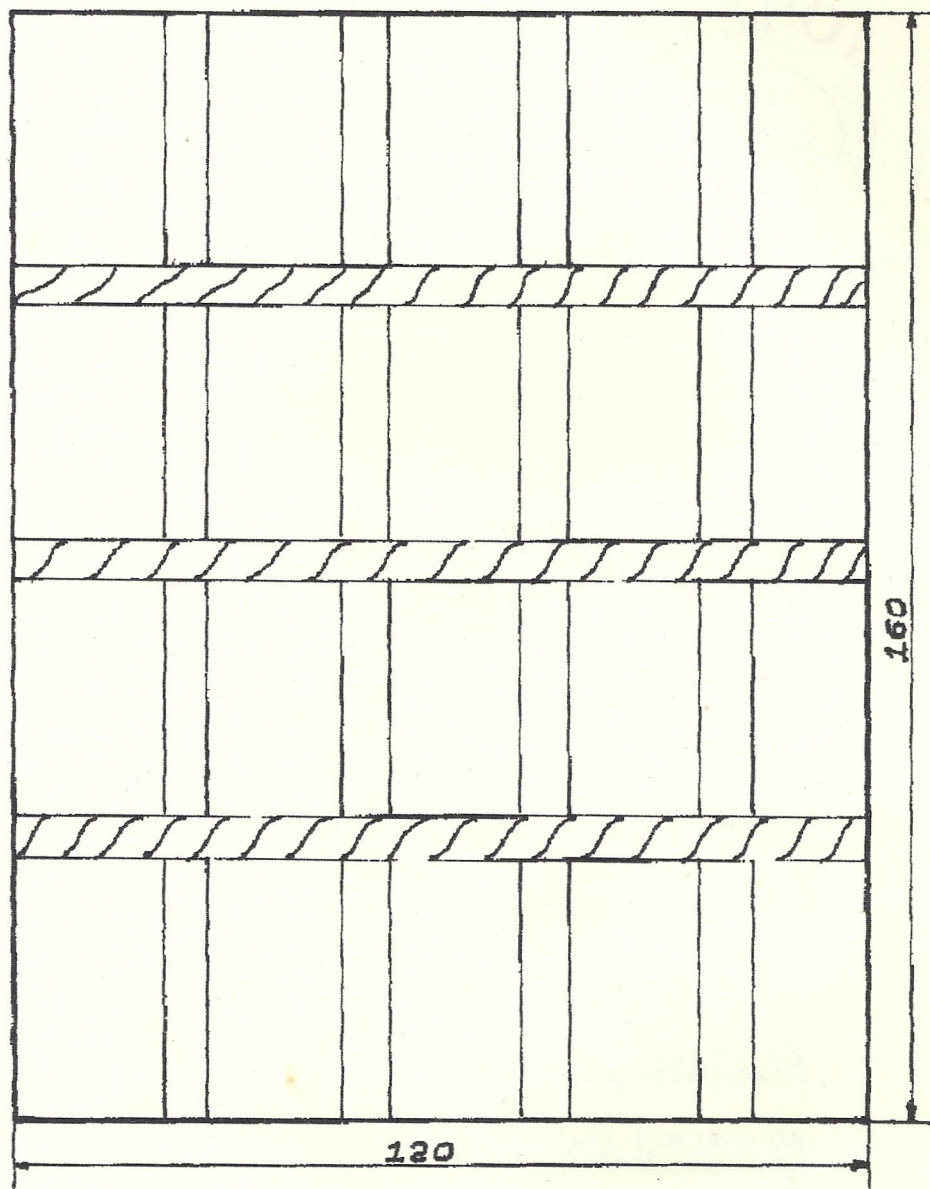


Fig. 3.7.- Vista frontal del arreglo de
tubos escalonados en el
calentador de aire.

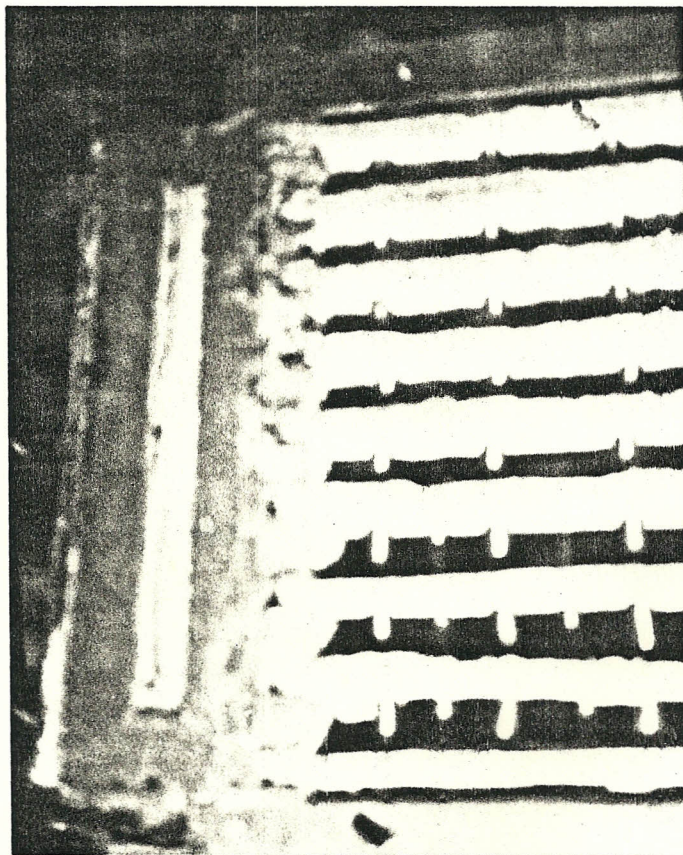


Foto 3.1.- Disposición de las resistencias
en el calentador de aire.

De la figura se aprecia los cuatro tubos formando la columna mayor en el área transversal del calentador y tres tubos en la columna menor.

El Area mínima para obtener la máxima velocidad se analiza de la siguiente manera:

$$\text{Si } \sqrt{St^2 + Sl^2} < St + Do/2$$

(Fórmula 3.49)

$G_{\text{máx}} = St / (\sqrt{Sl^2 + St^2} - Do)$ veces la velocidad libre del flujo de aire basada en el área transversal del ducto.

$$Do = 6 \text{ mm}$$

Reemplazando datos en la fórmula 3.49, se comprueba que:

$$31.9 < 20.5$$

Por tanto el área mínima es:

$$A_{\text{min}} = (H_c - 3E_p a) (A_c - 4 Do) \text{ mm}^2$$

(Fórmula 3.50)

Epa = Espesor de la plancha de asbesto que
sujeta las resistencias.

$$A_{min} = 13.632 \text{ mm}^2 = 0.0136 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal min} = 175 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Tfi = 165 °C cuando el filamento está
sometido a 138 V / 5.7 A.

Igualando la rapidez de disipación de
calor con la rapidez de aumento de energía
del aire se obtiene la temperatura de
salida del aire.

$$Q_g = W_a * C_{pa} * T$$

$$T = T_{\text{salida del aire}} - T_{\text{entrada del aire}}$$

Despejando:

$$T_{\text{salida aire}} = \frac{Q_g}{W_a * C_{pa}} + T_{\text{entrada aire}}$$

(Fórmula 3.51)

Donde reemplazando valores nos da una
temperatura de salida de 162 °C desde el
calentador entrando a la cámara de secado.

$$G_{\max} = \int f * Q_{\min} / A_{\min} \quad \text{kg /hr-m}^2$$

(Fórmula 3.52)

Temperatura media de la masa de aire:

$$T_{bc} = (T_a + T_{ea}) / 2$$

$$T_{bc} = 92.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura de película:

$$T_{fc} = (T_f + T_b) / 2$$

$$T_{fc} = 128.9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Densidad del fluido a T_f :

$$\int f = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$G_{\max} = 12.867,6 \text{ kg/hr-m}^2$$

$$Re_{\max} = G_{\max} * D_o / \mu_f$$

Donde μ_f es la viscosidad cinemática a T_f
la cual es igual a:

$$\mu_f = 0.07296 \text{ kg/hr-m}$$

$$Re_{\max} = 1058$$



Por lo tanto el fluido se encuentra en estado de transición:

$$200 < Re < 6000$$

Según Kreit para flujo a través de un tubo da la ecuación 3.53:

$$h_c = (C/Dof) * K_f * Re^n$$

Donde C y n son constantes que dependen del número de Reynolds. (Ver tabla 3.4)

Redf	c	n
4 - 40	0.821	0.385
40 - 4000	0.615	0.466
4000 - 40000	0.174	0.618
40000 - 400000	0.0239	0.805

Tabla 3.4. Coeficientes para calcular por medio de la ecuación 3.53 el coeficiente promedio de transferencia de calor de un cilindro, dentro de un gas que fluye perpendicular a su eje.



Donde D_{of} = Diámetro del filamento

$D_{of} = 0.7 \text{ mm} = 0.0023 \text{ pies}$

$h_c = 139 \text{ Btu/hr-pie}^2 \text{ }^\circ\text{F}$

$h_c = 678 \text{ Kcal/hr-m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

El calor disipado en función del coeficiente convectivo está dado por:

$$Q_d = A_{tf} \cdot h_c \cdot T \quad (\text{Fórmula 3.54})$$

A_{tf} = Area total del filamento

T = Temperatura media MLDT

$$T = \frac{T_{ea} - T_a}{\ln \left(\frac{T_f - T_a}{T_f - T_{ea}} \right)}$$

(Formula 3.55)

$$A_{tf} = \pi D_{of} \cdot L_{tf} \quad (\text{Fórmula 3.56})$$

L_{tf} = Longitud total del filamento en el circuito.

$$L_{tf} = 120.6 \text{ m}$$

$$A_{tf} = 120.6 * \pi * 0.7/1000$$

$$A_{tf} = 0.27 \text{ m}^2$$

A esta área debido a razones de montaje en

la estructura del calentador se resta un 20 % de pérdida.

$$A_{tf} = 0.216 \text{ m}^2$$

Despejando T de la fórmula 3.54,

$$T = Q_d / A_{tf} \cdot h_c$$

$$T = 160 \text{ }^\circ\text{C.}$$

N_{lc} = número de tubos del calentador.

CALCULO DEL NUMERO DE RESISTENCIAS PARA UNA POTENCIA DE 15 KW.

Del circuito de la figura 3.8 se tiene que:

$$R_{1eq} = R_{2eq} = R_{3eq} \quad (\text{Fórmula 3.57})$$

$$I_L = I_F \quad (\text{Fórmula 3.58})$$

$$I_N = -(I_A + I_B + I_C) \quad (\text{Fórmula 3.59})$$

$$POT_{\Phi} = \sqrt{3} V_L \cdot I_L \quad (\text{Fórmula 3.60})$$

$$V_F = I_F R_{eqF} = V_L / \sqrt{3} \quad (\text{Fórmula 3.61})$$

$$POT_{\Phi} = 3 I_F^2 R_{eqF} \quad (\text{Fórmula 3.62})$$

$$P_T = 3 P_F \quad (\text{Fórmula 3.63})$$

Así:

$$V_F = 138.56 \text{ V}$$

$$P_F = 5000$$

$$R_{eqF} = 3.84 \text{ } \Omega \approx 4$$

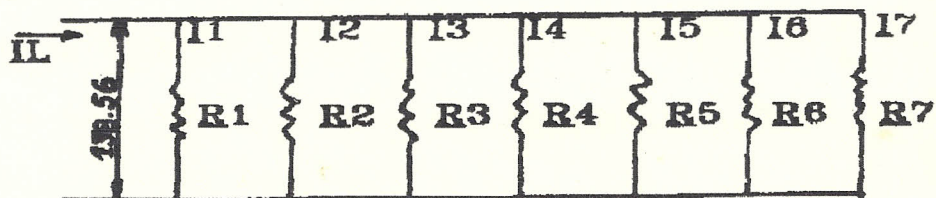
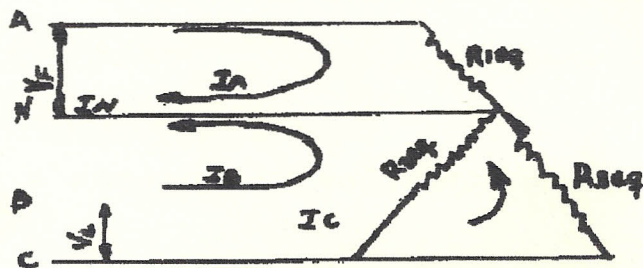


Fig. 3.8 - 3.9.- Conexión trifásica Y y
circuito en paralelo

$$I_L = 34.6 \text{ A}$$

Con R_{eq} se determina el número de resistencias individuales de 24Ω .

$$R_{eq} = R/N_r \quad (\text{Fórmula 3.64})$$

N_r = número de resistencias.

$$N_r = 6$$

Para una fase (Fig. 3.9)

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_n \quad (\text{Fórmula 3.65})$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_n \quad (\text{Fórmula 3.66})$$

$$I_{ni} = V_{ni}/R_{ni} \quad (\text{Fórmula 3.67})$$

Así:

$$I_1 = 5.77 \text{ A}$$

$$I_L = \Sigma I_n \quad (\text{Fórmula 3.68})$$

$$I_L = 34.64 \text{ A}$$

La potencia de trabajo del calentador para una prueba determinada se puede seleccionar de la siguiente tabla:



ReqF(Ω)	Nr(Ω)	R(Ω)	Volt (V)	Pot (W)	IL
4	6*3	24	240	14.399	34,64
5	5*3	24	240	11.519	27,71
6	4*3	24	240	9.599,4	23,09
7	4*3	24	240	8.288,0	19,79
8	3*3	24	240	7.199.6	17,32
12	2*3	24	240	4.799.7	11,54
24	1*3	24	240	2.399.9	5,77

Tabla 3.5.- Potencias de trabajo en función del número de resistencias.

DETERMINACION DE LA CORRIENTE QUE SOPORTA LAS RESISTENCIAS.

Del mercado se tiene resistencias con la siguiente especificación:

$$R = 12 \Omega$$

$$Pot = 1.000 W$$

$$Pot = V^2/R \quad (\text{Fórmula 3.69})$$

$$V = 109.5 V$$

En la conexión trifásica Y con una fuente

de 240 V, se tiene una corriente de línea igual a la de fase y un voltaje de fase igual a 138.7 V.

Si se conectan dos resistencias de 12 Ω en serie la resistencia equivalente es de 24 Ω , y considerando 2.000 W de potencia, el voltaje sería de 219 V.

Esto es igual a 1.6 veces más que el voltaje aplicado.

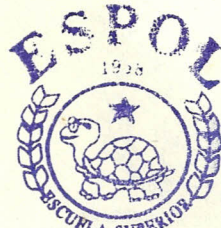
La corriente que resiste cada resistencia equivalente sería de 9.12 A que sería igual a 1.6 veces la corriente aplicada.

Esto significa de que no pueden conectarse menos de una resistencia de 12 Ω para el circuito trifásico.

Para calcular la pared aislante, manteniendo una temperatura interior de 300 °C y exterior de 23 °C (Figura 3.10), se considera lo siguiente:

Utilizando cemento refractario,

$$k = 0.86 \text{ cal/hr-m-}^\circ\text{C}$$



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

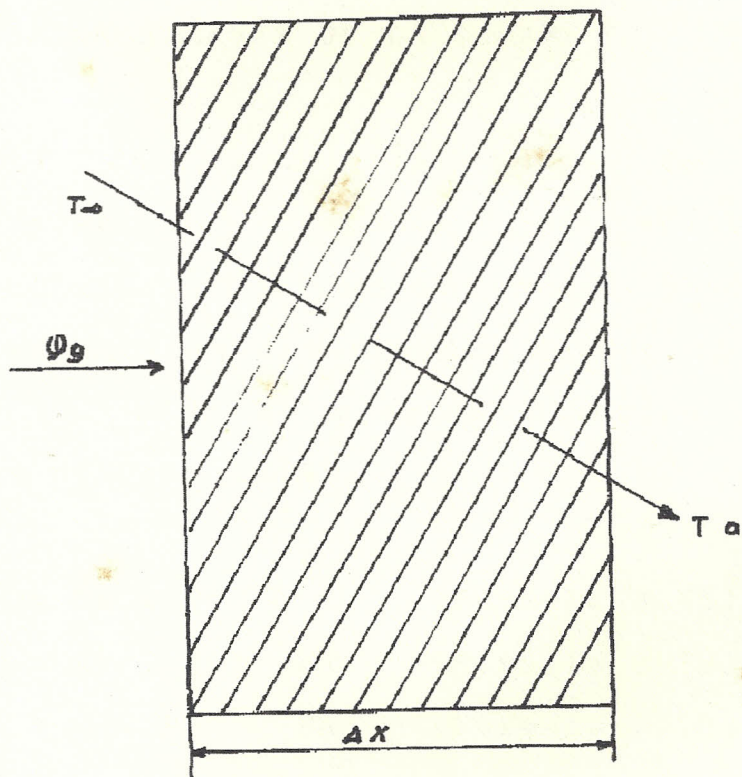


Fig. 3.10.- Variación de temperatura
atravez de una pared de
cemento refractario.



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

$$Q_g = \frac{A_{pc} \cdot K \cdot T}{X} \quad (\text{Fórmula 3.70})$$

$$A_{pc} = 0.112 \text{ m}^2$$

$$X = 46 \text{ mm}$$

DETERMINACION Y CALCULO DE LA CAIDA DE PRESION ATRAVEZ DE LA CAMARA DE SECADO.

Para determinar la caída de presión a través del secador los cálculos se realizan con el mayor caudal posible que pase a través del secador debido al aumento de la caída de presión dinámica conforme aumenta el caudal.

$$P_t = P_s + P_v \quad (\text{Fórmula 3.71})$$

$$P_v = (V/1.29) P_a \quad (\text{Fórmula 3.72})$$

$$P_s = C \cdot P_v \quad P_a \quad (\text{Fórmula 3.73})$$

C = Factor adimensional que es característico de la geometría del sistema.

$$V = \text{m/s}$$

Asumiendo que se va a trabajar con una velocidad de 75 m/min, recomendada para secado, se tiene un caudal basado en el área del perímetro mojado de la cámara,

donde el caudal será igual a $290 \text{ m}^3/\text{hr}$.

Caída de presión en la succión del ventilador.- Esta parte está formada de un cono truncado, presentando una expansión gradual (Fig. 3.11). Con $\theta = 13.7^\circ$ en las tablas del manual del aire acondicionado se obtiene $C = 0.45$.

Así:

$$V_1 = 10,26 \text{ m/s}$$

$$P_{v1} = 63,21 \text{ Pa}$$

$$P_s = 28.44 \text{ Pa}$$

$$P_t = 91.64 \text{ Pa}$$

Caída de presión en el calentador de aire.- La caída de presión a través de este se determinó experimentalmente con ayuda de un ventilador centrífugo impulsado con un motor trifásico de 10 HP a 3.500 rpm, acoplando ductos entre la descarga del ventilador y la entrada del calentador y, entre la salida del calentador y la entrada de la cámara de secado, tomándose las presiones con el tubo de Pitot, basadas en el área transversal de estos ductos, esto se muestra en la figura 4.2 y 4.3.

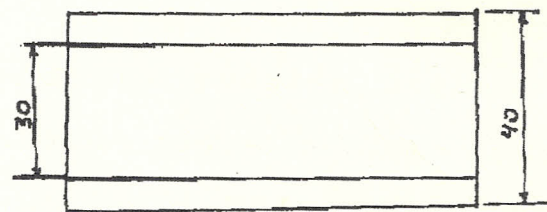
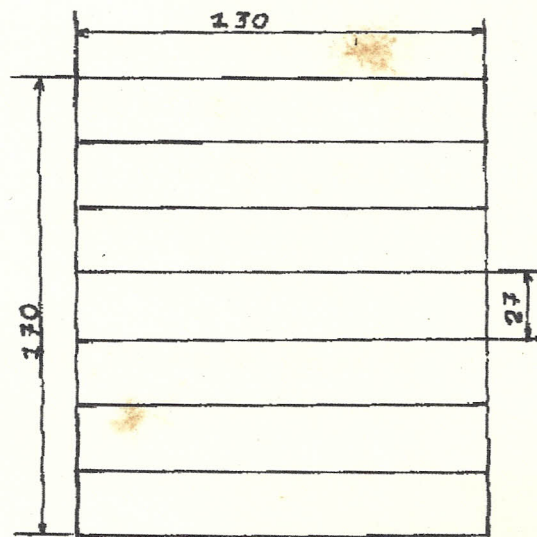
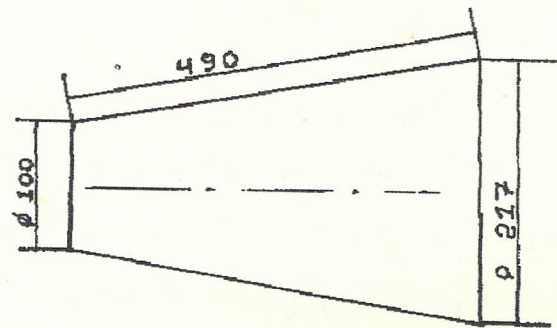


Fig. 3.11.- 3.12.- Expansión gradual en el cono truncado y rejillas desviadoras de flujo en posición horizontal.

De esto se obtiene:

$$P_t = 883 \text{ Pa}$$

Caída de presión atravez de las rejillas desviadoras de flujo.- Son nueve rejillas espaciadas a 17 mm con una longitud de 130 mm todas en paralelo (Fig. 3.12), por lo que:

$$Q = 29 \text{ m}^3/\text{hr}$$

La pérdida de energía estática sería:
(pág. 626 fig. 610 Ref 1)

$$P_s = 1.78 (P_v)$$

(Fórmula 3.74)

$$\text{Area de cada endija } A_e = 2.21 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V = 3.645 \text{ m/s}$$

$$P_v = 7.98 \text{ Pa}$$

$$P_s = 14.20 \text{ Pa}$$

$$P_t = 22.18 \text{ Pa}$$

Caída de presión atravez de las rejillas desviadoras.- Son cuatro rejillas espaciadas 26 mm dejando un área libre de flujo (Fig. 3.13), así:

$$A_e = 4.42 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q = 58 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$P_v = 7.98 \text{ Pa}$$

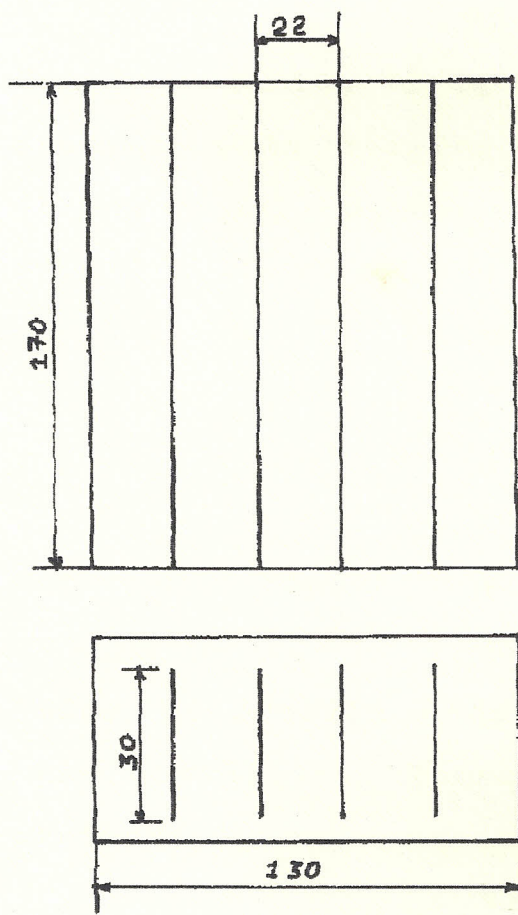


Fig. 3.13.- Rejillas desviadoras de flujo en posición vertical.

$$P_s = 14.21 \text{ Pa}$$

$$P_t = 22.19 \text{ Pa}$$

Expansión gradual a la entrada de la cámara de secado (Fig. 3.14).- Partiendo de las velocidades:

$$V_1 = 3.65 \text{ m/s}$$

$$V_2 = 0.6 \text{ m/s}$$

Con la relación $V_2/V_1 = 0.16$ y $\theta = 30^\circ$ de acuerdo a la referencia 2 (Tabla 10 del folleto del aire acondicionado de la ESPOL)

$$n = 0.52$$

$$P_s = n(P_{v1} - P_{v2})$$

(Fórmula 3.75)

$$P_s = 4 \text{ Pa}$$

$$P_v = 7.78 \text{ Pa}$$

$$P_t = 11.78 \text{ Pa}$$

Caída de presión a través de las bandejas (Fig. 3.15).- Tomando un volumen de control:

$$V_1 = 0.87 \text{ m/s}$$

$$V_2 = 2.2 \text{ m/s}$$

Con $V_1/V_2 = 0.4$ en la tabla de la referencia 2 (Manual del aire acondicionado):

$$n = 1.24$$

$$P_s = nP_{v2} \text{ (Fórmula 3.76)}$$

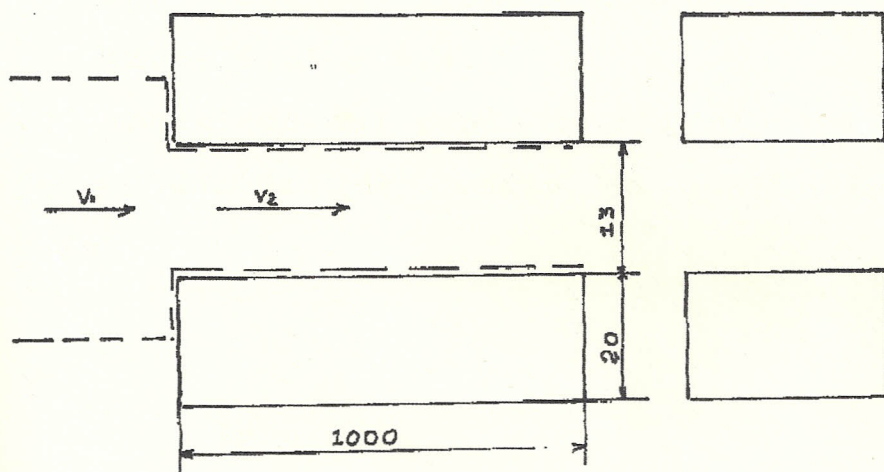
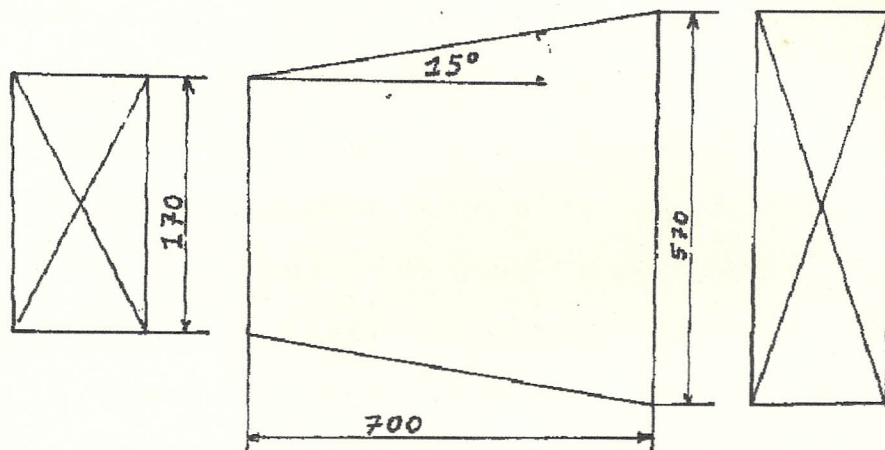


Fig. 3.14-3.15.- Expansión gradual a la entrada de la cámara de secado.

- Disposición de las bandejas en la cámara de secado.

$$P_{v2} = 2.9 \text{ Pa}$$

$$P_s = 3.6 \text{ Pa}$$

$$P_t = 6.5 \text{ Pa}$$

Caída de presión a través de la capa de grano en las bandejas (Fig. 3.16).- La mayoría de las fórmulas obtenidas mediante estudios se basan en la resistencia del cuerpo compacto aislado, desde donde se pasa al caso de un amontonamiento de esferas, tomando en cuenta de los espacios intermedios que ejercen acción decisiva sobre la caída de presión.

$$(Fórmula 3.77) \quad P = (\rho_g - \rho_s) * \phi * L$$

L = Altura de la capa de grano en m

ϕ = Porosidad del lecho recomendado

entre 0,35 y 0,4.

ρ_g = Densidad del producto Kg/m^3

ρ_s = Densidad del medio en deslizamiento
 kg/m^3

Así:

$$\rho_g = 591$$

$$\rho_s = 1.3$$

$$L = 0.02$$

$$P_t = 7.7 \text{ Pa}$$

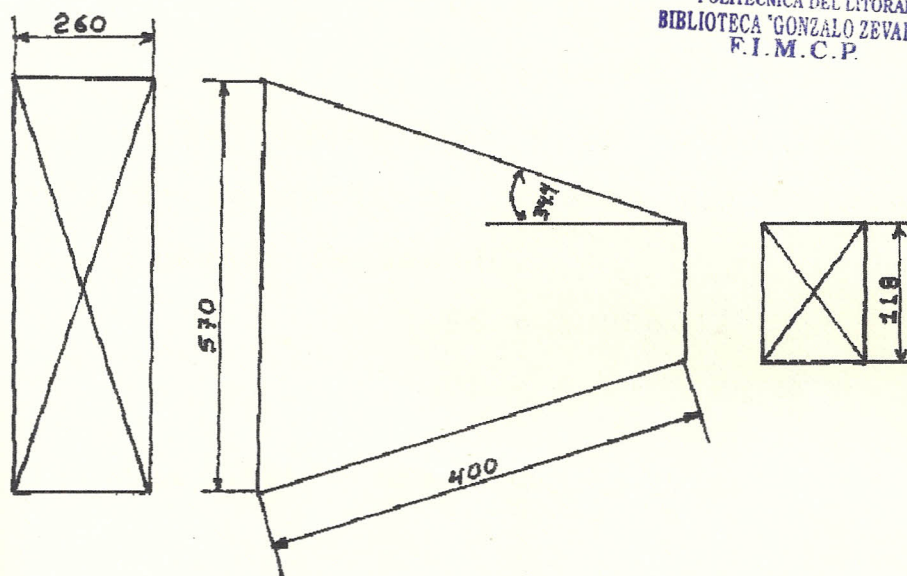
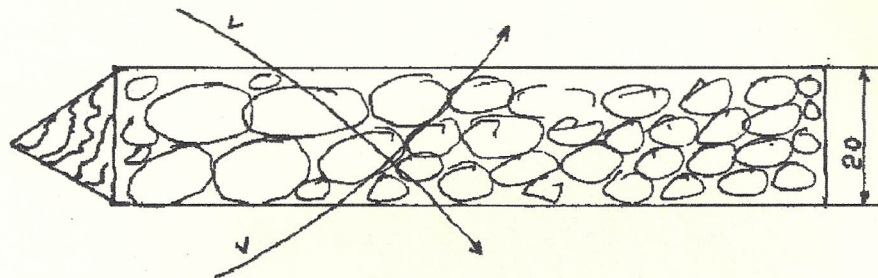


Fig. 3.16 - 3.17.- Aglomeración de grano en una bandeja. - Contracción gradual a la salida de la cámara de secado.

Caída de presión a la salida de la cámara de secado con una contracción gradual (Fig. 3.17).- Teniendo en cuenta:

$$V1 = 0.544 \quad \text{m/s}$$

$$V2 = 4.24 \quad \text{m/s}$$

$$hv1 = 0.18 \quad \text{Pa}$$

$$hv2 = 10.8 \quad \text{Pa}$$

De las tablas de aire acondicionado (Referencia 2) para una contracción con mayor ángulo o a 34° .

$$n = 1.07$$

$$Ps = n(hv2 - hv1)$$

(Fórmula 3.78)

$$Ps = 11.36 \quad \text{Pa}$$

$$Pt = 16.85 \quad \text{Pa}$$

Así de la figura 3.18 y la tabla 3.6 se obtiene la caída de presión total a través de la cámara de secado.

$$Pt = 1.056,52 \quad \text{Pa}$$

$$Pt = 4.24 \quad \text{" de H}_2\text{O}$$

$$\text{(Fórmula 3.79)} \quad \text{BHP} = \frac{\text{CFM} * Pt}{6.356 * n}$$

n = eficiencia recomendada entre 0.5 - 0.7

$$\text{CFM} = 161$$

$$\text{BHP} = 0.18$$

Tabla 3.6 :

Tabla de presiones en los elementos del secador.

#de elemento	posición	Elemento	ΔP en (N/m ²).
0	Succión	Ambiente	0
1	Succión	Cono truncado	-91.64
2	Descarga	Calentador	883.8
3	Descarga	Deflectores	44.37
4	Descarga	Expansión gradual	11.78
5	Descarga	Bandejas	6.5
6	Descarga	Capa de grano	7.7
7	Descarga	Contracción gradual	16.85
8	Descarga	Ambiente	0

PRESIONES A LO LARGO DEL SECADOR

PRESION vs POSICION

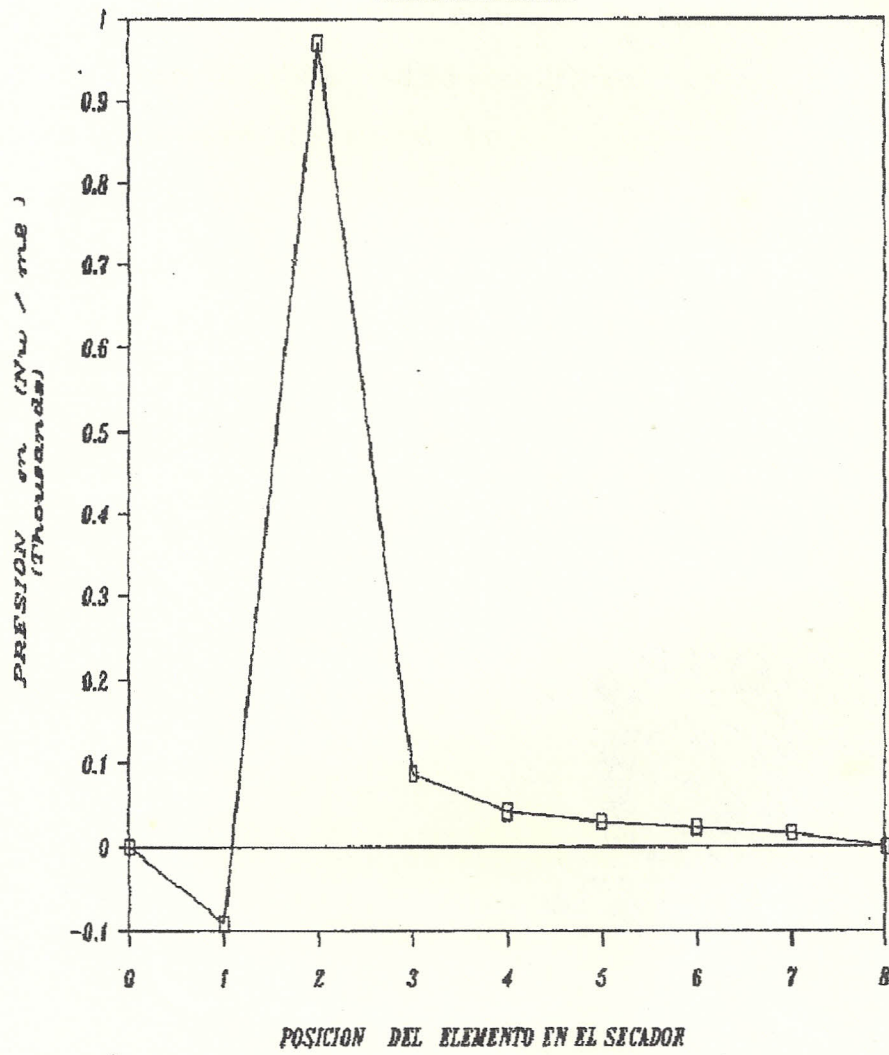


Fig. 3.18.- Presiones a lo largo del secador.

$$\text{BHP} = 0.18 \text{ HP} * 0.745$$

KW/HP

$$\text{POT} = 0.14 \text{ KW}$$

Con esto decimos que la potencia total que debe tener el ventilador para poder vencer la resistencia del flujo en las diferentes secciones del dispositivo experimental debe de ser de 0.14 KW.



CAPITULO IV

EVALUACION EXPERIMENTAL DEL SECADOR

4.1 Partes principales del secador

En el grafico 4.1 y Foto 4.1 a continuación se da las partes principales del secador diseñado, en donde se muestra lo siguiente:

- 1.- Regulador de flujo
- 2.- Cono de succión de aire.
- 3.- Ventilador
- 4.- Calentador de resistencias eléctricas.
- 5.- Deflectores.
- 6.- Expansión gradual.
- 7.- Cámara de secado.
- 8.- Visores laterales.
- 9.- Puerta.
- 10.- Bandejas
- 11.- Contracción gradual.
- 12.- Toma de aire en caso de recirculación.
- 13.- Caja de control eléctrico para el motor del ventilador y el calentador.

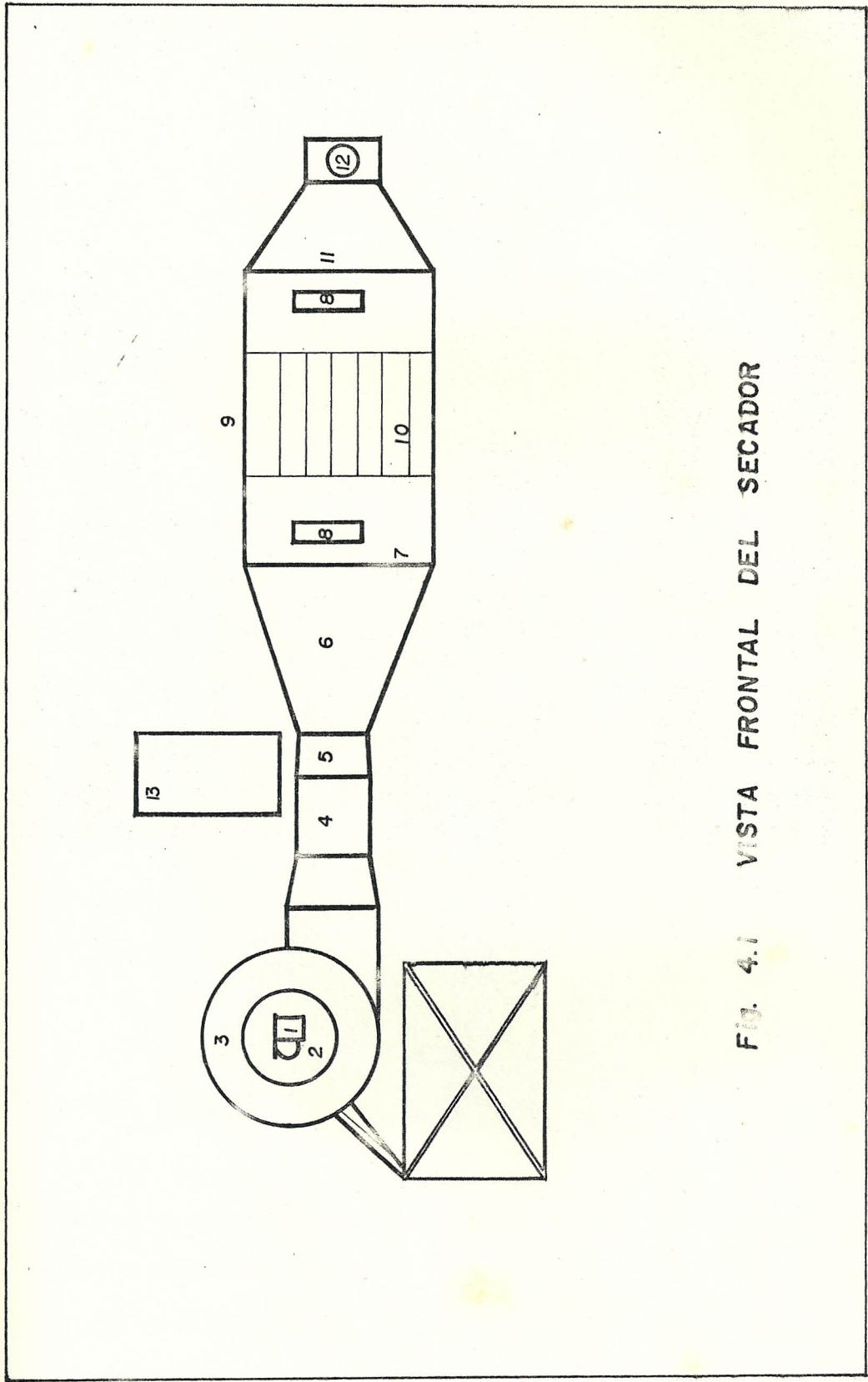


FIG. 4.1 VISTA FRONTAL DEL SECADOR

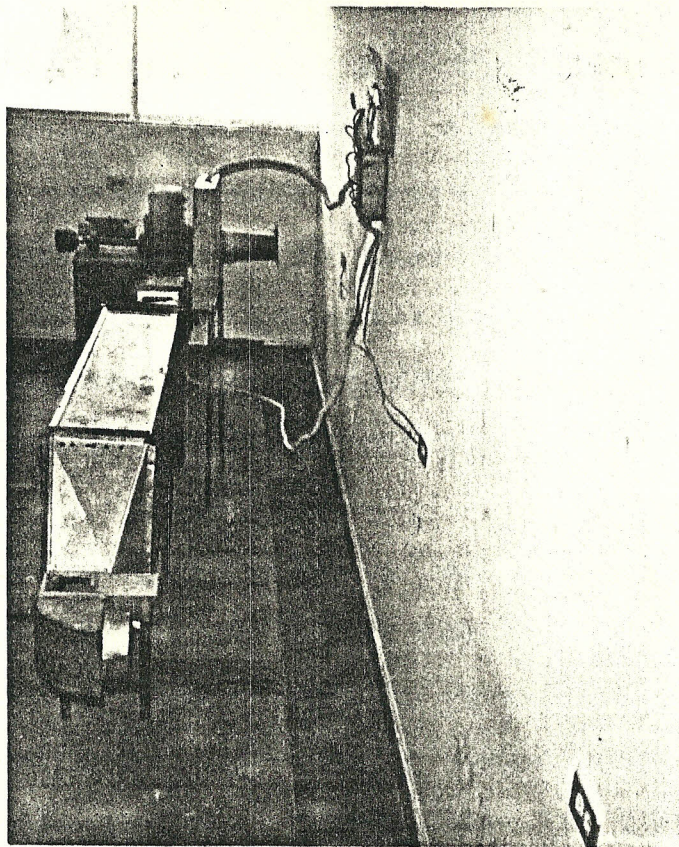


Foto 4.1.- Secador experimental con aire calentado por resistencias sin recirculación de aire.

4.2 Funcionamiento y operación del equipo.

El principio es el siguiente:

Aire es succionado desde el ambiente por medio de un ventilador centrífugo, para descargarlo a la entrada del calentador a una presión y temperatura diferente. Este aire, al pasar atravez del calentador, absorve toda la energía disipada por las resistnecias que están conectadas a una fuente de corriente alterna. Esta energía discipada depende de la potencia requerida para calentar la estructura del secador, la cantidad y calidad (Humedad) del producto que se va a secar.

Después que el aire se ha calentado pasa atravez de las aletas del deflector, que distribuye horizontal y verticalmente, lo más uniforme posible a cada una de las bandejas, a la entrada de la cámara de secado.

El aire al pasar sobre o atravez de la capa de grano, contenido en las bandejas, cede energía para calentar y evaporar el

agua contenida en el grano, para absorberla y arrastrarla hasta la salida del secador, secando el producto hasta la humedad requerida.

En la operación del equipo se consideran los siguientes componentes:

CAJA DE CONTROL

En esta caja se encuentran dos breakers trifásicos uno de 40 A para encender o apagar el motor que impulsa el ventilador, y otro de 20 A para energizar las barras.

A estas barras se encuentran conectadas resistencias en igual número, a través de un fusible protector, y un interruptor ON-OFF que sirve para energizar individualmente cada resistencia, de acuerdo a la potencia que se requiera en el calentador.

REGULADOR DE FLUJO

Este regulador consiste en una regla metálica graduada en milímetros, la

longitud de la regla es de 100 mm igual al diámetro de la succión del ventilador y, de 20 mm de ancho con una ranura en el centro, que sirve de guía para deslizar una tapa metálica que cubre el sector de succión igual al porcentaje de caudal que se desea obtener a la descarga.

CONTROL DE HUMEDAD.

En los lados laterales, a la entrada y salida de la cámara de secado, se encuentran dos visores dentro de los cuales están localizados dos termómetros de mercurio, uno expuesto al flujo de aire que marca la temperatura de bulbo seco y, otro con el bulbo completamente humedecido por una mecha de gasa húmeda que está sumergida en un recipiente con agua destilada.

MEDICION DE PRESIONES.

Las presiones se miden entre la descarga del ventilador y entrada al calentador, a la salida del calentador y entrada a la cámara de secado y, a la salida de la

cámara de secado, con ayuda del tubo de PITOT que va dentro del ducto en el cual fluye aire.

El PITOT puede deslizarse horizontal y verticalmente en la sección transversal rectangular del ducto para tomar presiones en distintos puntos de esta, controlando el nivel que debe mantener el PITOT para mantener el punto de referencia inicial.

Este nivel se controla por perillas que se encuentran en la base del PITOT, la boquilla debe estar lo más paralela posible al flujo de aire para evitar errores en la lectura.

TERMOCUPLAS.

Las termocuplas se fijan en distintos puntos, que sean necesarios obtener la temperatura que alcanza el flujo de aire a través del calentador o cámara de secado, el grano que se está secando o la estructura del secador. Cuando se dispone de por lo menos dos termocuplas, estas se conectan a selector de doce entradas, que a su vez tiene una salida que está

conectado a un termómetro digital dando datos en grados Centígrados o Fahrenheit.

La lectura individual se obtiene variando la perilla del selector.

CAMARA DE SECADO.

Esta cámara está compuesta de nueve bandejas con 40 mm de altura, para variar la altura de la capa de grano según la prueba que se vaya a realizar. En el lado lateral de la cámara se encuentra una puerta para obtener muestras del producto en cualquier tiempo durante la prueba, en igual forma a la salida de la cámara se tiene una reducción que se utiliza como compuerta para toma de datos o para recuperar un porcentaje de aire que se considere óptimo para ser utilizado como aire de recirculación a través de un ducto flexible conectado a la succión del ventilador.

4.3 Pruebas experimentales



INSTRUMENTOS UTILIZADOS.

1.- Tubo de Pitot.

Rango de 0 a 10 pulgadas de agua en posición vertical.

2.- Termómetro digital.

303K Thermometer - Termocupla tipo K-NiCr-NiAl

Precisión de 1 grado Centígrado o Farenheit.

3.- Selector de Termocuplas de 12 entradas y una salida.

4.- Termocuplas tipo K.

5.- Termómetros de Mercurio (0 - 110 grados Celsius)

6.- Termo con un litro de capacidad.

7.- Calentador eléctrico. (FISHER TERMIX HOT PLATE

MODEL 200 T)

8.- Vaso de vidrio (Capacidad de 400 mml)

9.- Balanza mecánica

MARCA CENCO

RANGO 0 - 500 gr

Precisión 1 gr.

10.- Psicrómetro

11.- Medidor de Humedad instantaneo para granos

Agromatic MKII

12.- Balanza Mecánica.

Rango de 0 a 20 Kg

Precisión 1 Kg.

13.- Multímetro

14.- Regla.

15.- Cronómetro.

16.- Tiza.

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN VACIO

Estas pruebas se realizan en dos partes:

a.- Obtención de temperaturas.

1.- Ubicar termocuplas a la entrada y salida del calentador, a la entrada de la cámara de secado y en el punto donde se desea saber la temperatura de trabajo.

2.- Ubicar termómetros de mercurio en los visores de los lados laterales, a la entrada y salida de la cámara de secado, para toma de datos de temperaturas en esos

puntos.

3.- Cerrar completamente la cámara de secado, verificando que dentro de ella no se encuentre material ajeno a ella.

4.- Posicionar el regulador de flujo en la succión del ventilador de acuerdo al caudal requerido.

5.- Encender el motor del ventilador.

6.- Pulsar los interruptores en la posición de encendido ON, el número de interruptores será igual a la potencia requerida.

7.- Energizar las barras.

8.- Dejar que el equipo alcance un calentamiento uniforme en toda su estructura durante 30 min., hasta que no varíe la temperatura para tomar el primer dato.

9.- Tomar datos cada 15 min, manteniendo fija la potencia del calentador y variando el caudal con el regulador de flujo.

Luego se procede con la siguiente potencia del calentador.

10.- Al terminar la prueba, primero desenergizar las barras y pulsar interruptores en la posición OFF, seguido apagar motor después de 10 min para

asegurar enfriamiento de calentador.

11.- Ver resultados en las tablas.

b.- Obtención de Presiones

1.- Instalar el tubo de Pitot en el ducto y en el punto que se desea conocer las presiones, controlando su nivel tomando como punto de referencia en la columna de líquido y el factor de escala.

2.- Posicionar el regulador de flujo en la posición completamente abierto.

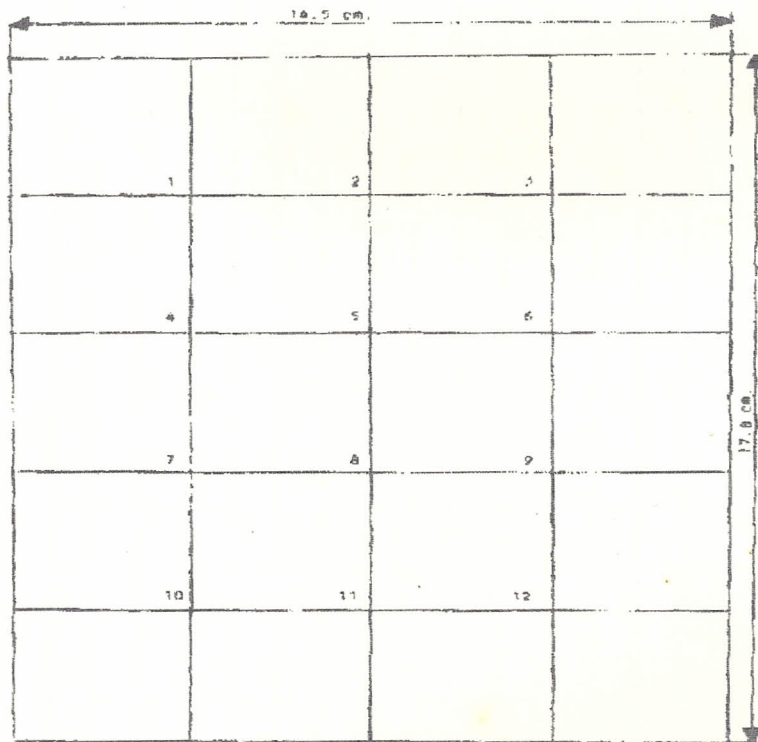
3.- Encender el motor del ventilador.

4.- Deslizar el tubo de Pitot en la posición vertical y horizontal para tener datos en los diferentes puntos de la sección transversal del ducto y obtener un valor promedio, debido a que el fluido es compresible.

5.- Repetir el procedimiento para distintas posiciones del regulador de flujo, para obtener una curva de presión vs. caudal o presiones simplemente.

6.- Ver resultados en tablas.

Fig. 4.2 UBICACION DE Sonda PARA DETERMINAR PRESIONES
SALIDA VENTILADOR - ENTRADA CALDERINCHI



PRESTIONES SALIDA VENTILADOR - ENTRADA CALENTADOR

N.º	Punta Sonda	cmH ₂ O Nivel (e)	cmH ₂ O Pt	cmH ₂ O Pv	Factor	1	Salida T°C Ventilador	RAM Ventil.	Rev. Ho. ir	ca. de	cmH ₂ O Pt	cmH ₂ O Pv	lbs Ft. 72	72	79
1	1	-0.2	11.9	5.7	1	14.1	30.0	3190	3640	26	11.13	3.43	77	72	79
2	2	-0.2	10.0	1.3	1										
3	3	-0.4	9.1	0.5	1										
4	4	-0.2	12.0	4.5	1										
5	5	-0.2	10.5	2.2	1										
6	6	-0.2	9.7	1.2	1										
7	7	-0.2	11.4	3.0	1										
8	8	-0.2	11.5	6.1	1										
9	9	-0.2	11.0	3.4	1										
10	10	-0.2	10.2	1.4	1										
11	11	-0.2	11.5	5.5	1										
12	12	-0.2	12.4	6.0	1										
1	1	-0.2	8.4	0.6	1	13.8	31.0	3150	3640	26	9.37	3.09			
2	2		8.5	0.9											
3	3		8.0	0.4											
4	4		9.5	2.2											
5	5		8.5	1.8											
6	6		7.5	0.8											



TABLA 4.2 PRESIONES SALIDA VENTILADOR - ENTRADA CALENTADOR

...VIENER																
Nº	Punto Sonda	cmH ₂ O Nivel(c)	cmH ₂ O Pt	cmH ₂ O Pv	Factor	Z Arg	Salida °C Ventilador	HPW Ventil.	RPM Motor	Ca cc	cmH ₂ O Pt	cmH ₂ O Pv	tbs F	tbs F	% O ₂	
	7		10.3	4.3												
	8		10.3	4.3												
	9		9.5	3.0												
	10		9.3	5.5												
	11		9.5	5.5												
	12		10.0	3.4												
2	1	-0.2	6.0	0.2	1	13.2	31.6	3150	3640	26	7.1	2.058				
	2		6.2	0.5												
	3		5.7	0.0												
	4		6.6	1.2												
	5		6.3	1.0												
	6		5.6	0.6												
	7		6.5	3.5												
	8		8.0	3.5												
	9		7.1	2.9												
	10		8.5	5.2												
	11		7.2	4.2												
	12		7.0	4.0												

PASAR...

...VIENEN
 TABLA 4.3. PRESIONES SALIDA VENTILADOR - ENTRADA CALENTADOR

N Z	Punto Sonda	cmH2O Nivel(0)	cmH2O Pt	cmH2O Pv	Factor	i Amp	Ssida °C Ventilador	R=V Ventil.	RPM motor	ta °C	cmH2O Pt	cmH2O Pv	lbs F	ton F	0%
3	1	-0.2	5.0	0.1	1	12.9	32.0	3150	364C	26.0	5.975	2.090			
	2		5.2	0.2											
	3		4.9	0.0											
	4		5.4	0.8											
	5		5.7	0.8											
	6		4.8	0.5											
	7		7.2	3.3											
	8		6.7	3.3											
	9		6.0	2.5											
	10		7.0	4.3											
	11		5.9	3.6											
	12		6.0	3.3											
4	1	-0.2	4.1	0.0	1	12.6	33.0	3160	3660	26.5	5.242	1.992			
	2		4.4	0.2											
	3		4.1	0.1											
	4		4.5	0.7											
	5		4.3	0.7											
	6		4.5	0.6											

PASAM...

TABLA 4.4 - PRESIONES SALIDA VENTILADOR - ENTRADA CALENTADOR

A. VIENEN															
B Z	Punto Sonda	cmH ₂ O Nivel (g)	cmH ₂ O Pt	cmH ₂ O Pv	Factor	I Amp	Salida T°C Ventilador	RPM Ventil.	RPM Motor	ta °C	cmH ₂ O Pt	cmH ₂ O Pv	tbs °F	Tbn °F	CM
	7		6.1	2.9											
	8		5.7	3.1											
	9		6.0	3.1											
	10		6.0	3.8											
	11		4.7	2.7											
	12		5.9	3.6											
5	1	-0.2	3.5	0.0	1	12.4	33.2	3160	3660	26.5	4.22	7.533			
	2		3.7	0.1											
	3		3.5	0.0											
	4		3.7	0.4											
	5		3.7	0.6											
	6		3.4	0.3											
	7		5.1	2.6											
	8		4.7	2.7											
	9		4.9	2.1											
	10		5.0	3.2											
	11		3.7	2.0											
	12		3.7	2.0											

PASAN...

TABLA 415.- PRESIONES SALIDA VENTILADOR - ENTRADA CALENTADOR

...VIENER

Nº	Punto Sonde	cmH ₂ O Nivel (g)	cmH ₂ O Pt	cmH ₂ O Pv	Factor	I Amp	Salida T°C Ventilador	RPM Ventil.	RPM Motor	ta °C	cmH ₂ O PE	cmH ₂ O Fv	lbs F	lbh F	CM
6	1	-0.2	2.2	-0.1	1	11.6	33.5	3160	3660	26.5	2.025	2.590			
	2		2.5	0.0											
	3		2.4	-0.2											
	4		2.3	0.2											
	5		2.3	0.4											
	6		2.2	0.1											
	7		3.1	2.0											
	8		3.0	2.0											
	9		2.8	1.6											
	10		2.7	1.9											
	11		1.7	1.0											
	12		1.5	1.3											
7	1	-0.2	1.5	-0.2	1	11.6	34.5	3160	3660	26.5	1.701	0.642			
	2		1.7	0.0											
	3		1.7	-0.2											
	4		1.5	0.2											
	5		1.5	0.2											
	6		1.7	0.1											

PASAN...

TABLA 4.6 PRESIONES SALIDA VENTILADOR - ENTRADA CALENTADOR

VIENEN

K Z	Punto Salida Mjval(c)	cmH ₂ O Pt	cmH ₂ O Pv	Factor corr	2		Salida T°C Ventilador	RPM Ventilador	FPM Motor	ta	cmH ₂ O Pt	cmH ₂ O Pv	Obs	T _{amb} °C
					10.8	14.0								
7		2.0	1.3											
8		1.8	1.3											
9		1.8	1.2											
10		1.3	0.9											
11		1.5	0.0											
12		1.0	0.5											
1	-0.2	2.0	0.6	1	10.8	14.0	16.0	3150	3560	25.5	1.433	0.392		
2		2.0	0.2											
3		1.9	0.0											
6		1.5	0.2											
5		1.1	0.0											
6		0.5	-0.1											
7		1.1	0.6											
8		1.0	0.5											
9		0.5	0.4											
10		1.0	-0.2											
11		0.9	0.4											
12		0.5	0.0											

1.5.5.5.5

Tabla 4.8.-

PRESIONES Y VELOCIDADES SALIDA VENTILADOR - ENTRADA CALENTADOR
VALORES REALES

Z m	\bar{P}_v cmH ₂ O	\bar{P}_t cmH ₂ O	V (P/min)	v (m/min)	A (Pie ²)	Q CFM
0	3.430	11.130	4636.33	1419.78	0.2778	1293.53
1	3.090	9.370	4415.57	1346.72		1227.48
2	2.458	7.100	3939.82	1200.80		1094.48
3	2.090	5.975	3634.39	1107.71		1009.64
4	1.992	5.242	3546.45	1080.91		985.20
5	1.533	4.220	3111.75	948.41		864.44
6	1.025	2.590	2544.18	775.43		706.77
7	0.642	1.783	2013.50	613.53		559.21
8	0.392	1.433	1573.36	479.54		437.08
9	0.275	0.8833	1317.81	401.65		366.09
\bar{P}_t Puig H ₂ O						
0		4.38				
1		3.69				
2		2.80				
3		2.35				
4		2.06				
5		1.66				
6		1.02				
7		0.70				
8		0.56				
9		0.35				

POTENCIA DEL MOTOR DEL VENTILADOR.

De la placa del motor se tiene:

Pot Φ = 10 HP

Consumo de corriente:

230 V/26 A

460 V/13 A

$$\text{Pot } \Phi = V \cdot I \cdot \cos\theta \quad (\text{Fórmula 4.1})$$

De donde se obtiene $\cos\theta$.

$\cos\theta = 0.8$ para ambos casos, que es un valor recomendado por los fabricantes de 0.8 - 0.85.

Con este valor de $\cos\theta$ reemplazo en la fórmula anterior se determina la potencia del motor, resultados reflejados en la tabla 4.9.



Z % cerrado	Motor I (A)	Volt (V)	Cos Φ	Pot
0	14.1	220	0.8	2.48
1	13.8	220	0.8	2.43
2	13.2	220	0.8	2.32
3	12.9	220	0.8	2.27
4	12.6	220	0.8	2.22
5	12.4	220	0.8	2.18
6	11.8	220	0.8	2.08
7	11.4	220	0.8	2.01
8	10.8	220	0.8	1.90
9	10.5	220	0.8	1.85

Tabla 4.9.- Consumo de Energía del motor que impulsa el ventilador.

FIG. 4.3 -UBICACION DE Sonda PARA DETERMINAR PRESIONES
SALIDA DEL CALORÍMETRO

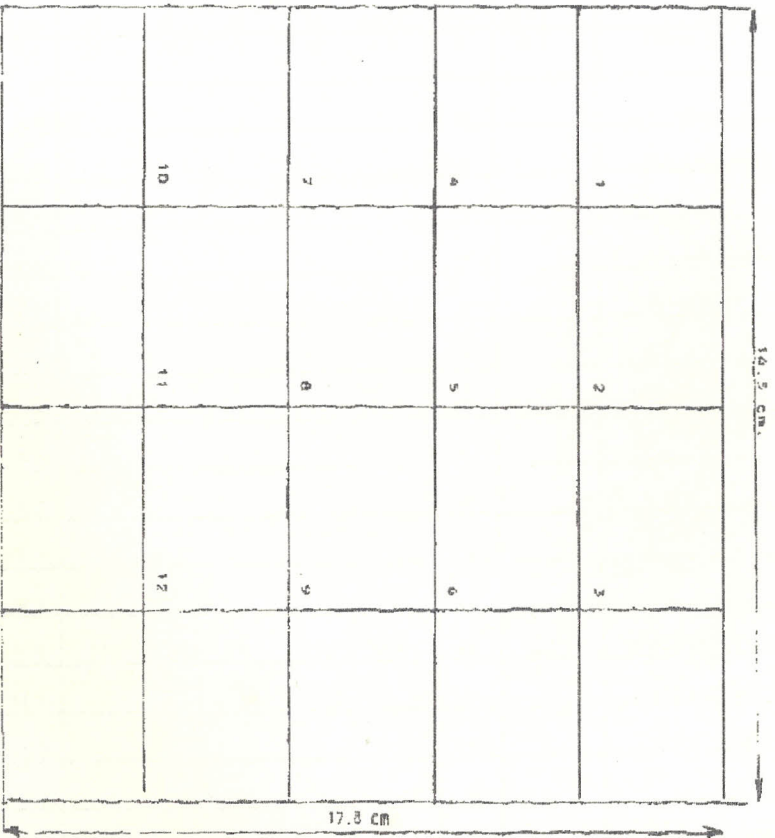


TABLA 4. DATOS DE CAIDA DE PRESION
PRESIONES A LA SALIDA DEL CALENTADOR

Z	Pt	Pv	ta	tbs	lbh	OK	Factor	Punto	Nivel	ZK = C 100% Abierto
motor	cmM20	cmM20	oC	oF	oF					
13.8	11.8	7.4	25	78.0	73	80	0.2	16	-0.2	Prueba # 1
	8.0	5.7						12		
	6.9	2.8						8		Pt1 = 9.63*0.2
	3.8	4.7						4		Pt1 = 1.927
	8.1	4.5						3		Pv1 = 5.583*0.2
	10.1	6.1						7		Pv1 = 1.117
	13.0	5.9						11		
	17.0	12.4						15		
	2.7	-2.0						14		
	8.9	4.7						10		
	6.5	4.1						6		
	12.7	8.7						2		
13.8	22.0	12.2	25	77.5	73	80	0.1	16	0.2	Prueba # 2
	21.3	11.3						12		Pt2 = 20.883*0.1
	21.4	13.2						8		Pt2 = 2.0883
	15.4	6.5						4		
	21.2	12.2						3		Pv2 = 11.52*0.1

POSAN...

TABLA 4.7 DATOS DE CAIDA DE PRESION
PRESIONES A LA SALIDA DEL CALENTADOR

...VIENEN

T motor	Pt cmH2O	Pv cmH2O	ta °C	tba °F	tbn °F	OR	Factor	Punto	Nivel	ZH = 0 100% Abierto
	21.0	11.3						7		$\bar{P}_{v2} = 1.152$
	23.5	13.9						11		
	23.8	14.1						15		
	24.0	14.9						14		
	21.0	11.2						10		$\frac{P_{v1} + P_{v2}}{2} = 2$
	23.0	13.2						6		$\frac{P_{v1} + P_{v2}}{2} = 1.1345$
	21.7	13.0						2		
14	0.9	-0.5	23	76.5	72	61	0.1	14	0.7	Salida deflectores Pruebas
	18.5	16.6					0.1	10	0.7	
	21.5	19.0					0.1	6		$\bar{P}_{v1} = 13.46-0.7$
	5.4	3.0					0.1	2	0.7	= 12.75
	6.5	4.3					0.1	3	0.7	
	20.2	18.0					0.1	7	0.7	$\bar{P}_{v1} = 12.345-0.7$
	15.9	18.0					0.1	11	0.7	= 11.65
	11.5	9.3					0.1	15	0.7	
	12.2	9.4					0.1	16	0.7	
	17.3	14.6					0.1	12	0.7	

PASAN...

TABLA 4.12.- DATOS DE CAIDA DE PRESION
PRESIONES A LA SALIDA DEL CALENTADOR

..VIERNES

I Picos	Pt cmHg	Pv cmHg	fa oC	lbs oF	ton oF	OK	Factor	Punto	Nivel	Zk = C 100% Abierto
	18.4	16.0					0.1	8	0.7	
	9.2	7.2					0.1	4	0.7	
	8.6	6.7					0.1	4	0.7	Salida deflectores Pruebas 2
	19.0	16.7					0.1	6	0.7	Pt1
	18.0	15.6					0.1	12	0.7	14.23-0.7 = 13.53
	12.6	10.0					0.1	16	0.7	Pv2
	9.9	7.8					0.1	15	0.7	12.26-0.7 = 11.56
	19.3	17.4					0.1	11	0.7	
	20.0	17.9					0.1	7	0.7	
	5.6	3.7					0.1	3	0.7	
	5.5	3.2					0.1	2	0.7	
	21.9	19.5					0.1	6	0.7	
	18.2	16.4					0.1	10	0.7	
	2.0	-0.6					0.1	14	0.7	

$Pv1 - Pv2 = 13.14 \pm 0.1$
 $\frac{2}{2} = 1.314$
 $Pt1 + Pt2 = 11.6 \pm 0.1$
 $\frac{2}{2} = 1.16$

Tabla 4.13.-CAUDAL A LA SALIDA DEL CALENTADOR Y VELOCIDAD A LA ENTRADA DE LA CAMARA DE SECADO
 SIENDO P_v A LA SALIDA DEL CALENTADOR 0.575 P_v
 A LA ENTRADA

Z	SALIDA CALENTADOR		ENTRADA A LA CAMARA			
	CAUDAL (CFM)	CAUDAL (m^3/h)	A(m) Ancho	H(m) Altura	Área (m^2)	Velocidad (n/min)
0	743.76	1755.50	26	570	0.1482	142.09
1	705.80	1799.00				134.84
2	629.33	1069.11				120.23
3	580.54	986.22				110.97
4	566.45	962.28				108.22
5	497.05	844.39				94.96
6	406.40	690.40				77.64
7	321.50	546.16				61.42
8	251.32	426.90				48.00
9	210.50	352.60				40.22

FIG. 4.4 - UBICACION DE SONDAS PARA TOMA DE PRESIONES SALIDA SECADOR

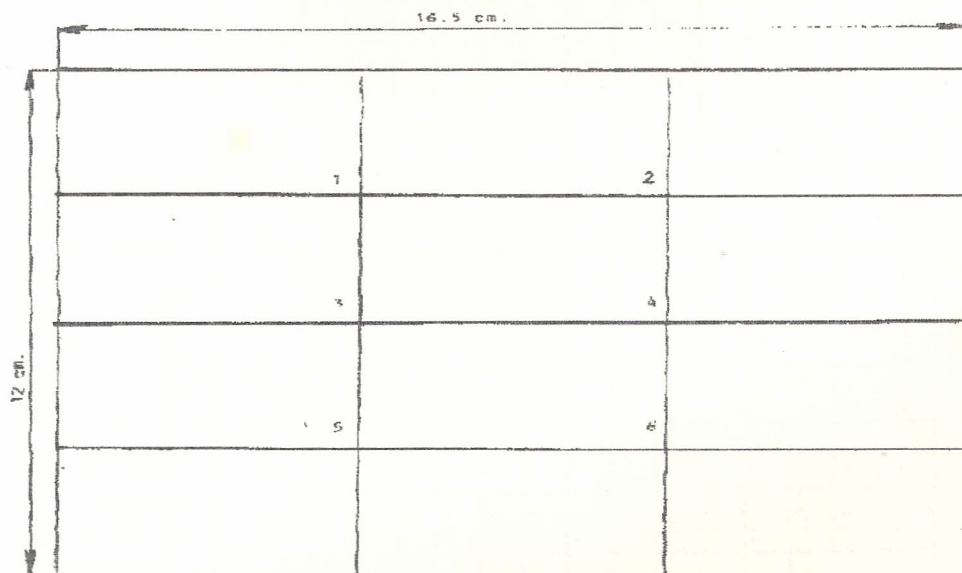


TABLA 4.14. - PRESIONES SALIDA SECADOR.

Z motor	Pbs of	Tbh of	β%	la uc	Pt CmH2O	Pv CmH2O	Nivel (O)	Z x	Punto Sonda	Factor	Observación	
13.3	60.0	74	76	27.0	12.8	5.9	3.1	0	6	0.05	Cámara-Bandejas sin aletas	
					12.8	6.2	3.1	0	4			
					12.7	6.6	3.1	0	2			Pt=5.43*0.03=0.482 CmH2O
					12.7	6.5	3.1	0	1			
					12.7	6.2	3.1	0	3			Pv=3.13*0.05=0.157 CmH2O
					12.7	6.0	3.1	0	5			
13.5	76.5	72	81	24.0	13.7	6.8	2.7	0	6	0.05	Cámara-Bandejas con aletas	
					13.9	7.1			4			
					14.2	5.0			2			Pt=11.3*0.03=0.565 CmH2O
					13.9	7.9			1			Pv=6.633*0.03=0.232 CmH2O
					14.3	7.1			3			
					14.0	7.1			5			
13.2	76.0	72	82	23.5	13.0	6.0	2.6	0	6	0.05	Bandejas con 5mm de espesor de arroz	
					13.7	6.1			4			
					13.2	7.3			2			
					13.3	7.1			1			Pt=10.63*0.03=0.532 CmH2O
					13.3	6.2			3			Pv=1.83*0.03=0.1919 CmH2O
					13.4	5.9			5			
13.6	74.0	70	82	23.0	13.2	6.0	2.5	6	0.05	Cámara con 20mm de capa de arroz		

TABLA 4.15.- PRESIONES SALIDA SECADOR.

I	Tbs OP	Tbh OP	Ta DE	Pt CMH2O	Pv CMH2O	Nivel (O)	Z %	W-10 Sonda	Facto	Observación
				13.3	6.2			4		
				13.3	7.5			2		Pt=0.8*0.05=0.54 CMH2O
				13.4	7.6			1		
				13.3	6.4			3		Pv=4.17*0.03=0.201 CMH2O
				13.3	6.3			3		
13.8	74.0	70.0	23.0	13.3	6.7	2.6	0	6		Cámara con 35% de SECO DE OTTO
				13.4	6.7			4		
				13.4	6.2			2		Pt=10.833*0.05=0.541 65
				13.7	8.1			1		
				13.4	6.5			3		Pv=7.07*0.05=0.353
				13.4	6.2			3		
14.0	75.0	70.3	22.0	17.3	10.2	2.6	0	1	0.05	Cámara sin bandejas
				17.5	9.0			3		
				17.7	8.5			5		Pt=11.8*0.05 CMH2O
				13.5	8.3			6		10.74 CMH2O
				17.4	8.8			4		
				17.8	10.6			2		Pv=6.63*0.05 =0.332 CMH2O

TABLA 4.16 - PRESIONES A LO LARGO DEL SISTEMA

Entrada Calentador
Salida Ventilador
Pt = 11.13 CMH2O
Pv = 5.43 CMH2O
Ps = 7.70 CMH2O = 3P11H2O
Salida Calentador
Pt = 2 CMH2O
Ps = 0.8855 CMH2O
Pv = 1.1345 CMH2O
Salida Deflectores
Pt = 1.314 CMH2O
Pv = 1.160 CMH2O
Ps = 0.154 CMH2O
Cámara sin Bandejas
Pt = 0.740 CMH2O
Pv = 0.332 CMH2O
Ps = 0.408 CMH2O
Cámara con Bandejas Sin Aletas
Pt = 0.482 CMH2O
Pv = 0.157 CMH2O
Ps = 0.325 CMH2O
Cámara con Bandejas y Aletas
Pt = 0.565 CMH2O
Pv = 0.232 CMH2O
Ps = 0.333 CMH2O
Bandejas con 3 mm de capa de grano
Pt = 0.332 CMH2O
Pv = 0.1915 CMH2O
Ps = 0.3405 CMH2O
Bandeja con 20 mm. de grano
Pt = 0.340 CMH2O
Pv = 0.201 CMH2O
Ps = 0.339 CMH2O
Bandeja con 35 mm. de grano
Pt = 0.54165 CMH2O
Pv = 0.35300 CMH2O
Ps = 0.18865 CMH2O

TABLA 4.17.-

CAIDA DE PRESTIONES A LO LARGO DEL SECADOR

Caida de Prestion			
0			
Entrada Calentador		Salida Calentador	
APt = 9.13	cmH2O =	3.594	Pulg H2O
APs = 6.8365	cmH2O =	2.691	Pulg H2O
Salida Calentador		Salida Deflectores	
APt = 0.686	cmH2O =	0.27	Pulg H2O
APs = 0.7115	cmH2O =	0.280	Pulg H2O
CAMARA SIN BANDEJAS			
Salida Calentador		Salida Secador	
APt = 1.26	cmH2O =	0.496	Pulg H2O
APs = 0.4575	cmH2O =	0.180	Pulg H2O
CAMARA SIN BANDEJAS SIN ALTIAS			
Salida Calentador		Salida Secador	
APt = 1.518	cmH2O =	0.598	Pulg H2O
APs = 0.5405	cmH2O =	0.213	Pulg H2O
CAMARA CON BANDEJAS Y ALTIAS			
Salida Calentador		Salida Secador	
APt = 1.4350	cmH2O =	0.5650	Pulg H2O
APs = 0.3323	cmH2O =	0.2096	Pulg H2O
BANDEJAS CON 5 MM DE CAPA DE GRANO			
Salida Calentador		Salida Secador	
APt = 1.468	cmH2O =	0.5780	Pulg H2O
APs = 0.329	cmH2O =	0.2067	Pulg H2O
BANDEJAS CON 20 MM DE CAPA DE GRANO			
Salida Calentador		Salida Secador	
APt = 1.4600	cmH2O =	0.5750	Pulg H2O
APs = 0.5265	cmH2O =	0.2073	Pulg H2O
BANDEJAS CON 85 MM DE CAPA DE GRANO			
Salida Calentador		Salida Secador	
APt = 1.4584	cmH2O =	0.5740	Pulg H2O
APs = 0.67685	cmH2O =	0.2665	Pulg H2O

FIG. 4.5.- UBICACION TERMOCUPLAS SALIDA CALENTADOR

PRUEBA No. 2 y No. 3

	T10	Asbesto
	T7	Tm1
	T2	Tm2
	T1	Tm2
	T3	Tm3
	T4	Tm4
	T5	Tm5
	T6	
	T11	Tm8
	T8	Asbesto

pared de arena y asbesto
pared de arena y asbesto

TABLA 418.- TEMPERATURAS A LA SALIDA CALENTADOR

Z %	I (Amp) Motor	I (Amp) Calentador	Ta °C	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	T5 °C	T6 °C	T7 °C	T8 °C	T9 °C	T10 °C	T11 °C	T12 °C	Y °C	NR
0	11.0	16.9	29	47	45	56	51	53	52		34	31	38	40	32	50.7	9
1	11.1	16.9	29	52	51	63	56	58	57		36	32	40	42	34	56.2	9
2	11.1	16.9	29	54	53	67	60	61	59		37	33	42	43	35	59.0	9
3	11.0	17.0	30	56	55	71	63	64	60		37	33	43	44	35	60.5	9
4	11.1	16.7	28	66	60	72	65	66	62	88	38	34	43	45	36	62.2	9
5	11.1	16.7	26	80	81	74	72	68	69	98	38	34	44	46	36	71.7	9
6	11.1	16.5	26	85	85	77	75	70	72	60	40	34	53	58	37	74.9	9
7	11.1	16.3	26	96	93	87	80	83	68	61						81.4	9
8	11.1	16.4	25	115	113	104	93	92	77	70						95.9	9
9	11.0	16.5	26	125	124	116	105	110	86	89						106.4	9

TABLA 4.19.- EFICIENCIA DEL CALENTADOR

Z %	Voltaje	I (Amp) Calentador	Caudal (m ³ /hr)	Temperaturas t _{esc} (°C) t _{sac} (°C)		Densidad ρ _f (Kg/m ³)	Calor específico CP(Kcal/Kg-°C)	QR (Kcal/hr)	QI (Kcal/hr)	N %
0	240	16.7	1263.50	30.0	50.70	0.854	0.2426	5418.69	6942.0	78.0
1	240	16.9	1199.00	31.0	56.20	0.854	0.2426	6259.91	7025.2	89.0
2	240	16.9	1069.11	31.6	59.00	0.860	0.2426	6111.70	7025.1	87.0
3	240	17.0	986.22	32.0	61.50	0.860	0.2425	6067.45	7066.8	85.9
4	240	16.7	962.28	33.0	65.28	0.854	0.2436	6537.72	6942.0	94.2
5	240	17.0	844.39	33.2	71.73	0.868	0.2423	6842.51	7066.8	96.8
6	240	16.5	690.40	33.5	74.90	0.870	0.2420	6017.77	6859.0	87.8
7	240	16.3	546.16	34.5	81.40	0.874	0.2420	5417.76	6776.0	80.0
8	240	16.4	426.90	36.0	95.90	0.883	0.2422	5468.75	6817.0	80.0
9	240	16.5	337.60	37.0	106.40	0.890	0.2420	5345.18	6859.0	77.9

WCP_{rAT}	$\frac{\sqrt{5}VLIL}{860}$	$\frac{QR}{QI}$
-------------	----------------------------	-----------------

BIBLIOTECA GONZALO ZEVALLLOS
POLITECNICA DEL LITORAL
F. I. M. C. P.



FIG. 4.6- UBICACION DE LAS TERMOCUPLAS A LA ENTRADA DE LA CAMARA

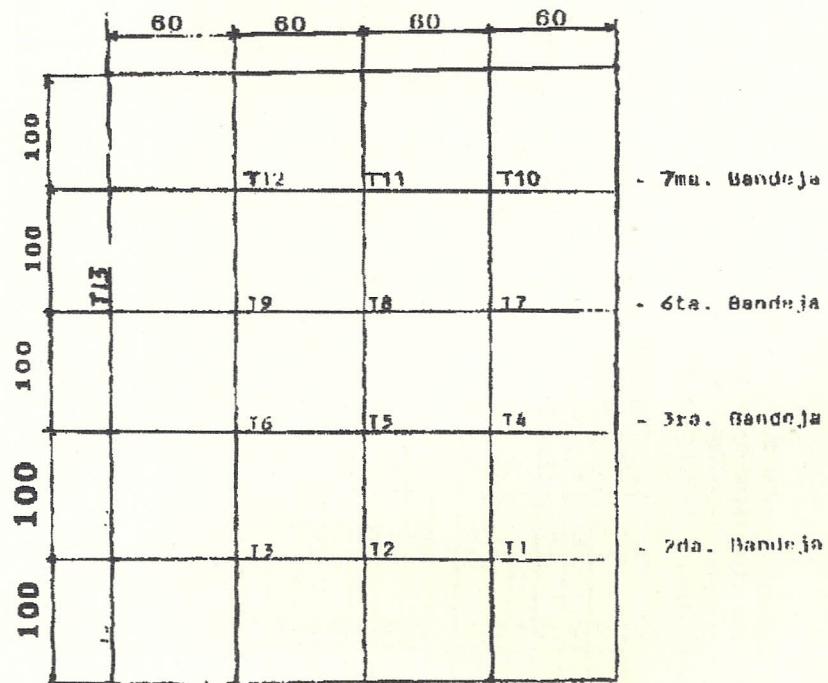


TABLA 4.20

DATOS TOMADOS EL 13 DE JULIO DE 1992

Tiempo después de la min.	Z % En tra da Vent.	No resis ten - cias	I Amp Calenta dor	T Ambiente °C	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	
					°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
TEMPERATURAS EN LA CAMARA DE SECADO																			
25	25	0	9	16.7	28	50	49	47	45	44	43	45	46	45	48	48	47	50.5	51.5
30	53	0	9	16.7	28	51	50	48	45	44	44	45	46	46	49	49	47	50.5	51.5
35	83	0	9	16.7	28	52	50	48	47	45	45	47	47	47	50	50	48	50.5	51.5
40	118	0	9	16.7	28	51	50	48	47	45	45	47	47	47	50	50	48	50.5	51.5
45	128	1	9	16.9	28	52	51	49	47	46	45	47	47	46	50	50	47	52.0	52.0
50	138	2	9	16.9	28	53	51	49	48	46	46	48	48	47	51	51	48	54.0	54.0
55	148	2	9	16.9	28	54	52	50	49	47	46	50	49	49	52	51	50	54.0	54.0
60	161	2	9	16.9	28	55	53	50	50	48	47	49	49	50	51	51	50	54.0	54.0
65	177	2	9	16.9	28	56	54	51	51	49	48	49	48	48	49	49	49	54.0	54.0
70	194	2	9	16.9	28	56	53	50	50	48	48	49	49	49	50	50	51	54.0	54.0
75	209	3	9	17.0	26	57	52	50	51	48	48	50	51	52	52	51	51	55.0	55.0
80	219	4	9	16.7	26	58	53	51	52	50	50	52	53	54	54	53	53	58.0	58.0
85	229	5	9	16.7	28	61	56	54	55	53	53	55	56	57	57	56	56	60.0	59.5
90	239	6	9	16.5	28	64	59	56	58	56	55	57	58	60	61	60	60	63.0	64.0
95	249	7	9	16.3	28	68	65	62	60	58	58	62	63	64	59	68	64	68.0	66.0
100	259	8	9	16.2	29	78	74	70	68	66	65	71	72	73	78	76	75	75.0	76.0
105	279	9	9	16.5	29	87	81	78	80	77	73	77	79	78	86	84	79	80.0	83.0

Una vez alcanzado la temperatura estable, con la succión del ventilador 100% abierto se procede a tomar datos de las temperaturas a los 25 min. llegando a un estado completamente estable a los 55 min.; luego se veía la entrada de aire en el ventilador dejando 10 min. en que alcanza el estado estable para esta entrada y se procede a tomar datos de temperatura; así sucesivamente para los otros destinos, sin dejar que el equipo regrese a la temperatura ambiente.

TABLA 4.21-DATOS TOMADOS EL 13 DE JULIO DE 1992

t	2	No	Imp	1	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	
																			min
TEMPERATURAS EN LA CÁMARA DE SECADO																			
18	18	0	6	11.5	29	48	47	45	44	44	43	43	44	44	47	47	45	48	46
40	56	1	6	11.6	29	50	48	47	46	45	45	46	46	45	48	49	46	48	50
10	68	2	6	11.6	29	51	48	46	47	46	45	46	46	47	48	48	48	50	51
10	78	3	6	11.6	29	52	49	48	47	46	46	48	47	46	50	50	47	51	52
10	88	4	6	11.5	29	53	49	48	49	48	47	48	48	49	50	50	50	53	53
10	98	5	6	11.4	30	56	53	51	52	50	49	50	50	51	52	52	52	55	56
10	108	6	6	11.3	30	58	54	52	54	53	52	53	53	54	55	55	55	58	58
10	118	7	6	11.2	30	63	60	58	59	57	56	59	59	57	63	62	58	60	62
15	135	8	6	11.3	30	69	65	62	64	62	61	64	64	63	67	66	66	66	67
18	151	9	6	11.3	30	76	73	70	71	69	67	71	70	69	74	72	67	71	72
15	15	0	3	5.8	30	43	42	42	41	41	42	41	41	42	43	42	42	44	43
10	25	1	3	5.8	30	44	43	43	42	41	41	41	41	41	43	43	43	45	45
10	35	2	3	5.8	30	44	43	42	42	42	42	42	42	42	43	43	43	45	45
10	45	3	3	5.8	30	46	44	43	43	42	42	42	42	43	43	43	43	46	46
10	55	4	3	5.8	30	46	45	44	44	43	43	44	44	44	45	45	45	47	47
10	65	5	3	5.8	30	47	46	45	45	44	44	44	44	45	46	46	46	48	48
10	75	6	3	5.9	30	49	48	47	46	47	46	47	47	48	48	48	48	50	50
10	85	7	3	5.9	30	52	50	49	49	48	47	48	48	48	50	50	50	52	52
10	95	8	3	6.0	30	54	53	51	52	50	50	51	51	52	53	53	53	54	54
10	105	9	3	6.0	30	57	57	55	56	54	53	54	55	56	58	57	56	57	57

temperatura entrada a la cámara de secado:



TABLA 4.22-TEMPERATURAS PROMEDIO A LA ENTRADA DE LA CÁMARA EN VACÍO

L %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NR	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Ta(°C)	28.0	28.0	28.0	26.0	26.0	28.0	28.0	28.0	29.0	29.0
Tes(°C)	48.2	48.4	50.9	51.4	53.2	56.0	59.0	63.8	72.4	80.0
Tsa(°C)	51.5	52.0	54.0	55.0	58.0	59.5	64.0	68.0	76.0	83.0
Calentador T sup	16.7	16.9	16.9	17.0	16.7	16.7	16.5	16.3	16.4	16.5
NR	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Ta(°C)	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Tes(°C)	45.46	46.85	47.38	48.23	49.50	51.80	54.31	59.31	64.80	70.80
Tsa(°C)	48.00	50.00	51.00	52.00	53.00	56.00	58.00	62.00	67.00	72.00
Calentador T sup	11.50	11.60	11.60	11.60	11.50	11.40	11.30	11.20	11.30	11.30
NR	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ta(°C)	42.0	42.4	42.7	43.2	44.4	45.5	47.8	49.3	52.1	55.9
Tes(°C)	42.0	42.4	42.7	43.2	44.4	45.5	47.8	49.3	52.1	55.9
Tsa(°C)	43.0	45.0	45.0	46.0	47.0	48.0	50.0	52.0	54.0	57.0
Calentador T sup	5.8	5.8	5.8	5.8	5.9	5.8	5.9	5.9	6.0	6.0

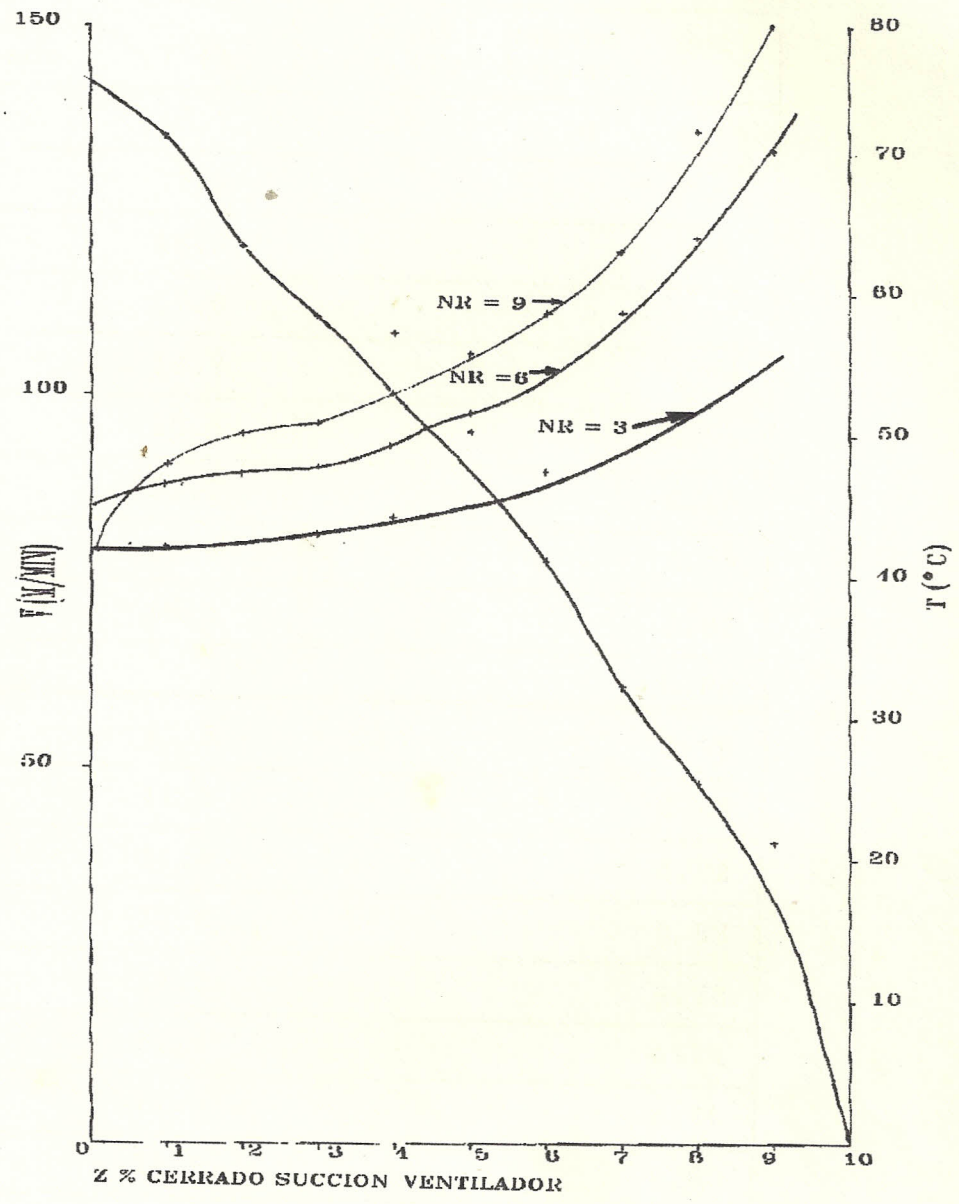


Fig. 4.7. Curvas de Velocidades y temperaturas de aire a la entrada de la cámara de secado vs. % Z cerrado succión ventilador.

Fig. 4.7.- Curvas de Velocidades y temperaturas de aire a la entrada de la cámara de secado vs. % Z cerrado succión ventilador.

Z % cerrado	I (A)	Volt (V)	Número Resist.	Pot
0	16.7	240	9	6.49
1	16.9			7.03
2	16.9			7.03
3	17.0			7.07
4	16.7			6.94
5	16.5			6.94
6	16.3			6.86
7	16.4			6.78
8	16.5			6.82
9				6.86
0	11.5	240	6	4.78
1	11.6			4.82
2	11.6			4.82
3	11.6			4.82
4	11.5			4.78
5	11.4			4.74
6	11.3			4.70
7	11.2			4.66
8	11.3			4.70
9	11.3			4.70

Tabla 4.23.- Consumo de energía del sistema de calentamiento de aire.

Z % cerrado	I (A)	Volt (V)	Número Resist.	Pot
0	5.8	240	3	2.41
1	5.8			2.41
2	5.8			2.41
3	5.8			2.41
4	5.8			2.41
5	5.8			2.41
6	5.9			2.45
7	5.9			2.45
8	6.0			2.49
9	6.0			2.49

Tabla 4.23 B- Tabla de consumo de energía del sistema de calentamiento del aire.

*PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO EN VACIO CON
RECIRCULACION DE AIRE.*

Para esta prueba se conecta la descarga del secador con la succión del ventilador mediante un ducto flexible. (Ver foto 4.2)

El flujo de aire circundante se mezcla tomando un porcentaje de aire caliente procedente desde el secador y un porcentaje de aire fresco del medio ambiente, la ubicación de las termocuplas para la toma de temperaturas es la misma que la prueba sin recirculación. Ver tabla 4.24.

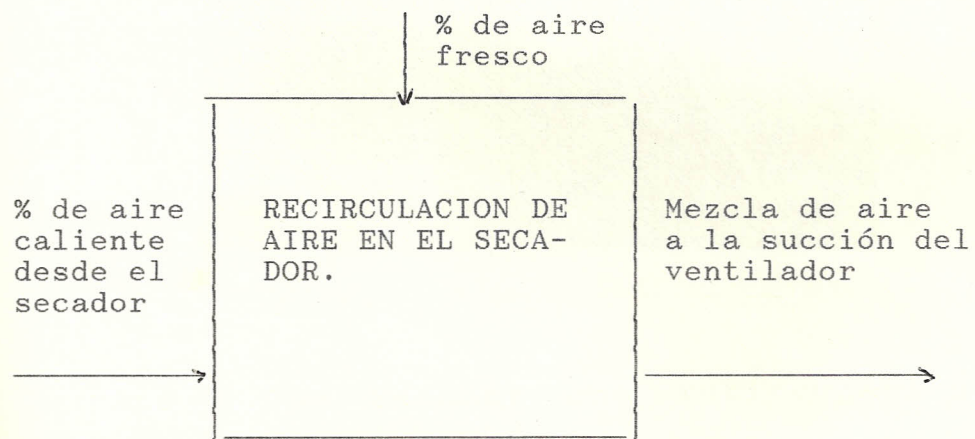


Fig. 4.8.- Sistema de recirculación de aire.

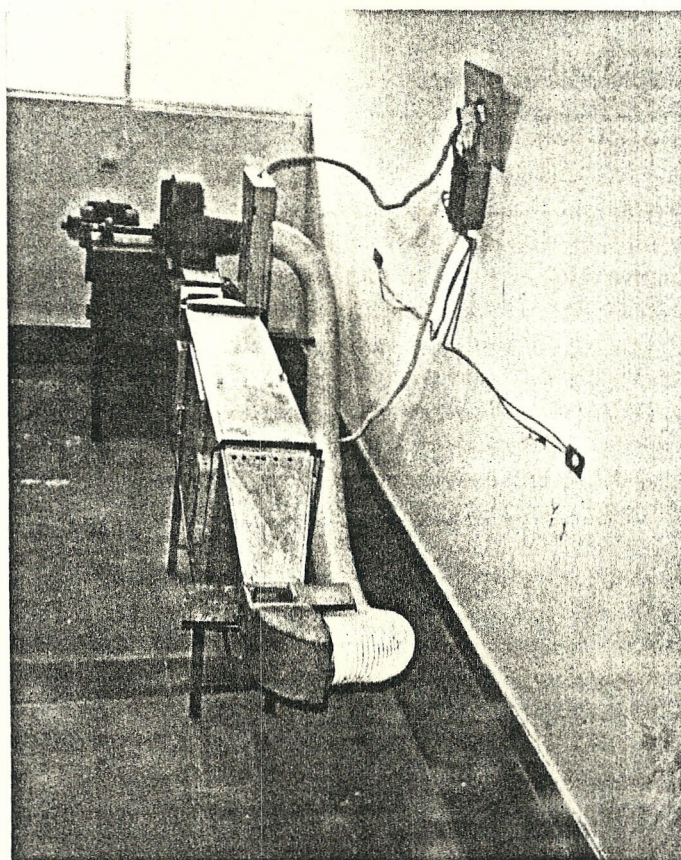


Foto 4.2.- Secador con recirculación de aire.

VENTA	TEMPERATURA	TEMPERATURAS EN LA CAMARA DE SECADO										TEMPERATURAS CON REGULACION DE AIRE	% de aire	CALLE	PRESION	HUMIDIDAD	I (h-h)	HORA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
10	15	98.6	98.5	98.4	98.3	98.2	98.1	98.0	97.9	97.8	97.7	97.6	97.5	97.4	97.3	97.2	97.1	97.0	96.9	96.8	96.7	96.6	96.5	96.4	96.3	96.2	96.1	96.0	95.9	95.8	95.7	95.6	95.5	95.4	95.3	95.2	95.1	95.0	94.9	94.8	94.7	94.6	94.5	94.4	94.3	94.2	94.1	94.0	93.9	93.8	93.7	93.6	93.5	93.4	93.3	93.2	93.1	93.0	92.9	92.8	92.7	92.6	92.5	92.4	92.3	92.2	92.1	92.0	91.9	91.8	91.7	91.6	91.5	91.4	91.3	91.2	91.1	91.0	90.9	90.8	90.7	90.6	90.5	90.4	90.3	90.2	90.1	90.0	89.9	89.8	89.7	89.6	89.5	89.4	89.3	89.2	89.1	89.0	88.9	88.8	88.7	88.6	88.5	88.4	88.3	88.2	88.1	88.0	87.9	87.8	87.7	87.6	87.5	87.4	87.3	87.2	87.1	87.0	86.9	86.8	86.7	86.6	86.5	86.4	86.3	86.2	86.1	86.0	85.9	85.8	85.7	85.6	85.5	85.4	85.3	85.2	85.1	85.0	84.9	84.8	84.7	84.6	84.5	84.4	84.3	84.2	84.1	84.0	83.9	83.8	83.7	83.6	83.5	83.4	83.3	83.2	83.1	83.0	82.9	82.8	82.7	82.6	82.5	82.4	82.3	82.2	82.1	82.0	81.9	81.8	81.7	81.6	81.5	81.4	81.3	81.2	81.1	81.0	80.9	80.8	80.7	80.6	80.5	80.4	80.3	80.2	80.1	80.0	79.9	79.8	79.7	79.6	79.5	79.4	79.3	79.2	79.1	79.0	78.9	78.8	78.7	78.6	78.5	78.4	78.3	78.2	78.1	78.0	77.9	77.8	77.7	77.6	77.5	77.4	77.3	77.2	77.1	77.0	76.9	76.8	76.7	76.6	76.5	76.4	76.3	76.2	76.1	76.0	75.9	75.8	75.7	75.6	75.5	75.4	75.3	75.2	75.1	75.0	74.9	74.8	74.7	74.6	74.5	74.4	74.3	74.2	74.1	74.0	73.9	73.8	73.7	73.6	73.5	73.4	73.3	73.2	73.1	73.0	72.9	72.8	72.7	72.6	72.5	72.4	72.3	72.2	72.1	72.0	71.9	71.8	71.7	71.6	71.5	71.4	71.3	71.2	71.1	71.0	70.9	70.8	70.7	70.6	70.5	70.4	70.3	70.2	70.1	70.0	69.9	69.8	69.7	69.6	69.5	69.4	69.3	69.2	69.1	69.0	68.9	68.8	68.7	68.6	68.5	68.4	68.3	68.2	68.1	68.0	67.9	67.8	67.7	67.6	67.5	67.4	67.3	67.2	67.1	67.0	66.9	66.8	66.7	66.6	66.5	66.4	66.3	66.2	66.1	66.0	65.9	65.8	65.7	65.6	65.5	65.4	65.3	65.2	65.1	65.0	64.9	64.8	64.7	64.6	64.5	64.4	64.3	64.2	64.1	64.0	63.9	63.8	63.7	63.6	63.5	63.4	63.3	63.2	63.1	63.0	62.9	62.8	62.7	62.6	62.5	62.4	62.3	62.2	62.1	62.0	61.9	61.8	61.7	61.6	61.5	61.4	61.3	61.2	61.1	61.0	60.9	60.8	60.7	60.6	60.5	60.4	60.3	60.2	60.1	60.0	59.9	59.8	59.7	59.6	59.5	59.4	59.3	59.2	59.1	59.0	58.9	58.8	58.7	58.6	58.5	58.4	58.3	58.2	58.1	58.0	57.9	57.8	57.7	57.6	57.5	57.4	57.3	57.2	57.1	57.0	56.9	56.8	56.7	56.6	56.5	56.4	56.3	56.2	56.1	56.0	55.9	55.8	55.7	55.6	55.5	55.4	55.3	55.2	55.1	55.0	54.9	54.8	54.7	54.6	54.5	54.4	54.3	54.2	54.1	54.0	53.9	53.8	53.7	53.6	53.5	53.4	53.3	53.2	53.1	53.0	52.9	52.8	52.7	52.6	52.5	52.4	52.3	52.2	52.1	52.0	51.9	51.8	51.7	51.6	51.5	51.4	51.3	51.2	51.1	51.0	50.9	50.8	50.7	50.6	50.5	50.4	50.3	50.2	50.1	50.0	49.9	49.8	49.7	49.6	49.5	49.4	49.3	49.2	49.1	49.0	48.9	48.8	48.7	48.6	48.5	48.4	48.3	48.2	48.1	48.0	47.9	47.8	47.7	47.6	47.5	47.4	47.3	47.2	47.1	47.0	46.9	46.8	46.7	46.6	46.5	46.4	46.3	46.2	46.1	46.0	45.9	45.8	45.7	45.6	45.5	45.4	45.3	45.2	45.1	45.0	44.9	44.8	44.7	44.6	44.5	44.4	44.3	44.2	44.1	44.0	43.9	43.8	43.7	43.6	43.5	43.4	43.3	43.2	43.1	43.0	42.9	42.8	42.7	42.6	42.5	42.4	42.3	42.2	42.1	42.0	41.9	41.8	41.7	41.6	41.5	41.4	41.3	41.2	41.1	41.0	40.9	40.8	40.7	40.6	40.5	40.4	40.3	40.2	40.1	40.0	39.9	39.8	39.7	39.6	39.5	39.4	39.3	39.2	39.1	39.0	38.9	38.8	38.7	38.6	38.5	38.4	38.3	38.2	38.1	38.0	37.9	37.8	37.7	37.6	37.5	37.4	37.3	37.2	37.1	37.0	36.9	36.8	36.7	36.6	36.5	36.4	36.3	36.2	36.1	36.0	35.9	35.8	35.7	35.6	35.5	35.4	35.3	35.2	35.1	35.0	34.9	34.8	34.7	34.6	34.5	34.4	34.3	34.2	34.1	34.0	33.9	33.8	33.7	33.6	33.5	33.4	33.3	33.2	33.1	33.0	32.9	32.8	32.7	32.6	32.5	32.4	32.3	32.2	32.1	32.0	31.9	31.8	31.7	31.6	31.5	31.4	31.3	31.2	31.1	31.0	30.9	30.8	30.7	30.6	30.5	30.4	30.3	30.2	30.1	30.0	29.9	29.8	29.7	29.6	29.5	29.4	29.3	29.2	29.1	29.0	28.9	28.8	28.7	28.6	28.5	28.4	28.3	28.2	28.1	28.0	27.9	27.8	27.7	27.6	27.5	27.4	27.3	27.2	27.1	27.0	26.9	26.8	26.7	26.6	26.5	26.4	26.3	26.2	26.1	26.0	25.9	25.8	25.7	25.6	25.5	25.4	25.3	25.2	25.1	25.0	24.9	24.8	24.7	24.6	24.5	24.4	24.3	24.2	24.1	24.0	23.9	23.8	23.7	23.6	23.5	23.4	23.3	23.2	23.1	23.0	22.9	22.8	22.7	22.6	22.5	22.4	22.3	22.2	22.1	22.0	21.9	21.8	21.7	21.6	21.5	21.4	21.3	21.2	21.1	21.0	20.9	20.8	20.7	20.6	20.5	20.4	20.3	20.2	20.1	20.0	19.9	19.8	19.7	19.6	19.5	19.4	19.3	19.2	19.1	19.0	18.9	18.8	18.7	18.6	18.5	18.4	18.3	18.2	18.1	18.0	17.9	17.8	17.7	17.6	17.5	17.4	17.3	17.2	17.1	17.0	16.9	16.8	16.7	16.6	16.5	16.4	16.3	16.2	16.1	16.0	15.9	15.8	15.7	15.6	15.5	15.4	15.3	15.2	15.1	15.0	14.9	14.8	14.7	14.6	14.5	14.4	14.3	14.2	14.1	14.0	13.9	13.8	13.7	13.6	13.5	13.4	13.3	13.2	13.1	13.0	12.9	12.8	12.7	12.6	12.5	12.4	12.3	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.3	10.2	10.1	10.0	9.9	9.8	9.7	9.6	9.5	9.4	9.3	9.2	9.1	9.0	8.9	8.8	8.7	8.6	8.5	8.4	8.3	8.2	8.1	8.0	7.9	7.8	7.7	7.6	7.5	7.4	7.3	7.2	7.1	7.0	6.9	6.8	6.7	6.6	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7	3.6	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6	-1.7	-1.8	-1.9	-2.0	-2.1	-2.2	-2.3	-2.4	-2.5	-2.6	-2.7	-2.8	-2.9	-3.0	-3.1	-3.2	-3.3	-3.4	-3.5	-3.6	-3.7	-3.8	-3.9	-4.0	-4.1	-4.2	-4.3	-4.4	-4.5	-4.6	-4.7	-4.8	-4.9	-5.0	-5.1	-5.2	-5.3	-5.4	-5.5	-5.6	-5.7	-5.8	-5.9	-6.0	-6.1	-6.2	-6.3	-6.4	-6.5	-6.6	-6.7	-6.8	-6.9	-7.0	-7.1	-7.2	-7.3	-7.4	-7.5	-7.6	-7.7	-7.8	-7.9	-8.0	-8.1	-8.2	-8.3	-8.4	-8.5	-8.6	-8.7	-8.8	-8.9	-9.0	-9.1	-9.2	-9.3	-9.4	-9.5	-9.6	-9.7	-9.8	-9.9	-10.0	-10.1	-10.2	-10.3	-10.4	-10.5	-10.6	-10.7	-10.8	-10.9	-11.0	-11.1	-11.2	-11.3	-11.4	-11.5	-11.6	-11.7	-11.8	-11.9	-12.0	-12.1	-12.2	-12.3	-12.4	-12.5	-12.6	-12.7	-12.8	-12.9	-13.0	-13.1	-13.2	-13.3	-13.4	-13.5	-13.6	-13.7	-13.8	-13.9	-14.0	-14.1	-14.2	-14.3	-14.4	-14.5	-14.6	-14.7	-14.8	-14.9	-15.0	-15.1	-15.2	-15.3	-15.4	-15.5	-15.6	-15.7	-15.8	-15.9	-16.0	-16.1	-16.2	-16.3	-16.4	-16.5	-16.6	-16.7	-16.8	-16.9	-17.0	-17.1	-17.2	-17.3	-17.4	-17.5	-17.6	-17.7	-17.8	-17.9	-18.0	-18.1	-18.2	-18.3	-18.4	-18.5	-18.6	-18.7	-18.8	-18.9	-19.0	-19.1	-19.2	-19.3	-19.4	-19.5	-19.6	-19.7	-19.8	-19.9	-20.0	-20.1	-20.2	-20.3	-20.4	-20.5	-20.6	-20.7	-20.8	-20.9	-21.0	-21.1	-21.2	-21.3	-21.4	-21.5	-21.6	-21.7	-21.8	-21.9	-22.0	-22.1	-22.2	-22.3	-22.4	-22.5	-22.6	-22.7	-22.8	-22.9	-23.0	-23.1	-23.2	-23.3	-23.4	-23.5	-23.6	-23.7	-23.8	-23.9	-24.0	-24.1	-24.2	-24.3	-24.4	-24.5	-24.6	-24.7	-24.8	-24.9	-25.0	-25.1	-25.2	-25.3	-25.4	-25.5	-25.6	-25.7	-25.8	-25.9	-26.0	-26.1	-26.2	-26.3	-26.4	-26.5	-26.6	-26.7	-26.8	-26.9	-27.0	-27.1	-27.2	-27.3	-27.4	-27.5	-27.6	-27.7	-27.8	-27.9	-28.0	-28.1	-28.2	-28.3	-28.4	-28.5	-28.6	-28.7	-28.8	-28.9	-29.0	-29.1	-29.2	-29.3	-29.4	-29.5	-29.6	-29.7	-29.8	-29.9	-30.0	-30.1	-30.2	-30.3	-30.4	-30.5	-30.6	-30.7	-30.8	-30.9	-31.0	-31.1	-31.2	-31.3	-31.4	-31.5	-31.6	-31.7	-31.8	-31.9	-32.0	-32.1	-32.2	-32.3	-32.4	-32.5	-32.6	-32.7	-32.8	-32.9	-33.0	-33.1	-33.2	-33.3	-33.4	-33.5	-33.6	-33.7	-33.8	-33.9	-34.0	-34.1	-34.2	-34.3	-34.4	-34.5	-34.6	-34.7	-34.8	-34.9	-35.0	-35.1	-35.2	-35.3	-35.4	-35.5	-35.6	-35.7	-35.8	-35.9	-36.0	-36.1	-36.2	-36.3	-36.4	-36.5	-36.6	-36.7	-36.8	-36.9	-37.0	-37.1	-37.2	-37.3	-37.4	-37.5	-37.6	-37.7	-37.8	-37.9	-38.0	-38.1</

PRUEBA DE SECADO CON PRODUCTO

Se procede de la siguiente manera:

1.- Verificar que los instrumentos estén calibrados y los necesarios, con el objetivo de evitar contratiempos y pérdida de la muestra.

2.- Ubicar los termómetros de mercurio en los visores de los lados laterales y a la salida de la cámara de secado, para obtener datos de temperatura bulbo seco y bulbo húmedo, previamente llenar de agua destilada los recipientes que humedecen la mecha que cubre el bulbo.

3.- Pulsar los interruptores en la posición ON, según la potencia requerida.

4.- Seleccionar en la grafica el flujo de aire según la temperatura de secado. En base a esto posicionar el regulador de flujo en la succión del ventilador.

UNA VEZ QUE EL EQUIPO ESTA LISTO:

5.- Pesar la muestra a secar.

6.- Depositar la muestra en partes iguales en las nueve bandejas.

7.- Medir el espesor de la capa de grano

en diferentes puntos para obtener un valor promedio.

8.- Determinar la Humedad inicial de la muestra.

9.- Ubicar las termocuplas dentro de la capa de grano, en las bandejas que se considere necesario.

10.- Cerrar la cámara de secado dejando abierta la descarga.

11.- Encender el motor del ventilador.

12.- Energizar las barras del calentador.

13.- Tomar datos de temperaturas en la cámara de secado y en el ambiente, temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo en la cámara de secado y en el ambiente, amperaje del motor y calentador.

14.- A los 30 min. en que se considera haber alcanzado estado estable en el calentamiento de la estructura de la cámara de secado, se repite el paso 13, tomando datos de muestras de producto en cada bandeja y determinando la humedad tanto a la salida como a la entrada ó en las partes que se considere necesario a lo largo de una bandeja.

15.- Repetir los pasos 13 y 14 cada 15 o 30 minutos según el caso, hasta cuando se

considere la humedad final requerida para el producto.

16.- Sacar las bandejas con producto desde la cámara antes de apagar el equipo y, pesar la muestra individual e inmediatamente si el producto es higroscópico.

17.- Desenergizar las barras del calentador y apagar el motor del ventilador a los 10 min.

En las fotos 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, se presenta la secuencia que sigue el producto desde el momento que está listo para la cosecha y llega al secador, para obtener la humedad final requerida para su almacenamiento.



Foto 4.3.- Plantación de arroz en estado de cosecha.

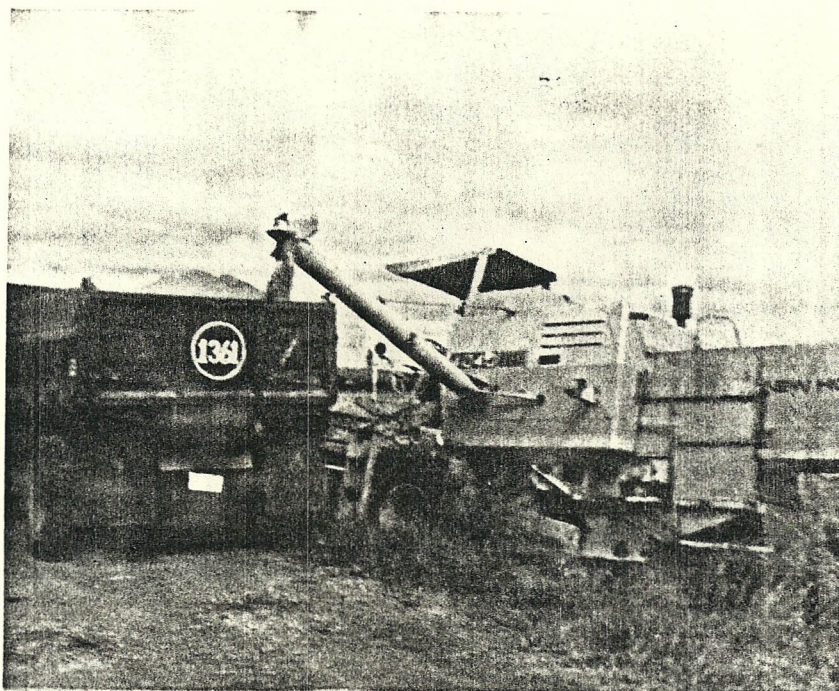


Foto 4.4.- Arroz cosechado y listo para ser transportado al secadero.

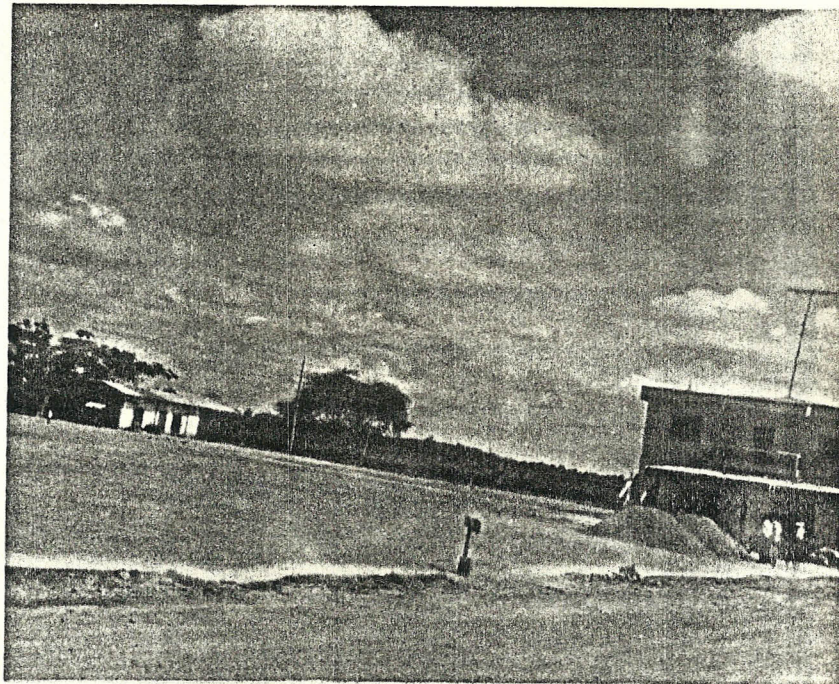


Foto 4.5.- Secadero de arroz aprovechando la energía natural del sol durante el verano.

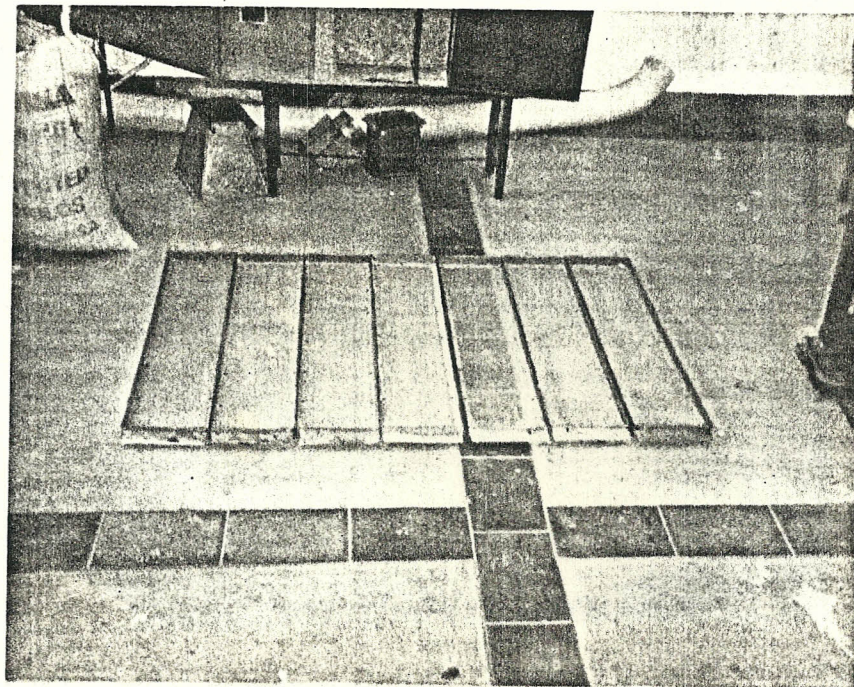


Foto 4.6 Bandejas en que reposa el producto durante las pruebas de secado.

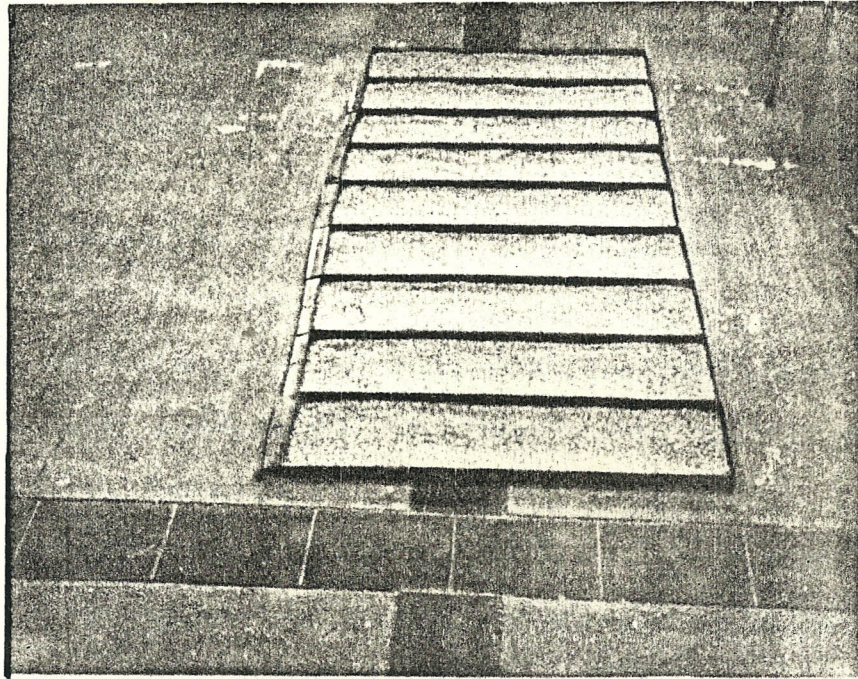


Foto 4.7.- Bandejas con producto a secar.

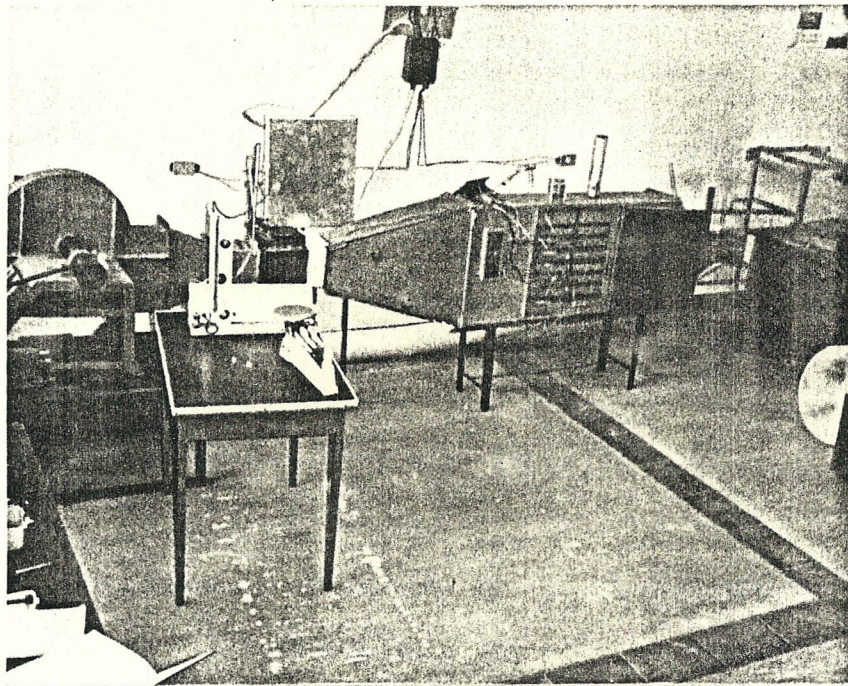


Foto 4.8.- Secador e instrumentos durante pruebas de secado.

PRUEBA DE SECADO # 1

CONDICIONES:

- Número de resistencias : 9
- Temperatura de entrada en la cámara de secado bajando en vacío es igual a 60 grados Celsius.
- Porcentaje de apertura en la succión del ventilador 40% Z = 60 % cerrado.
- Humedad de arroz al momento de cosecha 20 % base húmeda.
- Humedad a las 20 horas después de la cosecha permaneciendo enmarcado durante la noche \approx 19.9 %.
- Hora de inicio 10:52
- Temperatura ambiente $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Velocidad del aire a la entrada de la cámara $V = 77.64 \text{ m/min.}$
- Potencia del calentador : 7.07 Kw.
- Espesor de la capa de grano : 20 mm.

TABLA 4.25.-
PRUEBA DE SECADO No. 1

I (Amp) Calentador	I (Amp) Motor	T (°C) Salida Calentador	T (°C) Entrada de cámara				T (°C) en el grano				T (°C) salida secador	Muestra #		
			T3	T4	T5	T13	T6	T7	T8	T9			T11	T12
												TSS		
17	12	67	54	58	64	58	36	52	36	42	36	54	50	1
17	12	71	59	61	63	60	37	53	36	50	36	63	57	2
17	12	72	60	63	61	63	42	52	42	54	50	57	57	3
15.8	12	72	62	62	61	61	42	57	53	55	45	61	59	4
17	12	73	55	63	63	62	60	58	50	61	49	66	59	5
17	12	74	54	63	63	62	47	65	51	64	52	67	63	6
17	12	69	60	66	65	63	43	51	53	56	45	61	62	7
17	12	71	66	64	65	64	58	53	48	58	53	60	64	8
17	12	72	54	66	66	63	59	66	58	65	64	68	64	9

TABLA 4.26.- HUMEDAD DEL AIRE AMBIENTE

PRUEBA NO. 1

Hora	t _{bh} (°C)	t _{bs} (°C)	H %	Muestra
11:46	22.8	25.6	80	1
12:00	23.3	26.4	78	2
12:36	23.3	26.7	76	3
13:07	23.9	27.8	74	4
13:47	23.3	27.2	72	5
14:20	23.9	28.3	70	6
14:54	24.2	27.9	74	7
15:24	24.4	28.3	74	8
16:06	23.0	26.7	74	9

HUMEDAD DEL AIRE SALIDA DEL SECADOR

Hora	t _{bs} (°C)	t _{bh} (°C)	H %	Muestra
11:46	53	33	25	1
12:00	57	33	21	2
12:36	58	35	20	3
13:07	60	35	18	4
13:47	61	35	17	5
14:20	64	36	15	6
14:54	64	36	15	7
15:24	61	35	17	8
16:06	64	36	15	9

El instrumento necesita agregar agua en el bulbo húmedo debido a que la mecha se seca rápidamente.
Se moja el bulbo y se instala 10 min. antes de realizar la prueba.

TABLA 4.27.-HUMEDADES (BASE HUMEDA) EN LAS BANDEJAS
PRUEBA No.1

Muestra	t (min)	Hora	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	\bar{B}
0	0	10:52	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
1	48	11:40	16	16	16	14	12	10.2	12	14	14	13.8
2	78	12:10	12	16	12	11	10	8.8	10	10	12	11.3
3	108	12:40	11.9	12	12	10	6	8	8	8	8	9.5
4	138	13:10	11	12	11	8	6	6	8	8	8	8.7
5	168	13:40	10	10	10	7	6	6	6	6.5	8	7.7
6	198	14:10	8	9	8	6	6	6	6	6	6.5	6.8
7	228	14:40	8	8	8	6	6	5	5	5.5	6	6.4
8	258	15:10	7.8	7.5	7	5.5	3	4.5	5	5	5.7	5.9
9	258	15:40	6.5	6.5	6	5	4.5	4	4	4	5	5

TABLA 4.28.-CANTIDAD DE AGUA RETIRADA DURANTE LOS
288 (min)

Bandeja #	Peso Inicial (Kg)	Velocidad del aire (m/min)	T en el grano (°C)	Peso final (Kg)	Agua retirada (Kg)
B1	2.4159	77.64	47.0	2.0	0.4159
B2	2.4159	77.64	47.8	2.1	0.3159
B3	2.4159	77.64	43.4	2.1	0.3159
B4	2.4159	77.64	58.9	2.0	0.4159
B5	2.4159	77.64		2.1	0.3159
B6	2.4159	77.64	61.9	2.0	0.4159
B7	2.4159	77.64	56.7	2.1	0.3159
B8	2.4159	77.64		2.1	0.3159
EP	2.4159	77.64		2.2	0.2159
TOTAL	21.7430			18.7	3.0431

DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE SECADO.

$$V_s = (P_i - P_w) / t \text{ (Fórmula 4.2)}$$

t = Intervalo de tiempo
(tiempo inicial - tiempo en que se tomó el peso P_w)

P_i = Peso inicial de la muestra (kg)

P_w = Peso a determinado tiempo (kg)

Con esto se determina la cantidad de agua extraída en ese intervalo de tiempo de acuerdo a la fórmula 3.28:

$$W_{H_2O} = Mgh \left(\frac{W_a - W_w}{100 - W_w} \right)$$

kg H₂O

De lo que se deduce que:

$$W = \frac{100 * X}{100 + X} \text{ (Fórmula 4.3)}$$

$$V_s = W_{H_2O} / t$$

FACTOR DE UTILIZACION DE CALOR

El factor de utilización de calor indica cuan eficiente la capa de grano utiliza el aire de secado.

TABLA 4.29- VELOCIDAD DE SECADO.
PRUEBA No. 1

Tiempo (min)	Humedad promedio		Velocidad de secado (kgH ₂ O/hr)
	BASE SECA	BASE HUMEDA	
0	20.0	16.7	1.4125
48	13.8	12.15	1.4125
78	11.3	10.15	1.2200
108	9.5	8.70	1.0580
138	8.7	8.00	0.8940
168	7.7	7.15	0.7990
198	6.8	6.40	0.7250
228	6.4	6.00	0.6510
258	5.9	5.60	0.5950
288	5.0	4.80	0.5660



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F. I. M. C. P.

VELOCIDAD DE SECADO

1 - B1

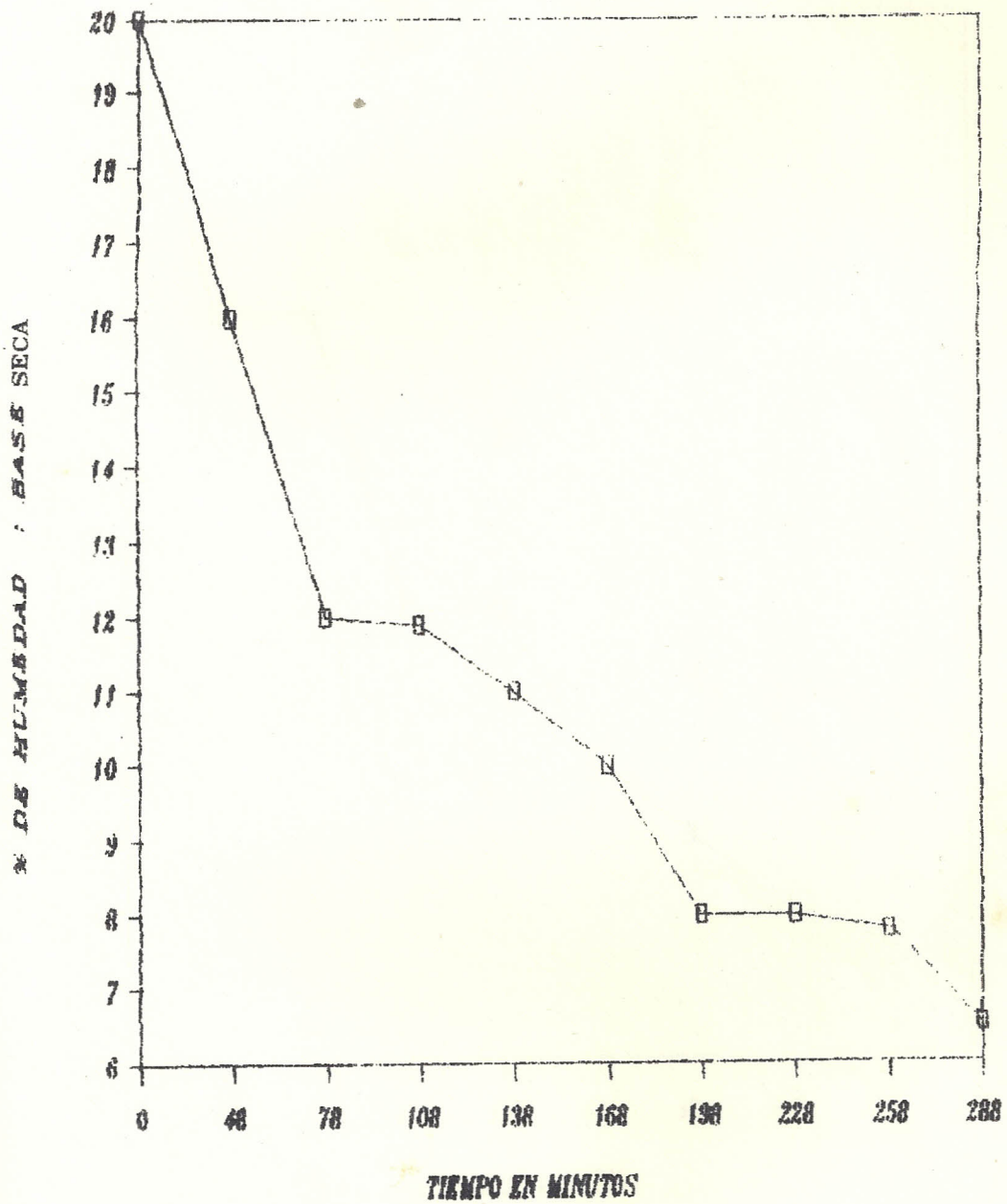


Fig. 4.9.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

1- B2

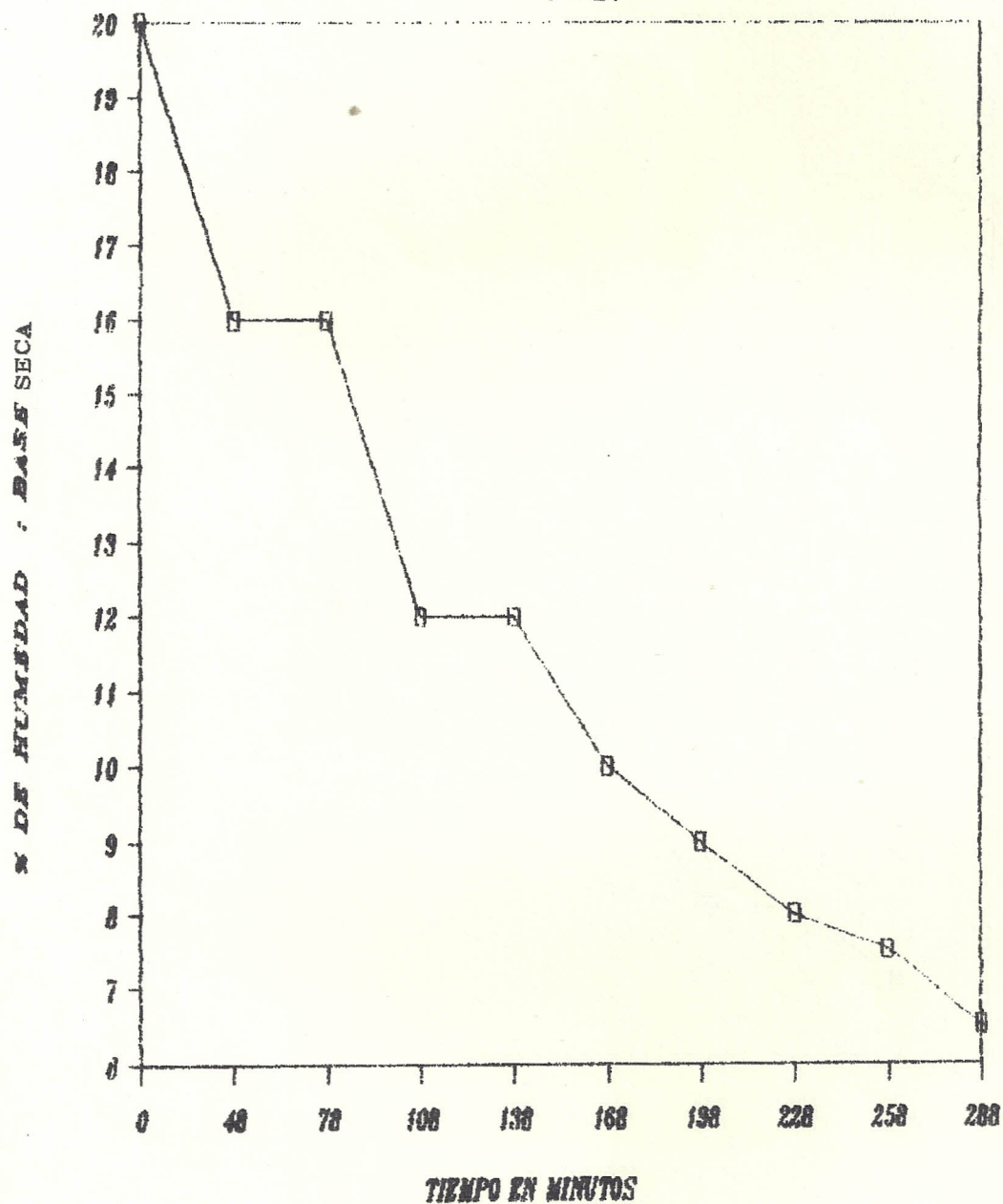


Fig. 4.10.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

1 - B3

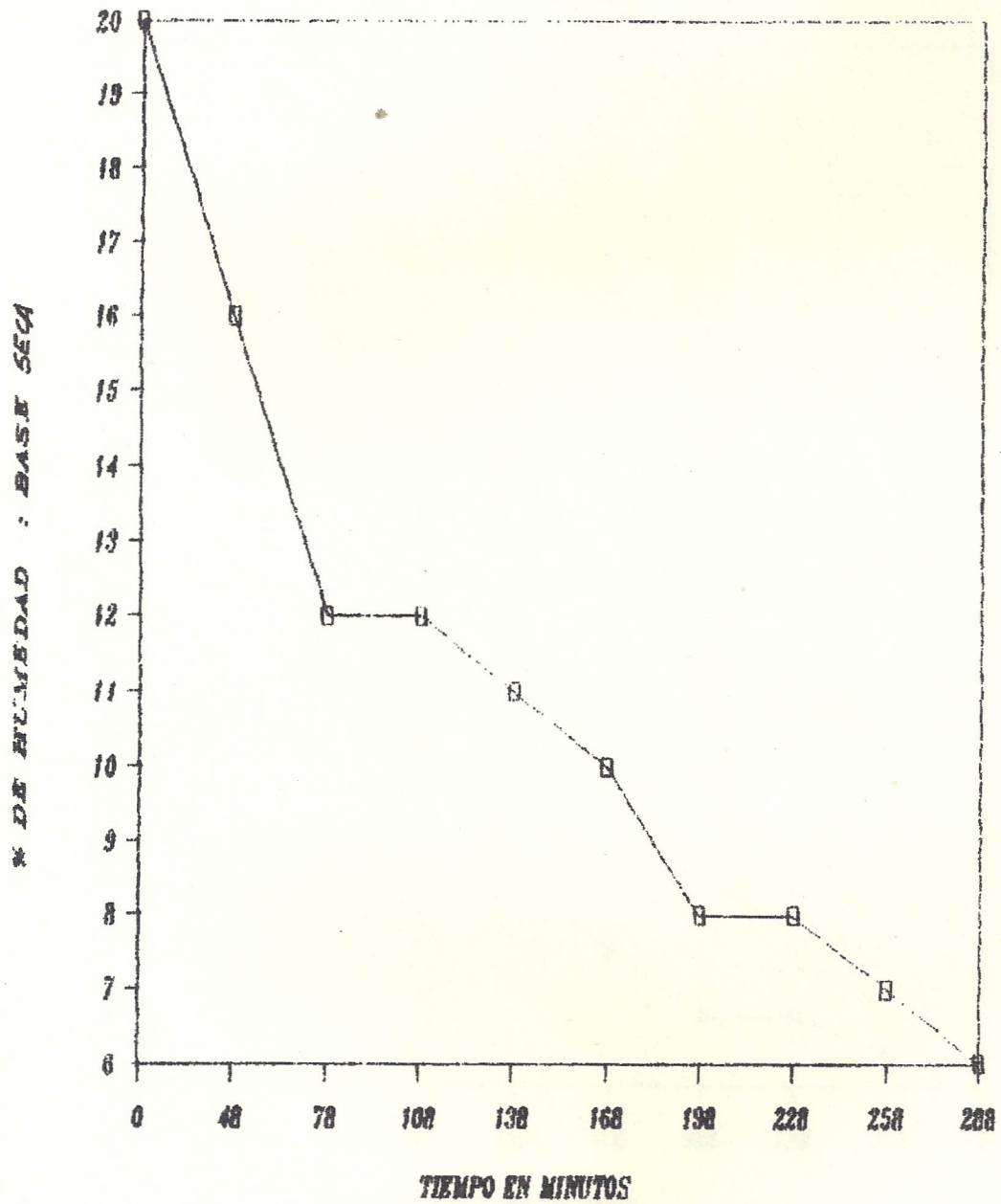


Fig. 4.11.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

1- B4

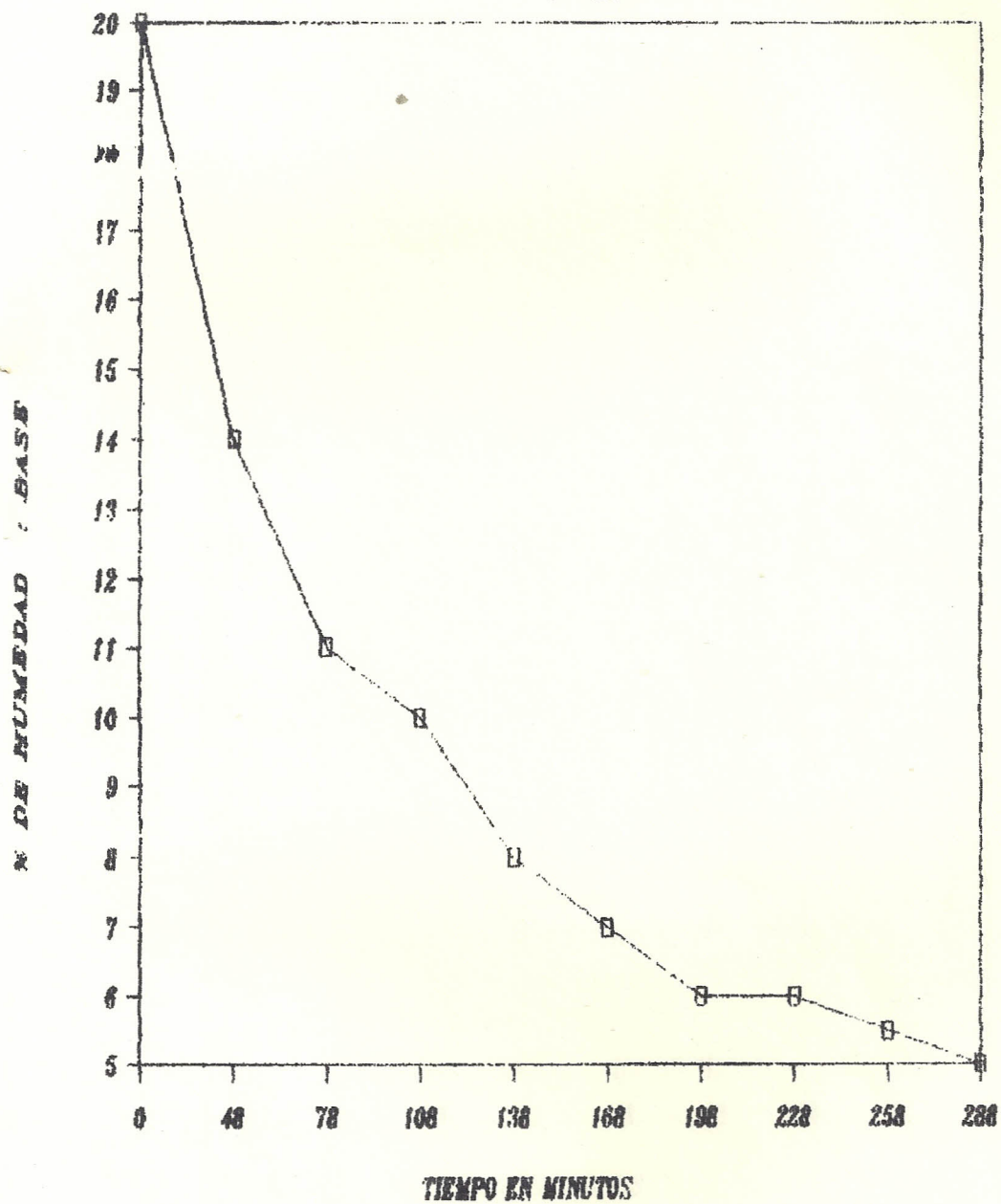


Fig. 4.12.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

1 - B5

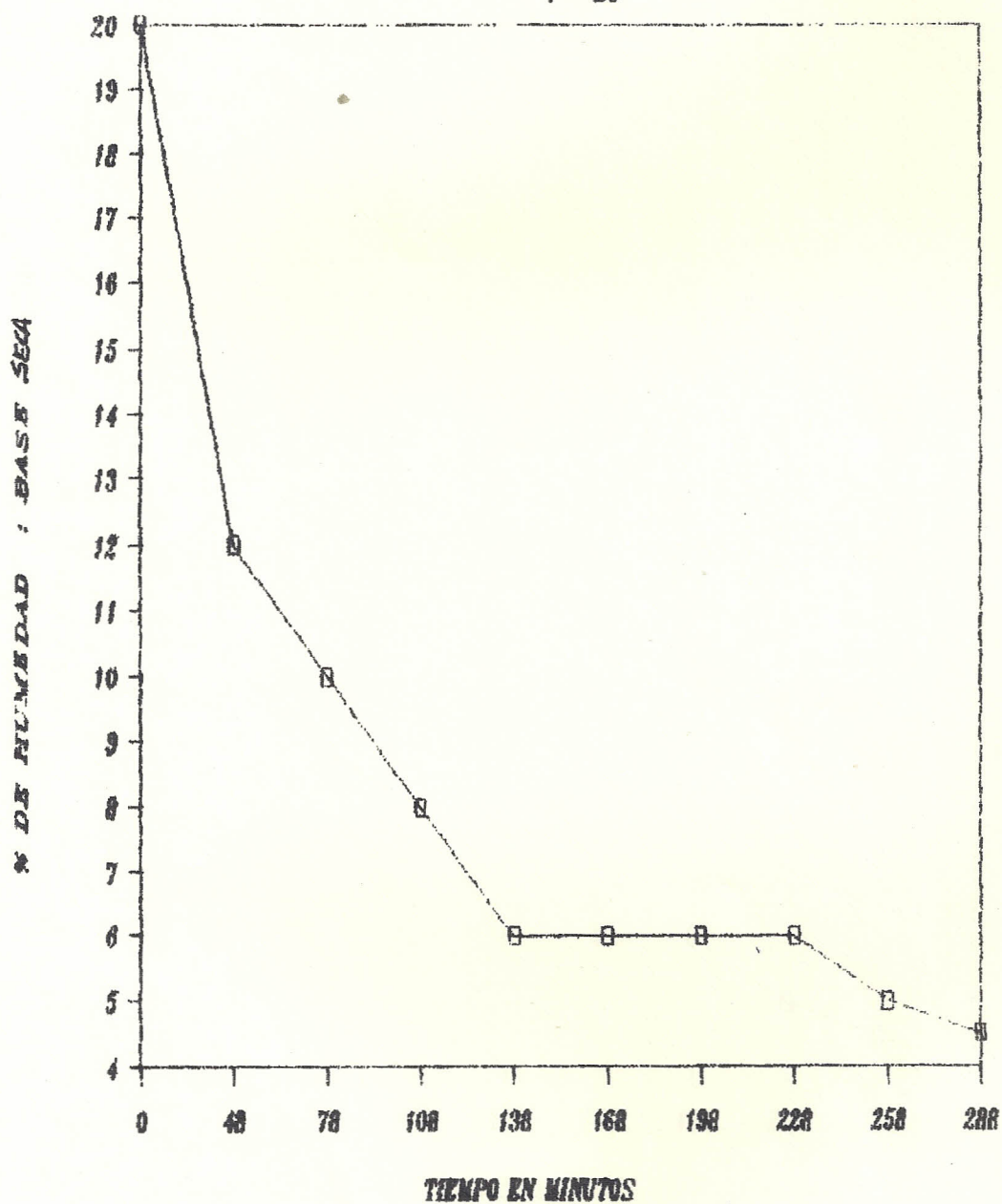


Fig. 4.13.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

1 - 86

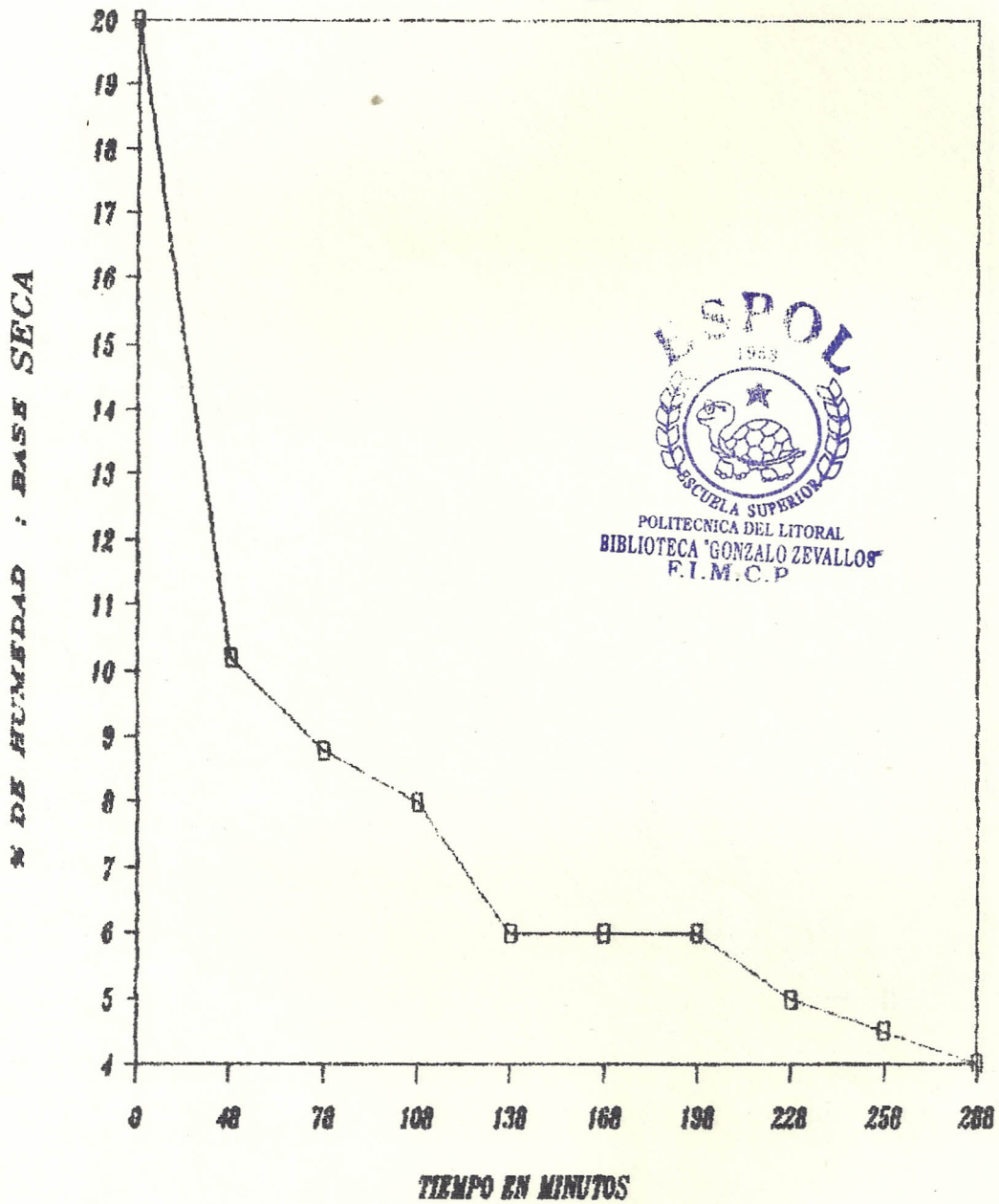


Fig. 4.14.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

1 - B7

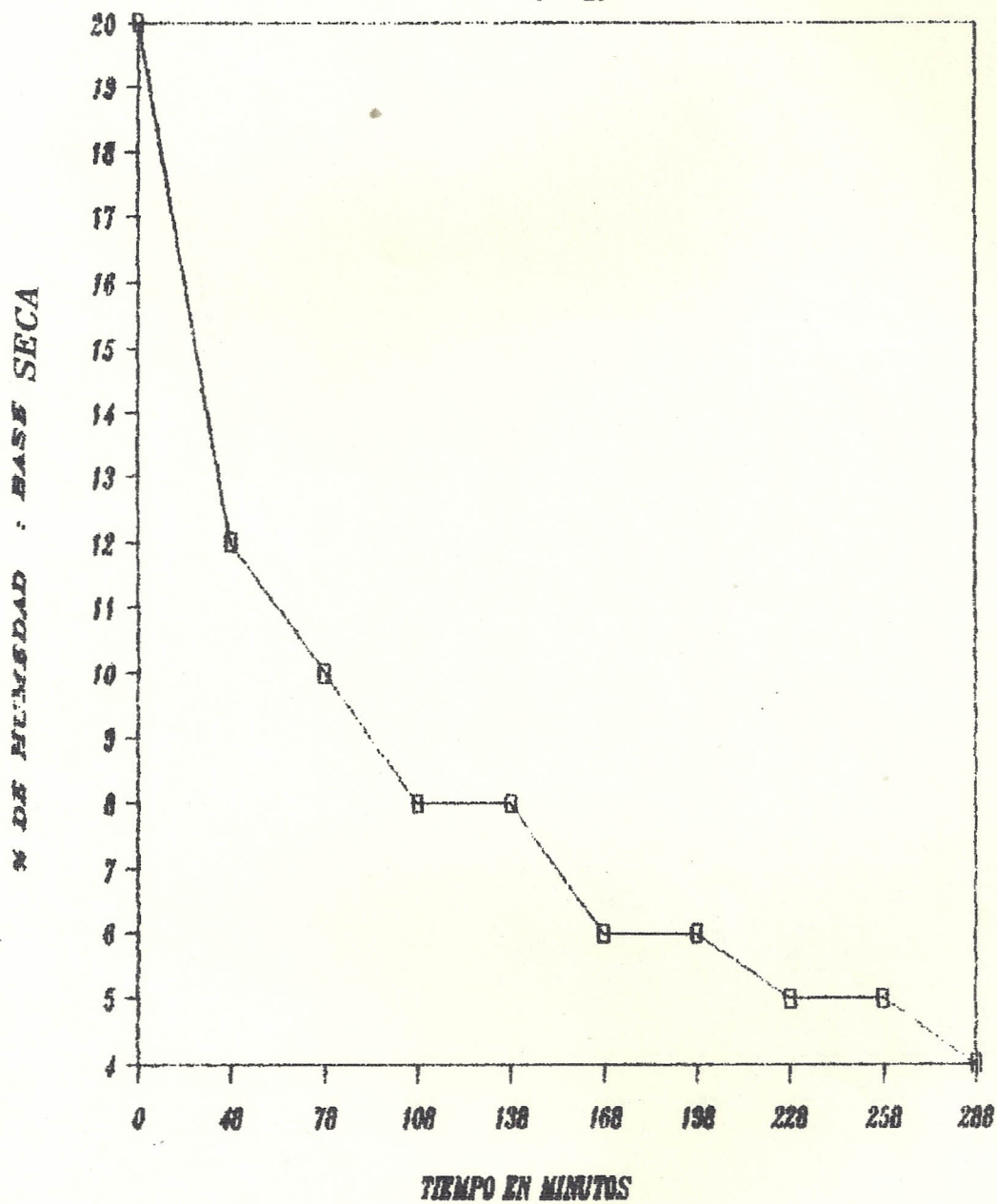


Fig. 4.15.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

1- 88

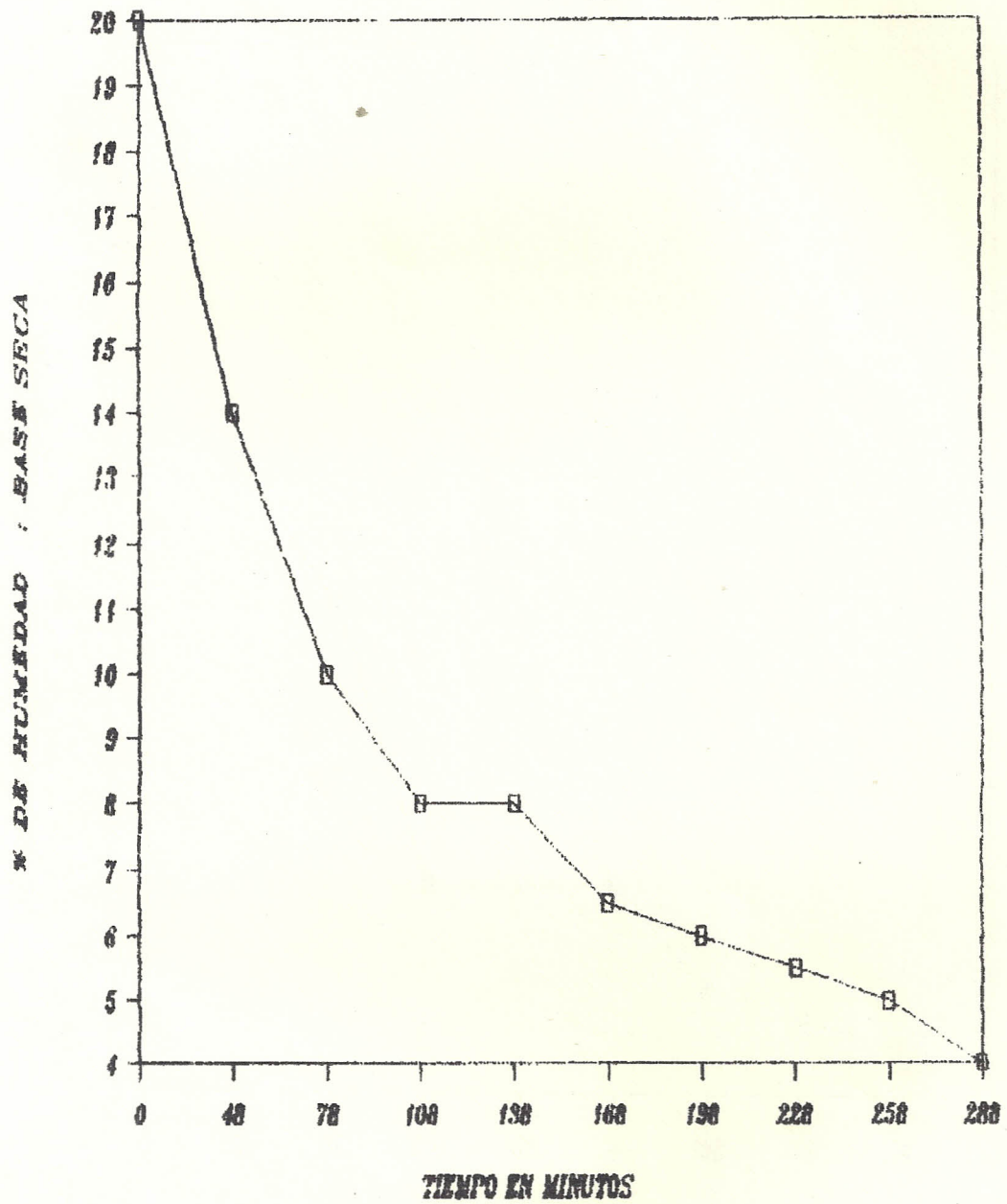


Fig. 4.16.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

1 - B9

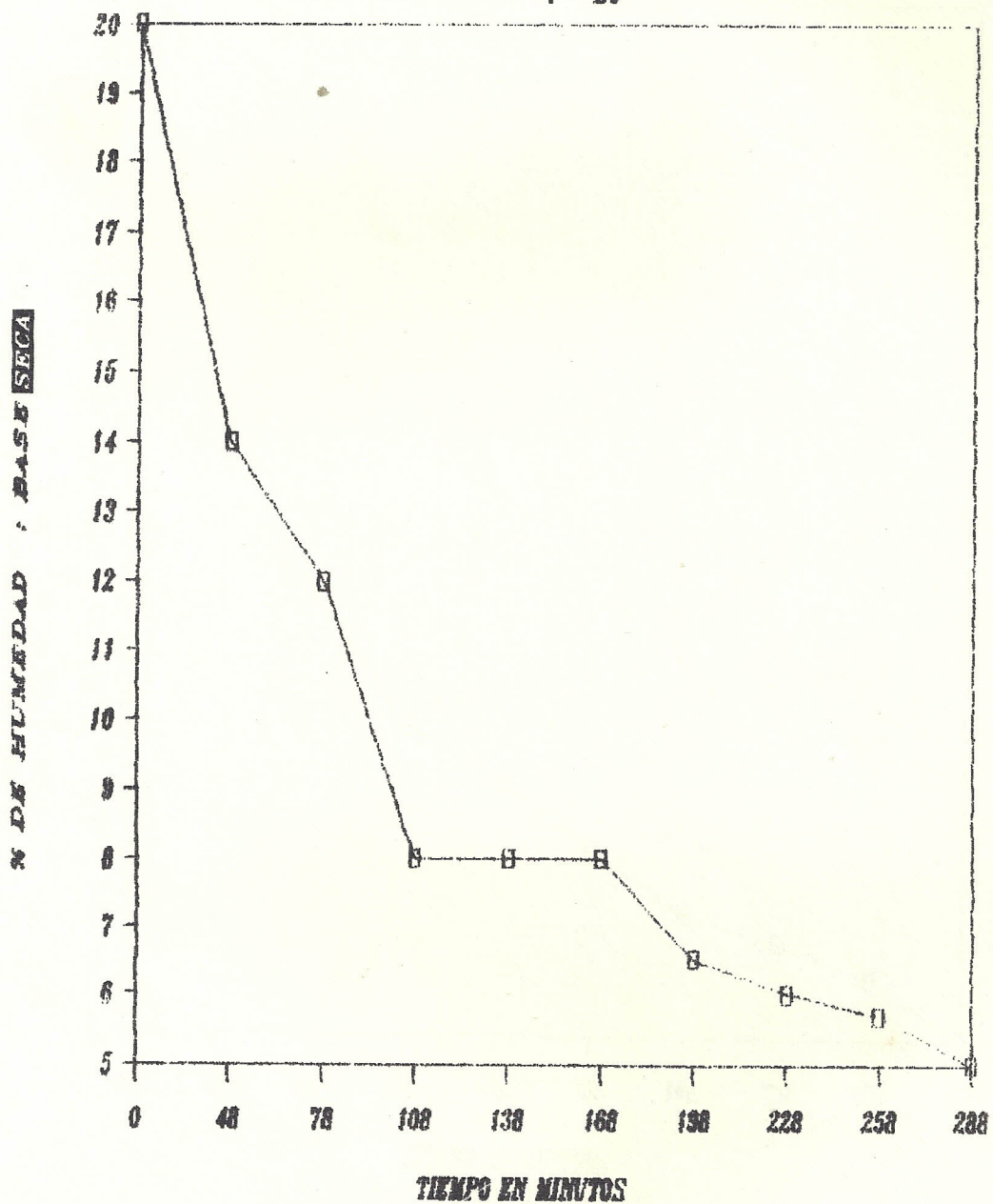


Fig. 4.17.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

1 - B - PROMEDJO

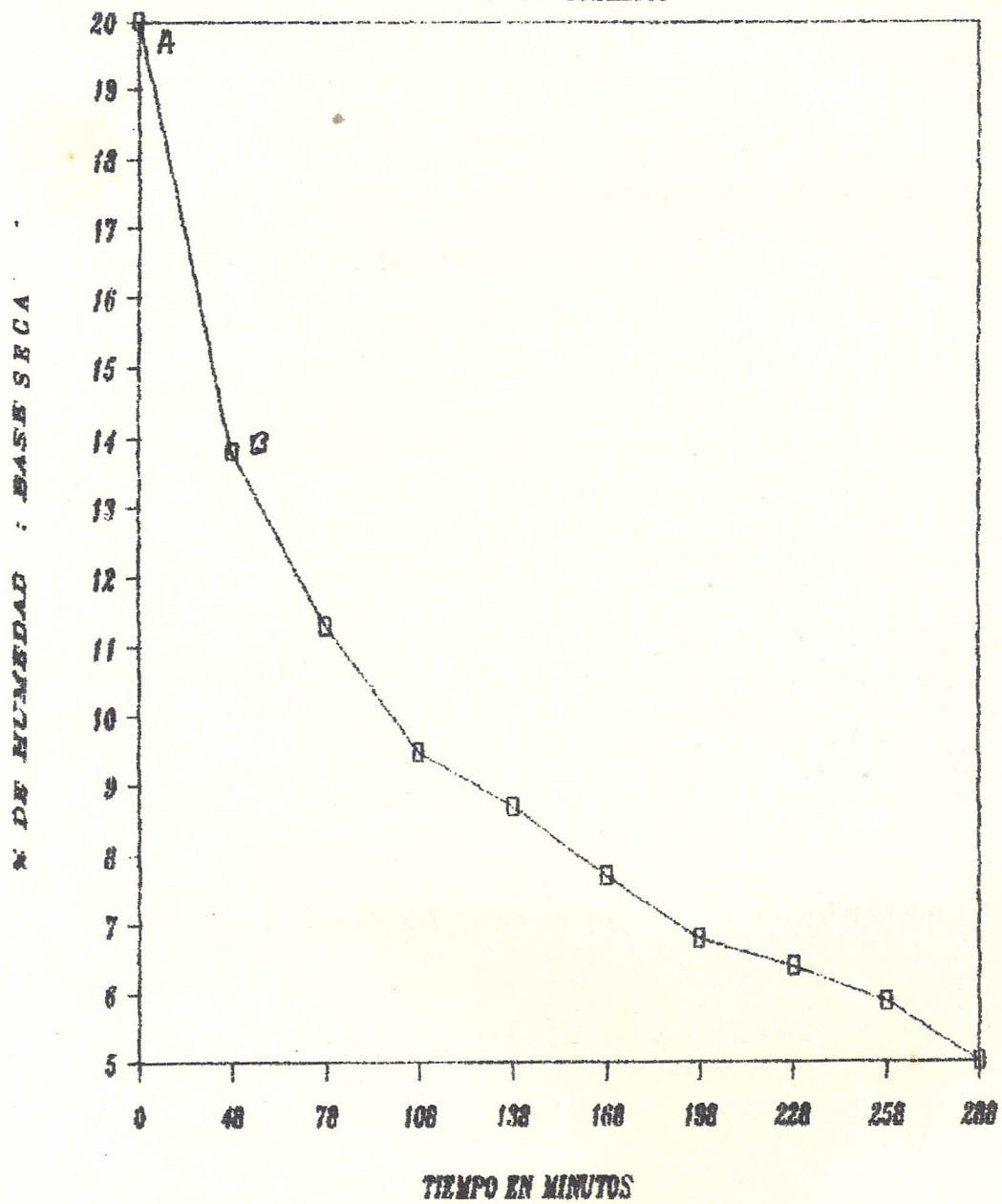


Fig. 4.18.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

$$\text{HUF} = \frac{\text{tea} - \text{tsa}}{\text{tea} - \text{ta}} * 100 \text{ (Fórmula 4.4)}$$

Donde:

tea = Temperatura del aire caliente a la entrada de la cámara.

tsa = Temperatura del aire de escape o salida de la Cámara.

ta = Temperatura de bulbo seco del aire ambiente.

HUF = Factor de utilización del calor.

PRUEBA DE SECADO # 2

CONDICIONES:

- Número de resistencias : 3

- Temperatura de entrada en la cámara de secado

trabajando en vacío es igual a 47.8 grados Celsius.

- Porcentaje de apertura en la succión del ventilador

40%. Z = 60 % cerrado.



- Humedad de arroz al momento de cosecha
18 % base
húmeda.

- Humedad a las 20 horas despues de la
cosecha
permaneciendo enmarcado durante la noche
 \approx 19.9 %.

- Hora de inicio 10:30

- Temperatura ambiente $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

- Velocidad del aire a la entrada de la
cámara $V =$
77.64 m/min.

- Potencia del calentador : 2.453 Kw.

- Espesor de la capa de grano : 20 mm.

TABLA 4.30.-FACTOR DE UTILIZACION DE CALOR UHF %
PRUEBA No. 1

	Hora	t_a (°C)	t_{ea} (°C)	t_{sb} (°C)	HUF (%)
68	11:40	26	58.70	50	26.60
78	12:10	27	61.00	57	11.76
108	12:40	28	61.33	57	13.00
138	13:10	28	61.70	59	8.00
168	13:40	28	60.30	59	4.00
196	14:10	30	60.00	63	9.00
228	14:40	30	63.70	62	5.00
258	15:10	30	65.00	64	3.30
288	15:40	30	65.33	64	3.30

TABLA 4.31.-PRUEBA DE SECADO No.2 (06/08/92)

Hora	I Amp Calentador	I Amp Motor	Temperaturas Salida Calentador		Temperaturas Entrada a la Cámara				Temperaturas En el grano				Temperatura Salida Secador	Muestra No.		
			T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T13 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)	T9 (°C)	T11 (°C)		T12 (°C)	T55 (°C)
11:06																
	5.9	11.8	48	40	46	45	45	43	28	32	31	29	30	30	37	1
11:48																
	5.9	11.8	49	41	48	48	49	45	33	36	32	34	30	34	41	2
12:48																
	5.9	11.8	50	42	47	47	48	46	34	34	36	40	35	40	42	3
13:21																
	5.9	11.8	51	43	48	49	50	46	36	40	36	43	36	44	44	4
14:14																
	4.9	11.4	51	43	48	49	50	47	41	41	40	43	39	46	44	5
15:08																
	5.1	11.4	45	41	42	43	43	43	37	41	39	42	39	43	41	6
16:00																
	5.9	11.8	46	41	43	44	44	42	37	40	37	42	38	43	41	7
16:48																
	5.9	11.8	46	42	44	44	45	42	40	42	38	42	39	42	42	8
									36	38	36	39	35	40		
									81	84	82	86	83	87		

TABLA 4.52.—HUMEDAD DEL AMBIENTE A LA ENTRADA DEL VENTILADOR
(06/08/92)

PRUEBA No. 2

HORA	lbs of	lph of	%	MUESTRA	°C
10:54	26.7	23.3	76	0	
11:28	27.8	23.9	74	1	25
12:09	28.0	23.9	72	2	26
12:48	28.3	23.9	70	3	27
13:43	30.0	25.0	68	4	28
14:46	29.4	25.0	68	5	29
15:35	30.0	24.7	69	6	28
16:22	30.0	25.0	68	7	29
17:00	30.0	25.0	68	8	29

HUMEDAD DEL AIRE A LA SALIDA DEL SECADOR

HORA	lbs (°C)	lph (°C)	%	MUESTRA
11:03	38.0	28.0	50	1
11:47	41.0	29.0	43	2
12:25	42.0	29.0	40	3
13:18	44.0	29.0	34	4
14:11	44.0	30.0	35	5
15:05	40.0	28.0	48	6
15:57	40.0	28.5	48	7
16:46	40.5	29.0	47	8

NOTA: La mecha siempre permanece húmeda y no necesita agregar agua a cada momento. El instrumento puede permanecer en el equipo sin agregar agua.

TABLA 4.33. HUMEDAD DEL GRANO EN LAS BANDEJAS
PRUEBA No. 2 DE SECAO

Muestra	Hora	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9		
1	11:06	15	15	15	15	14	14	15	14.3	16	Eb	Entrada de la bandeja
		16	16	16	15	14.2	14.3	15	16	16	Sb	Salida de la bandeja
2	11:49	12	13	14	14	12	13	13	13.9	14	Eb	
		14.2	14	15.8	12.2	12	13.8	14	14.4	14	Sb	
3	12:28	12	13	13	11	10	10	10.2	12	13	Eb	
		14	13	13.5	12	10.2	11.9	12.5	12.2	13	Sb	
4	13:21	12	12.5	12	10	9.8	9	10	10	10.5	Eb	
		14	12.5	13	10.3	10	10	11	11	11.9	Sb	
5	14:14	11.9	11.5	12	9.9	8	8	8	8.6	9.5	Eb	
		12	12	12.5	10	9	9	9.9	9.2	10	Sb	
6	15:08	10.2	10	10.5	9	8.2	8	8	8.2	9	Eb	
		11.9	10.5	10.2	9	8	8	9.2	9	9.8	10	Sb
7	16:00	10	10	10	8	8	8	8	8	9	Eb	
		10.2	10	10	8.2	8	8	8	9	9	Sb	
8	16:48	10	9.9	9.9	8	8	8	8	8	8	Eb	
		10	10	9.9	8	8	8	8	9	9	Sb	

TABLA 4.34 HUMEDAD PROMEDIO DEL GRANO EN LAS BANDEJAS

Muestra	Hora	$\bar{B1}$	$\bar{B2}$	$\bar{B3}$	$\bar{B4}$	$\bar{B5}$	$\bar{B6}$	$\bar{B7}$	$\bar{B8}$	$\bar{B9}$	\bar{B}	g/g (calculado)
1	11:06	15.5	15.5	15.5	15.0	14.1	14.2	15.0	15.2	16.0	15.1	36
2	11:49	13.1	13.5	14.9	13.1	12.0	13.4	13.5	14.2	14.0	13.52	79
3	12:28	13.0	13.0	13.3	11.5	10.1	10.95	11.4	12.1	13.0	12.0	118
4	13:21	13.0	12.5	12.5	10.2	8.9	9.5	10.5	10.5	11.2	11.1	171
5	14:14	12.0	11.8	12.3	10.0	8.5	8.5	9.0	8.9	9.8	10.1	224
6	15:08	11.0	10.3	10.3	9.0	8.1	8.6	8.5	9.0	9.5	8.4	225

TABLA 4.34 HUNEDAD PROMEDIO DEL GRANO EN LAS BANDEJAS

...VEEN

SUBSUE	HORA	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
7	15:00	10.1	10.0	10.0	8.1	8.0	8.0	8.0	8.5	9.0	8.86	330
8	15:48	10.0	10.0	9.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.5	8.71	378

TABLA 4.35 AGUA RETIRADA
 EN LOS 378 (min)

Bancaje	Peso inicial (Kg)	velocidad del aire (m/min)	T en el grano (°C)	Peso final (Kg)	Agua retirada (Kg)
B1	2.4159	77.64	36.0	2.3	0.1159
B2	3.4159	77.64	36.0	2.3	0.1159
B3	2.4159	77.64	35.8	2.3	0.1159
B4	2.4159	77.64	38.3	2.2	0.2159
B5	2.4159	77.64		2.2	0.2159
B6	2.4159	77.64	39.4	2.2	0.2159
B7	2.4159	77.64	40.3	2.2	0.2159
B8	2.4159	77.64		2.2	0.2159
B9	2.4159	77.64		2.2	0.2159
TOTAL	21.7430			20.1	1.6431

TABLA 4.36 VELOCIDAD DE SECAJO

SEUEB no. 2

Tiempo min.	Humedad Promedio		Velocidad de Secado kg/hr
	Base Secca	BASE HUMEDA	
0	18.03	15.30	0.91
35	15.10	13.12	0.91
72	13.47	11.87	0.85
118	13.31	11.25	0.995
176	11.12	9.99	0.450
214	10.00	9.09	0.399
278	9.40	8.59	0.344
330	8.86	8.14	0.308
378	8.71	8.01	0.273

TABLA 4.37 FACTOR DE UTILIZACION DE CALOR UHF
PRUEBA NO. 2

ti min	Hora	ts (°C)	tes (°C)	tsa (°C)	HUF (%)
38	11:26	27.6	45.3	37	47.43
79	12:09	28.0	48.3	41	35.96
118	12:49	28.3	47.3	42	27.89
171	13:43	30.0	49.0	44	26.32
224	14:46	30.0	49.0	44	26.32
278	15:35	29.4	42.7	41	12.78
330	16:22	30.0	43.7	41	19.7
378	17:00	30.0	44.33	42	16.0

VELOCIDAD DE SECADO

2 - B1

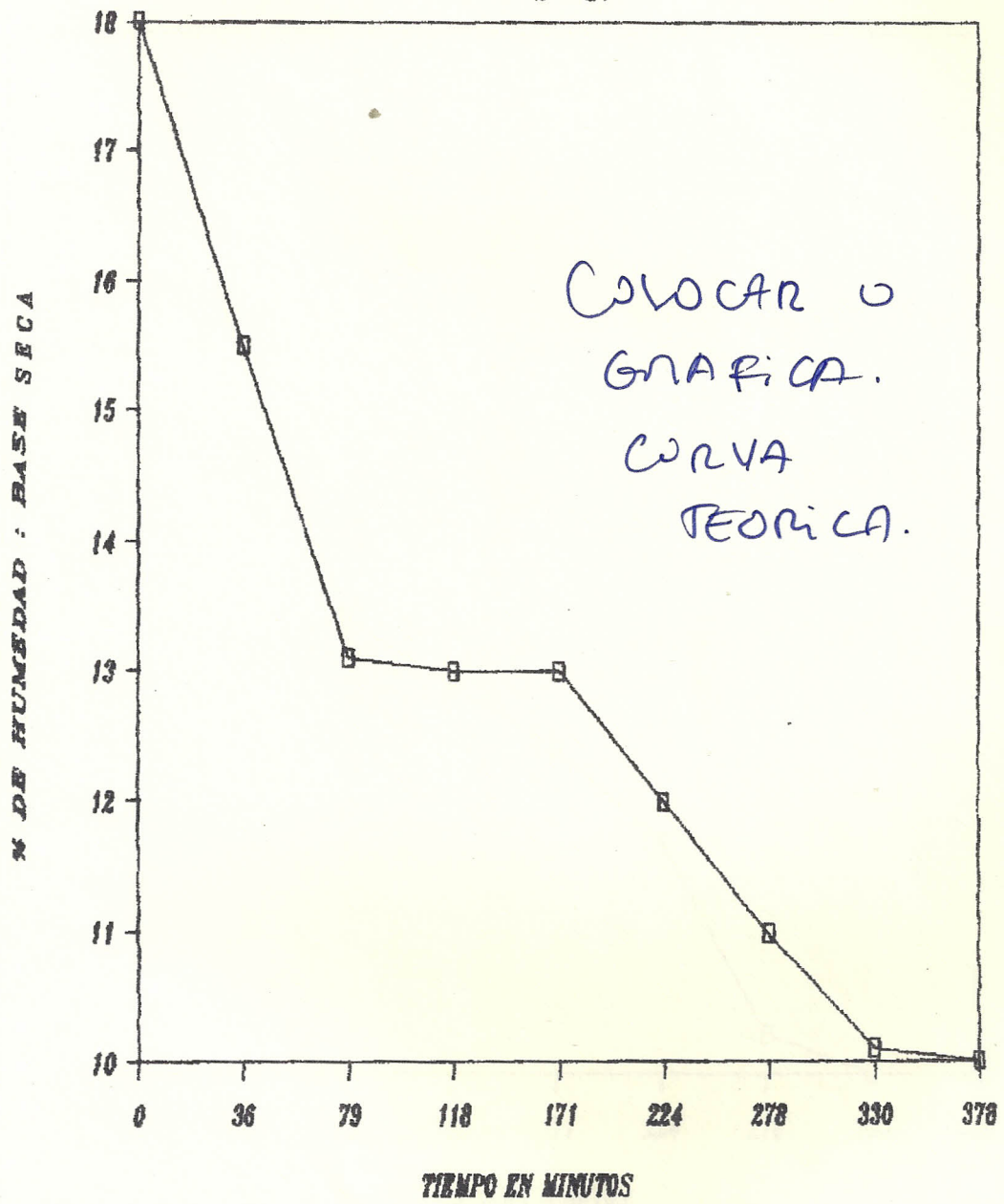


Fig. 4.20.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

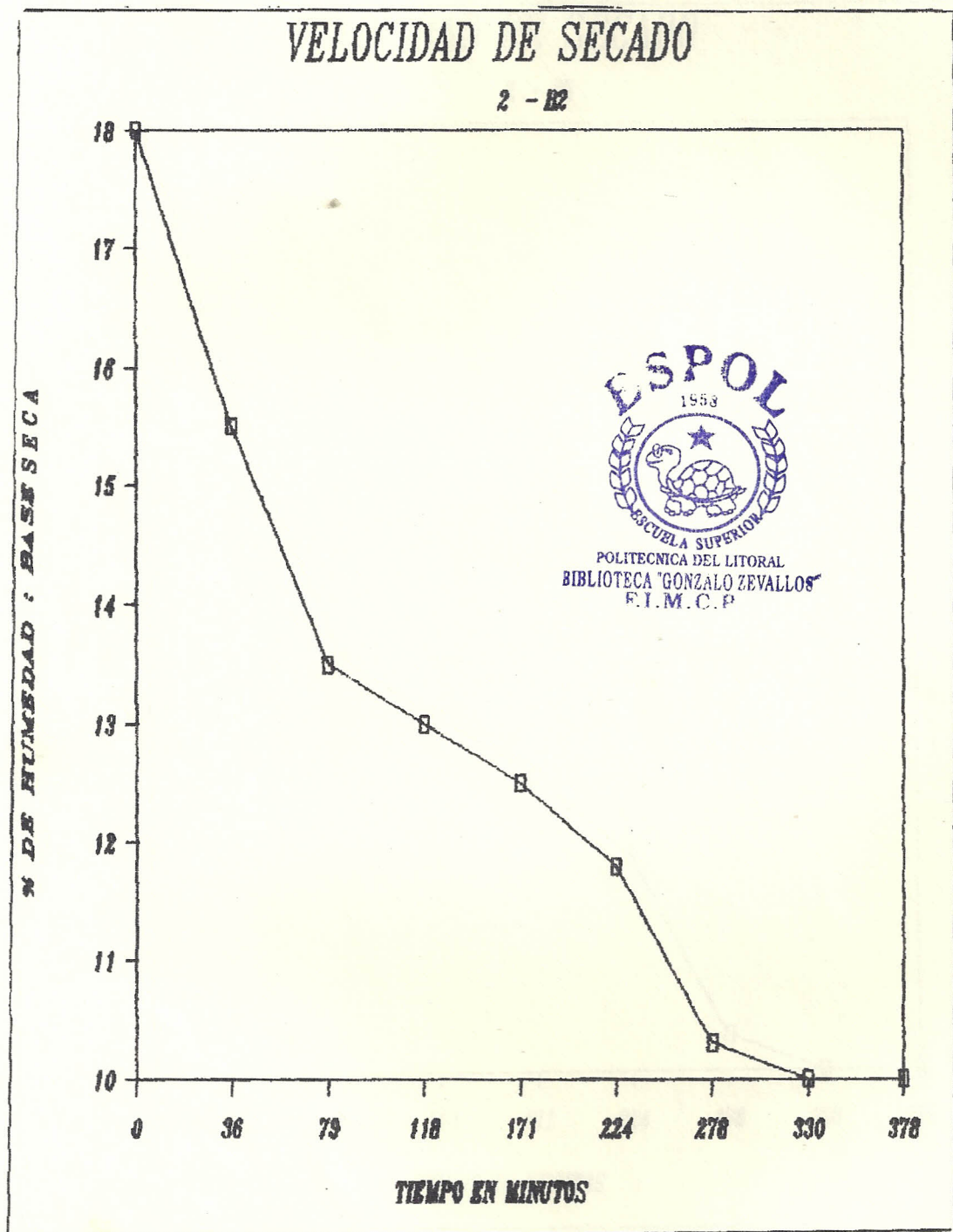


Fig. 4.21.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

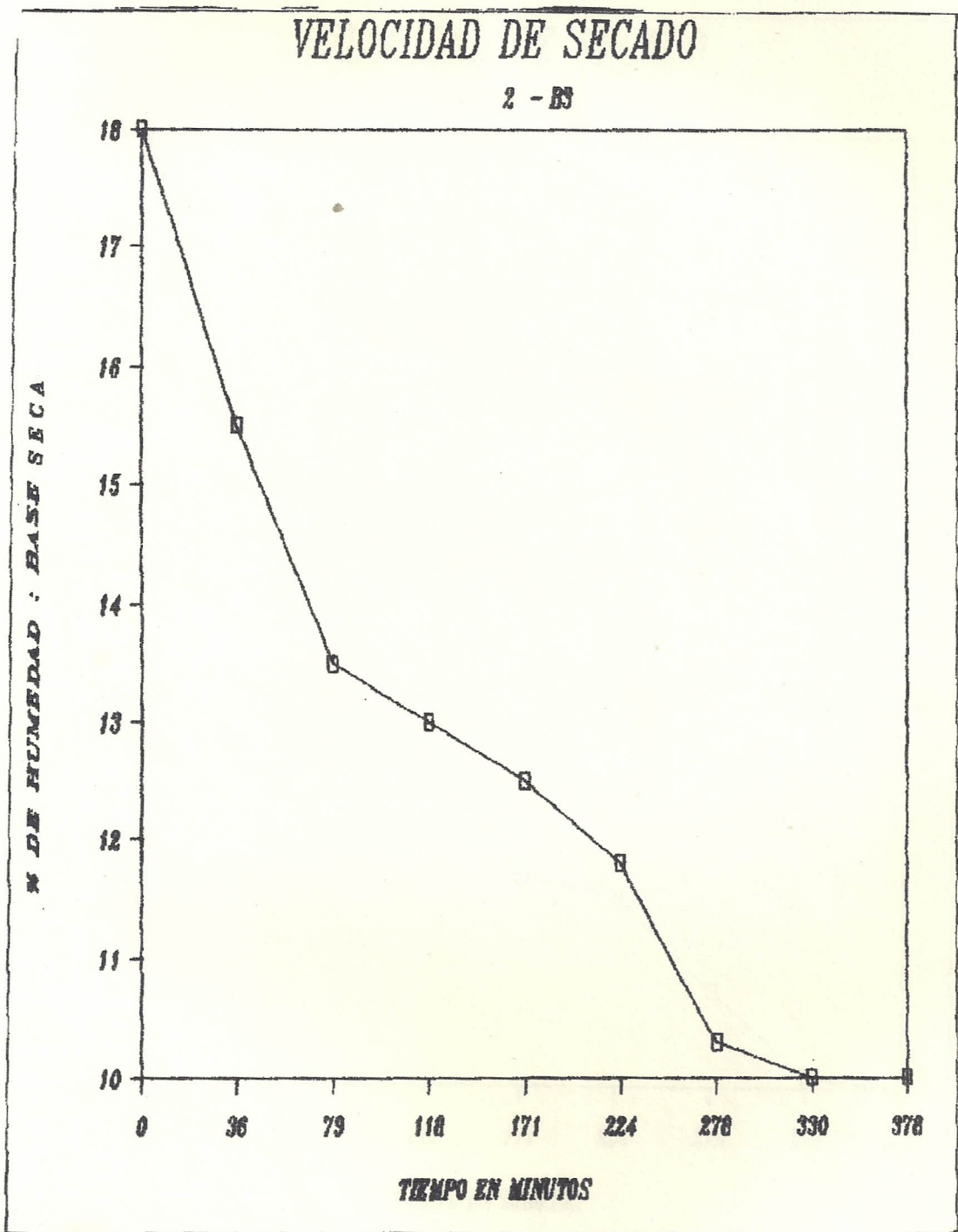


Fig. 4.22.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

2 - B4

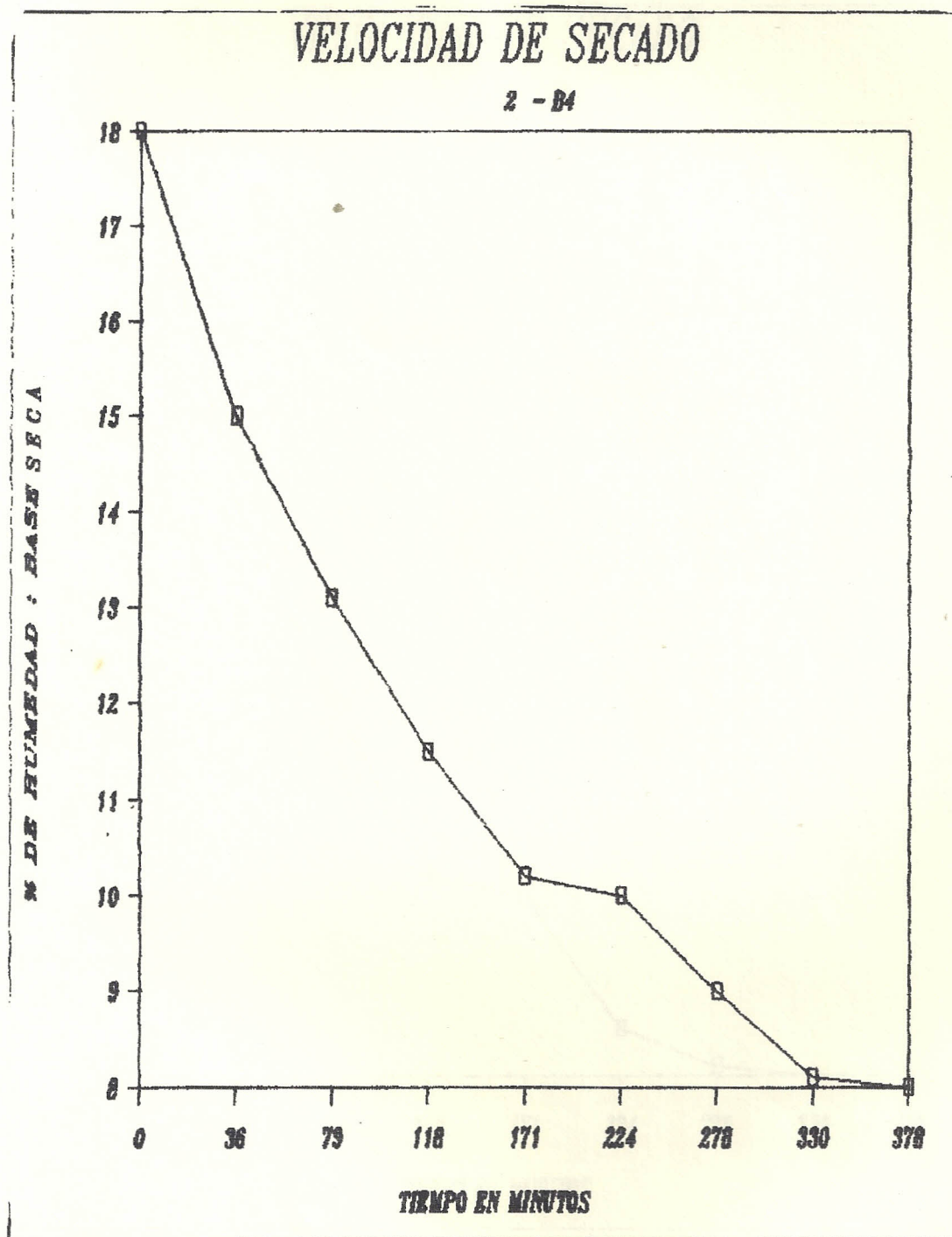


Fig. 4.23.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

2 - B5

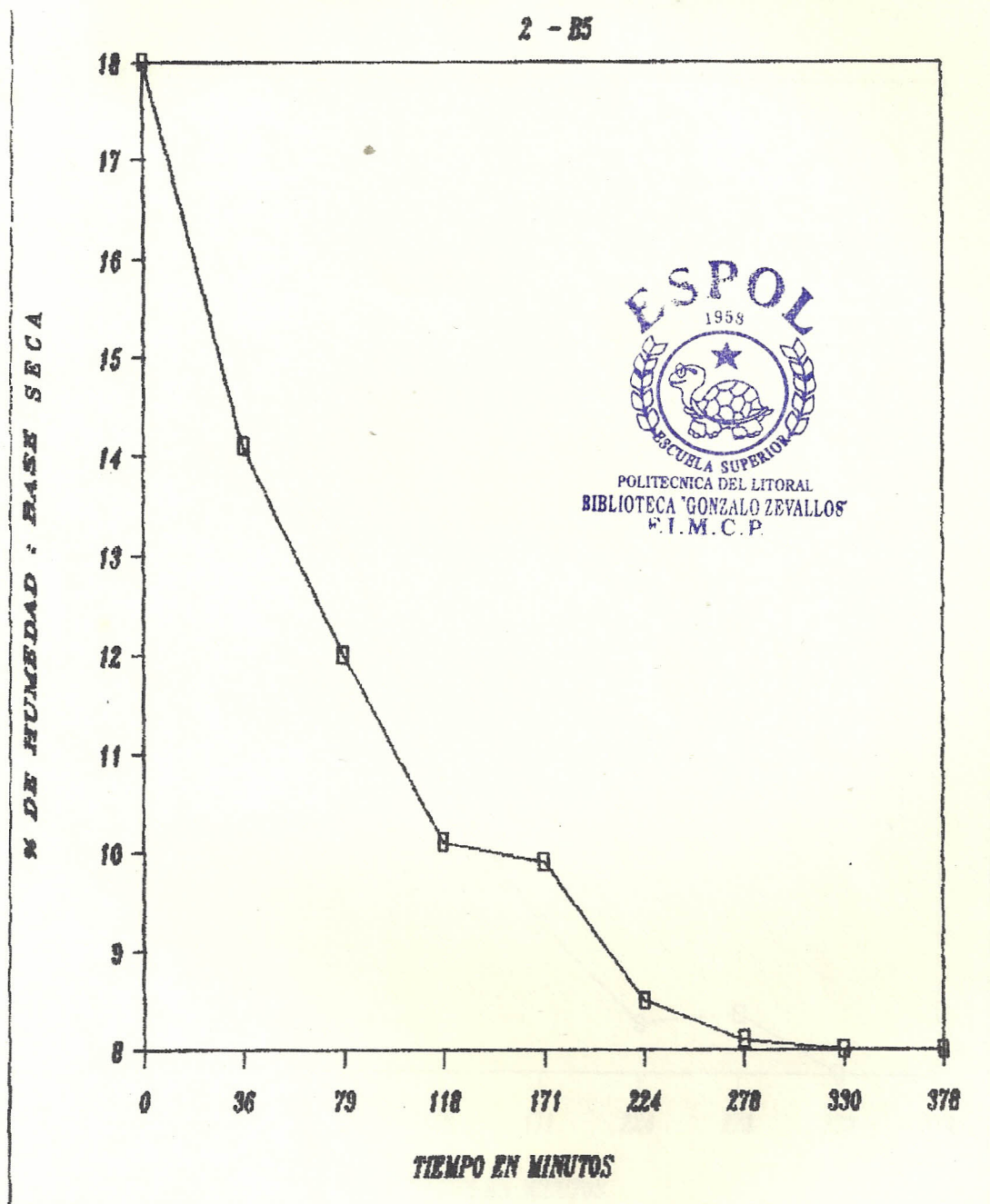


Fig. 4.24.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

2 - B6

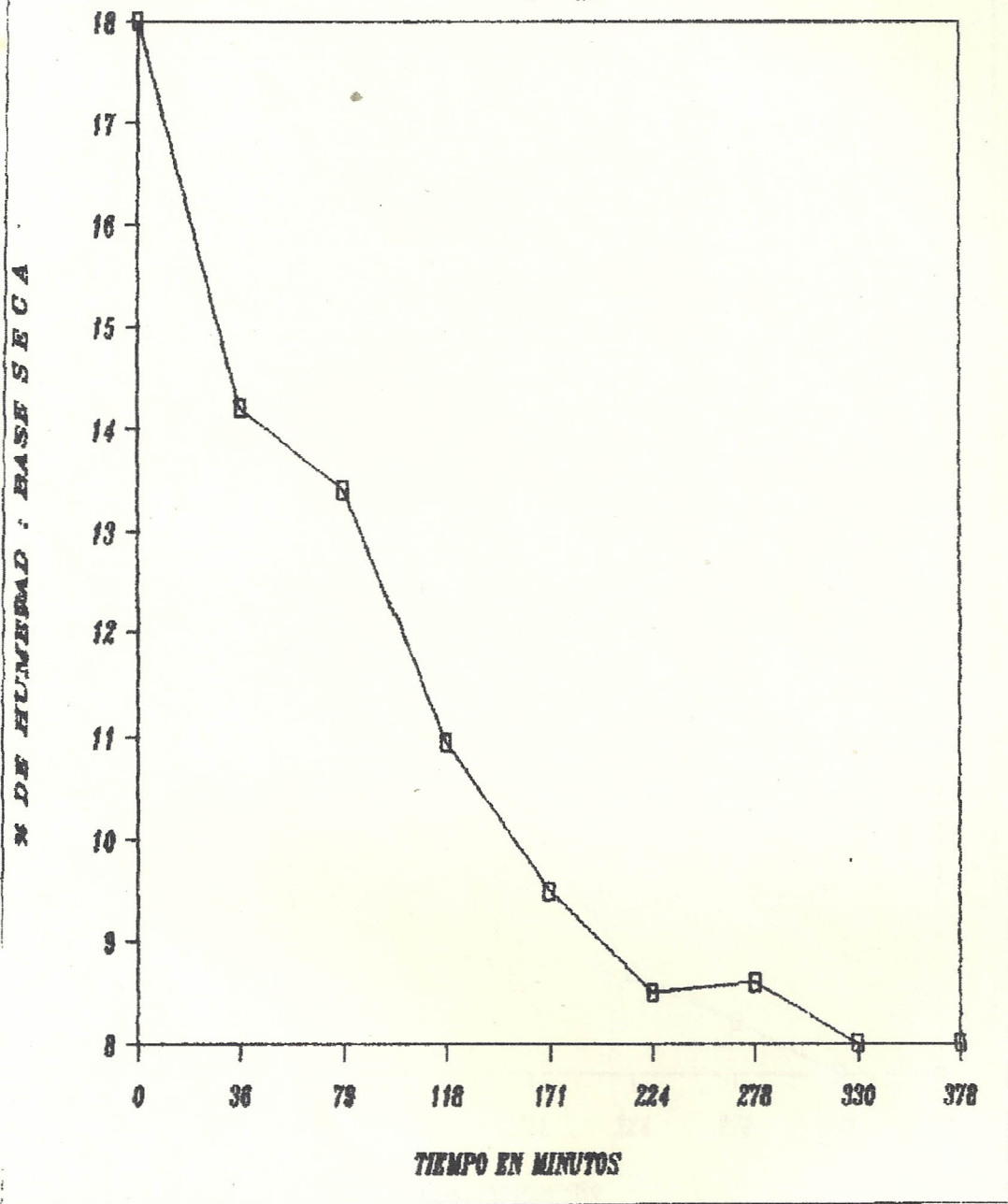


Fig. 4.25.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

2 - B7

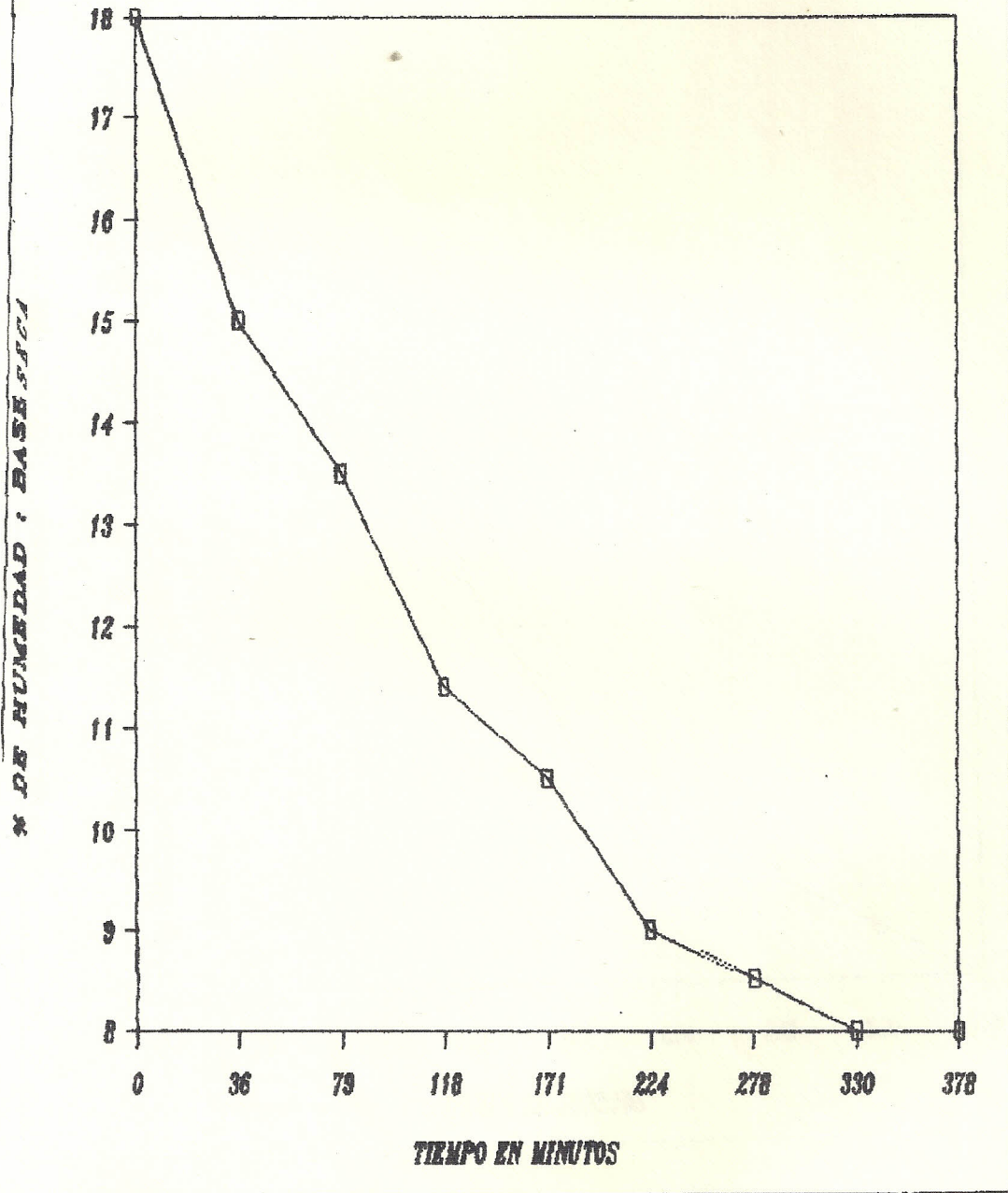


Fig. 4.26.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

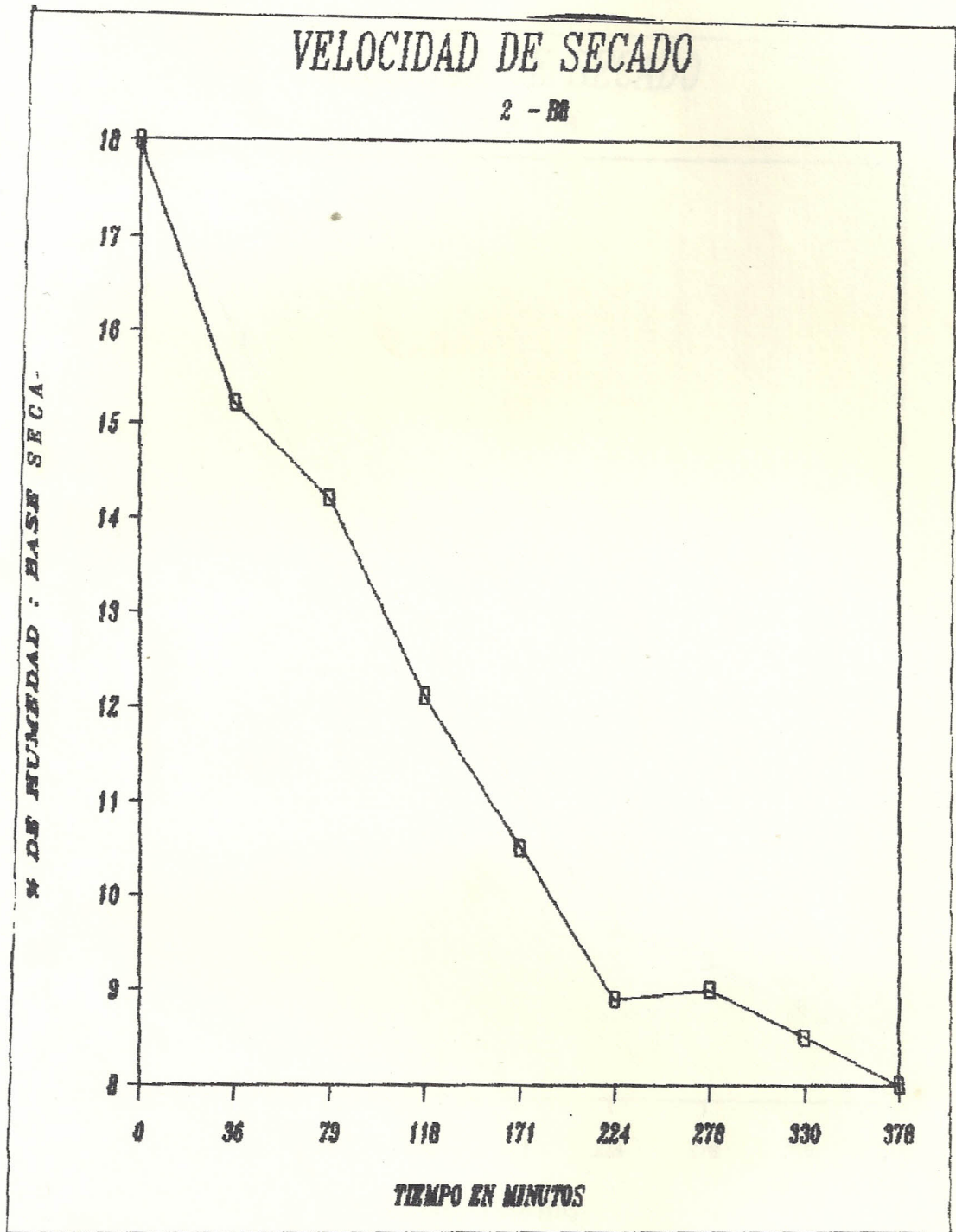


Fig. 4.27.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

VELOCIDAD DE SECADO

2 - 89

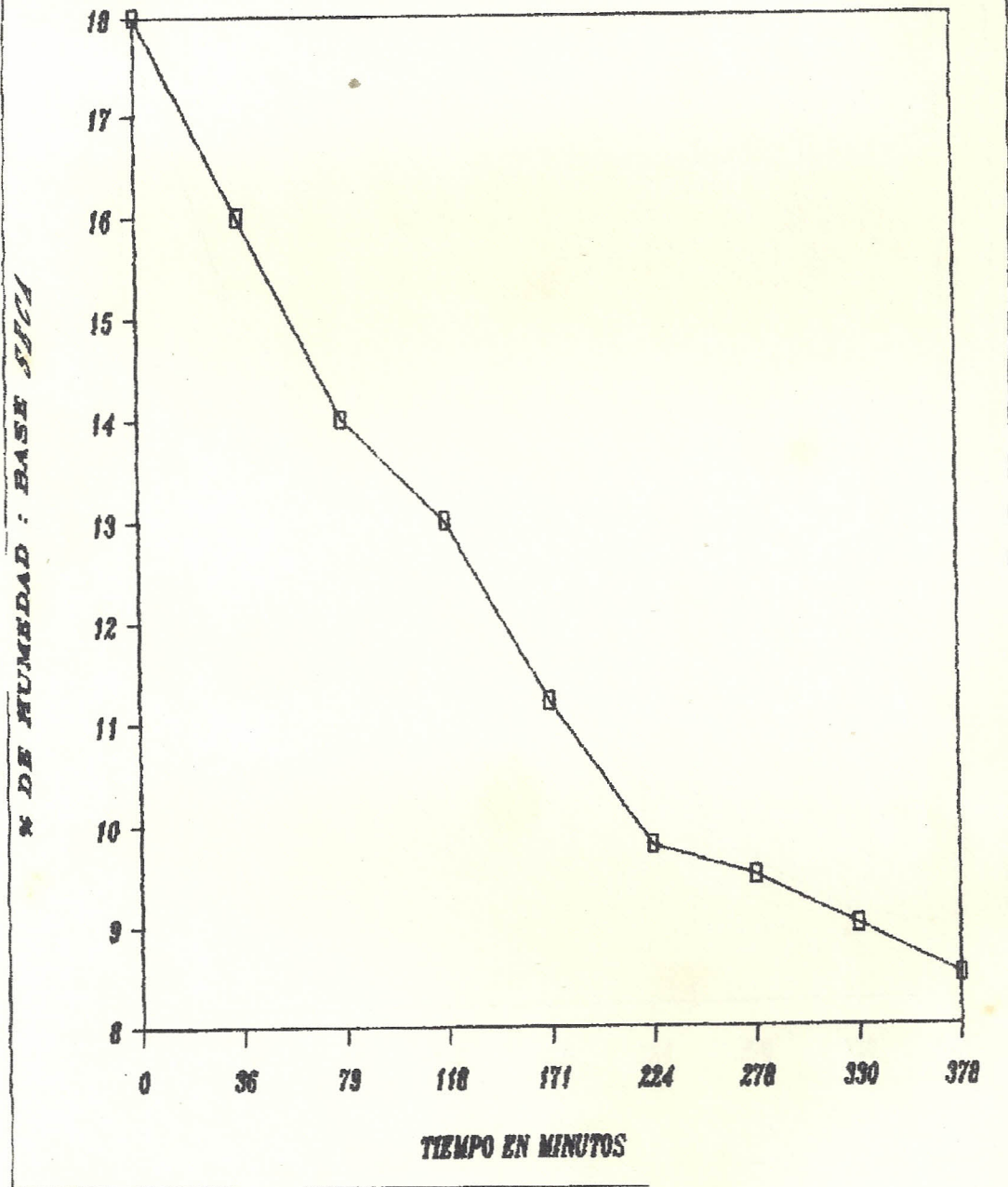


Fig. 4.28.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

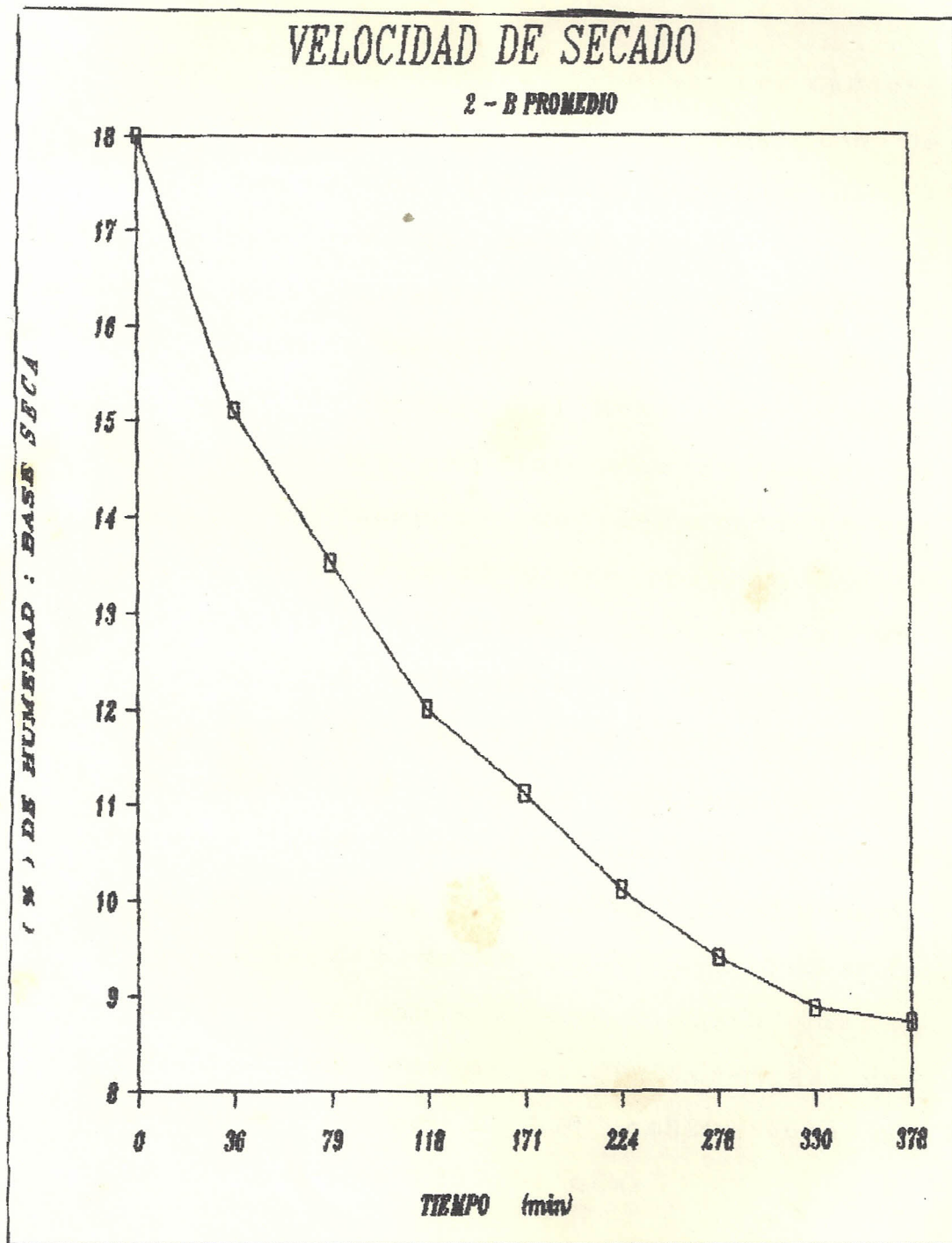


Fig. 4.29.- Curva de secado: Humedad X del producto en función del tiempo en condiciones de secado constante.

4.4. Analisis Experimental de los resultados

En las tablas de las pruebas se aprecia las presiones según varía la posición de la sonda en los diferentes puntos de la sección transversal del ducto dado que es un fluido compresible, y la variación de las presiones en los mismos puntos según cambia el porcentaje del area a la succión del ventilador. En las mismas tablas se aprecia el aumento de temperatura que alcanza el fluido al pasar por los alabes del ventilador desde la temperatura ambiente, tal calentamiento se encuentra en un promedio de 7 grados Centígrados.

Además se resta claramente la disminución de amperaje conforme aumenta la obstrucción en la succión, disminuyendo la potencia del motor como lo muestra la tabla. En la tabla # 4.8, indica que la presión total máxima a la descarga del ventilador es de 11.130 cmH₂O, con un caudal máximo de 1293.53 cfm.

La tabla # 4.13 presenta velocidades de aire a la entrada de la cámara de secado que van desde 142.09 m/min hasta una velocidad de 40.22 m/min tomando como base

el area libre de la cámara igual a 0.1482 m².

En la tabla # 4.16 se aprecia las presiones promedio puntuales obtenidas a lo largo del secador notando su disminución a medida que el aire avanza a lo largo del mismo. Con más detalle se observa en la tabla # 4.17 la caída de presión entre los diferentes puntos tomando como referencia la salida del calentador y demuestra la disminución de la caída de presión al adaptarse aletas en las bandejas para obtener una entrada aerodinámica obteniendo una disminución de 5.52 %. En la misma tabla se aprecia que la caída de presión aumenta cuando se forma una capa de grano en la bandeja, y la caída de presión disminuye cuando aumenta el espesor de la capa de grano en un 0.5 a 0.2 % por cada 15 mm de espesor.

ANALISIS DE TEMPERATURAS.

De la figura 4.5 y la tabla 4.17 se verifica que el recubrimiento de las paredes presenta baja pérdida de calor al hacer una comprobación entre la

temperatura ambiente que rodea la parte exterior del calentador y las paredes exteriores del mismo dando una diferencia de 10 a 15 °C para las diferentes condiciones de flujo de aire que atraviesa la cámara del calentador, obteniéndose como resultado una alta eficiencia de calentamiento que se encuentra sobre el 77 % según la tabla # 4.19 y en la gráfica 4.7 Velocidad - Temperatura Z % de la succión del ventilador demuestra que es más eficiente cuando la potencia de calentamiento es menor de 6.858 KW para flujos que se encuentran entre 1263.5 a 1199 m³/hr. El comportamiento de las temperaturas en la sección transversal a la entrada de la cámara de secado varían de 2 a 3 grados Centígrados según la posición, tablas # 4.20 y 4.21, notándose que en el centro las temperaturas más bajas debido a una distribución casi uniforme del flujo de aire en toda la sección transversal de la cámara de secado y, este comportamiento se generaliza para las diferentes potencias que genera el calentador y para los diferentes flujos de aire, teniendo un incremento de temperatura a medida que disminuye el

flujo de aire y un decrecimiento cuando la potencia del calentador disminuye, como se puede notar temperaturas promedio de 83 °C para una potencia de calentamiento de 6.859 KW con un flujo mínimo de 337.6 m³/hr y para el mismo flujo con una potencia de calentamiento de 2.49 KW temperaturas promedio de 57°C tabla # 4.22. Tambien es notorio que la corriente de línea para las resistencias del calentador presenta fluctuaciones de 0.7 A dando como resultado inestabilidad en la potencia de calentamiento del mismo tabla # 4.23 y, acompañado con la fluctuación de temperatura ambiente sea por la hora de trabajo o presencia de vientos, proporcionen mínimas diferencias de temperatura a la entrada de la cámara para flujos consecutivos.

Independientemente de la potencia de calentamiento y flujo de aire con que se desea trabajar, el equipo alcanza su estado estable a los 30 min. en que se calienta toda la estructura del mismo.

Temperaturas con recirculación de aire.

Las temperaturas que se alcanzan en la

cámara de secado con recirculación de aire son superiores a medida que aumenta el porcentaje de aire caliente que se desea manejar y mezclar con el aire fresco a la entrada del ventilador, en la tabla # 4.24 se observa que se alcanzan temperaturas promedio de 98.6 °C cuando la cantidad de aire caliente pasa el 99 % y va disminuyendo conforme disminuye este pasa un mismo flujo en la succión del ventilador y una misma potencia de calentamiento, siendo la temperatura a la entrada del ventilador de 4 a 40 °C mayor que la temperatura ambiente.

Análisis del secado (Prueba # 1)

Se alcanzan temperaturas de 58 a 65 °C a la entrada de la cámara de secado, manteniendo las temperaturas de la capa de arroz desde 42 hasta 63 °C a medida que disminuye la humedad en la capa. También es notorio que la temperatura a la salida del secador es inferior en 8.5 °C respecto a la entrada, por la humedad que arrastra desde el grano el medio secante y esta temperatura trata de igualarse conforme la humedad del grano disminuye y alcanza la

temperatura del medio secante 65 °C. La humedad relativa del aire ambiente a la entrada del ventilador se encuentra en un promedio de 75 % disminuyendo al pasar por la cámara del calentador hasta un 8 %, aumentando cuando pasa por la capa de aire húmedo a 25 % y decreciendo más cuando este grano va alcanzando la temperatura del aire que lo seca (tabla # 4.26)

El secado comienza con una humedad inicial de 20 % disminuyendo a medida que pasa el tiempo, presentando un comportamiento no uniforme en los diferentes bandejas, siendo la velocidad de secado más brusca en las bandejas centrales y en menor grado en las bandejas inferiores que en las superiores tabla # 4.27. De estas gráficas se obtiene un promedio del comportamiento de secado que da las siguientes observaciones.

De la gráfica % de humedad vs. tiempo, se obtiene que entre los primeros 48 min. la velocidad de secado cambia linealmente de 20 a 14 % lo que indica que se encuentra en un período de velocidad constante AB y, en la gráfica Velocidad de secado kgH₂O/hr vs. tiempo, se nota claramente el punto de

inflexión o punto crítico C siguiendo el período de disminución de la velocidad tramo CD, alcanzando la humedad para almacenamiento a los 78 min. El factor de utilización de calor cambia de 27 a 3 % con el tiempo de secado. (Tabla 4.30)

Análisis del secado (Prueba # 2)

En esta prueba la temperatura del aire alcanza 46 °C que es menor cuando el equipo trabaja en vacío, manteniendo la temperatura del grano al inicio en 30 °C esta va incrementandose a medida que pasa el tiempo de secado, la temperatura en el grano en todas las bandejas no se mantiene uniforme presentando diferencias de temperatura entre bandeja y bandeja de 3 a 4 °C. (Tabla # 4.31)

La variación de velocidad de secado es superior, presentando diferencias de humedad a lo largo de cada bandeja, en muchos casos 8 % mayor a la salida del secador que en la entrada (Tabla # 4.33)

La humedad recomendable para un almacenamiento de 12 % se alcanza en 118

min. Tomando como referencia los resultados de secado en la bandeja # 1, con una temperatura promedio de 36 °C y una curva velocidad de secado vs. tiempo más definida durante el período de secado, se estima que el punto crítico para el secado para el arroz está en 13 %. El factor de utilización de calor para esta prueba, cambia a medida que pasa el tiempo de secado desde 47.43 % a 16 %. (Ver Tabla 4.37)

Análisis del secador con la prueba de secado.

De las dos pruebas de secado realizadas con arroz, se escoje la prueba # 2 por los análisis expuestos anteriormente, para trabajar con todos los datos que se obtuvieron durante esta prueba, en la determinación del tiempo aproximado de secado, la temperatura de salida del aire y la potencia requerida para el secado de la muestra utilizada.

Para un posterior análisis, los cálculos se realizaron tomando como referencia el área libre por donde fluye el medio

secante, esto es el área libre de la cámara de secado, el área libre entre las bandejas y el área promedio entre el área libre de la cámara de secado y el área libre entre bandejas. (Ver tabla 4.38)

Datos

Temperatura promedio que reporto el grano

$$T_s = 37.6 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Temperatura promedio del ambiente

$$T_a = 28.9 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Humedad relativa del ambiente promedio a la entrada del ventilador.

$$\Phi = 70.5 \%$$

Temperatura de entrada del aire en la cámara de secado.

$$T_{ca} = 45.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura promedio del aire a la salida de la cámara de secado.

$$T_{sa} = 41.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Caudal de trabajo

$$Q = 690.4 \text{ m}^3/\text{hr.}$$

$$\rho_{a \text{ t} = 45.7 \text{ } ^\circ\text{c}} = 1.14 \text{ Kg/m}^3$$

Area libre de la cámara

$$A = 0.1482 \text{ m}^2$$

$$G = m/A = 5310.8 \text{ Kg/hr-m}^2$$

$$h_c = 0.0176 \text{ G}^{0.8}$$

$$h_c = 18.422$$

$$h_r = 1.4 \text{ kcal/hr-m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

$$h_t = (h_r + h_c) * A_u + (A_u / (1 + ((h_r + h_c) / k)))$$

$$h_t = 19.9 \text{ kcal/hr-m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

Diferencia media logarítmica.

$$v_m = 5.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

Humedad del grano al momento de la cosecha.

$$X_a = 18 \%$$

Humedad del grano después del secado.

$$X_w = 8.71 \%$$

Densidad del sólido seco.

Esta densidad se determinó experimentalmente en el laboratorio de química aplicada II, con el grano a 10 % de humedad base seca.

$$\text{Masa del arroz} = 122.5 \text{ gr}$$

$$\text{Volúmen del grano} = 0.0002 \text{ m}^3$$

$$\{\text{arroz} = 610 \text{ kg}$$

Tiempo aproximado de secado

$$t = \frac{L * \int g_s * L_v}{h_t} (X_a - X_w)$$

$$h_t (v_m)$$

Espesor del grano en las bandejas = 0.02 m

Así:

$$t = 5.78 \text{ hr}$$

Humedad del aire a la entrada y salida de la cámara de secado.

Humedad ambiente a la entrada del ventilador con $T_{bs} = 28.9 \text{ }^\circ\text{C}$ y $\Phi = 70.3 \%$

Masa del aire seco a la entrada: entrada

Masa del aire húmedo/ $(1+X_e) = \text{Mas}$

Mas = 834.6 Kg aire seco/hr.

Masa de agua en el aire a la entrada:

$M_{we} = (\text{masa de aire húmedo} - \text{masa aire seco})$

$M_{we} = 14,592 \text{ Kg vapor/hr.}$

Masa de agua en el grano:

$$M_{h20} = M_{gh} \left(\frac{W_a - W_w}{100 - W_w} \right)$$

$$W_a = 15,3 \%$$

$$W_w = 8 \%$$



Humedad del aire a la salida de la cámara:

$$X_s = (W_{h20}/t * \text{Masa seca}) + X_e$$

$$X_s = 0,01786$$

Masa de agua en el aire a la salida

$$M_{was} = X_s * M_{as}$$

$$M_{was} = 14.90 \text{ kg-vapor/kgaire-seco}$$

Masa de aire húmedo a la salida

$$M_{ahs} = M_{as} + M_{was}$$

$$M_{ahs} = 849.50 \text{ kgaire/hr.}$$

Entalpía del aire ambiente a la entrada y salida de la cámara.

Entalpía del ambiente:

$$h_1 = 17,7 \text{ kcal/kgvapor}$$

Entalpía a la salida de la cámara de secado:

$$h_3 = 21,034 \text{ kcal/kgvapor}$$

Temperatura a la salida de la cámara:

$$T_{sa} = \frac{h_3 - 597 X_s}{C_p + 0,46 X_s}$$

$$T_{sa} = 41.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura en función del número de unidades de transferencia:

$$N_t = \frac{L_t * h_t}{G * C_p * E_b}$$

$$N_t = 0.456$$

$$T_{sa} = T_s + (T_{ea} - T_s) e^{-N_t}$$

$$T_{sa} = 42.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Calor necesario para calentar el grano:

$$Q_g = M_{gs} * C_{ps} * T$$

M_{gs} = Masa del grano seco = $M_{\text{grano húmedo}}$
- agua retirada.

$$M_{gs} = 20 \text{ kg.}$$

El calor específico del grano seco con 10 % de humedad base seca, se determinó experimentalmente en el laboratorio de Química aplicada II de la ESPOL.

Temperatura de entrada del grano a la cámara de secado $25 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$Q_g = 118,44 \text{ kcal}$$

$$q_g = 18.9 \text{ kcal/hr}$$

La cantidad de calor necesario para calentar el material de la cámara de secado:

$$Q_m = m V_m C_{pm} T$$

$$Q_m = 392.51 \text{ Kcal.}$$

$$q_m = 62.6 \text{ Kcal/hr.}$$

Calor sensible para calentar el agua hasta la temperatura del medio secante:

$$C_{ph20} * (T_b - T_o) = 14,7 \text{ Kcal/hr.}$$

Humedad absorbida por el aire al pasar por el grano:

$$X_s - X_e = 0.00036$$

Calor perdido a travez de las paredes:

$$q_p = q_{sv} = 15,52 \text{ Kcal/hr.}$$

La entalpía a la entrada de la cámara será:

$$W_{h20/t} = 0,2985$$

$$h_2 = h_3 + (X_s - X_e) * (24,17 / 0,2985 + 14,7 + 80,1 / 0,2985 + 15,52 / 0,2985) = 21,184$$

Calor para calentar el aire de h_1 a h_2 :

$$Q_{neto} = M_{ahs} (h_2 - h_1)$$

$$Q_{neto} = 849.48 (21,184 - 17,7)$$

$$Q_{neto} = 2.959,4 \text{ kcal/hr}$$

$$Q_{neto} = 3,46 \text{ Kw}$$

TABLA 4.38 A

DATOS EXPERIMENTALES						teorico				
#p	ts °c	tea °c	t _{sa} °c	xw	t (hr)	ht	t (hr)	Xa	L (m)	Lv
1	30	44.75	37	15.1	0.6	20.50	0.96	18	0.02	578.9
2	33.2	47.5	41	13.52	1.3	20.60	1.43			
3	36.5	47	42	12.0	1.97	20.63	2.66			
4	39.2	48.25	44	11.1	2.93	20.66	3.57			
5	41.7	48.5	44	10.1	3.7	20.71	6.49			
6	40	42.75	41	9.1	4.6	20.64	17.6			
7	39.5	43.75	41	8.86	5.5	20.02	13			
8	39.8	43.75	42	8.71	6.3	20.66	10.62			

Densidad
del arroz
610 Kg/m³

DATOS TOMADOS DE LA PRUEBA # 2

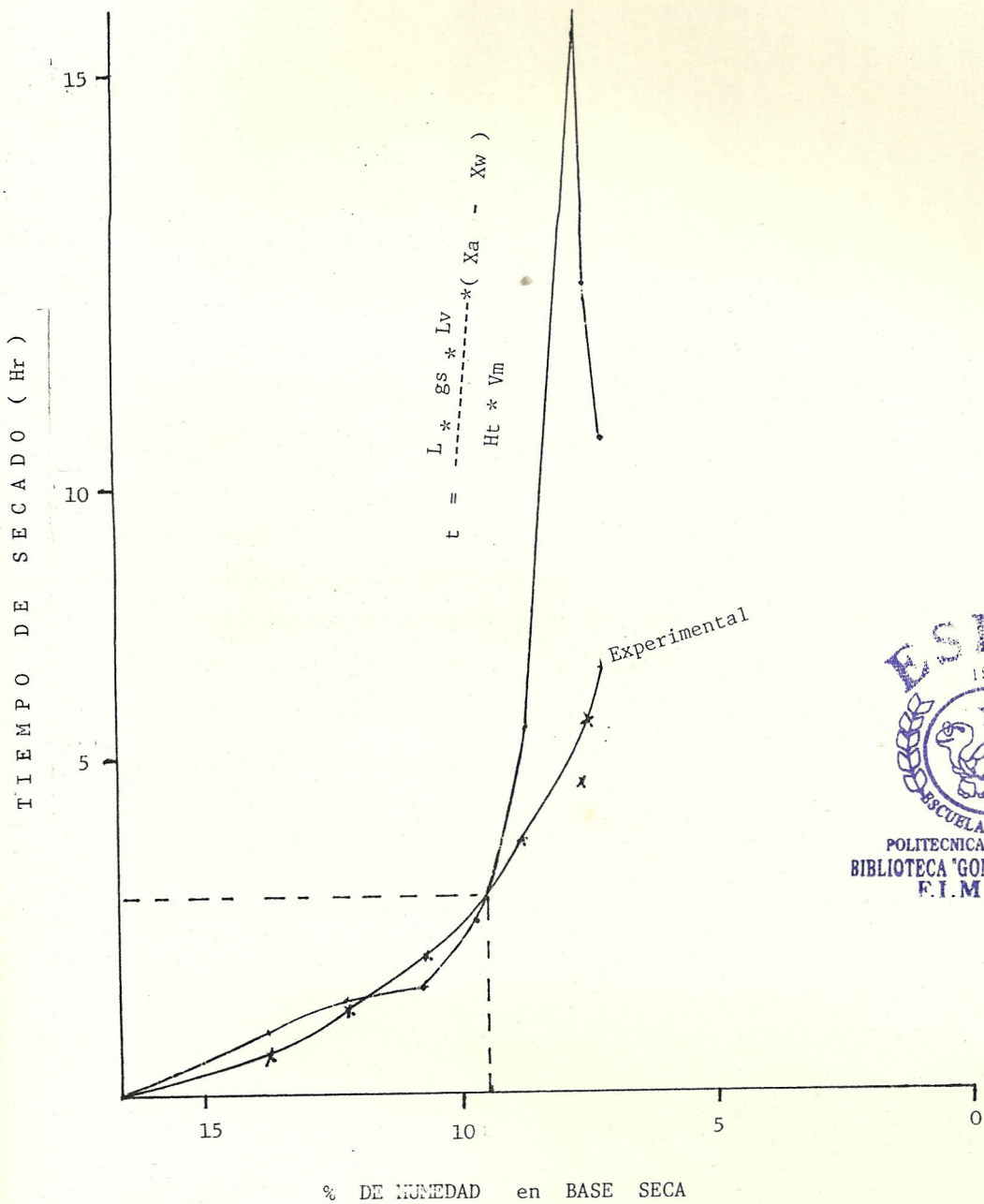


FIG. 4.20

CURVAS DE ANALISIS ENTRE EL TIEMPO TEORICO
Y EXPERIMENTAL vs HUMEDAD DEL GRANO DURANTE EL
SECADO.

ANALIZANDO LA FIGURA 4.30 , DEMUESTRA LA RELACION ENTRE EL TIEMPO
TEORICO Y EXPERIMENTAL , ENCONTRANDO UN RANGO DE ACEPTACION E IGUAL
DAD ENTRE ESTOS , IGUALDAD QUE SE MANTIENE ENTRE EL PRIMER _
PERIODO Y SEGUNDO PERIODO DE SECADO (VER FIG 4.20).
SEGUN LA INFORMACION EL TIEMPO TEORICO ES APLICABLE PARA EL _
PRIMER PERIODO DE SECADO DE UN PRODUCTO EN REPOSO SECADO POR UNA
CORRIENTE QUE PASA POR ENCIMA DE EL O LO ATRAVIESA . PARA UN _
SEGUNDO PERIODO DE SECADO LAS RELACIONES SON TAN COMPLEJAS _
QUE NO ES POSIBLE PENSAR EN UN METODO DE CALCULO.

Tabla 4.38.- Comportamiento del Secador
Segun el área del flujo de aire

Base calculo	Condiciones de entrada			Agua retirada Kgh ₂₀ /Hra	Coeficiente convecctivo ht	Tsa en función de		Tiempo HORAS	Calor ϕ (KW)
	Ta °C	ϕ %	Tea °C			Nt	h3		
Area libre de la cámara	28.9	70.5	45.7	0.275	19.90	42.7	41.50	5.78	3.4
Area libre entre bandejas	28.9	70.5	45.7	0.520	34.20	40.7	41.52	3.34	3.63
Area promedio	28.9	70.5	45.7	0.352	23.42	42.7	41.50	4.90	3.50

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.

Para analizar el secador se escogió la prueba # 2, debido a que ésta presentó los mejores resultados. Con este análisis se llega a determinar que los cálculos de flujo másico y coeficiente convectivo para obtener un tiempo de secado, temperaturas de aire a la salida de la cámara y consumo de energía aproximado o igual al teórico se debe realizar en base al área libre de la sección transversal de la cámara (Ver Tabla 4.38). En base a ésta área se determina el coeficiente de transferencia de masa para la primera y segunda prueba de secado

PRUEBA # 1

$$t_{ea} = 61.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{sa} = 59.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_s = 52.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_{pf} = 0.240 \text{ Kcal/kg-}^\circ\text{C}$$

$$\rho_f = 1.243 \text{ Kg/m}^3$$

$$h_t = 19.5 \text{ Kcal/hr-m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con ayuda de la igualdad 2.4 se tiene:

$$\beta = 0.01815 \text{ m/s}$$

PRUEBA # 2

$$t_{ea} = 45.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{sa} = 41.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_s = 37.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_{pf} = 0.240 \text{ Kcal/kg-}^\circ\text{C}$$

$$\rho_f = 1.243 \text{ Kg/m}^3$$

$$h_t = 19.9 \text{ Kcal/hr-m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

Con ayuda de la igualdad 2.4 se tiene:

$$\beta = 0.0167 \text{ m/s}$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro de los datos experimentales se pudo observar lo siguiente:

1) La mayor caída de presión se obtuvo en el calentador de aire, debido a la forma y distribución de las resistencias.

2) La pérdida de presión que presenta el aire al pasar por el secador disminuye cuando se adapta aletas aerodinámicas en las bandejas y disminuye más cuando el espesor de la capa de grano en las bandejas aumenta.

3) La pérdida de temperaturas a través de las paredes del calentador es relativamente baja lo que hace que este presente una alta eficiencia sobre los 77 %.

4) La caída de temperatura a lo largo del secador es casi nula debido al aislamiento que presenta las paredes de la cámara de secado, construidas de plywood revestidas de lana de vidrio recubiertas de varias capas de esmalte negro.

5) Las temperaturas que se alcanza a la entrada de la cámara de secado son altas y casi uniformes en la sección transversal del ducto de la cámara, debido a una distribución casi uniforme del aire por los deflectores. Estas temperaturas son controlables o regulables de acuerdo al grano que se va a secar con un flujo de aire controlado.

6) Una recirculación de aire mejora la eficiencia de calentamiento y arrastre de humedad desde el producto por el medio secante.

7) Mientras más baja es la temperatura a la entrada de la cámara de secado, la variación de temperatura en la capa de grano entre las diferentes bandejas es más uniforme obteniéndose una velocidad de secado más suave y curvas de secado bien definidos con un factor de utilización de calor más elevado.

8) Del análisis del secador en la prueba # 2 se concluye que el procedimiento, principios y fórmulas utilizados para el diseño del secador dan un resultado

aproximado realizando los cálculos en base al área libre de la sección transversal de la cámara vacía, debido a que el aire realmente atravieza la capa de grano por las velocidades o caminos que este presenta y dando un consumo de energía real del calentador menor a la teórica en un 30 % y un tiempo de secado real igual al teórico (Tabla 4.38).

En base a esto se concluye que el coeficiente de transferencia de masa para alcanzar una velocidad de secado suave, manteniendo temperaturas bajas y uniformes en el grano durante el secado con una eficiente utilización de calor (HUF), sin crear alteraciones físico químicas en el grano se encuentra en 0.0167 m/s.

9) Se realizaron pruebas sólo con arroz debido al tiempo de utilización de los equipos e instrumentos, por lo que se recomienda relizar pruebas para diferentes tipos de grano y comprobar la secuencia de cálculo descrita anteriormente.

10) Es necesario realizar pruebas con recirculación de aire para determinar

hasta cuando es aprovechable.

11) Este estudio de secado debe seguir realizando pruebas cambiando la dirección de flujo de aire a través de la capa de grano, esto es, flujo cruzado y flujo por toberas, aprovechando el calentador de aire y la misma cámara de secado, hasta demostrar cual es el secador más eficiente y hasta que punto lo es de acuerdo al tipo de grano.



APENDICES

TABLA A-1
PROPIEDADES FÍSICAS DE GASES, LÍQUIDOS Y METALES LÍQUIDOS
 (Todas las propiedades de los gases son a la presión atmosférica)

GASES

T (°F)	(lb _m /pie ³)	(ft ³ /lb _m °F)	$\mu \times 10^{-3}$ (lb _m /pie ² seg)	$\nu \times 10^{-3}$ (pie ² /seg)	k (Btu/hr pie °F)	Pr	(pie ² /hr)	$\beta \times 10^{-3}$ (1/°F)	$\frac{d\rho}{\rho dT}$ (1/°F pie ³)
-----------	--------------------------------------	---------------------------------------	---	---	----------------------	----	------------------------	----------------------------------	---

Aire

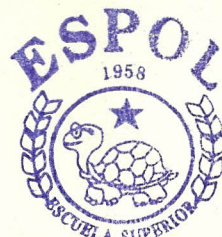
0	0.086	0.239	1.110	0.180	0.0183	0.78	0.646	2.18	4.2×10^{-6}
32	0.081	0.240	1.165	0.145	0.0140	0.72	0.720	2.03	3.16
100	0.071	0.240	1.235	0.160	0.0154	0.72	0.905	1.79	1.75
200	0.060	0.241	1.410	0.250	0.0174	0.72	1.20	1.52	0.850
300	0.052	0.243	1.610	0.306	0.0193	0.71	1.53	1.32	0.444
400	0.046	0.245	1.750	0.378	0.0212	0.69	1.88	1.16	0.265
500	0.0412	0.247	1.890	0.455	0.0231	0.683	2.27	1.04	0.179
600	0.0373	0.250	2.000	0.540	0.0250	0.685	2.68	0.919	0.109
700	0.0341	0.253	2.14	0.625	0.0268	0.690	3.10	0.862	70.1×10^{-3}
800	0.0314	0.256	2.25	0.717	0.0286	0.697	3.56	0.794	49.5
900	0.0291	0.259	2.36	0.815	0.0303	0.705	4.02	0.736	36.0
1000	0.0271	0.262	2.47	0.917	0.0319	0.713	4.50	0.685	26.5
1500	0.0202	0.276	3.00	1.47	0.0400	0.739	7.19	0.510	7.45
2000	0.0161	0.286	3.45	2.14	0.0471	0.763	10.2	0.406	2.84
2500	0.0133	0.292	3.69	2.80	0.051	0.763	13.1	0.333	1.41
3000	0.0114	0.297	3.86	3.39	0.054	0.765	16.0	0.290	0.815

TABLA A-2

EMISIVIDADES DE VARIAS SUPERFICIES

MATERIAL	LONGITUD DE ONDA Y TEMPERATURA PROMEDIO				
	2.3, 100°F	3.4, 500°F	3.6, 1,000°F	1.8, 2,500°F	0.6, Solar
Metales:					
Aluminio					
Pulido	0.04	0.05	0.08	0.19	~0.3
Oxidado	0.11	0.12	0.18		
24-ST interperizado	0.4	0.32	0.27		
Superficie para techado	0.22				
Anodizado (a 1,000°F)	0.94	0.42	0.60	0.34	
Bronce					
Pulido	0.10	0.10			
Oxidado	0.61				
Cromo					
Pulido	0.08	0.17	0.26	0.40	0.49
Cobre					
Pulido	0.04	0.05	0.18	0.17	
Oxidado	0.87	0.83	0.77		
Hierro					
Pulido	0.06	0.08	0.19	0.25	0.45
Fundición, oxidado	0.63	0.66	0.76		
Galvanizado, nuevo	0.23			0.42	0.66
Galvanizado, sucio	0.28			0.90	0.80
Acero en placa, rugosa	0.94	0.97	0.98		
Oxido	0.96		0.85		0.74
Fundido				0.1-0.4	
Magnesio	0.07	0.13	0.18	0.24	0.30
Molibdeno en filamento			~0.09	~0.15	~0.2*
Plata					
Pulida	0.01	0.02	0.03		0.11
Acero inoxidable					
18-8, pulido	0.15	0.18	0.22		
18-8, interperizado	0.85	0.85	0.85		
Tubo de acero					
Oxidado		0.80			
Tungsteno en filamento	0.03			~0.10	0.35†
Zinc					
Pulido	0.02	0.03	0.04	0.06	0.46
Placa galvanizada	~0.25				
Materiales de construcción y aislantes					
Hojas de asbesto	0.93	0.93			
Asfalto	0.91		0.9		0.9†

* A 3,000°F
† A 6,000°F



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
E.L.M.C.F.

Side Rectangular Duct	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24
6	6.6																
7	7.1	7.7															
8	7.5	8.2	8.8														
9	8.0	8.6	9.3	9.9													
10	8.4	9.1	9.8	10.4	10.9												
11	8.8	9.5	10.2	10.8	11.4	12.0											
12	9.1	9.9	10.7	11.3	11.9	12.5	13.1										
13	9.5	10.3	11.1	11.8	12.4	13.0	13.6	14.2									
14	9.8	10.7	11.5	12.2	12.9	13.5	14.2	14.7	15.3								
15	10.1	11.0	11.8	12.6	13.3	14.0	14.6	15.3	15.8	16.4							
16	10.4	11.4	12.2	13.0	13.7	14.4	15.1	15.7	16.3	16.9	17.5						
17	10.7	11.7	12.5	13.4	14.1	14.9	15.5	16.1	16.8	17.4	18.0	18.6					
18	11.0	11.9	12.9	13.7	14.5	15.3	16.0	16.6	17.3	17.9	18.5	19.1	19.7				
19	11.2	12.2	13.2	14.1	14.9	15.6	16.4	17.1	17.8	18.4	19.0	19.6	20.2	20.8			
20	11.5	12.5	13.5	14.4	15.2	15.9	16.8	17.5	18.2	18.8	19.5	20.1	20.7	21.3	21.9		
22	12.0	13.1	14.1	15.0	15.9	16.7	17.6	18.3	19.1	19.7	20.4	21.0	21.7	22.3	22.9	24.1	
24	12.4	13.6	14.6	15.6	16.6	17.5	18.3	19.1	19.8	20.6	21.3	21.9	22.6	23.2	23.9	25.1	26.2
26	12.8	14.1	15.2	16.2	17.2	18.1	19.0	19.8	20.6	21.4	22.1	22.8	23.5	24.1	24.8	26.1	27.2
28	13.2	14.5	15.6	16.7	17.7	18.7	19.6	20.5	21.3	22.1	22.9	23.6	24.4	25.0	25.7	27.1	28.2
30	13.6	14.9	16.1	17.2	18.3	19.3	20.2	21.1	22.0	22.9	23.7	24.4	25.2	25.9	26.7	28.0	29.3
32	14.0	15.3	16.5	17.7	18.8	19.8	20.8	21.8	22.7	23.6	24.4	25.2	26.0	26.7	27.5	28.9	30.1
34	14.4	15.7	17.0	18.2	19.3	20.4	21.4	22.4	23.3	24.2	25.1	25.9	26.7	27.5	28.3	29.7	31.0
36	14.7	16.1	17.4	18.6	19.8	20.9	21.9	23.0	23.9	24.8	25.8	26.6	27.4	28.3	29.0	30.5	32.0
38	15.0	16.4	17.8	19.0	20.3	21.4	22.5	23.5	24.5	25.4	26.4	27.3	28.1	29.0	29.8	31.4	32.8
40	15.3	16.8	18.2	19.4	20.7	21.9	23.0	24.0	25.1	26.0	27.0	27.9	28.8	29.7	30.5	32.1	33.6

BIBLIOGRAFIA

- Andreini P., Jarach M.-Esercizi di Fisica Tecnica: Trasmissione del calore.- Fac. Agraria, Università di Milano, 1985/86

- Boumans G. - Grain handling and storage - Elsevier, Amsterdam 1985

- Chiumenti R. - Costruzioni rurali - Edagricole, Bologna 1987

- Gasparetto E.- L'essiccazione dei cereali: principi fisici, caratteristiche e misura dell'umidità - Industrie Agrarie no. 5, Verona 1973

- Gasparetto E.- Instalaciones para el secado de productos agrarios - II Jornadas de deshidratación y secado de productos agrícolas y forestales, Madrid 1988

- Hall D. W. - Manipulación y almacenamiento de granos alimenticios en las zonas tropicales y subtropicales - FAO, Roma 1971

- Hyde M.B. et al. - Airtight grain storage -
FAO Agr. Serv. Bulletin No. 17, Roma 1973

- Kneule F. - El secado - URMO, Bilbao 1976

- Mujumdar A.S.- Handbook of industrial drying -
Marcel Dekker, Inc. - New York & Basel, 1987

- - Agricultural grain driers: test methods and
performance
150 doc. DS/R 6016, 1986

- - Séchoirs continus à grains: détermination
des performances - Norme AFNOR U 31-601, 1986

- Norme ISO 1000, 1973

- Tópico de Graduación especial de electrónica,
Ings. Juan Amat, Charles Mcdermott, John Murphy,
John Padilla, Julio Panta.