

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



OPERACION Y SEGADO DE UN
MATERIAL ALIMENTICIO

T E S I S

Que Para Obtener el Título de
INGENIERO QUIMICO
P r e s e n t a

SERGIO ARMANDO SILVA MUÑOZ

1978



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS TESIS 1978
ABO M.C. 1978 2/01
FECHA _____
PROG _____



JURADO ASIGNADO

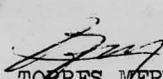
PRESIDENTE	PROF.	JOSE E. GALINDO FUENTES
VOCAL	PROF.	GRACIELA MARTINEZ ORTIZ
SECRETARIO	PROF.	JESUS TORRES MERINO
1er. SUPLENTE	PROF.	LUCILA MENDEZ CHAVEZ
2º SUPLENTE	PROF.	GENOVEVO SILVA PICHARDO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:
EL TECUAN, JALISCO.
LABORATORIO DE ING. QUIMICA UNAM



SUSTENTANTE: SERGIO ARMANDO SILVA MUÑOZ

ASESOR DEL TEMA: ING. QUIM. JESUS TORRES MERINO



A MI MADRE:

Ma. SOCORRO MUÑOZ
CON CARÍO

A LA MEMORIA DE MI PADRE
CRUZ SILVA NAJERA

A MIS HERMANOS:

ANTONIO

NORMA

MARTA

POR SU INFINITA AYUDA Y CONSEJOS.

A MI TIO SALVADOR (Q.E.P.D)
POR EL GRAN AMIGO QUE FUE

AL MAESTRO JESUS TORRES:
CON ESTIMACION Y AGRADECIMIENTO
POR SU COLABORACION

A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE
HICIERON POSIBLE LA REALIZACION
DE ESTE TRABAJO

I N D I C E

- I.- INTRODUCCION.
- II.- GENERALIDADES.
- III.- FUNDAMENTOS Y ECUACIONES.
- IV.- METODOS Y TIPOS DE SECADORES.
- V.- DESCRIPCION DEL EQUIPO.
- VI.- CALCULOS Y GRAFICAS.
- VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

C A P I T U L O 1

INTRODUCCION.

Este trabajo tiene la finalidad de que sea de utilidad a industriales de la alimentación y a técnicos predispuestos a la utilización de secaderos, a todos los cuales resultará de gran interés un estudio sobre la desecación de un material alimenticio de suma importancia en México, como es el chile.

Se trata de exponer con claridad cuál es el proceso de conservación del material en estudio, y su importancia dentro de la Economía Agrícola.

En este trabajo se hallan reunidos y expuestos de forma sencilla todos los elementos y datos prácticos relacionados con el fenómeno, tratamientos y aparatos que intervienen en el secado.

Resulta fácil observar que una desecación es tanto más económica cuanto mayor es la rapidez con que se lleva a cabo. Por lo tanto, interesa estudiar las características del fenómeno a fin de determinar las condiciones precisas para llevar a cabo una desecación industrial en el tiempo mínimo, con el mejor resultado posible, aprovechando al máximo el calor y el aire.

También se dan algunas recomendaciones de suma utilidad para el buen funcionamiento del secador.

SECADO.

El secado ha sido desde los tiempos más remotos, un medio de conservación de los alimentos. Su aplicación en forma mas sencilla se aprendió de la observación de la naturaleza. En el campo se secan los granos en los tallos por medio de la exposición al sol. A menudo se logra así un grado suficiente de sequedad en los alimentos, como en el caso de los granos en que la humedad final es de un 14 %, esto elimina las necesidades de secarlos mas a fin de que se conserven efectivamente. Este es el caso también de muchas semillas de plantas y especies y en menor grado en ciertas frutas como los dátiles y los higos, cuyo contenido de azúcar va aumentando a medida que se secan en el árbol. El hombre debió haber observado estos productos secados por el sol, antes de aprender a secar el pescado y la rebanadas delgadas de carne al colgarlas en algún lugar expuestas al sol y al aire. Cuando el secado de estos productos animales requiera mucho tiempo, la descomposición bacteriana tenía lugar durante el proceso, de tal manera que empezó a emplear el humo y la sal como agentes preservadores para complementar el secado.

El secado por medio del sol se emplea aún en muchas regiones del mundo, pero este proceso representa varios inconvenientes obvios que son los siguientes:

- a) El secado es lento y no apropiado para muchos productos de alta calidad.
- b) Generalmente no reduce el contenido de humedad a menos de 15 %, lo cual, en un gran número de productos, es insuficiente para permitir la estabilidad en el alimento.

- c) Requiere de un espacio bastante grande.
- d) Los alimentos expuestos al sol son susceptibles a la contaminación y a pérdidas debidas a los roedores, los insectos y a otros factores.

Era de esperarse, que el secado de los alimentos se trasladara a los interiores en que la operación pudiera controlarse en forma más eficiente. Los esfuerzos de lograr el secado artificial por medio de aire caliente datan de 1795, año en que se invento la primera estufa con aire caliente y en 1840 se invento un deshidratador para verduras en Inglaterra.

Por secado de alimentos, queremos decir la eliminación casi completa del agua que contienen éstos, bajo condiciones de control que producirán sólo un mínimo de cambios o, idealmente ningún cambio, en las propiedades del alimento. La humedad final es de 1 a 5%, según el producto.

Cualquiera que sea el método de secado empleado, se llevan a cabo dos etapas en el proceso: 1) la introducción del calor al producto; 2) la extracción de la humedad del producto.

Estas dos etapas no siempre son favorecidas por las mismas condiciones de operación. Por ejemplo, se puede comprimir al material entre dos placas calientes. Esto proporcionaría un contacto estrecho y mejoraría la transmisión de calor al interior de material, pero el mismo contacto estrecho con las placas obstaculizaría el escape de la humedad libre.

Al secar un producto procedemos a obtener la velocidad máxima en el secado, de manera que hacemos todos los esfuerzos posibles a fin de acelerar las velocidades de transmisión de calor y la transferencia de masa. Las siguientes consideraciones son importantes a este respecto: área de la superficie, temperatura del aire, velocidad del aire, humedad del aire, temperatura del agua y tamaño y forma de la superficie húmeda.

IMPORTANCIA DEL CHILE EN MEXICO.

Probablemente el cultivo de chile tiene mayor importancia en México que en ningún otro país; su consumo forma parte, en gran medida, de la alimentación diaria del pueblo.

El chile es una verdura que se conserva por largo tiempo, ya que la desecación permite su almacenamiento y transporte a grandes distancias. Por este motivo es una fuente de energía durante las épocas de malas cosechas o en lugares más aislados, ya que, por otra parte, los análisis químicos demuestran que el fruto seco conserva un alto valor nutritivo, especialmente de vitamina "A" y "C".

El chile se cultiva en muy variadas condiciones de clima y de suelo por lo tanto, pueden emplearse diferentes métodos de cultivo según la variedad y región de que se trate.

PRODUCCION NACIONAL DE CHILE.

En México el chile ha ocupado por siglos un lugar importante en el consumo de verduras. Los datos más recientes que se presentan en el cuadro (1-º), da una idea de la extensión anual del cultivo, la cual es casi uniforme de un año a otro. Considerando el área total cultivada con chile verde y seco, se observa que en 1966 se sembraron alrededor de 53,800 hectáreas.

La producción de chile seco ha sido constantemente mas baja que la de verde, y las regiones de mayor producción son diferentes para uno y otro.

Sinaloa, Veracruz y Guanajuato encabezan la producción de chile verde, con mas de la tercera parte de la extensión total de cultivo. Zacatecas, San Luis Potosi y Aguascalientes son tradicionalmente los centros de producción de chile seco y abarcan cerca de la cuarta parte del total del área cultivada. Esta división de las regiones de cultivo es el resultado de la intervención de varios factores como el clima, los transportes y el mercado.

PRINCIPALES VARIEDADES.

El número de tipos y nombres regionales con que se conoce a los chiles cultivados en México son muchos, entre estos cabe citar: Ancho, Mulato, Pasilla, Jalapeño, Serrano, Guajillo, Güero, Cascabel, Piquín, Chiltepín y Cora. Estos tipos son picantes que se destinan para el consumo Nacional.

Dentro de las variedades introducidas de los Estados Unidos y que se destinan para el mercado de exportación, se encuentran los siguientes: Chile dulce (no picante), Yolo Wonder, Californi Wonder, Emerald Giant, Keystone Resistant Giant y Florida Giant. Chiles picantes, Anaheim, Fresno, Yellow Cuban, Caribe y Floral Gem.

CHILE PICANTE.

Anaheim. Frutos largos y angostos de alrededor de 18 centímetros de longitud por 3.5 cm. de diámetro. Colgantes, terminados en punta, de color verde intenso que cambia a escarlata y de sabor medianamente picante. Tarda 80 días del transplante a la cosecha y se le usa para la deshidratación y para enlatado. Se siembra en el norte para exportación.

CHILE PASILLA.

Pabellón. Planta de tamaño medio, con altura de 55 a 60 centímetros. Follaje de color verde oscuro. Las plantas producen abundantes frutos, la mayoría de los cuales no tocan el suelo. Los frutos tiernos son rectos y largos, de 18 a 20 centímetros, y tienen el cáliz envolvente. Son de tipo dos venas, puntiagudos y gruesos. El color es verde oscuro y al madurar cambia directamente al café moreno oscuro, típico de la variedad. Al secarse toman un color café "achocolatado". Las plantas son tolerantes al ataque de algunos hongos que producen la pudrición de la raíz y la marchitez del follaje. Tardan 145 días del trasplante a la iniciación de la cosecha. Esta variedad fué obtenida por el Instituto Nacional de Investigación Agrícola.

CHILE MULATO.

V-2. Planta de tamaño grande, con altura de 60 a 80 centímetros. Follaje abundante y vigoroso. Las plantas se caracterizan por su abundante producción. Los frutos son grandes, de 12 a 18 centímetros de longitud, y con cajete. El color es verde muy oscuro cuando el fruto está tierno, y al madurar cambia al café oscuro; al secarse toma un color café "achocolatado" y la epidermis se vuelve "china". Los primeros frutos se cosechan a los 130 días del trasplante. Esta variedad fué obtenida por el I.N. de I.A.

CHILE ANCHO.

Esmeralda. Planta de tamaño medio, con altura de 58 a 60 centímetros, y follaje cerrado y vigoroso. Los frutos son muy grandes, de color verde esmeralda brillante, y al madurar cambian al color café claro, moreno y rojo oscuro; tienen epidermis áspera y opaca. Después del secado el fruto es de color rojo intenso y toma el aspecto "chino", típico del Chile ancho. Es tolerante al ataque de algunos hongos que producen la pudrición de la raíz y la marchitez del follaje. Se empieza a cosechar 145 días después del trasplante. Esta variedad fue obtenida por el I.N. de I.A.

CHILE VERDEÑO.

Verdeño. Plantas erectas de tamaño medio grande, con altura de 60 a 65 centímetros, follaje de color verde oscuro y vigoroso. Los frutos tiernos son de tamaño medio, verde oscuro y al madurar cambian de color a moreno y después a un rojo brillante; su epidermis es lisa. Los frutos tienen poco "cajete"; son bien formados y muy suculentos; al secarse toman un color rojo oscuro brillante y muy atractivo, y la textura se vuelve "china". El verdeño es tolerante al ataque de algunos hongos. La cosecha se inicia 136 días después del trasplante.

FLOR DE PABELLON.

Flor de pabellon. Plantas de tamaño grande, con altura de 65 a 70 centímetros, las hojas son de color verde oscuro y las ramas forman un follaje de tipo de vaso, tienen desarrollo vigoroso. Las plantas producen frutos en abundancia en todas las ramas y no tocan el suelo. La primera flor se presenta alrededor de los 51 días después del trasplante, y los primeros frutos maduros se pueden cosechar alrededor de 136 días después del mismo trasplante. Los frutos son de tamaño grande, y de color verde ligero a oscuro, que al madurar cambian directamente a rojo brillante; la epidermis tiene apariencia cerosa. Los frutos en general tienen muy poco cajete, muy buena forma y son firmes y bien desarrollados. Al secarse toman un color rojo oscuro y son muy uniformes, con la epidermis "china", la variedad es tolerante al ataque de alguno hongos. Esta variedad fué obtenida por el I.N. de I.A.

COMPORTAMIENTO DE LA PRODUCCION Y DEL COMERCIO EXTERIOR.

La producción del cultivo de chile verde en el valor total de la producción Agrícola Nacional, se incrementó de 0.5% en 1960 a 2.38% en 1977 (cuadro I-a). Este incremento se debió a que la producción en éste período aumentó poco más de 437%, debido al aumento de los rendimientos de alrededor de 167%, así como la superficie en un 94%. Los aumentos promedios anuales en rendimiento fueron de 386 Kilogramos por hectarea y 2,370 hectareas en la superficie (cuadro I-b).

El potencial del mercado externo para chile verde, queda de manifiesto con el acelerado ritmo de las exportaciones, al pasar éstas de 12,000 en 1960 a 89,000 en 1977, lo que representa un aumento de 623% (cuadro I-c).

PARTICIPACION EN EL VALOR DE LA PRODUCCION AGRICOLA NACIONAL.
 CHILE VERDE
 MILES DE PESOS

Cuadro I-a

AÑO	Valor de la Prod. de chile verde.	Valor de Prod. Agrícola Nacional.	%
1960	81 242	16 399 251	0.50
1961	94 499	19 070 433	0.50
1962	113 660	20 070 658	0.54
1963	132 442	23 740 994	0.56
1964	162 437	26 833 141	0.61
1965	169 712	28 501 735	0.60
1966	207 754	30 116 696	0.69
1967	243 908	30 299 291	0.80
1968	241 526	31 865 212	0.76
1969	237 882	30 087 507	0.79
1970	261 419	32 956 382	0.79
1971	436 553	35 768 272	1.22
1972	855 733	39 455 220	2.03
1973	909 840	54 089 332	1.71
1974	1 038 375	62 093 710	1.67
1975	1 170 030	56 707 081	2.03
1976	1 392 238	59 586 190	2.33
1977*	1 490 266	62 465 299	2.38

* Datos estimados.

RENDIMIENTO, SUPERFICIE, PRODUCCION Y VALOR DE LA PRODUCCION.
1960 - 1977
CHILE VERDE.

Cuadro I-b

Concepto.	1960	1970	1971	1972	1973	1974
Rendimiento Ton/ha	3	5	7	7	7	7
Sup. Cosechada miles de ha.	33	36	45	61	63	55
Producción miles de toneladas.	90	191	310	435	440	415
Valor de la pro- ducción millones de pesos.	81	261	436	800	925	1 038

1975	1976	1977	Incremento 1960-1977	Incremento medio anual 1960 - 1977
8	8	8	167	0.386
49	54	56	94	2.370
400	461	490	437	30.220
1170	1392	1490		

PRODUCCION, IMPORTACION, EXPORTACION Y CONSUMO NACIONAL.
1960 - 1977
CHILE VERDE.

AÑO	Producción	Imp.	Exportación	Consumo Interno Toneladas
1960	90 492	11	11 793	78 710
1970	190 835	1	37 085	153 751
1971	310 202	1	46 093	264 110
1972	435 074	122	37 509	397 687
1973	440 433	57	58 952	381 525
1974	415 350	62	64 431	365 998
1975	400 790	92	46 882	354 000
1976	461 900	112	75 012	387 000
1977*	490 600	130	89 450	401 020

*Datos estimados.

SITUACION ACTUAL.

El problema principal que tiene este cultivo se presenta en el proceso de comercialización interna que, a causa de la fuerte estacionalidad de la producción, origina variaciones de consideración en los precios que afectan los intereses tanto de los productores como del consumidor.

DEMANDA INTERNA Y EXTERNA.

La demanda total para 1978 se estima de alrededor de 532 mil toneladas y para 1980 de 608 mil toneladas, correspondiendo al primer año 428 mil toneladas para el consumo interno y 100,000 toneladas para exportaciones; para 1980 se esperan 470,000 toneladas para la demanda Nacional y 130 mil para exportaciones. (cuadro I-d)

DEMANDA INTERNA ESPERADA DE CHILE VERDE DE 1978 a 1980

Cuadro I-d	
Año	Miles de Toneladas
1978	428 000
1979	449 000
1980	470 000

ESTIMACION DE LA PRODUCCION 1978-1980

Cuadro I-d'

AÑO	Producción Estimada
1978	532 500
1979	569 600
1980	607 900

CHILE VERDE

1970 - 1977

Cuadro I-d''

AÑO	Sup. Cosechada.	Rend. medio Kg/ha	Producción Toneladas.	Precio Rural \$/Ton.
1970	36 291	5 258	190 835	1 370
1971	44 949	6 901	310 202	1 410
1972	60 787	7 157	435 070	1 967
1973	62 523	7 044	440 420	2 066
1974	55 765	7 453	415 614	2 500
1975	49 346	8 122	400 790	2 920
1976	53 872	8 574	461 900	3 020
1977	56 200	8 836	496 600	3 100

CHILE SECO
1970 - 1977

Cuadro I-e

AÑO	Superficie	Rend. medio	Producción	Precio
	Cosechada (ha)	Kg/ha	Toneladas	Rural \$
1970	18 768	1 109	20 811	7 580
1971	18 113	1 149	20 806	7 720
1972	24 949	1 137	28 360	8 639
1973	27 466	1 188	32 624	9 696
1974	26 932	1 288	34 624	18 000
1975	30 949	1 293	40 017	24 600
1976	33 517	1 332	44 644	30 000
1977	36 085	1 338	48 295	28 000

AÑO	Valor de la	Exp.	Imp.	Consumo
	Producción \$			Nacional.
1970	157 693 387	2 570	92	18 333
1971	160 538 177	1 270	165	19 693
1972	245 015 051	1 048	348	27 660
1973	316 344 000	2 726	734	30 634
1974	623 232 000	2 168	220	32 746
1975	948 418 200	2 840	566	37 743
1976	1339 320 000	3 576	649	41 717
1977	1352 260 000	2 091	510	45 694

CHILE VERDE
1970 - 1977

AÑO	Valor de la			Consumo Nacional.	
	Producción \$	Imp.	Exp.		
1970	261 419 183	1	37 085		153 715
1971	436 553 631	1	46 093		264 110
1972	855 733 631	122	37 509		397 687
1973	909 840 136	57	58 952		381 525
1974	1039 035 000	62	64 431		365 998
1975	1170 030 680	92	46 882		354 000
1976	1392 238 000	112	75 012		387 000
1977	1490 266 000	150	89 450		407 000

COMPOSICION
(CHILE)

AGUA	91	%
CALORIAS	5	
PROTEINAS	0.3	(g)
CALCIO	4	(mg)
HIERRO	0.2	(mg)
RI BLOFAVINA	0.01	(mg)
MIACINA	0.00	
VITAMINA A	18.00	mcg
VITAMINA C	8	mcg
FIBRA BRUTA	1.5	
CENIZAS	0.6	

C A P I T U L O 11

GENERALIDADES.

Se hace a continuación una descripción de los términos más usados en relación con la operación de secado.

Contenido Crítico de Humedad.- Es el contenido de humedad ' que existe al final del período de velocidad constante y es representado en las figuras lll-la, lll-lb y lll-lc por el punto "C".

Contenido de Humedad.- El contenido de humedad de una sustancia se puede representar basandose en su "peso húmedo" (Kg de agua por Kg de producto húmedo), o en "peso seco" (Kg de agua por Kg de producto seco). Por lo tanto, es el peso de agua que acompaña a la unidad de peso de sólido seco o húmedo.

Contenido de Humedad en el Equilibrio.- Es la humedad límite a la cual un material dado puede ser secado bajo condiciones específicas de temperatura y humedad.

Cuerpos no Higroscópicos.- Se dice que un material es no higroscópico cuando la presión del vapor del agua que acompaña al sólido, es igual a la tensión de vapor del agua a esa temperatura. Este fenómeno por lo regular se presenta en los materiales de poros grandes.

Cuerpos Higroscópicos.- Un material es higroscópico, cuando la presión del agua que acompaña al sólido es menor que la tensión de vapor del agua a la misma temperatura.

Difusión Interna.- Puede ser definida como el movimiento de líquido o vapor a través del sólido como resultado de una diferencia de concentraciones.

Distribución Inicial de Humedad.- Se refiere a la repartición de la humedad a través de un sólido al comenzar el proceso de secado.

Flujo Capilar.- Es el movimiento del líquido a través de los intersticios y sobre la superficie del sólido, causado por una atracción molecular líquido-sólido.

Gradiente de Humedad.- Se refiere a la distribución del agua en el sólido en un momento dado en el proceso de secado.

Humedad Desligada.- Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada; o bien la humedad libre del sólido en contacto con aire saturado.

Humedad Libre.- Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones dadas. Por lo tanto, es la humedad que pierde el sólido en contacto con aire, durante un tiempo suficientemente prolongado en condiciones dadas y constantes, y dependerá tanto de la humedad del sólido como de la humedad relativa del aire.

Humedad ligada.- Es el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con aire saturado; o bien la humedad mínima del sólido necesaria para que éste deje de comportarse como higroscópico. El fenómeno característico en el proceso de secado será de que la humedad ligada deberá conservar una tensión de vapor en relación a la temperatura del producto.

Humedad Relativa.- Puede definirse como la relación entre la presión parcial de vapor y la presión de vapor del líquido a la temperatura que se encuentra. La humedad relativa es por lo tanto, una función de la composición de la mezcla y de su temperatura, así como la naturaleza del vapor.

Líquido Capilar.- Es el líquido que queda retenido en los intersticios de los materiales porosos y que al ser sometidos al proceso de secado, se desplazan hacia la superficie del sólido bajo la acción de fuerzas capilares.

Líquido de Hinchado.- Con esta denominación entendemos toda clase de humedad que provoca en un cuerpo un hinchamiento o aumento de volumen, este líquido forma parte integral de la fase del producto.

Período de Velocidad Constante.- Es el período durante el cual la velocidad del agua desplazada por unidad de superficie seca es constante.

Período de Velocidad Decreciente.- Es el período de secado durante el cual, la velocidad de secado instantáneo continuamente disminuye.

Porcentaje de Humedad.- Es la relación de la humedad actual y la humedad de saturación, a la temperatura del gas y puede ser expresada como un porcentaje.

Punto de rocío.- Es la temperatura a la cual una mezcla de aire vapor no saturado debe enfriarse para alcanzar el estado de saturación.

Temperatura de Bulbo Humedo.- Se define como la temperatura de equilibrio alcanzada por un líquido que se vaporiza en un gas.

C A P I T U L O 111

FUNDAMENTOS Y ECUACIONES.

El secado como cualquier otra operación requiere de calculos fundamentales, los cuales pueden ser abordados desde ' dos puntos de vista: según el proceso y según el proyecto.

De acuerdo con el proceso, los calculos se realizan en ' función del proceso de transmisión de calor necesario para ' evaporar el agua y también del método de eliminar el vapor ' de agua.

Según el proyecto, se calcula la velocidad de secado o tiempo necesario para efectuarlo y las cantidades de calor y aire precisas para secarlo, se utilizan la transmisión de calor por convección, conducción, radiación o una combinación' de cualquiera de las tres.

Las características que distinguen a los secadores, es ' principalmente, el método de transmisión de calor, aunque la gran mayoría de ellos el mecanismo se efectúa calentando primero la superficie del sólido y de ahí al interior, la transferencia de masa se efectúa como líquido o vapor o como ambos dentro del sólido, y como vapor desde la superficie húmeda.

Podemos distinguir dos mecanismos en el proceso de secado, mecanismo interno de la difusión del líquido hacia el ' exterior mediante gradientes de presión originados por un incremento en la temperatura; el mecanismo externo comprende, ' la evaporación del líquido desde la superficie hacia el seno del gas secante, mediante la cesión de calor por parte del ' aire, hasta obtener el calor latente de evaporación necesario para evaporar el líquido.

El mecanismo interno de circulación del líquido está determinado fundamentalmente por la estructura del sólido, difusión de sólidos homogéneos, circulación debida a gradientes de concentración y presión; circulación causada por la gravedad y circulación originada por una sucesión de evaporaciones y condensaciones.

De los mecanismos anteriores, uno es el que generalmente predomina, sin embargo, no se puede precisar si en alguna parte del período de velocidad decreciente, predomine uno o varios de ellos, esto es lo que ha hecho pensar a los investigadores que no es posible determinar con precisión la trayectoria de la curva de secado en la etapa final ya que la mayoría de la veces se han encontrado desviaciones en la práctica con respecto a la teoría.

De lo anterior se deduce que, deben efectuarse varias pruebas para determinar con la mayor precisión la curva de secado.

GENERALIDADES DE SECADO

La operación de secado consiste en la eliminación de un líquido contenido en un sólido, por medios térmicos. Los contenidos de humedad son generalmente bajos en comparación a la cantidad de sólidos, lo que diferencia al secado de la evaporación, ya que en esta operación la eliminación de líquido es en grandes cantidades.

También podemos distinguir la operación de secado de la filtración y de la centrifugación, porque mientras en la primera, la remoción de líquido se efectúa por medios térmicos y mecánicos, básicamente podemos expresar que al secar cualquier material le estamos disminuyendo el líquido por medio de vaporización térmica, y el contenido de humedad siempre y cuando el líquido no se encuentre en exceso.

El diseño de equipo de secado, requiere de conocimientos fundamentales, tales como transferencia de calor, transferencia de masa, así como también de las propiedades físicas y químicas del material por secar. La complejidad de los mecanismos de transferencia de materia ha hecho que los estudios de secado, se basen en transferencia de calor, es decir que la práctica ha demostrado que resulta menos difícil calcular con mayor exactitud los coeficientes de transferencia de calor, que los de masa, datos fundamentales para el diseño adecuado.

La naturaleza del producto que va a ser secado es de primordial importancia, además de las mencionadas se incluyen la rigidez, flexibilidad, granulometría, solución o cristales.

Factores que influyen en el mal funcionamiento de un secador.

Se tiene que realizar experiencias que proporcionen datos del comportamiento del material en diversos secadores y en distintas condiciones de proceso, tomar en cuenta el deterioro del material por sobre-calentamiento, dificultades de alimentación del material húmedo, así como sacarlos del mismo.

PERIODO DE SECADO.

En las experiencias de secado, al representar la humedad del sólido frente al tiempo, operando a condiciones constantes de secado, se obtienen curvas del tipo indicado en la (Fig. lll-1a), en esta curva se observa el caso en que un sólido mojado pierde humedad por evaporación desde la superficie saturada, seguida por un período de evaporación desde una superficie saturada de área gradualmente de creciente, y finalmente el período en donde se evapora el agua en el interior del sólido.

Aunque la figura anterior indica que la velocidad de secado esta sujeta a variaciones del contenido de humedad con respecto al tiempo, estas las podemos apreciar mejor en sus diferentes etapas, diferenciando la curva, númerica o graficamente y trazando la velocidad de secado en función del contenido de humedad como se indica en las figuras (lll-lb y lll-lc). Estas curvas nos demuestran que la operación no es un proceso continuo y estable en el cual domine un solo mecanismo. La sección B-C en las curvas nos demuestran el periodo de velocidad constante. En la (Fig. lll-1a), este periodo esta representado por una línea recta; la cual llega a ser horizontal en la porción de curva de las otras figuras.

La porción de curva C-D de la primera figura, representa el periodo de velocidad decreciente. El punto E; representa el lugar en el cual las superficies expuestas llegan a estar completamente insaturadas y marca el comienzo del ciclo de secado durante el cual, el movimiento de hume

dad interna regula la velocidad de secado. El punto C, es' en donde termina el periodo de velocidad constante y empieza el de velocidad decreciente. La sección A-B representa' un periodo de calentamiento, que puede ser importante o no según sea el proceso.

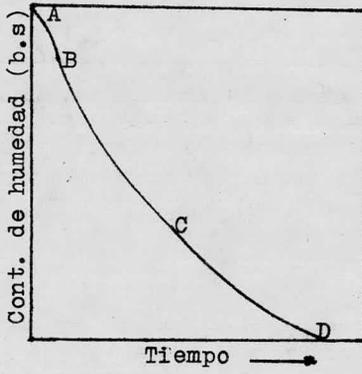


Fig. 111-la

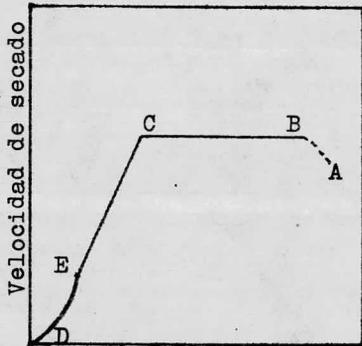


Fig. 111-lb

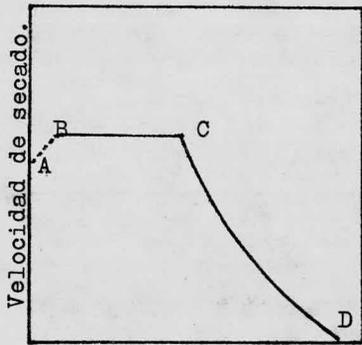


Fig. 111-lc

MECANISMO DE DIFUSION EN EL MOVIMIENTO DE HUMEDAD.

En sólidos relativamente homogéneos tales como fibras orgánicas, sustancias como gel o pastillas porosas, la probabilidad de que la humedad se mueva hacia la superficie es debida a la difusión molecular. La velocidad del movimiento de humedad es expresada por la ley de Fick:

$$\frac{\partial C_a}{\partial \theta} = D_1 \frac{\partial^2 C_a}{\partial X^2} \quad \text{----- 111-1}$$

la cual es rearmplada para este caso particular

$$\frac{dX'}{d\theta} = D_1 \frac{\partial^2 X'}{\partial X^2} \quad \text{----- 111-2}$$

Para la integración de esta ecuación, es necesario establecer las condiciones frontera y que las características de la difusividad en la fase líquida (D_1), sean especificadas. Para simplificar la ecuación, D_1 la consideraremos como constante y que el secado ocurriera por una sola cara de una lámina, además que los lados estuvieran aislados. Aplicando estas restricciones y suponiendo que el contenido inicial de humedad esta igualmente distribuido a través de la lámina, Sherwood y Newman obtubieron la siguiente igualdad:

$$\frac{X - X_e}{X_c - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ e^{-D_1 \theta (\bar{u}/2d)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_1 \theta (\bar{u}/2d)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_1 \theta (\pi/2d)^2} + \dots \right\} \text{----- 111-3}$$

Esta igualdad se simplifica para tiempos de secado largos:

$$\frac{X - X_e}{X_c - X_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_1 \theta (\pi/2d)^2} \text{----- 111-4}$$

Para obtener la velocidad de secado, esta igualdad es diferenciada:

$$\frac{dX}{d\theta} = \frac{D_1}{4d^2} (X - X_e) \text{----- 111-5}$$

Puesto que el movimiento del líquido por difusión es relativamente lento, la curva de velocidad de secado casi no muestra el período de velocidad constante. En este caso X_c podría ser el contenido de humedad final de el período de velocidad constante, siendo idéntico al contenido crítico de humedad.

MECANISMO CAPILAR DEL MOVIMIENTO DE HUMEDAD.

Para cámaras de sólidos, o para sustancias con una estructura porosa grande, el flujo de agua a través de los poros no va de acuerdo con la ley de difusión molecular. Para estos materiales la humedad se desplaza de una región de alta concentración a una más baja, como resultado de los efectos de la tensión superficial y de las diferencias de fuerzas en las cabezas hidrostáticas. La potencia de las fuerzas capilares en un punto dado de un poro, depende de la curvatura de los meniscos, la cual es una función de la sección transversal de los poros. Si se sumerge un tubo capilar de radio "r" en un líquido, la experiencia muestra que éste se eleva en el tubo a cierta altura, como se indica en la (Fig. 111-2). La superficie superior del líquido en el interior del tubo forma una área circular cuya convexidad se distingue en el interior. Si se toma una superficie que se aproxime en forma a una esfera, con un ángulo de contacto cercano a 180° y si además se desprecia la densidad del medio ambiente, se obtiene la altura por la fórmula:

$$H = \frac{2\sigma}{\gamma_l r} = \frac{2}{A} \frac{\sigma}{\text{gr}} \quad \text{-----} \quad 111-6$$

La presión eficaz en el capilar es por consiguiente:

$$P_c = H \gamma_l = H \frac{g}{9.81} = \frac{2\sigma}{r} \quad \text{-----} \quad 111-7$$

Si en un sólido húmedo se reúnen capilares de diferentes anchuras resulta que, como consecuencia de las diferencias de presiones debidas a las desigualdades entre los radios "r", los capilares más estrechos aspiran el líquido de los capilares más anchos. Además la presión desarrollada se emplea para vencer el rozamiento del líquido. La altura aparente de la columna viene dada por la ecuación:

$$H_{ap} = \left(\frac{gA}{9.81} + \frac{dPr}{dH} = \frac{2\sigma}{r} \right) \text{----- 111-8}$$

En donde dPr/dH , representa la caída de presión necesaria para vencer la resistencia originada por el rozamiento.

Según el principio de Poiseulle, se tiene:

$$\frac{dPr}{dH} = \frac{8 \eta u}{r^2} \text{----- 111-9}$$

En donde:

u = Velocidad del líquido, (m/s).
 η = Viscosidad dinámica, (Kp s/m²).

Si se designa por V , el volumen del agua evaporada por hora se obtiene con $V = r^2 \Pi u$:

$$\frac{dPr}{dH} = \frac{8 \eta V}{r^4 \Pi} \quad \text{----- 111-10}$$

la altura aparente será entonces:

$$H_{ap} = \frac{2\sigma}{r \left(\frac{g}{9.81} + \frac{8 \eta V}{r^4 \Pi} \right)} \quad \text{----- 111-11}$$

Según Krischer puede representarse este movimiento de humedad capilar, por la ecuación:

$$\dot{G} = - FK \rho_s \frac{dX}{dl} \quad \text{----- 111-12}$$

En la que:

- \dot{G} = humedad desplazada Kg/h;
- F = superficie de la sección transversal m^2 ;
- K = coeficiente de difusividad de la humedad m^2/h ;
- $\frac{dX}{dl}$ = gradiente de humedad l/m;
- X = porcentaje de humedad con respecto a un kilogramo de material seco Kg/Kg;
- l = recorrido vertical a la superficie de transferencia de materia
- ρ_s = densidad de la sustancia (seca) anhidra Kg/m^3 .

El signo negativo indica que el líquido se desplaza en dirección del gradiente decreciente de humedad.

Los sólidos porosos contienen una complicada red de poros y canales, cuya sección transversal varía ampliamente. Dado que la succión ejercida por los capilares es tanto más fuerte cuanto más estrechos son los poros, los meniscos de los poros más alejados del orificio superficial retroceden y caminan hacia el interior del producto, es decir que la potencia de las fuerzas capilares en un poro de un producto determinado depende de la estructura de los meniscos, los cuales son función de la sección transversal del poro. Debido a que el agua es desplazada de la superficie, los poros amplios son los que pierden su humedad primero. El aire ingresa al material por los orificios superficiales y por los lados, si el secado se lleva a cabo por una sola cara.

Una curva típica de secado de un sólido poroso es la que se muestra en la (Fig 111-lb).

El secado de un producto húmedo comienza muy a menudo por un período de velocidad constante, sección B-C. Este fenómeno se refiere a una humectación mas o menos completa de la superficie del producto. Su secado es análogo a la evaporación de una superficie líquida. Debido al movimiento del líquido en el interior del sólido, se produce una diferencia de humedades de la que resulta una disminución del contenido de humedad en la superficie. Esta permanece húmeda mientras la fuerza de aspersion de los capilares sea lo suficientemente grande para traer rápidamente del interior la cantidad de líquido que se evapora en la superficie en las condiciones que imperan en el aire ambiente.

La primera sección de la línea C-E es el primer período de velocidad decreciente. A medida que el secado prosigue el líquido en los poros amplios continúa retirándose hasta al canzar un estrangulamiento dentro del poro, así que entre C y E la superficie real que se esta saturando es cada vez menor. El secado continúa en la superficie saturada en la misma proporción que la observada en el período de velocidad constante. La proporción global de secado se reduce, puesto que el calor como la masa deben difundirse a través de las capas superficiales del sólido, en este momento el punto E, o sea el segundo punto crítico es alcanzado y la humedad se ha reducido en todos los poros superficiales. Un secado posterior incluye trayectorias de difusión cada vez mas largas para el calor y la masa. Durante los últimos pasos del secado, la superficie del sólido se aproxima a la temperatura del medio secante, pero la superficie a partir de la cual tiene realmente lugar la evaporación permanece a la temperatura de bulbo húmedo. El segundo punto crítico es muy difícil de encontrar experimentalmente y frecuentemente la curva de velocidad de secado es suave de C a E. Las curvas varían ampliamente en cuanto a forma y pendiente; dependiendo de la estructura del sólido y de la facilidad del movimiento de humedad en el interior del mismo. Debido a que la superficie real que se esta secando se encuentra dispersa y discontinua, el mecanismo que controla es el de difusión de calor y de masa a través del sólido poroso al final del proceso de secado.

Cuando el mecanismo que controla es el de capilaridad, el período decreciente de secado puede expresarse con bastante precisión por medio de la ecuación:

$$\left(\frac{dX}{d\theta} \right)_d = - K_1 (X - X^*) \quad \text{----- 111-13}$$

En donde K_1 , es una función del período constante de secado.

$$K_1 = - \frac{ (dX/d\theta)_c }{ X_c - X^* } \quad \text{----- 111-14}$$

El período de velocidad constante de secado será:

$$W_c = K_y \Delta P = \frac{ h_c \Delta t }{ \lambda } = K_h \Delta H = \frac{ S dX }{ A d\theta } \quad \text{----- 111-15}$$

$$\left(\frac{dX}{d\theta} \right)_d = \frac{ h_c }{ d \lambda } (t - t_i) = \frac{ h_c A }{ \lambda S } (t - t_i) \quad \text{111-16}$$

La constante K_1 se convierte en:

$$K_1 = \frac{ h_c (t - t_i) }{ \rho_s \lambda d (X_c - X^*) } \quad \text{----- 111-17}$$

Por lo tanto, el período de velocidad decreciente en este caso es dado por:

$$\left(\frac{dx}{d\theta} \right)_d = - \frac{h_c (t - t_i) (X - X^*)}{\rho_s \lambda d (X_c - X^*)} \quad \text{----- 111-18}$$

Y el tiempo de secado en este período será:

$$\theta_d = \frac{\rho_s \lambda d (X_c - X^*)}{h_c (t - t_i)} \ln \frac{X_c - X^*}{X - X^*} \quad \text{----- 111-19}$$

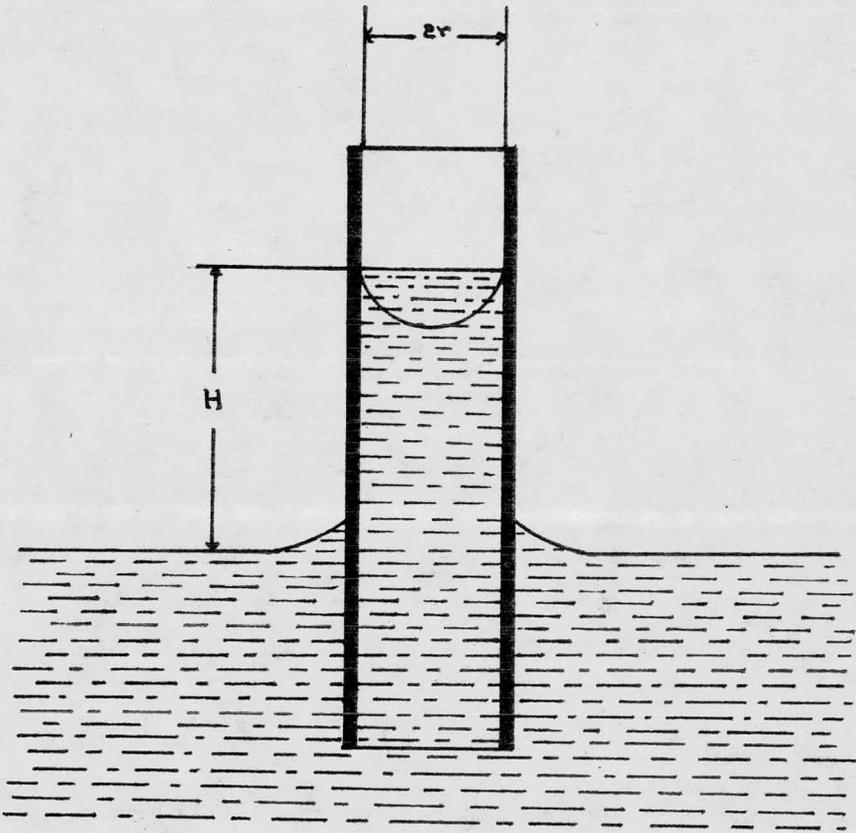


Figura III-2.

VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE.

En este período, la superficie del sólido esta totalmente cubierta por una capa de líquido y la evaporación de penderá solamente de la velocidad de difusión de vapor o ' de la intensidad de paso de calor a través de la capa lími te de aire. El movimiento de humedad dentro del sólido es' muy rápido para mantener una condición saturada en la su-- superficie y la velocidad es controlada por la velocidad de' transferencia de calor, hasta alcanzar la evaporación de ' la superficie. Durante este período, la superficie mojada' se comporta como una superficie de agua libre (el agua en la superficie ejerce una presión igual a la tensión de va-- por a la temperatura de la superficie). La resistencia de difusión a través del sólido hasta la superficie de secado es despreciable, de modo que la velocidad de difusión en ' un sólido es igual a la velocidad de secado.

Atendiendo a la difusión de vapor, la velocidad de se cado vendrá dada por:

$$W_c = K_y (Y_i - Y) \quad \text{----- 111-20}$$

Haciendo referencia a la intensidad del paso de calor. Si el calor se emplea unicamente en evaporar la humedad, ' la velocidad de secado estará representada por:

$$W_c = \frac{U}{\lambda_i} (t - t_i) \quad \text{----- 111-21}$$

Normalmente se hace uso de esta ecuación, ya que el error' en la determinación de t_i afecta a $(t - t_i)$ menos que el error de Y_i al termino $(Y_i - Y)$. Por otra parte, puede ' conocerse con mayor seguridad los coeficientes de esta ecuación.

COEFICIENTE INTEGRAL DE TRANSMISIÓN DE CALOR.

El valor de este coeficiente depende del mecanismo del paso de calor al cuerpo húmedo. Si la transmisión se efectúa por convección del aire a la superficie húmeda, en ausencia de cualquier otro calor, la temperatura superficial se aproxima a la temperatura de bulbo húmedo y el valor de este coeficiente será:

$$U = h_c \quad \text{----- 111-22}$$

El coeficiente de convección (h_c) para mezcla aire-agua, puede calcularse a partir de las expresiones siguientes:

Para flujo de aire paralelo a la superficie y valores de "G" comprendidos entre 2,500 y 30,000 Kg/h m.²

$$h_c = 0.0175 G^{0.8} \quad \text{----- 111-23}$$

Como los cálculos técnicos del coeficiente local de transmisión de calor no nos interesa, sino más bien su valor medio a partir del comienzo de la placa hasta un punto "L" en la misma. Este valor medio se obtiene a partir del número de Nusset.

$$N_{um} = \frac{h_c L}{K} = 0.664 R_e^{1/2} P_r^{1/3} \quad \text{----- 111-24}$$

$$R_e = \frac{u \rho L}{\mu} < 100,000$$

La ecuación anterior así como la relación siguiente, son ' validas para una corriente de aire turbulento a lo largo ' de una superficie lisa de longitud L.

$$N_{um} = \frac{h_c L}{K} = 0.057 R_e^{0.78} P_r^{0.78} \quad \text{----- 111-25}$$

$$R_e = \frac{u \rho L}{\mu} > 500,000$$

Para superficies rugosas, deberá tomarse para h_c un 5 % ' más del valor calculado por estas ecuaciones.

Para flujos de aire perpendicular a la superficie, ' con valores de "G" comprendidos entre 4,000 y 20,000 Kg/h m² puede emplearse la ecuación:

$$h_c = G^{0.37} K \text{ cal/h m}^2 \text{ C}^0 \quad \text{----- 111-26}$$

Si la transmisión de calor se efectúa por convección y radiación, el coeficiente integral esta dado por:

$$U = h_c + h_r \quad \text{----- 111-27}$$

En el caso particular de que el calor llegue por medio de convección, radiación y conducción, como en los secaderos de charolas en donde el calor llega por convección a la superficie de éstas por medio del aire, por radiación de la charola superior y por conducción a través del material. Además si h_c y h_r son los mismos para las superficies de las charolas y el material, se llega a la expresión:

$$U = (h_c + h_r) \left[1 + \frac{1}{1 + \frac{L}{K} (h_c + h_r)} \right] \text{--- 111-28}$$

CONDICIONES DE INTERFASE.

Aunque las condiciones de interfase permanescan constantes en este período, su valor dependerá del mecanismo ' de transmisión de calor.

Si el calor es transferido por convección, la temperatura superficial del producto se aproxima a la temperatura de bulbo húmedo. Sin embargo cuando el calor es transferido por radiación y conducción o una combinación de éstos ' con la convección, la temperatura de la superficie estará ' entre la temperatura de bulbo húmedo y el punto de ebullición del agua o líquido a evaporar. Bajo estas condiciones la velocidad de transferencia de calor aumenta y como consecuencia se tiene una velocidad de secado rápida. Cuando ' el calor es transferido a un sólido húmedo por conducción ' a través de las superficies calientes, la temperatura de ' la superficie estará mas cerca a la temperatura del punto ' de ebullición que a la temperatura de bulbo húmedo.

Cuando el coeficiente integral de transmisión de calor corresponde realmente al paso de calor a través de la ' capa límite, después de igualar las ecuaciones 111-20 y ' 111-21, y teniendo en cuenta que para la mezcla aire-agua, $h_c/K_e = C$, se deduce la expresión:

$$Y_i - Y = \frac{UC}{h_c \lambda_i} (t - t_i) \text{ ----- } 111-29$$

CÁLCULO DE SECADO A RÉGIMEN CONSTANTE.

Para conocer el tiempo de secado bajo estas condiciones, es necesario partir de la ecuación de velocidad de secado, que por definición es:

$$W = \frac{S}{A} \frac{dX}{d\theta} \quad \text{----- 111-30}$$

Rearreglando e integrando a través de un intervalo de tiempo desde la humedad inicial hasta la humedad final

$$\theta = \int_0^{\theta} d\theta = \frac{S}{A} \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{d\theta} \quad \text{----- 111-31}$$

para conocer el valor de esta integral es necesario cono--cer $W = f(X)$, y en general, hemos de distinguir dos perío--dos:

- a) Período de velocidad constante o período anticrítico.- Debido a que $W = \text{cte}$, así como X_i y $X_f > X_c$ y que $W = W_c$ la integración de la ecuación 111-31 nos lleva a:

$$\theta = \frac{S (X_i - X_f)}{AW_c} \quad \text{----- 111-32}$$

si $X_c > X_f$, la humedad crítica es sustituida en esta ecuación.

b) Período de velocidad decreciente o período poscrítico.-
Método gráfico: si no se conoce la relación analítica $W = f(X)$, la integración de la ecuación 111-31 ha de hacerse gráficamente representando X frente a $1/W$. El valor de la integral será el área bajo la curva limitada por el eje de las abscisas y las ordenadas X_c y X_f .

Método analítico: si la velocidad de secado varía linealmente con la humedad, desde la humedad crítica hasta la final, la integración de la ecuación nos conduce a la expresión:

$$W = mX + b \quad \text{----- 111-33}$$

en donde m es la inclinación de la porción lineal y $b = \text{cte}$.
Sustituyendo en la ecuación 111-31 nos da:

$$\theta = \frac{S}{A} \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{mX + b} = \frac{S}{mA} \ln \frac{mX_i + b}{mX_f + b} \quad \text{-- 111-34}$$

Pero como $W = mX + b$, $W_f = mX_f + b$ y $m = (W_i - W_f)/(X_i - X_f)$ la ecuación 111-34 nos da:

$$\theta = \frac{S(X_i - X_f)}{A(W_i - W_f)} \ln \frac{W_i}{W_f} = \frac{S(X_i - X_f)}{AW_{\log}} \quad \text{--- 111-35}$$

Si no se conoce la forma en que varía la velocidad de secado en este período, se puede tener una expresión aproximada suponiendo que la variación es lineal desde la humedad crítica hasta la de equilibrio, de lo que resulta la expresión siguiente:

$$\theta = \frac{S}{A} \frac{X_c - X^*}{W_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} \quad \text{----- 111-36}$$

PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE.

La forma de la curva durante este período es difícil de predecir, así como también lo es, el contenido crítico de humedad. La forma dependerá primero, de la estructura del sólido que se va a secar, de la proporción de secado durante el período de velocidad constante y del contenido crítico de humedad. La proporción de flujo gaseoso que influye tan poderosamente en el período de velocidad constante, se vuelve menos importante a medida que la proporción de secado disminuye. Esta disminución, se presenta por el hecho de que la velocidad de secado se controla más completamente por difusión de calor y de masa a través del sólido poroso. En muchos casos, la curva de velocidad de secado contra contenido de humedad libre durante el período de velocidad decreciente, se aproxima a una línea recta que va desde el contenido crítico de humedad hasta el origen. En general este período puede dividirse en dos tramos: uno en que la velocidad de secado varía linealmente con la humedad desde el punto crítico, y otro en el que no se cumple esta variación lineal.

Durante el primer tramo, la velocidad de secado está regida por la evaporación del agua sobre la fracción de superficie mojada; esta fracción disminuye continuamente hasta que al final de este período la superficie está seca. Puede calcularse la velocidad de secado durante el primer tramo en cualquier instante, en función de las velocidades y humedades críticas y final correspondiente a este período, de acuerdo a la ecuación:

$$W = W_c - \frac{X_c - X}{X_c - X_f} (W_c - W_f) \quad \text{----- 111-37}$$

En el segundo tramo, la superficie está totalmente seca y la velocidad de secado ha de evaluarse atendiendo al proceso de transporte de humedad, desde el interior del sólido' hasta la superficie. Si el mecanismo de transporte se realiza por difusión (caso de sólidos de estructura continúa tales como jabones, maderas, papael, arcilla, etc) la velocidad de secado estará representada por la ecuación:

$$W = \frac{\pi^2 \gamma D}{4z} (X - X^*) \quad \text{----- 111-38}$$

y el tiempo de secado entre las humedades X_1 y X_2 será:

$$\theta = \frac{4z^2}{\pi^2 D} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad \text{----- 111-39}$$

Siendo γ el peso específico del sólido; z el espesor; D la difusividad.

En el caso de que el mecanismo de transporte este controlado por el flujo capilar (caso de sólidos granulares' tales como arenas, pigmentos, etc) el tiempo de secado entre las humedades X_1 y X_2 vendrá dada por la ecuación:

$$\theta = \frac{S(X_c - X^*)}{A(W_c)} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} \quad \text{----- 111-40}$$

En esta ecuación se supone que la velocidad de secado varía linealmente con la humedad, hasta alcanzar el equilibrio. Como la velocidad de secado viene dada por la ecuación:

$$W_c = \frac{U}{\lambda_i} (t - t_i) \quad \text{----- 111-41}$$

Si el cociente U/λ_i lo consideramos constante, W decrece al disminuir $(t - t_i)$. Si suponemos que t es constante, t_i aumentará en este período es decir, ha de aumentar la temperatura del sólido durante el secado en este período.

Para los sólidos de estructura capilar uniforme, en donde los capilares no son muy pequeños y la estructura no varía durante el secado, las zonas de evaporación se reducen uniformemente en el material y estas permanecen con una humedad igual a la crítica y temperatura igual a la temperatura húmeda. En la siguiente expresión, el espesor de la capa seca esta relacionada por la humedad X :

$$e = \frac{Ls(X_c - X)}{(X_c - X^*)} \quad \text{----- 111-42}$$

Cuando el secado se realiza por una cara, L_s representa el espesor total de la placa, pero cuando el secado tiene lugar por dos caras opuestas, L_s representa la mitad del espesor de la placa húmeda.

El coeficiente integral de transmisión de calor entre el aire que fluye a lo largo de la superficie del sólido y la zona de evaporación, está dado por:

$$1/U = 1/h_c + X/K \quad \text{----- 111-43}$$

y la velocidad de secado será:

$$W = \frac{U (T - T_w)}{\lambda} \quad \text{----- 111-44}$$

Combinando estas dos ecuaciones resulta:

$$W = \frac{h_c K (X_c - X^*) (T - T_w)}{[K (X_c - X^*) + h_c L_s (X_c - X)] \lambda} \quad \text{---- 111-45}$$

de acuerdo a esta expresión el tiempo de secado será:

$$\theta = \frac{S (X_c - X_f)}{A (T - T_w)} \frac{1}{h_c} + \frac{Zs (X_c - X_f)}{(X_c - X_1)} \quad \text{---- 111-46}$$

SECADO CON CIRCULACIÓN DE AIRE A TRAVÉS DEL OBJETO A SECAR

Supongamos una bandeja que tiene el fondo perforado, sobre la cual va situado el material a secar. Al circular el aire a través del lecho, la evaporación del agua desligada se efectúa en una zona relativamente estrecha de este, esta zona de evaporación se moverá gradualmente a través del lecho en dirección del flujo de aire. A la salida de esta zona, el aire se encontrará a la temperatura de saturación del gas de entrada, que coincide con la superficie del sólido húmedo si el secador funciona adiabáticamente. Cuando esta zona de evaporación se encuentre completamente en el interior del lecho, la velocidad de secado será constante y su valor será el máximo, puesto que el aire sale saturado. Esta velocidad máxima de secado se expresa por la ecuación:

$$W_{\max} = G(Y_w - Y_1) = Gc_p(T_1 - T_w) / \lambda_w \quad \text{---- 111-47}$$

La humedad desligada se separa continuamente, a una velocidad global que ira disminuyendo hasta que todo el lecho alcance las condiciones de equilibrio con el aire de entrada, en cuyo instante la velocidad será nula.

Durante el secado también se observa un período de velocidad constante, el cual persistirá mientras que la superficie de la partículas permanezca completamente mojada, este período viene dado por la ecuación:

$$W_a = G(Y_{sal} - Y_1) \quad \text{----- 111-48}$$

La relación entre la velocidad constante de secado y la velocidad máxima de secado, se denomina eficiencia de vaporización:

$$E = \frac{W_a}{W_{max}} = \frac{Y_{sal} - Y_1}{Y_w - Y_1} \quad \text{----- 111-49}$$

La velocidad de secado en el período constante para lechos de poco espesor, puede calcularse conociendo la eficiencia, de acuerdo con la ecuación:

$$W_c = G(Y_w - Y_1) E = \frac{Gc_p (T_1 - T_w) E}{\lambda_w} \quad \text{-- 111-50}$$

La eficiencia está relacionada con el número de unidades de transferencia.

Para una sección diferencial de cama, donde el gas sufre un cambio de humedad "dY" y abandona a una humedad "Y", la velocidad de secado esta dada por:

$$dW = GdY = K_y dS(Y_w - Y_1) \quad \text{----- 111-51}$$

Donde:

$$dS = a \, dz_s \quad \text{--- 111-52}$$

La ecuación (111-51) se transforma en:

$$\int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dY}{Y_w - Y} = \int_0^{z_s} \frac{K_y a \, dz_s}{G} \quad \text{----- 111-53}$$

Integrando tenemos:

$$\ln \frac{Y_w - Y_1}{Y_w - Y_2} = N_G = \frac{K_y a \, z_s}{G} \quad \text{----- 111-54}$$

En donde N_G , son las unidades de transferencia del gas en la cama. Esta ecuación es la misma que la utilizada para calcular la altura de la unidad de transferencia en las operaciones de contacto aire-agua, combinando esta ecuación con (111-47), (111-48) y (111- 54) tenemos:

$$\frac{W}{W_{\max}} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_w - Y_1} = 1 - \frac{Y_w - Y_2}{Y_w - Y_1} = 1 - e^{-N_G} =$$

$$1 - e^{-K_y a \, z_s / G} \quad \text{----- 111-55}$$

También

$$N_G = Z_s / H_t \quad \text{----- 111-56}$$

Siendo H_t , la altura del elemento de transmisión.

Para partículas pequeñas de (10 a 100 mallas o de ' 2 mm a 0.08 mm) en lechos poco profundos, N_t puede calcularse por la ecuación empírica siguiente:

$$N_t = \frac{0.272}{d_p^{0.35}} \left(\frac{d_p G}{\mu} \right)^{0.215} (X z_s)^{0.64} \quad \text{----- 111-57}$$

Para partículas de (3 a 20 mm.) en lechos poco profundos comprendidos entre 1 y 6 cm, el valor de H_t para sistema aire-agua viene dado por:

$$H_t = \left(\frac{d_p G_v}{a} \right)^{0.41} \quad \text{----- 111-58}$$

Para el período de velocidad decreciente, la velocidad de secado en cualquier instante puede calcularse suponiendo que es una función lineal del contenido en humedad del sólido, por lo tanto tendremos:

$$W_p = \left[\frac{G_c p E (T_l - T_w)}{\lambda} \right] \left[\frac{X - X^*}{X_c - X^*} \right] \quad \text{----- 111-59}$$

El tiempo de secado en el período de velocidad constante, se calcula sustituyendo la ecuación (111-23) en ' la ecuación de definición de la velocidad e integrando, resultando:

$$\theta_a = \frac{W(X_1 - X_c)}{A_n Gc_p (T_1 - T_w) E} \quad \text{----- 111-60}$$

En el período de velocidad decreciente, en aquellas ' sustancias en que la velocidad de secado es proporcional a su contenido en humedad, resulta:

$$\theta_p = \left[\frac{W(X_1 - X^*)}{A_n Gc_p (T_1 - T_w) E} \right] \left[\ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*} \right] \quad \text{--- 111-61}$$

NOMENCLATURA.

- A = Area de la superficie expuesta, m^2 .
A_n = Area de sección del lecho normal en la dirección del flujo de gas, m^2 .
a = Area específica de las partículas, m^2 .
C_p = Calor específico del sólido, K cal/Kg/Kg °C.
D = Difusividad, m^2/h .
d_p = Diámetro de la partícula, m.
E = Eficiencia de vaporización.
e = Espesor del material seco, m.
G = Velocidad másica del aire, Kg/h m^2 .
h_c = Coeficiente de transporte de materia, K cal/h m^2 °C.
h_r = Coeficiente por radiación, K cal/h m^2 °C.
K_y = Coeficiente de transporte de materia, K cal/h m^2 °C.
K = Conductividad calorífica, K cal/h m^2 °C.
L = Longitud de una placa, m.
L_s = Espesor de la placa húmeda, m.
N_u = Número de Nusset.
N_t = Altura del elemento de transmisión.
θ = Tiempo de secado, h.
P_r = Número de Prandtl.
R_e = Número de Reynolds.
S = Peso del material, Kg.
t = Temperatura en el seno del aire, °C.
t_i = Temperatura de interfase, °C.
T_w = Temperatura de bulbo húmedo, °C.
W = Velocidad de secado, Kg/h m^2 .
W_c = Velocidad de secado constante, Kg/h m^2 .
W_e = Velocidad de secado en el equilibrio, Kg/h m^2 .
W_f = Velocidad de secado final, Kg/h m^2 .

X = Humedad, Kg de agua/Kg de s.s.

X_c = Humedad crítica, Kg de agua/Kg de s.s.

X_e = Humedad de equilibrio, Kg de agua/ Kg de s.s.

X_f = Humedad final, Kg de agua/Kg de s.s.

Y = Humedad en el seno del aire, Kg de agua/Kg de aire seco.

Y_i = Humedad en la interfase, Kg de agua/Kg de aire seco.

U = Coeficiente integral de transmisión de calor, K cal/h m² °C.

Z_s = Espesor del lecho, m.

z = Espesor del sólido, m.

ρ_s = Densidad aparente del lecho, Kg/m³.

i = Calor latente de vaporización, K cal/Kg.

γ = Peso específico del sólido, Kg/m³.

C A P I T U L O I V

METODOS Y TIPOS DE SECADORES.

Existen varios métodos básicos de secado y un número mucho mayor de modificaciones de los mismos.

Dependiendo de la continuidad del proceso, los secadores se dividen en dos grupos:

- 1.- Continuos. La operación es continua a lo largo del secador sin ninguna clase de interrupción, hasta que el material de alimentación es renovado.
- 2.- Intermitentes. El equipo es utilizado con una carga durante un lapso de tiempo y al final del secado es descargado; repitiendo el ciclo una vez más con la carga nueva. La temperatura y el contenido de humedad cambian continuamente en algún punto del secador.

Dependiendo del método de transmisión de calor, los secadores se dividen en:

- 1.- Directos. El calor es transmitido por convección y radiación, siendo el medio de transferencia de calor aire o algún gas caliente. Siendo estos los que se encargan de transportar la humedad se parada al exterior.
- 2.- Indirectos. La transferencia de calor se efectúa por conducción. Generalmente el medio que lo transfiere es una pared metálica que se encuentra en contacto con el sólido, de modo que la velocidad de secado depende del contacto que exista entre el material y la pared metálica.

CLASIFICACION DE LOS SECADORES DEPENDIENDO DE LA TRANSMISION
DE CALOR Y EMPLEO.

D I R E C T O S .

CONTINUOS.

EMPLEO.

- | | |
|-----------------------------------------|---------------------------|
| 1.- Secador de charolas. | Pastas, granos y fibras. |
| 2.- Secador de hojas. | Papel, telas, etc. |
| 3.- Secador de transportador neumático. | Pastas, granos y fibras. |
| 4.- Secador rotatorio. | Granos, polvos y fibras. |
| 5.- Secador por atomización. | Líquidos y pastas. |
| 6.- Secador de túnel. | Pastas, granos y fibras. |
| 7.- Secador de circulación forzada. | Pastas y granos. |
| 8.- Secador de banda. | Piezas pequeñas y granos. |

INTERMITENTES.

- | | |
|-------------------------------------------|--------------------------|
| 1.- Secador de circulación forzada. | Granos y fibras. |
| 2.- Secador de compartimiento y charolas. | Pastas, granos y fibras. |

I N D I R E C T O S

CONTINUOS.

- 1.- Secador de cilindros.
- 2.- Secador rotatorio de tubo de vapor.
- 3.- Secador de tambor.
- 4.- Secador de transportador de tornillo.
- 5.- Secador de platos vi-bratorios.

EMPLEO.

- Pastas y líquidos.
Granos y fibras.
- Líquidos.
- Líquidos y Pastas.
- Granos y fibras.

INTERMITENTES.

- 1.- Secador de platos agitados.
- 2.- Secador por liofilización
- 3.- Secador rotatorio al' vacío.
- 4.- Secador de charolas al vacío.

- Líquidos, sólidos, granos y pastas.
- Líquidos y sólidos.
- Pastas, granos y fi--bras.
- Pastas, granos y fi--bras.

SECADORES AL VACIO.

Los métodos de secado al vacío crean los productos de más alta calidad, pero los costos son generalmente más altos que los otros métodos. En el secado al vacío, la temperatura del material y la velocidad con que se elimina el agua se controlan regulando el grado de vacío y la intensidad del calor introducido. La transmisión de calor al material se efectúa sobre todo por conducción y radiación. Normalmente los procesos de secado al vacío se pueden controlar con más precisión que aquellos secadores que se basan en el calentamiento por convección del aire.

Todos los sistemas al vacío tienen cuatro elementos esenciales:

- 1.- Una cámara de vacío.
- 2.- Un componente para recoger el vapor de agua.
- 3.- Un mecanismo para producir vacío.
- 4.- Una fuente de calor.

La cámara de vacío deberá de ser de construcción fuerte de tal manera que pueda resistir la presión del aire exterior, el cual puede exceder a la del aire interior hasta en 3,000 Kg. por metro cuadrado.

El mecanismo para producir el vacío se coloca fuera de la cámara, éste puede ser una bomba mecánica de vacío o un inyector de vapor.

El medio para recoger el vapor de agua, puede ser un condensador de pared fría. Este se encontrará dentro o fuera de la cámara, pero deberá de estar antes de la bomba, a fin de prevenir que el vapor de agua se introduzca a ésta y la deteriore.

SECADOR DE BANDAS.

El secador de bandas, utiliza un procedimiento de ventilación parecido al secador de túnel. El producto se dispone generalmente sobre la superficie de una banda horizontal, la cual corre a través de un recinto análogo a un túnel. Con ayuda de un distribuidor o por unión de un cilindro ranurado para la fragmentación de los residuos de filtros espreas, el producto llega ha descargarse automáticamente en el extremo opuesto de la banda.

SECADOR DE CHAROLAS.

Este tipo de secador es uno de los más sencillos. Esta compuesto fundamentalmente de un gabinete dentro del cual, se encuentra el material por secar sobre las charolas. En la (Fig. IV-1,) se muestra una construcción típica de estos secadores. El aire fresco entra en el gabinete -- H (b), es atraído por el ventilador a través de los serpentines de calentamiento (c) y posteriormente impulsado a través de las charolas que contienen el producto, para luego salir (h). b

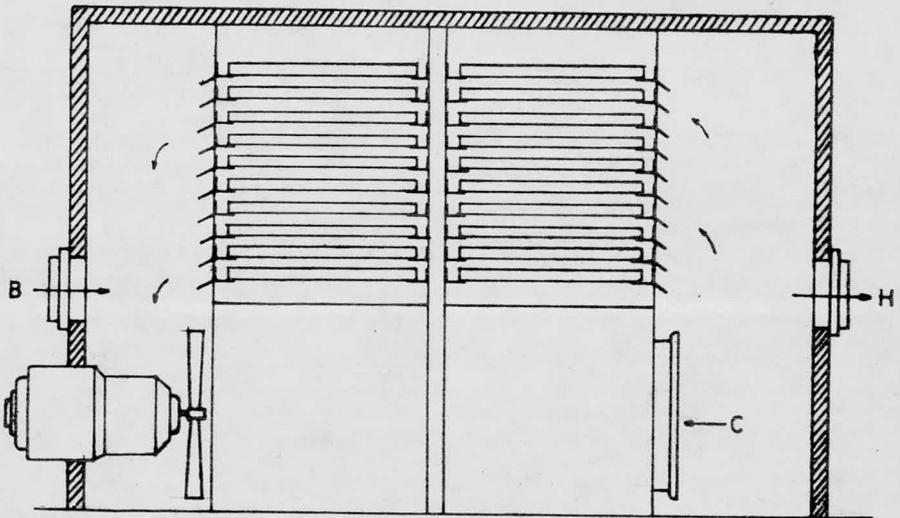


FIG. 1 SECADOR DE CHAROLAS.

Las charolas donde se coloca el material son de metal para asegurar una buena transferencia de calor entre el es tante y éstas.

El gabinete puede tener capacidad para acomodar hasta 25 charolas, los equipos más grandes miden 2.5 mt. de ancho, 5.5 mt. de largo y 2.5 mt. de altura.

Estos equipos son usados en la industria farmacéutica y en materiales sensibles a altas temperaturas o fácilmente oxidables, en donde el costo de la operación es insignificante con el costo del producto.

SECADOR DE TRANSPORTADOR NEUMÁTICO.

Estos secadores se utilizan generalmente para terminar el secado de materiales que han sido deshidratados parcialmente por otros métodos, generalmente hasta el nivel de un 25% de humedad o por lo menos, hasta el punto en que el material se vuelve granular. Un secador de este tipo es el de lecho fluidizado que se muestra en la (Fig. IV-2).

SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO. ↙

En la cámara se introduce aire caliente por medio de un ventilador hacia arriba y a través de las partículas de alimento con la fuerza exacta requerida para mantenerlas suspendidas y moviéndose suavemente. Las partículas semise

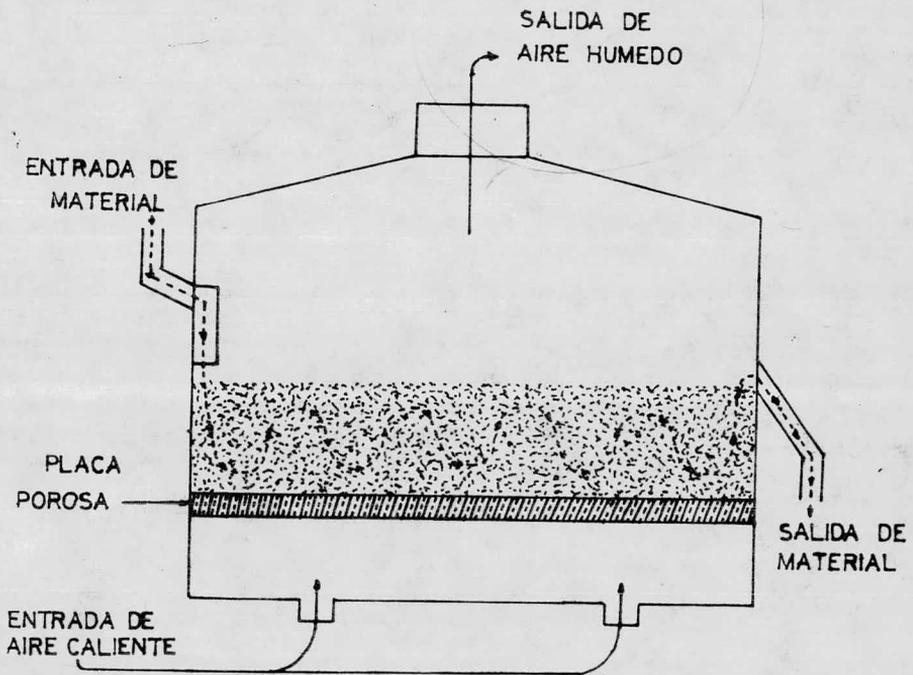


FIG. 2 SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO.

cas, entran a la izquierda y se mueven paulatinamente hacia la derecha, de donde se les descarga ya secas. El aire caliente se introduce a través de una placa porosa que sostiene el lecho lleno de gránulos. El aire húmedo abandona la cámara por la parte superior. El proceso es continuo y el tiempo de permanencia de las partículas en el secador puede ser regulado por el ajuste de la profundidad del lecho y por otros medios. Estos tipos de secadores se pueden utilizar para secar granos y alimentos en forma de granulos o partículas.

SECADOR ROTATORIO.

Los secadores rotatorios son usados para el secado de materiales granulares o en polvo, dado que sus ventajas son mayores si son comparadas con otros tipos de secadores como en lo referente al costo de operación y facilidad de manejo. Este consiste en una coraza cilíndrica que gira sobre su eje central. El sólido se desplaza de un extremo al otro del secador por una ligera inclinación hacia la salida del material. En el interior del cilindro están colocadas unas aletas que levantan el material y lo desparraman por gravedad a través del aire caliente, el cual será el medio de transmisión de calor y el vehículo para el transporte de la humedad. La forma de estas aletas dependerán del material que va a ser manejado. Los secadores rotatorios pueden ser calentados por un gas, el cual pasa a través de una envoltura externa de la coraza o por condensación de vapor en un conjunto de tubos longitudinales colocados en la cara interior de la coraza, a este tipo de secador se le llama seca-

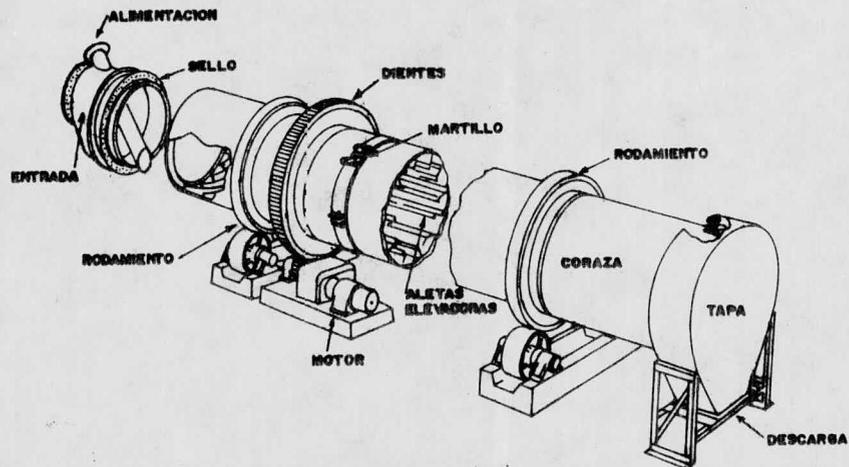


Fig. 3 Secador rotatorio.

dor rotatorio de tubo de vapor.

Un típico secador rotatorio a contracorriente por contacto directo, es el que se muestra en la figura (1V-3).

SECADOR DE TUNEL.

Este tipo de secador, consiste en un túnel relativamente largo y a través del cual se mueven los carros con los ' bastidores, los cuales son los que se encargan de trasladar y poner en contacto con aire caliente al material de ' alimentación. Los carros son introducidos periodicamente a la entrada del túnel, el desplazamiento se efectúa paso a ' paso o por movimiento continuo y una vez efectuado el secado salen por el final del equipo. Gracias a diferentes ventiladores y dispositivos de calentamiento repartidos a lo largo del túnel, la temperatura y la velocidad del medio secante ' se adaptan a las propiedades del producto. La ventilación ' se lleva a cabo longitudinal o transversalmente con respecto al movimiento del transporte, la circulación de aire puede ser en corriente paralela o a contracorriente. También ' puede adoptarse una combinación de ambos procedimientos. En este caso, la mitad del túnel trabaja a corriente del mismo sentido y la otra mitad trabaja a contracorriente, mientras el aire se retira en el punto de unión de ambas corrientes.

El aire es calentado por medio de serpentines con vapor y si se requiere de altas temperaturas, se efectúa el ' calentamiento por medio de algún combustible.

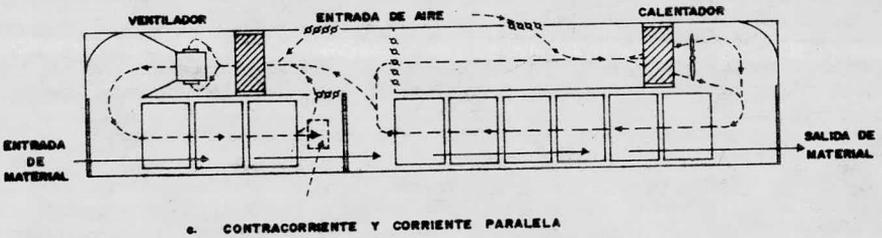
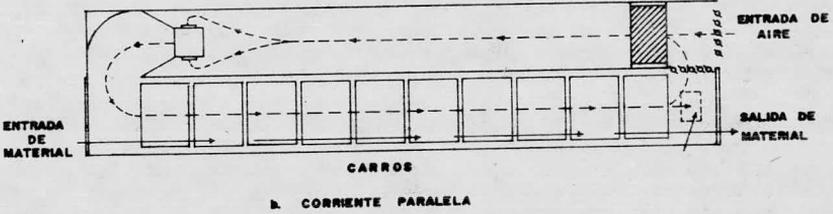
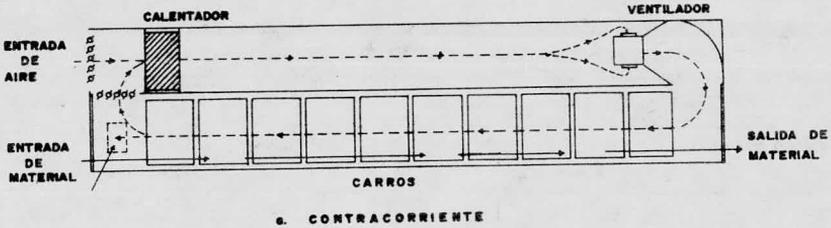


Fig. 4. Tres Tipos de Secador de Tunnel.

El funcionamiento de estos secadores puede ser adiabático o isotérmico. En el primer caso, el aire atraviesa el túnel sin recalentamiento de ninguna clase, en los secadores de tipo isotérmico el calentamiento se efectúa por fases o recalentamiento intermedio. En este procedimiento, la temperatura y la humedad del aire pueden regularse de forma satisfactoria a lo largo de todo el túnel, dado que cada sección posee su propio ventilador y su propio registro. En la (Fig. 1V-4), se muestran tres diferentes tipos de secador de túnel.

SECADOR POR ATOMIZACION.

Estos secadores procesan mas toneladas de producto que los demás tipos de secadores y varios de ellos han sido diseñados especialmente para un producto determinado.

Su uso esta limitado a los productos que pueden ser asperjados, como los líquidos de viscosidad baja. La aspersión de éstos en gotitas diminutas hace posible el secado en un tiempo relativamente corto, este método de secado puede producir una calidad excepcionalmente alta en muchos materiales que son sensibles al calor, entre ellos la leche y el café.

En el secado por atomización, generalmente introducimos el producto líquido en forma de rocío o llovizna fina a una torre o cámara junto con el aire caliente. A medida que las gotitas hacen contacto con el aire pierden su humedad instantaneamente, convirtiendose en pequeñas partículas que caen en el fondo de la torre de donde se les recoge. El ai

re caliente, ya cargado de humedad es expulsado de la torre mediante un ventilador. El proceso es continuo, constantemente se introduce el material líquido por bombeo a la torre y se le atomiza, se suministra más aire caliente para reponer el aire húmedo que se va retirando, para luego recoger el producto seco que cae al fondo del secador.

Varía la construcción de los principales componentes del sistema de secado, de acuerdo con el producto que se desea secar.

El principal propósito de la cámara de secado, es el de facilitar eficazmente el contacto entre el aire y las gotas finas dispersas. La construcción de estos secadores es diversa, como también lo es el modo de operación, en unos las gotas y el aire caliente pueden entrar juntos a la torre por la parte superior o por la parte inferior o bien, entrar por separado. Así mismo lograr que las partículas hagan su descenso en línea recta o espiral, la cámara puede ser horizontal o vertical.

Existen dos clases principales de aspersores: las boquillas rociadoras a presión y los discos o cestos giratorios centrífugos. Cuando el material por secar tiene una alta viscosidad y no es posible la atomización por medio de las boquillas rociadoras, se utilizan los discos giratorios centrífugos, en donde el material es depositado y dispersado en forma de gotitas como en el caso de los pures de pulpa.

Los colectores de polvos pueden ser zonas en la base cónica de la cámara secadora, desde las cuales el producto se seca periódicamente. Mas comunmente los colectores son

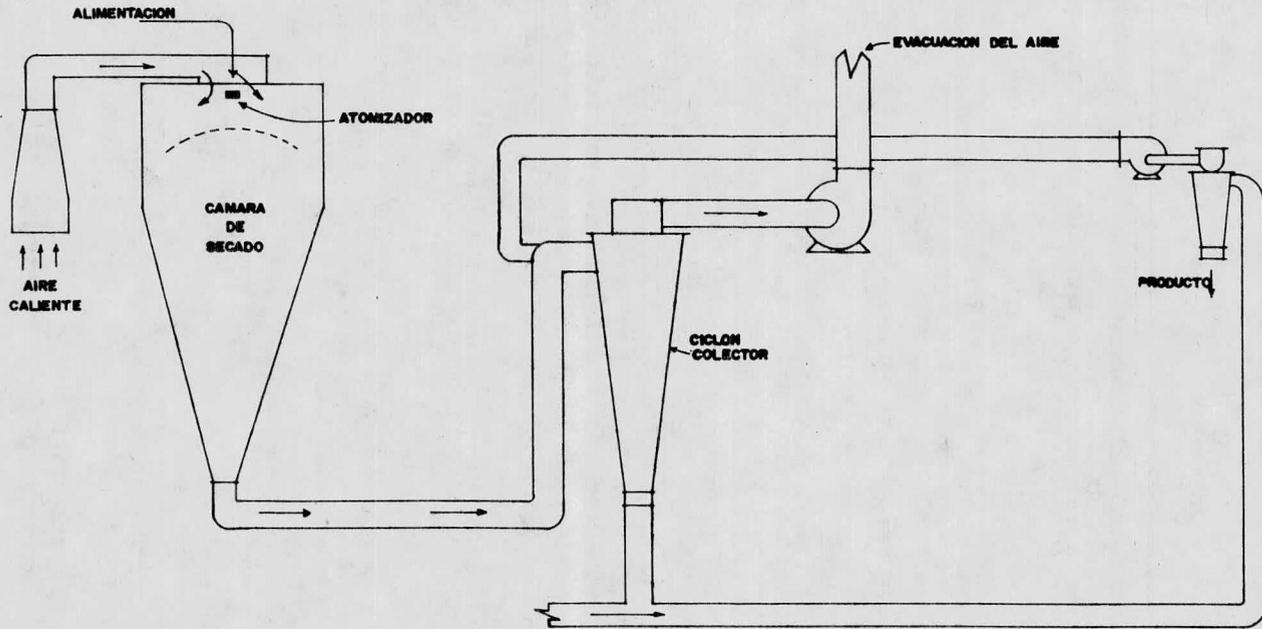


Fig. 5 Secador por atomizacion.

estructuras cónicas más pequeñas conocidas como separadores de ciclón. En este caso el aire que se escapa de la cámara lleva las partículas secas al separador de ciclón, en donde el aire se convierte en remolino, aventando las partículas secas contra la pared cónica, mientras el aire ya casi libre de partículas sale por la parte superior, (Fig. IV-5).

SECADOR DE BANDA VERTICAL.

Este secador es usado para el secado de materiales -- pulposos, muy espesos y pastosos este aparato ocupa una superficie muy reducida por lo que en muchos casos sustituye al secador de banda horizontal. El producto húmedo se alimenta mediante un dispositivo que lo introduce en las cavidades del tejido metálico especial en forma de delgadas capas.

La construcción de este aparato está representado en la (Fig. IV-6), el cual consiste en una cadena sin fin de enrejado metálico especial, que pasa sobre una serie de poleas en dos cámaras verticales. Debido a la pronunciada curvatura originada por el reducido diámetro del cilindro de evacuación colocado en la parte inferior, el producto seco cae fuera de la banda y se recoge en un recipiente colector.

SECADOR DE BANDA MULTIPLE.

En este tipo de secador las bandas recorren varias veces la cámara de secado. En el extremo de cada banda, el producto pasa a la banda siguiente que se desplaza en sentido opuesto. La ventilación puede hacerse paralelamente a la superficie superior de las bandas o en sentido oblicuo con respecto a la dirección del movimiento, en este caso se trabaja con recirculación de aire.

La (Fig. IV-7) muestra un secador de cuatro bandas -- con ventilación transversal. Las bandas están construidas por placas o marcos sobre las que han sido extendidos enrejados metálicos. Estas placas están unidas a una cadena de tracción por medio de una articulación, la cual permite que sufra una inclinación cuando se aproxima al punto donde se efectúa el cambio de dirección.

SECADOR DE BANDA ARTESA. X

Este es un tipo especial de secador, en el cual la banda tiene forma de artesa. Generalmente es de malla metálica y se impulsa el aire hacia arriba a través de la malla. La banda se mueve continuamente, por lo cual mantiene en movimiento al material de alimento dentro de la artesa, a fin de que diferentes superficies estén expuestas continuamente con el aire caliente. Esto hace que se acelere el proceso de secado. Es usado frecuentemente en el secado de legumbres, verduras, etc.

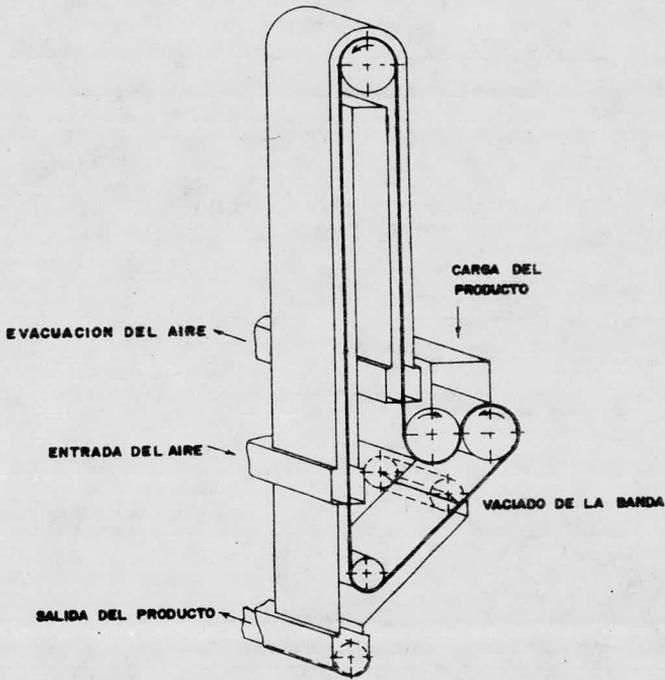


Fig. 6 Secador de banda vertical.

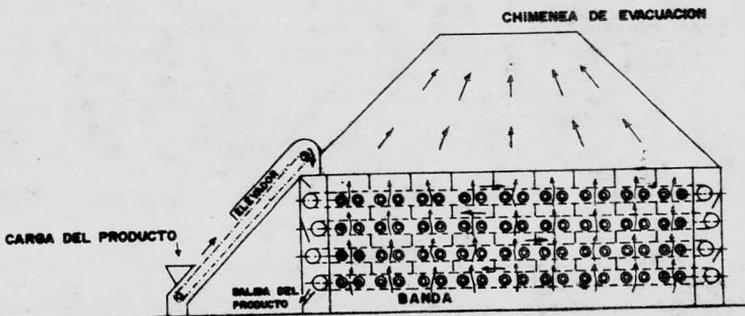


Fig. 7 Secador de cuatro bandas.

SECADOR DE TAMBOR. ✕

El material es triturado en forma de pures o pastas y aplicado en capas delgadas en la superficie de un tambor giratorio, calentado generalmente desde el interior por medio de vapor.

Puede haber uno o dos tambores (Fig. 1V-8), se puede depositar el material en el punto en que los dos tambores casi se tocan y en este caso, el espacio que existe entre los dos determinará el espesor de la capa. A un punto determinado en los tambores, se coloca una cuchilla raspadora que se encarga de desprender la capa de material seco adheridas al tambor. También se regula la velocidad de giro de los tambores, de tal manera que la capa de material se encuentre seca cuando llegue la cuchilla. La capa se seca en una revolución del tambor y se separa de éste antes de que regrese a la posición en que se le aplica más alimentación. Al usar vapor bajo presión dentro del tambor se puede mantener la temperatura de la superficie arriba de 100°C , otra de las características de los secadores de tambor, es de que tienen en la parte superior unas cubiertas para retirar el vapor húmedo y los transportadores en forma de artesa para retirar el producto seco.

Algunos de los productos que son secados en estos tambores son la leche, el puré de papa, otros purés como el tomate y los alimentos para animales.

Una limitación consiste en la dificultad de proporcionar el control de temperatura por zonas, que se necesita a fin de variar la temperatura de secado. Esto es de gran im-

portancia cuando se trata de materiales alimenticios termoplásticos.

Este metodo de secado es uno de los más economicos para la deshidratación de productos alimenticios relativamente resistentes al calor.



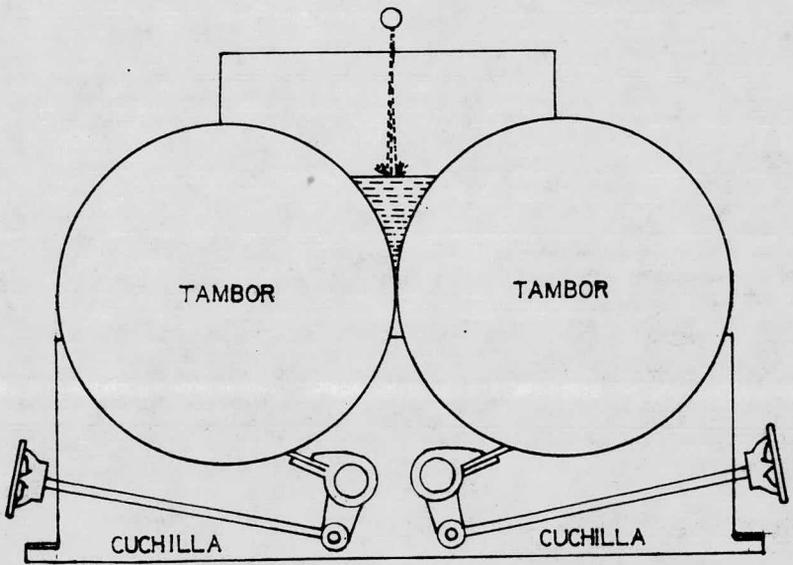


FIG. 8 SECADOR DE TAMBORES

C A P I T U L O V

DESCRIPCION DEL EQUIPO.

El secador consiste de dos tuneles, cada uno con las siguientes dimensiones; 20 metros de largo, 1.90 metros de ancho y 2.00 metros de altura, con capacidad para 19 carros que entran por los extremos. A la entrada y salida de cada túnel se encuentra un espacio disponible de 5.00 metros para maniobras de carga y descarga; en la parte superior y en los extremos se encuentran dos orificios para la salida del aire húmedo, además cada túnel tiene su propio registro con el propósito de poder controlar la temperatura y el flujo de aire. Las paredes están construidas de cemento revestidas con una capa de yeso, el piso tiene una capa de 20 cm. de grava cubierta con hormigón. En medio de los tuneles se encuentra el ducto de aire, en donde se encuentra el ventilador y el horno, ver Figs. VI-1 y VI-2.

El horno cuenta con una parte fundamental, el quemador. El cual tiene por objeto proporcionar la energía calorífica necesaria para poder alcanzar la temperatura requerida en la operación de secado. Este quemador se encuentra construido de las siguientes partes:

- 1.- Ventilador o Soplador.
- 2.- Tubo inyector.
- 3.- Tubo mezclador.

El objetivo fundamental del ventilador es el de proveer la cantidad de aire necesario para poder alcanzar una adecuada combustión. El ventilador está diseñado de 2 partes que son la cámara de aire y las aspas.

La cámara de aire tiene forma y dimensiones determinadas que tienen por objeto delimitar y dirigir el flujo de aire al tubo inyector.

Esta cámara se encuentra formada de dos tapas laterales con diametro de 30 cm. unidas por una banda metálica. Una de las tapas tiene un orificio de 5 cm. de diametro por donde se une al sistema de transmisión. La otra tapa tiene una entrada de 27 cm. de diametro con el objeto de facilitar la instalación del sistema de aspas, sobre ésta va una cubierta circular de 29 cm. con 4 aberturas que nos sirven para la admisión y control del aire, la admisión también se lleva a cabo por medio de una contracubierta de 15.5 cm de diametro igualmente con cuatro aberturas. En la boca de salida de la cámara lleva cuatro alerones para una mejor dirección del aire hacia el tubo inyector.

El tubo inyector arrastra y dirige el flujo de aire hacia el tubo mezclador, el tubo inyector tiene forma de Venturi con el fin de asegurar el arrastre máximo de combustible con la mínima presión. El aire que es la parte más voluminosa de la mezcla pasa directamente por la mezcladora que es una "T", a través de ésta se hace pasar el combustible (diesel).Ver Fig. VI-6.

El horno esta construido de ladrillo refractario del tipo Silicio-Aluminosa, con la composición siguiente: 43.5 % de Alumina (Al_2O_3) y 52.5 % de Silice (SiO_2), dichos ladrillos tienen una densidad promedio de 2.3 g/cm^3 , conductividad térmica de $3 \times 10^5 \text{ cal/cm. seg.}^\circ\text{C}$ y una porosidad aparente de 14.18 %. Las dimensiones del horno son: 3.00 metros de largo y 1.20 metros de diametro, éstas medidas incluyen el espesor de las paredes. Este horno esta diseñado para alcanzar una temperatura máxima de 400°C .

Los carros tienen las siguientes medidas: 90 centímetros de largo, 1.80 metros de ancho y 1.90 metros de altura con capacidad para 19 bastidores. Los bastidores están contruidos' con ángulo de 2.54 centímetros y solera de la misma medida, ' éstos tienen fondo de tela de alambre (Fig. V-3).

* La fuerza requerida por un ventilador depende del flujo de aire que hay que desplazar por metro cúbico y por segundo, de la eficiencia y de la diferencia de presiones entre la entrada y la salida en el ventilador. Teniendo en cuenta la eficiencia para secar diferentes materiales se considera un gasto razonable de aire por cada sección de 12,000 Kg/h, con una temperatura máxima de 90 °C, pudiendose variar según las condiciones de secado.

Las casas especializadas en su construcción están en condiciones de suministrarlos en base al volumen de aire y a la presión total requerida, por lo tanto, se verá más adelante ' el calculo de dicho ventilador.

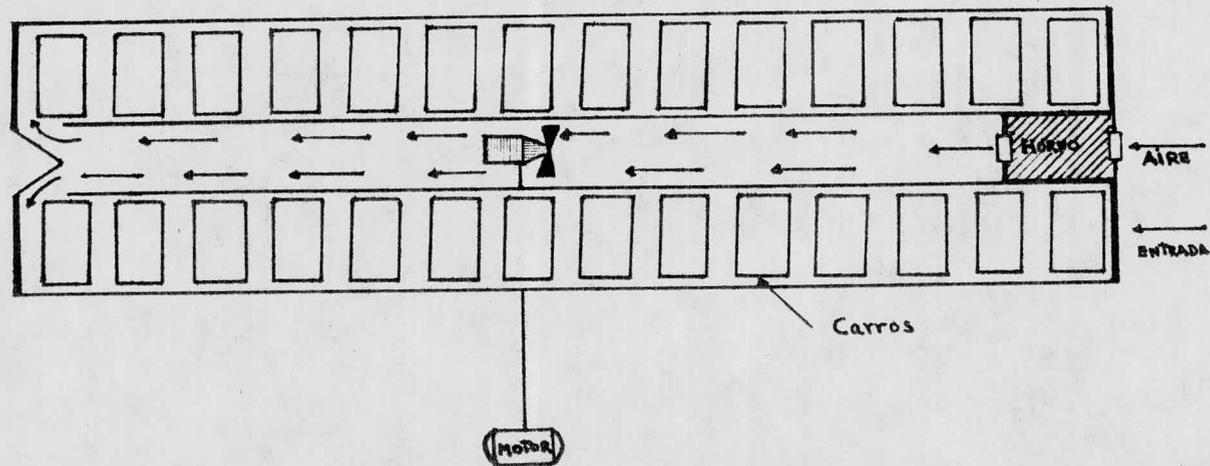


Fig. V-1

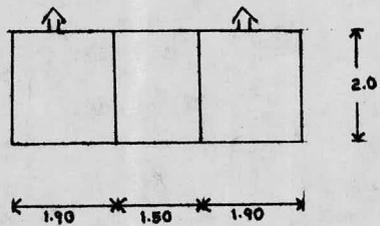
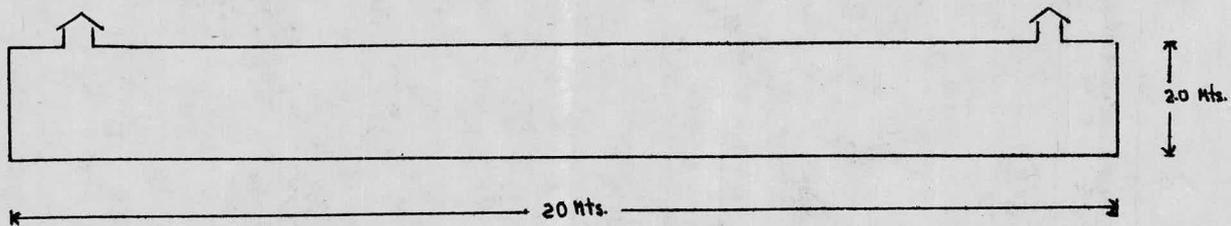


Fig. V-2

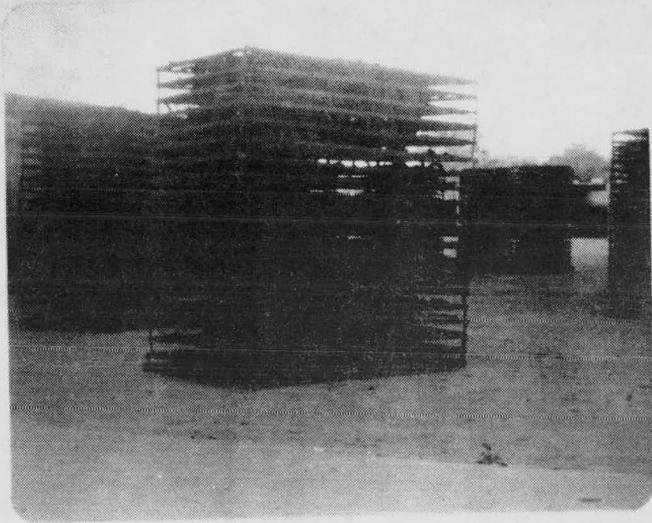


Fig. V-3 Vista de un carro.

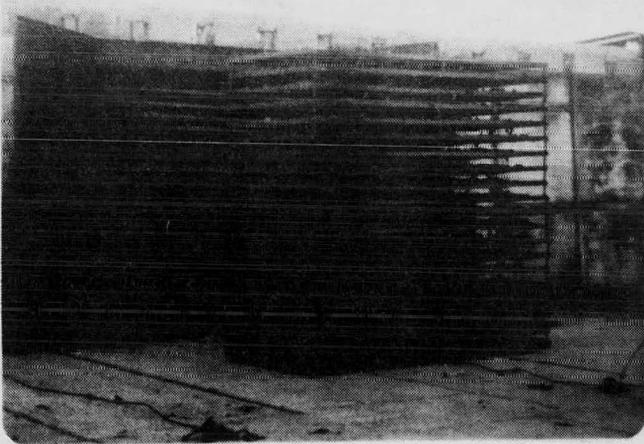


Fig. V-4 Salida del material seco.

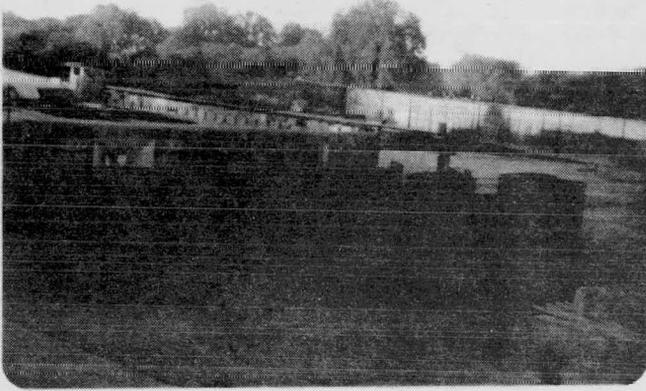


Fig. V-5 Vista del secador de túnel.

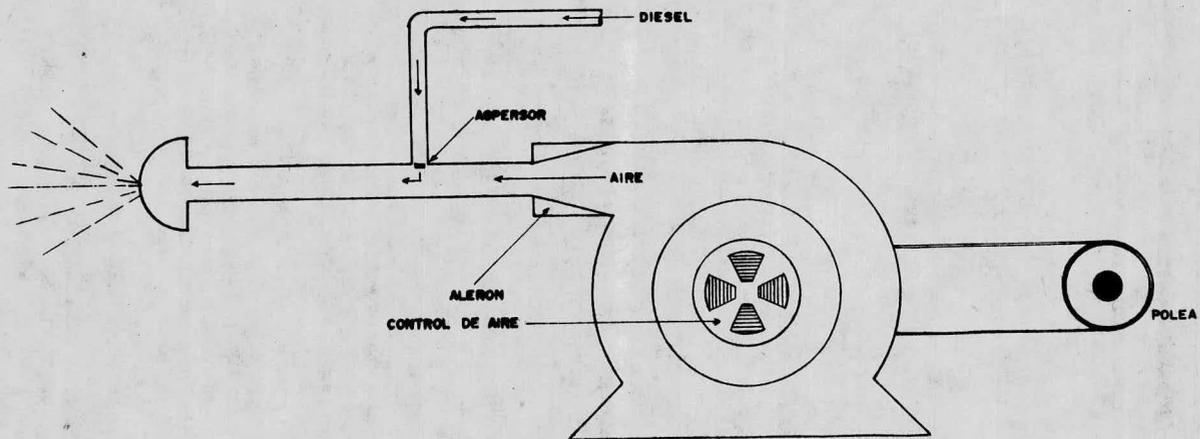


FIG. V-6 QUEMADOR

C A P I T U L O VI

CALCULOS Y GRAFICAS.

PROCEDIMIENTO DE CALCULO

Pra calcular la cantidad de aire y el calor necesario ' para llevar a cabo la desecación de un secador continuo a con tracórriente, conviene ante todo, reunir los datos realtivos! a las características del material y del aire y que, en resu- men son los siguientes:

1. Peso del material a secar.
2. Humedad total contenida en el material.
3. Humedad residual que pueda quedar en el material.
4. Duración conveniente de la desecación.
5. Cantidad de agua a evaporar por hora.
6. Temperatura crítica del material.
7. Temperatura máxima del aire a la entrada del secadero.
8. Grado de saturación del aire a la salida del secadero.
9. Temperatura y humedad relativa del aire exterior.

Algunos de estos datos fueron obtenidos por medio de las curvas de secado, estas fueron logradas en condiciones constan- tes, en un secador experimental.

Las graficas VI-1 a VI-4 indican las curvas de secado así obtenidas, siempre en condiciones constantes. De este modo puede establecerse, a partir de la grafica VI-1 la humedad inicial y la humedad final a la que queremos llegar. También' esta curva nos indica que el mecanismo que controla es el de' capilaridad.

Quando se desea obtener mayores datos sobre el procedimiento de secado de un material, puede utilizarse el método propuesto por Kamei, en el que las curvas de secado utilizadas se obtienen en condiciones constantes, en un secador experimental.

De este modo puede establecerse, a partir del diagrama de la figura VI-1, la velocidad de secado en diferentes zonas del secador. A la entrada del producto, se obtiene por ejemplo, la velocidad de secado más reducida y a la salida del producto, la velocidad de secado mayor.

En el diagrama de la figura VI-1, podemos observar que la línea representativa presenta un primer tramo recto, lo que nos indica que el cociente $(-dX/d\theta)$ es constante.

En el segundo tramo de la curva representada por la figura VI-2, se observa que $(-dX/d\theta)$ disminuye con el tiempo; por lo tanto, la velocidad de secado se va haciendo cada vez más pequeña.

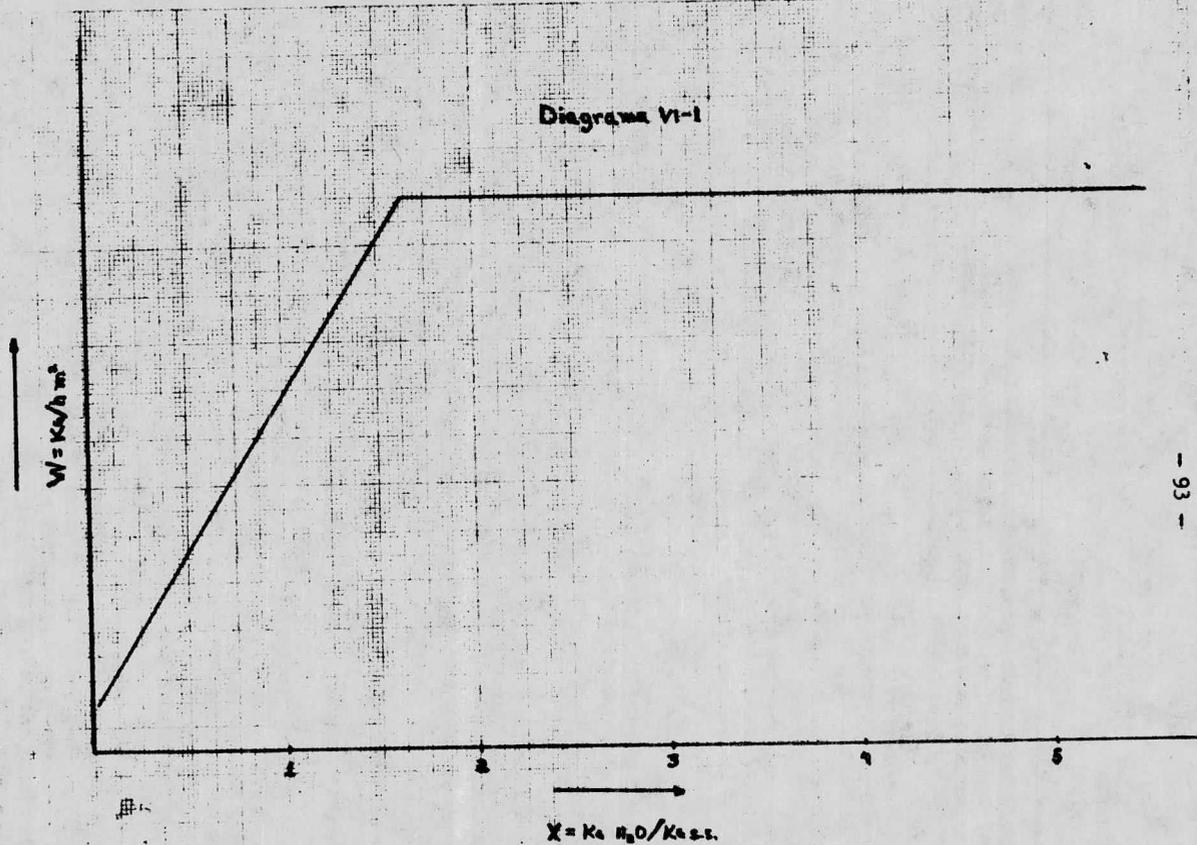
La curva de velocidad de secado (W frente a X) se puede construir en función de los valores de $(-dX/d\theta)$ leídos en la figura VI-2, sin embargo como se dispone de datos para intervalos de tiempo relativamente pequeños, se pueden realizar los cálculos analíticamente tomando los valores medios de la velocidad correspondientes a cada intervalo de tiempo.

Todos los valores calculados se indican en la tabla siguiente (en condiciones constantes).

Min.	Hrs.	Peso		Humedad	X	Valor	W
		Tot. Kg	Tot. Kg	Tot. Kg	Kg/Kg	Medio	Kg/h m ²
0	0.00	0.2110	0.1801	5.8284	5.7313	0.5820	
15	0.25	0.2050	0.1741	5.6343	5.5048	0.7767	
30	0.50	0.1970	0.1661	5.3754	5.2783	0.5820	
45	0.75	0.1910	0.1601	5.1812	5.0849	0.5820	
60	1.00	0.1810	0.1501	4.9887	4.8916	0.5820	
75	1.25	0.1760	0.1451	4.7946	4.6478	0.8800	
90	1.50	0.1700	0.1391	4.5011	4.4045	0.5820	
105	1.75	0.1640	0.1331	4.3074	4.1941	0.6700	
120	2.00	0.1570	0.1261	4.0809	3.9676	0.6800	
135	2.25	0.1500	0.1191	3.8543	3.7572	0.5820	
150	2.50	0.1440	0.1131	3.6601	3.5306	0.7760	
165	2.75	0.1360	0.1051	3.4012	3.3041	0.5820	
180	3.00	0.1240	0.0931	3.2070	3.0937	0.6790	
195	3.25	0.1230	0.0921	2.9805	2.9158	0.3800	
210	3.50	0.1190	0.0881	2.8511	2.7540	0.5820	
225	3.75	0.1130	0.0821	2.6590	2.5760	0.4900	
240	4.00	0.1080	0.0771	2.4951	2.3980	0.5820	
255	4.25	0.1010	0.0701	2.3010	2.1442	0.9500	
270	4.50	0.0922	0.0613	1.9838	1.8559	0.7670	
285	4.75	0.0843	0.0534	1.7281	1.6310	0.5820	
300	5.00	0.0777	0.0468	1.5340	1.4369	0.1848	
315	5.25	0.0730	0.0421	1.3399	1.3091	0.3300	
330	5.50	0.0704	0.0395	1.2783	1.2232	0.3100	
345	5.75	0.0670	0.0361	1.1682	1.1164	0.1800	
360	6.00	0.0638	0.0329	1.0647	1.0339	0.2420	
375	6.25	0.0619	0.0310	1.0032	0.9627	0.2230	
390	6.50	0.0594	0.0285	0.9223	0.8850	0.1940	
405	6.75	0.0571	0.0262	0.8478	0.8154	0.2430	
420	7.00	0.0551	0.0242	0.7831			

Continúa.

Min.	Hrs.	Peso	Humedad	X	Valor	W
		Tot. Kg	Tot. Kg	Kg/Kg	Medio	Kg/h m ²
435	7.25	0.0526	0.0217	0.7022	0.7426	0.2030
450	7.50	0.0505	0.0196	0.6343	0.6682	0.1750
465	7.75	0.0487	0.0178	0.5760	0.6051	0.2230
480	8.00	0.0464	0.0155	0.5016	0.5388	0.1944
495	8.25	0.0444	0.0135	0.4368	0.4692	0.2230
510	8.50	0.0421	0.0112	0.3624	0.3996	0.1650
525	8.75	0.0404	0.0095	0.3074	0.3349	0.2910
540	9.00	0.0374	0.0065	0.2103	0.2588	0.1455
555	9.25	0.0359	0.0050	0.1618	0.1860	0.1344
570	9.50	0.0349	0.0040	0.1170	0.1394	0.1263
585	9.75	0.0336	0.0027	0.0749	0.0959	0.1164
600	10.00	0.0324	0.0015	0.0361	0.0555	0.0480
615	10.25	0.0319	0.0010	0.0199	0.0280	0.0969
630	10.50	0.0309	0.0000	0.0000		



X кг нм/кг сз.

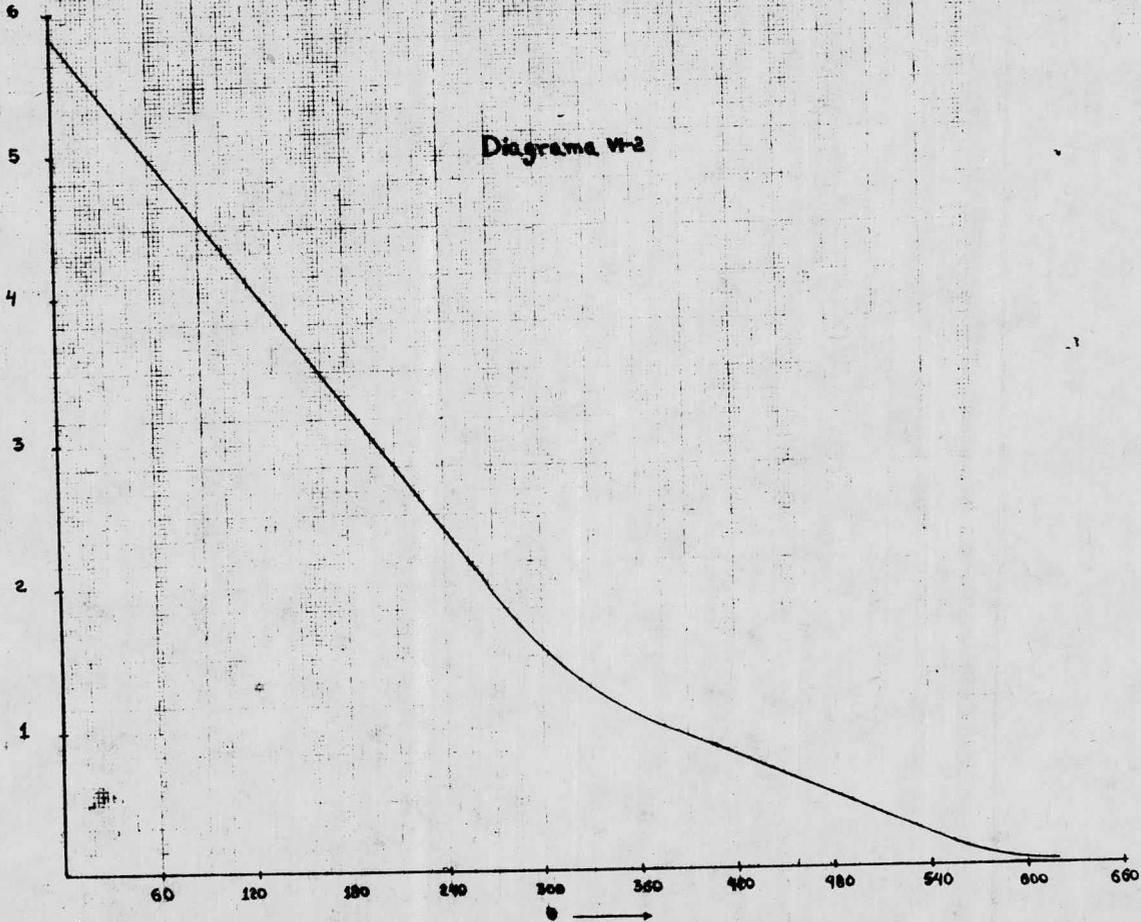
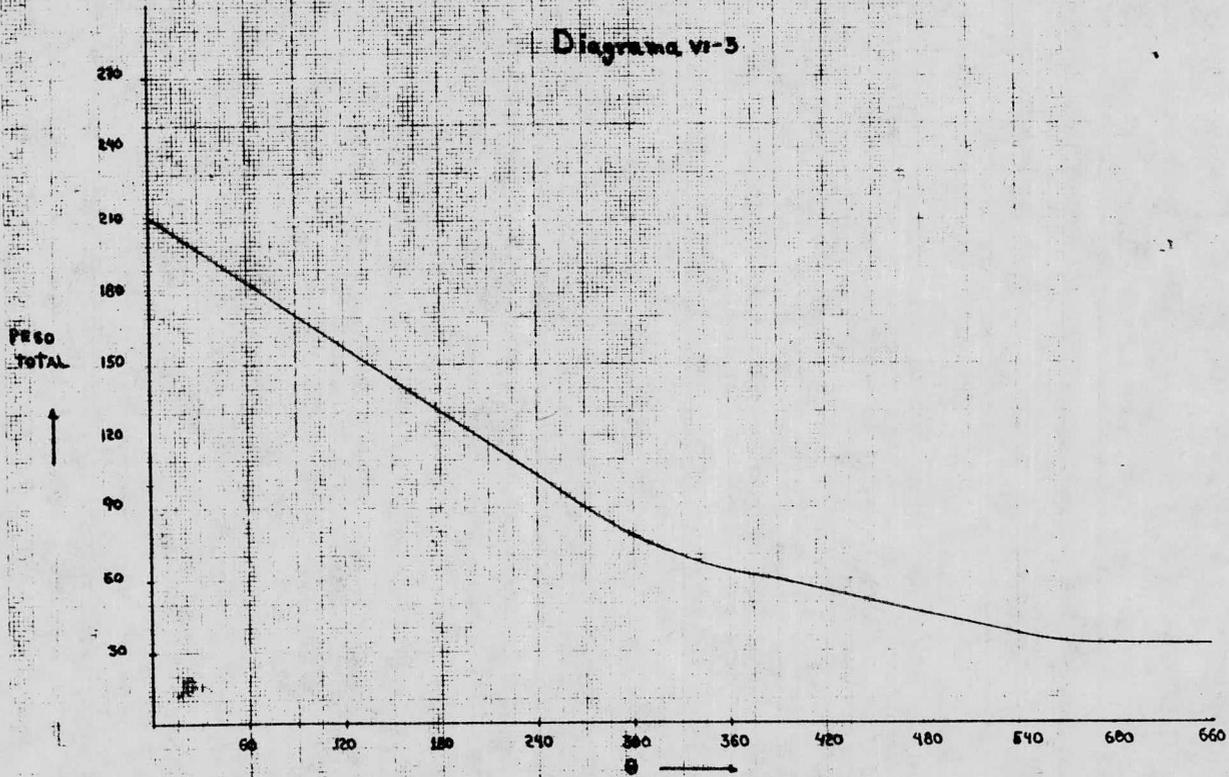
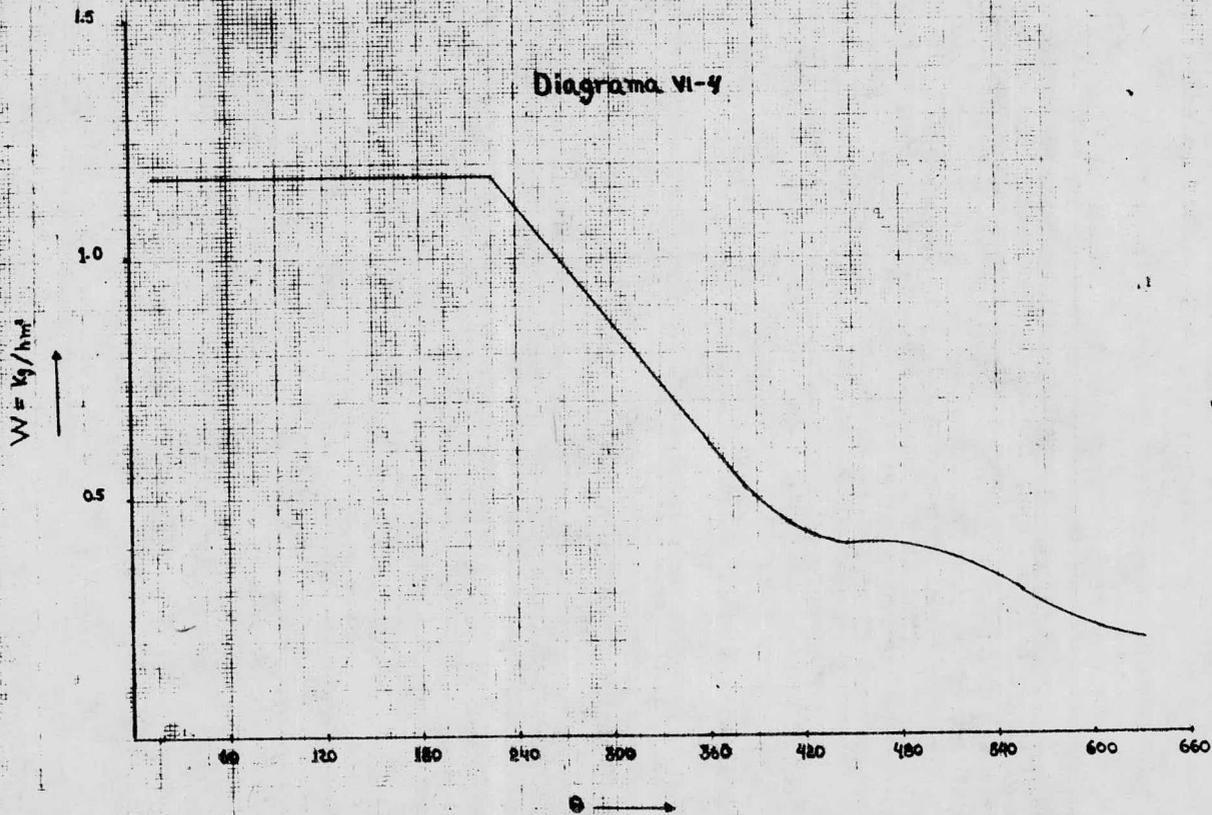


Diagrama nr 2

Diagrama nr-3





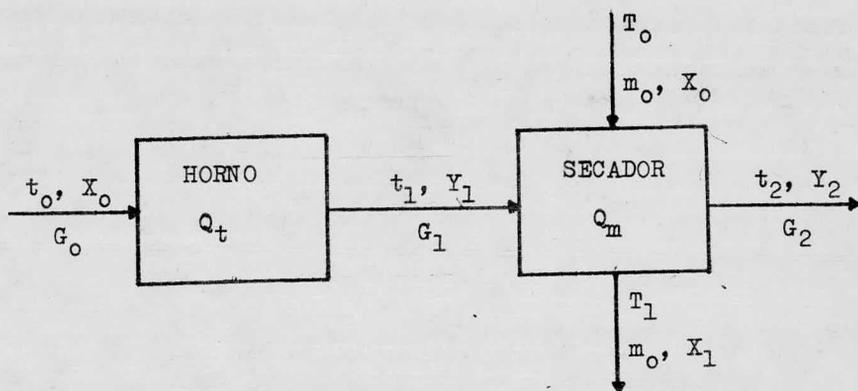


FIG. VI-1. Esquema del Balance de Materia y Energía

De acuerdo a la figura VI-1, la cantidad de calor cedido al aire en el secador es:

$$Q_t = G_0 C_{p_a} (t_1 - t_0)$$

----- VI-1

El calor que abandona al secador con el aire Q_a , es el representado por la ecuación:

$$Q_a = G_0 C_{p_a} (t_2 - t_0)$$

----- VI-2

Y el calor transferido para secar el material será:

$$Q_m = G_o C_{p_a} (t_2 - t_1) \quad \text{----- VI-3}$$

De acuerdo con:

$$Q_t = Q_m + Q_a \quad \text{----- VI-4}$$

Tendremos:

$$G_o C_{p_a} (t_1 - t_o) = G_o C_{p_a} (t_2 - t_o) + G_o C_{p_a} (t_2 - t_1) \text{---VI-5}$$

El calor que el aire cede en el secador se compone de la suma de los siguientes calores.

Calor necesario para calentar el material. desde la temp. inicial ~ la temp. de evaporización del líquido

$$q_1 = m C_{p_s} (T_1 - T_o) \quad \text{----- VI-6}$$

Calor necesario para calentar el agua residual. desde la temp. inicial \sim la temp. de evaporación

$$q_2 = M_{H_2O} C_{p_{H_2O}} (T_1 - T_0) \quad \text{----- VI-7}$$

Pero como: $M_{H_2O} = mX$ ----- VI-8

La ecuación se transforma en:

$$q_2 = mX C_{p_{H_2O}} (T_1 - T_0) \quad \text{----- VI-9}$$

Calor necesario para evaporar el agua. desde la temp. inicial \sim la temp. de salida del vapor

$$q_3 = m(X_0 - X_1) \left[C_{p_{H_2O}} (T_{eb} - t_0) + \lambda^{T_{eb}} + 0.46(t_2 - T_{eb}) \right] \quad \text{----- VI-10}$$

El calor específico del vapor de agua en el campo de las presiones y temperaturas consideradas, pueden tomarse como constante e igual a 0.46 K-cal/Kg.

Calor necesario para calentar el equipo de transporte.

$$q_4 = mC_p (t_1 - t_0) \quad \text{----- VI-11}$$

Calor perdido a través de las paredes.

$$q_5 = SK (t_1 - t_0) \quad \text{----- VI-12}$$

De acuerdo con lo anterior, se deduce que:

$$Q_m = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad \text{----- VI-13}$$

Sustituyendo resulta:

$$\begin{aligned} Q_m = & mC_{p_s} (T_1 - T_0) + m X_1 C_{p_{H_2O}} (T_1 - T_0) + \\ & m (X_0 - X_1) \left[C_{p_{H_2O}} (T_{eb} - T_0) + \lambda_{T_{eb}} + \right. \\ & \left. 0.46 (t_2 - T_{eb}) \right] + mC_p (t_1 - t_0) + \\ & SK (t_1 - t_0) \quad \text{----- VI-14} \end{aligned}$$

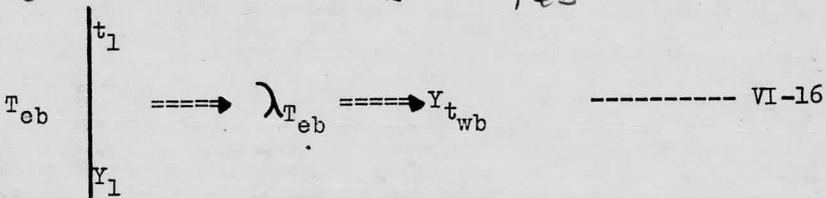
Sustituyendo la ecuación VI-3 en VI-14 y reorganizando resulta:

$$Q_m = G_o C_{p_a} (t_2 - t_1) = m (C_{p_s} + X_1) (T_1 - T_o) +$$

$$m (X_o - X_1) \left[(T_{eb} - T_o) + \lambda_{T_{eb}} + 0.46 (t_2 - T_{eb}) \right]$$

$$+ m C_p (t_1 - t_o) + SK (t_1 - t_o) \text{ ----- VI-15}$$

La temperatura de ebullición y $\lambda_{T_{eb}}$, se obtiene de la manera siguiente: Se supone que la temp. de equilibrio de la sup. de evaporación de los sólidos (T_s) = temp. de bulbo húmedo del aire $T_w = T_{eb}$



El gasto de aire es representado por la ecuación:

$$G_o = \frac{Q_m}{C_{p_a} (t_2 - t_1)} \text{ ----- VI-17}$$

El volumen húmedo se obtiene por:

$$V_H \left| \begin{array}{l} Y_1 \\ \\ t_0 \end{array} \right. \Rightarrow m^3/Kg \quad \text{----- VI-18}$$

Con el volumen húmedo obtenido se calcula el aire necesario que se requiere en la operación.

$$G_o \times V_H \quad \text{----- VI-19}$$

V_H = Volumen húmedo de Aire: m³/kg

La humedad final del aire se obtiene por:

$$Y_1 = \frac{m(X_o - X_1) + G_o Y_o}{G_o} \quad \text{----- VI-20}$$

El gasto de aire también se puede calcular por medio de la igualdad siguiente:

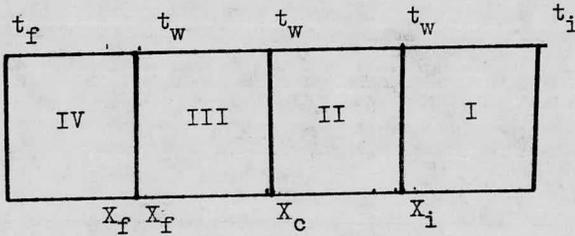
$$m(X_o - X_1) = G(Y_1 - Y_o) \quad \text{----- VI-21}$$

Despejando "G" tendremos:

$$G = \frac{m(X_0 - X_1)}{(Y_1 - Y_0)}$$

----- VI-22

SECADOR DE TUNEL (METODO RIGUROSO).



BALANCE DE CALOR EN CADA SECCION.

ETAPA I (Pre calentamiento), Calor recibido por el sólido.

$$q = mC_p \Delta T \quad \text{----- VI-23}$$

El calor se da por convección:

$$\frac{q}{\theta} = h_c A \Delta t_{\log} \quad \text{----- VI-24}$$

El tiempo de secado en la primera etapa será:

$$\frac{q}{\theta} = \theta \quad \text{----- VI-25}$$

ETAPA II (Período de secado constante). Calor recibido por el sólido.

$$q = A W \lambda \quad \text{----- VI-26}$$

El calor se da por convección

$$\frac{q}{\theta} = h_c A \Delta t_{\log} \quad \text{----- VI-27}$$

Por lo tanto, el tiempo de secado en ésta etapa es:

$$\theta = \frac{A W \lambda}{h_c A \Delta t_{\log}} \quad \text{----- VI-28}$$

Etapa III (Período decreciente). Si en ésta etapa el secado sigue una línea recta desde X_c hasta X_f , entonces:

$$q = A W \lambda \quad \text{----- VI-29}$$

El calor se da por convección.

$$\frac{q}{\theta} = A (h_c \Delta t)_{\log} \quad \text{----- VI-30}$$

Lo que es lo mismo:

$$\frac{q}{\theta} = \frac{A h_f \Delta t_f - h_c \Delta t_c}{\ln \frac{h_f \Delta t_f}{h_c \Delta t_c}} \quad \text{----- VI-30'}$$

En donde:

$$h_f = \frac{h_c}{X_c} X_f \quad \text{----- VI-3 1}$$

ETAPA IV (Etapa de sobrecalentamiento).

$$q = m C_p \Delta t \quad \text{----- VI-32}$$

$$\frac{q}{\theta} = h_f A \Delta t_{\log} \quad \text{----- VI-33}$$

El tiempo de secado será:

$$\frac{q}{\theta} = \theta \quad \text{----- VI-34}$$

Para el secado del material en estudio, es empleado un secador de túnel de 20 metros de longitud, en el que entra 'aire a contracorriente que se toma del exterior a 30 °C y se calienta hasta 90 °C antes de entrar al túnel con humedad de 0.028 Kg H₂O/Kg de aire y sale del mismo con una temperatura de 42 °C. El material entra a 28 °C con una humedad de 5.83' Kg H₂O/Kg s.s. y temperatura de 80 °C. El calor específico ' del material es de 0.296 K-cal/Kg s.s. °C.

$L_0 = 30$

$T_1 = 80 \text{ °C}$

$X_0 = 5.83 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg s.s.}$

$T_{\text{eb}} = 40 \text{ °C}$

$X_1 = 0.0873 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg s.s.}$

$T_0 = 30.5 \text{ °C}$ *28.0*

$Y_0 = 0.028 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg aire.}$

$t_1 = 90 \text{ °C}$

$C_{ps} = 0.296 \text{ K-cal/Kg s.s.}$

$t_2 = 42 \text{ °C}$

$K_{\text{Teb}} = 574 \text{ Kcal/Kg}$

Base 200 Kg s.s.

Sustituyendo en VI-15, resulta:

$$Q_m = 200(0.296 + 0.0873)(80 - 30.5) + 200(5.83 - 0.0873)$$

$$\left[(40 - 30.5) + 574 + 0.46(42 - 30.5) \right] +$$

$$200 \times 0.296(90 - 30) + 80 \times 1.8(90 - 30)$$

$Q_m = 692,235.53 \text{ K-cal}$

Sustituyendo en VI-17.

$$G_o = \frac{692,235.53}{0.25(90 - 42)} = 57,686.29 \text{ Kg de aire/hr.}$$

La masa de aire será:

$$G_o = 57,686.29 \text{ Kg de aire/hr.}$$

El volumen específico del aire es:

$$V_H \left| \begin{array}{l} 30 \text{ } ^\circ\text{C} = t_o \\ \\ 0.028 = \gamma_o \end{array} \right. = 0.84 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

El volumen de aire que se toma del exterior por hora es:

$$0.84 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} \times 57,686.29 \frac{\text{Kg aire}}{\text{hr}} = 48,456.48 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{hr}}$$

$$V = 48,456.48 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{hr}}$$

Sustituyendo valores en la ecuación VI-20, obtenemos la humedad del aire a la salida del secador.

$$Y_1 = \frac{200(5.83 - 0.087) + 57,686.29(0.028)}{57,686.29}$$

$$Y_1 = 0.048 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg aire seco.} \quad \text{Hum. final del aire}$$

Completando el balance de energía.

$$Q_a = 57,686.29 \times 0.296(42 - 30.5)$$

60 Cps $t_2 - T_0$
*(Calor desperdiciado
con el queso y el aire)*

$$Q_a = 196,364.13 \text{ K-cal/hr.}$$

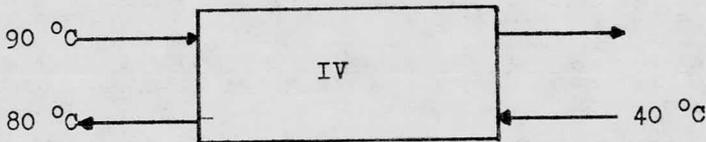
El calor total será:

$$Q_t = 692,235.53 + 196,364.13 = 888,599.66 \text{ K-cal/hr}$$

La eficiencia de la operación es:

$$\eta = \frac{692,235.53}{888,599.66} = 0.78 \%$$

CALCULO DE IV
SOBRECALENTAMIENTO.



Base: 1 Kg de s.s.

El sólido se calienta de 40 °C a 80 °C

$$q = mC_p \Delta t + H \times C_H \Delta t$$

$$q = 1 \times 0.296 \times 40 + 0.0873 \times 1$$

$$q = 15.33 \frac{\text{K-cal}}{\text{Kg s.s.}}$$

$$\Delta t = \frac{15.33}{288 \times 0.25} = 0.21$$

La temperatura a la salida de IV será prácticamente la misma, por lo que: $t_s = 90$ °C, $t_w = 40$ °C. Con estas temperaturas y con ayuda de la carta psicometrica encontramos la entalpia que es: $H = 0.028$ Kg H₂O/Kg aire.

El área de sección normal del secador es de:

$$3.8 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, la velocidad masica del aire será:

$$G_s = \frac{57,235.53}{3.8} = 15,061.98 \text{ Kg/hr m}^2$$

Por otra parte

$$h_c = 0.0175 G_s^{.8}$$

$$h_c = 0.0175 (15,061.98)^{.8} = 38.49 \text{ K-cal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

La superficie de secado es de:

$$S = 1.80 \times 0.90 \times 2 + (1.80 + 1.80 + 0.90 + 0.90)0.02$$

$$S = 3.35 \text{ m}^2$$

Esta área contiene un total de 2.10 Kg de s.s. por lo ' que, la superficie de secado por Kg de sólido seco es:

$$\frac{\text{Area}}{\text{Masa}} = \frac{3.35}{2.10} = 1.59 \frac{\text{m}^2}{\text{Kg}}$$

Tiempo de secado en esta etapa

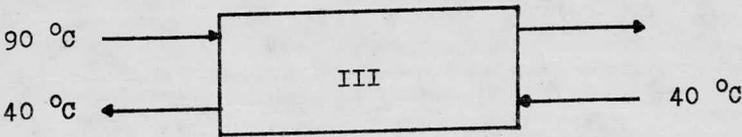
$$\frac{q}{e} = 1.59 \times 38.49 \frac{(90 - 80) - (90 - 40)}{\ln \frac{10}{50}}$$

$$\frac{q}{e} = 1,468.78$$

$$e = \frac{15.33}{1,468.78} = 0.010 \text{ hr}$$

$$e_{IV} = 0.010 \text{ hr.}$$

ETAPA III
PERIODO DECRECIENTE.
 X_c a X_f



$$\theta_{III} = \frac{q_{III}}{A(h_f \Delta t)_{\log}} = \frac{(X_c - X_f) \lambda T_i}{A \frac{h_f \Delta t_f - h_c \Delta t_c}{\ln \frac{h_c \Delta t_c}{h_f \Delta t_f}}}$$

Donde:

$$h_f = h_c \frac{X_f}{X_c} = 38.49 \frac{0.0873}{1.60} = 2.10$$

$$h_f = 2.10 \text{ K-cal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A la X_c , la H_c será:

$$G(H_c - H) = L(X_c - X_f)$$

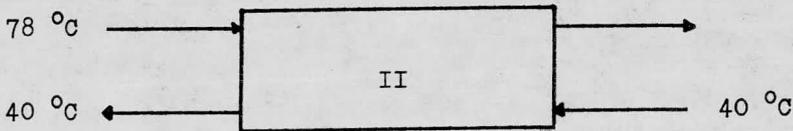
$$H_c = 0.028 + \frac{(1.60 - 0.0873)}{288} = 0.033$$

$$H_c = 0.033, t_s = 78 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ y } t_w = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\text{III}} = \frac{1.60 - 0.0873 \times 574}{\frac{2.10(90 - 40) - 34.49(78 - 40)}{\ln \frac{105}{1310}}}$$

$$\theta_{\text{III}} = 1.14 \text{ hr.}$$

ETAPA II
CONDICIONES CONSTANTES.



$$H = 0.033 + \frac{5.83 - 1.60}{288} = 0.047$$

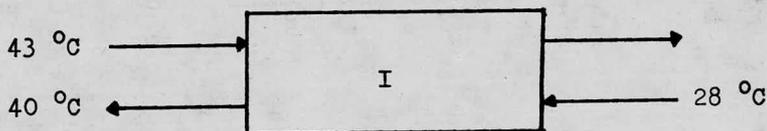
$$H = 0.047, t_s = 43 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ y } t_w = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{II} = \frac{q_{II}}{h_c A A t_{\log}} = \frac{(x - x_c) \lambda T_i}{h_c A A t_{\log}}$$

$$\theta_{II} = \frac{5.83 - 1.60 \times 574}{34.49 \times 1.59 \frac{(78 - 40) - (43 - 40)}{\ln \frac{38}{3}}}$$

$$\theta = 3.20 \text{ hr}$$

ETAPA I
PRECALENTAMIENTO.



$$q = mC_p \Delta t + H \times C_H \Delta t$$

$$q = 1 \times 0.296(40 - 28) + 5.83(40 - 28)$$

$$q = 73.51 \text{ K-cal/hr.}$$

$$\Delta t = \frac{73.51}{72.00} = 1.02$$

La temperatura a la salida de la etapa I es de 42 °C y la entalpia es de:

$$H = 0.047$$

El tiempo de secado es:

$$\theta_I = \frac{73.51}{34.49 \times 1.58 \frac{(43 - 40) - (42 - 40)}{\ln \frac{3}{2}}}$$

$$\theta_I = 0.55 \text{ hr.}$$

El tiempo total de la operación es:

$$\theta_t = 0.010 + 3.20 + 1.14 + 0.55$$

$$\theta_t = 4.9 \text{ hr.}$$

FUERZA MOTRIZ PARA IMPULSAR EL AIRE.

La fuerza requerida por un ventilador depende de la cantidad de aire que hay que desplazar por metro cúbico y por segundo, de la diferencia de presión entre la entrada y la salida en el ventilador, y de su rendimiento. La potencia para imprimir velocidad se expresa de la forma siguiente:

$$HP = \frac{Q \times P}{75 \times E} \quad \text{----- VI-35}$$

Siendo:

- Q. La cantidad de aire por metro cúbico y por segundo.
- P. Presión total (presión estática más presión dinámica).
- E. Rendimiento del ventilador (entre 0.5 y 0.6).

Las pérdidas de presión del aire, cuando éste atraviesa' los carros hacia el final del túnel, no son tan grandes como' cuando los atraviesa al comienzo, puesto que el material se ' encoge con la desecación y poco a poco va dejando espacio libre para la circulación del aire.

A los efectos de cálculo, los factores de fricción de un secador de túnel se suelen agrupar en un factor medio que expresa la pérdida media de presión por cada metro lineal de túnel y para una velocidad media del aire. La medición se efectúa en milímetros de agua.

La pérdida de presión en milímetros de agua se expresa:

$$F \times L \left[\frac{v}{3} \right]^2$$

Siendo:

- F. Factor de fricción.
- L. Longitud del túnel.
- v. Velocidad media en la sección vacía.

Cálculo:

La velocidad media del aire no deberá ser mayor de 4.0 ' metros por segundo, con el fin de que no arrastre consigo al ' material.

El factor de fricción de los carros con la carga es de: 1.6 milímetros por metro de túnel, por lo tanto, la pérdida ' de presión será:

$$1.6 \times 20 \left[\frac{4}{3} \right]^2 = 56.88 \text{ mm.}$$

La potencia es de:

$$\text{HP} = \frac{5.448 \times 56.83}{75 \times 0.60} = 6.88 \approx 7.00$$

C A P I T U L O VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El material en estudio esta compuesto de células, las cuales estan constituidas de una membrana que encierra una masa viva, el protoplasma. El agua se halla contenida en las células como agua de imbibición, y en las membranas se encuentra como agua de saturación. Esta distribución del agua y su textura es lo que establece las siguientes fases:

- a) Período de velocidad constante, en el que el material pierde el agua libre.
- b) Período de velocidad decreciente, en donde se pierde el agua de saturación de los estados superficiales. En esta fase, la humedad contenida tiende a equilibrarse.
- c) Período de velocidad constante, en el que la humedad interna se desplaza hacia las capas superficiales buscandose el equilibrio.

Durante el primer período, la vida de las células se encuentran desarrollandose, quedando en actividad las vitaminas y las proteínas sin que sufra ninguna modificación la estructura original del material.

En el segundo período, se va modificando el tejido y color del material, llegando también a la cuagulación de las proteínas. Es conveniente no aumentar la temperatura por encima de los 90 °C, para evitar las alteraciones en las características organolepticas y vitaminicas.

El agua abandona la superficie mojada del cuerpo convirtiéndose en vapor, y esta evaporación origina una disminución en el porcentaje del agua contenida en la superficie o pellejo. A su vez, esta disminución provoca una difusión del líquido desde

el interior hacia el exterior del cuerpo, que se prolonga hasta la desecación total. El vapor del agua que se forma en la superficie se va difundiendo en el aire de secado.

El último período es siempre el más lento, son las características específicas del material las que limitan esencialmente la velocidad de difusión de la humedad contenida. En este período la estructura, el color y el tejido superficial o pellejo se modifican por completo, estos cambios son:

1. Reducción del volumen.
2. Cambio de color, de verde a rojo escarlata.
3. Modificación de la superficie o pellejo, de lisa a "china".
4. Cambio de sabor.

Para obtener mayor eficiencia en el proceso, es conveniente que todos los frutos se hallen en estado uniforme y avanzado de madurez.

Por experimentación se ha comprobado que haciendo un corte a lo largo del fruto antes de la desecación, se reduce el tiempo de secado hasta en un 30%.

Antes de dar comienzo el proceso de secado es necesario inspeccionar debidamente toda la instalación, con objeto de asegurarse que todo se halle en orden. Las puertas deberán de estar bien cerradas, el motor, ventilador y carros tener sus cojinetes debidamente engrasados y en perfectas condiciones de trabajo.

Cuando los primeros carros que han de entrar al secador se hallen ya dispuestas con su carga, se pondrá en marcha el ventilador, así como el quemador; hay que proceder antes al encendido, con objeto de que al penetrar los primeros carros ya haya alcanzado su régimen normal.

Después es preciso regular el quemador a la debida temperatura; al principio, una cantidad de calor será absorbida por las paredes y por el piso, pero esta pérdida vendrá compensada por las vagonetas que se introducen en el túnel.

Las puertas de ventilación deberán ajustarse bien, comprobando las temperaturas que señalen los termómetros seco y húmedo, colocados a la salida del aire húmedo del secador.

Al comenzar la operación conviene introducir los carros con un espacio de tiempo igual entre ellos, y dar al aire caliente la temperatura que corresponda al aire húmedo para el funcionamiento normal. Luego, a cada nuevo carro que entra se va elevando lentamente la temperatura, hasta alcanzar la normal. De acuerdo a este sistema, el contenido de el primer carro se secará un poco antes de lo establecido.

Otro sistema consiste en empezar con el aire caliente a su temperatura normal, e ir introduciendo los carros a un

ritmo más rápido al establecido en el plan de secado, para! luego ir espaciando cada vez más, el ritmo de introducción.

Resulta un error el empezar la desecación introduciendo a la vez varios carros, pues la evaporación que se produce al introducir al túnel un solo carro es tan intensa que se produce una alta caída de temperatura. Si introdujésemos 3 ó 4 carros a la vez, el aire saldría del último casi saturado; en estas condiciones, la evaporación que se produciría en el último carro sería insignificante hasta que el primero hubiera perdido buena parte de su humedad.

Cuanto más reducida es la velocidad del aire, tanto menor ha de ser el número de carros que se pueden introducir en el túnel sin causar un aumento excesivo en la humedad relativa del aire.

Otra recomendación de suma importancia, es la de evitar que el material tenga sabor a quemado y no ofrecer el aspecto de ennegrecido como consecuencia de un exceso de temperatura en el secador. Tiene que hallarse practicamente exento de adherencias, manchas y materias extrañas, es también indispensable que antes de someterse al proceso de secado se! separen las partes marchitas, las quemadas por el sol, etc.

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

1. Foust/Wenzel/Clump/Maus/Andersen "Principles of operations"
Wiley International Edition.
2. McCabe & Smith "Unit Operations of chemical Engineering"
2th. Ed. McGraw-Hill.
3. Perry & Chilton "Chemical Engineers' Handbook"
9th. Ed. McGraw-Hill.
4. R.B. Keey "Drying Principles and Practice"
Ed. Pergamon Press.
5. Friedrich "El secado"
Ed. Urmo.
6. J. Piston Raschieri "Deseccación de los productos vegetales"
Ed. Reverté, S.A.
7. Norman N. Potter, Ph. D. "La ciencia en los alimentos"
Centro Regional de Ayuda Técnica. Agencia para el desarrollo
Internacional. Mexico/Buenos Aires/ 1973.
8. Norman W. Desrosier. "Conservación de alimentos"
2th. Ed. Continental, S.A. 1964.
9. W. V. Cruess. "Comercial Fruit and Vegetable Products"
3th. Ed. McGraw-Hill Book Company, INC. 1968.
10. Von Loesecke "Drying and Dehydration of Foods"
2th. Reinhold Publishing Corporation, New York
Chapman & Hall, LTD, London 1955.

11. J.G. Bernnan. "Las operaciones en ingeniería de los ali-
J.R. Butters. mentos"
A.E.V. Lilly. Ed. Acriba, Zaragoza (España).
12. Novedades Hortícolas Vol XIV, Nos. 1 a 4, Enero-Diciembre
Ed. Instituto de Investigación Agrícola, de S.A.G. 1969.
13. "Mass Transfer Operation", R.E. Treybal
McGraw-Hill Book, Co., Inc. 1975.