

247



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

"EVALUACION DE LA DESHIDRATACION DE
CHILE PIMIENTO MORRON EN SECADORES
DE CONTACTO DIRECTO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN ALIMENTOS
P R E S E N T A N

ERMILO JOSE ALBERTO HERRERA ROMERO

SERGIO CABRERA PADILLA



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 está 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.

I N D I C E

Resumen.	1
Introducción.	3
CAPITULO I: Generalidades.	9
1.1.- El pimiento morrón.	9
CAPITULO II: Experimentación.	12
II.1.- Objetivos.	12
II.2.- Descripción del sistema experimental de secado.	22
II.3.- Metodología General de Experimentación.	26
II.4.- Efecto del Pretratamiento en el secado.	28
II.4.1.- Pretratamiento con hidróxido de sodio.	28
II.4.2.- Pretratamiento con dióxido de azúfre.	37
II.5.- Efecto del Tamaño de Partícula en el Secado.	41
II.6.- Efecto de la Temperatura de Secado.	45
II.6.1.- Efecto de la Temperatura de Secado a 2% w/v de hidróxido de sodio.	45
II.6.2.- Efecto de la Temperatura de Secado a 4% w/v de hidróxido de sodio.	50
II.7.- Efecto del grado de madurez del pimiento en el color del producto final.	55
II.8.- Efecto de la dirección del aire en el secado.	58
II.8.1.- Comparación del pimiento morrón pretratado y el pimiento sin pretratar.	58
II.8.2.- Efecto del espesor del lecho en el tiempo de secado.	61
II.9.- Breve análisis de los resultados experimentales.	65

CAPITULO III: EXPERIMENTACION EN DOS SECADORES DIRECTOS.	67
III.1.- Selección de los equipos para la experimentación.	67
III.2.- Descripción general de secadores rotatorios y de charolas.	73
III.2.1.- Descripción de un secador rotatorio.	73
III.2.2.- Descripción de un secador de charolas.	75
III.3.- Experimentación en los secadores piloto.	78
III.3.1.- Descripción del secador rotatorio existente.	78
III.3.1.1.- Procedimiento de operación del secador rotatorio.	79
III.3.2.- Descripción del secador de charolas.	81
III.3.2.1.- Procedimiento de operación del secador de charolas.	82
III.3.3.- Resultados de la experimentación en los secadores piloto.	83
III.3.3.1.- Secador rotatorio.	83
III.3.3.2.- Secador de charolas.	84
CAPITULO IV: DISEÑO DEL SECADOR.	86
IV.1.- Teoría del secado por circulación transversal.	86
IV.2.- Descripción de algunos secadores de banda transportadora.	98
IV.3.- Condiciones de operación usuales en secadores de banda.	106
IV.4.- Condiciones preliminares para el diseño del secador.	110
IV.5.- Diseño del secador.	115
CAPITULO V: PROPUESTA DE DISTRIBUCION DE LA PLANTA DESHIDRATADORA DE PIMIENTO MORRON.	144
V.1.- Lineamientos generales de distribución.	144
V.2.- Plano de distribución general de la planta.	148

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

149

APENDICE:

- A. Construcción de las curvas, X (kg de agua/kg de s.s.) vs t (tiempo)
 N' (kg de agua/hr m) vs X_{prom} (kg de agua/kg de s.s.) A partir de
datos experimentales. 152
- B. Técnica de determinación de color y curvas empleadas para realizar
las lecturas. 164
- NOMENCLATURA. 168
- BIBLIOGRAFIA. 171

RESUMEN:

En el presente trabajo se realizó el estudio experimental de algunas de las variables que influyen significativamente en el proceso de secado de pimiento morrón.

Se estudió primeramente la fase de un pretratamiento, por considerarse que influía en el proceso y en la calidad final del producto. Para esto se revisaron dos tipos de pretratamiento, uno con hidróxido de sodio, y otro con dióxido de azufre. En ambos casos se varió la concentración NaOH en el agua de pretratamiento, en un rango de 0 a 4% peso/volumen.

En base a una revisión de la literatura especializada, se hizo el estudio experimental de las siguientes variables:

Dirección del flujo de aire con respecto al lecho sólido.

Tamaño de partícula (cuadros de 1 a 4 cm. de lado).

Temperatura de aire de secado (de 60 a 95°C).

Grado de madurez (color rojo tenue a rojo ladrillo).

Espesor del lecho (de 1 a 3 cm).

Efecto del pretratamiento con hidróxido de sodio y sin hidróxido de sodio.

Posteriormente se realizaron pruebas de deshidratación en dos equipos existentes en las instalaciones de la F.E.S. - C.

Con la información recabada en dicha fase experimental, se realizó finalmente la selección y dimensionamiento del secador adecuado.

do para el producto a manejar. Dicho secador resultó ser uno de túnel con banda transportadora y aire circulando a través del lecho.

INTRODUCCION

Es indudable que una de las mayores preocupaciones del hombre a lo largo de su historia, ha sido el procurarse sus alimentos. - Esto ha sido uno de los principales generadores de innegables - avances.

Conforme el hombre ha evolucionado, se le han presentado nuevos y grandes problemas a vencer. El incremento poblacional que ha azolado al mundo entero, ha modificado la forma en que el hombre produce sus alimentos. Ahora se exige una mejor utilización de las tierras y técnicas encaminadas a producir alimentos

En los momentos actuales, se piden altos niveles de producción y la tecnología en alimentos, debe desarrollarse a pasos agigantados.

El aumento poblacional en nuestro país toma matices y características distintivas, ya que siendo un país en vías de desarrollo, no ha impulsado el desarrollo de su industria alimentaria, necesaria para dar abasto a la población demandante que cada día crece más. Se puede observar en las cifras que se presentan a continuación.

Aumento Poblacional en las Últimas Décadas

Año	No. de Habitantes	Fuente
1950	25 791 017	VII Censo General de Población
1960	34 923 129	VIII Censo General de Población
1970	48 225 208	IX Censo General de Población
1980	66 346 833	X Censo General de Población

El desarrollo económico y social de México, afronta restricciones que deberán ser superadas para lograr el propósito de elevar el nivel de vida de la población. Entre los aspectos prioritarios del desarrollo que se enfrenta a serios obstáculos, no sólo derivados del crecimiento sino estructurales, destacan la producción y el abasto de productos alimenticios. En nuestro país se realizan importantes esfuerzos en materia de alimentos: dirigidos en su mayor parte, para alcanzar la soberanía alimentaria, atendiendo fundamentalmente, la producción. Estos esfuerzos requieren complementarse con los cambios estructurales -- que demanda la distribución equitativa de la misma.

La solución al problema de los alimentos en México, no radica exclusivamente en lograr una autosuficiencia entendida como una no dependencia del exterior en ciertos alimentos (en este caso, fundamentalmente granos), sino en lograr la disponibilidad y accesibilidad de los productos de consumo generalizado a toda la población. Lo anterior implica que, si bien los granos constituyen el alimento básico de la población, se requiere complementar su consumo con frutas y hortalizas, así como con productos

perceberos de origen animal, a fin de satisfacer adecuadamente los requerimientos mínimos nutricionales, incrementar el potencial de desarrollo humano y consecuentemente el bienestar de la sociedad en general.

En México, como en los demás países subdesarrollados, se requiere crear tecnología propia, para el aprovechamiento integral de sus materias primas, con lo cual se evitaría tener que importar alimentos procesados, tirar los alimentos dañados por descomposición a su mal manejo, realizar la cosecha de frutas y hortalizas en un estado óptimo, etc.

A fin de evitar la descomposición de muchos alimentos durante su almacenamiento, manejo y transporte, se han tenido que deshidratar a contenidos de humedad por debajo del 5% en peso (4).

Como se observa en el cuadro siguiente: los alimentos secos, pueden almacenarse durante períodos bastante largos en comparación con otras técnicas de conservación.

Vida de anaquel de Pimiento Morrón tipo Bell.

Tipo	Condiciones	Vida de Anaquel
Encurtido	Sin enlatar	9 días (Mahmud Saz)
Refrigeración (rojo)	5-7°C 90-95% H.R.	2 semanas (Pantastico 1979).
Refrigeración (verde)	7°C 85-90% H.R.	3-5 semanas (Pantastico 1979).
Refrigeración	0°C 85-90% H.R.	4-6 semanas (Altano et, al. 1963).

Continuación....

Tipo	Condiciones	Vida de Anaquel
Películas superficiales con desinfectantes		18 días (Hernández A.S. 1978).
Deshidratado		1 año (Cruet W.V. 1974)

Deshidratación de cualquier alimento no es una operación sencilla de ejecutarse a nivel industrial, y máxime si no se cuenta con algunas experiencias previas de secado, ya sea en equipos piloto o de laboratorio.

Una de las hortalizas que se cosecha abundantemente en algunos de los estados de la República Mexicana, es el Pimiento Morrón tipo Bell. Sin embargo, una buena parte de esa producción se desperdicia por la falta de conocimiento de alguna técnica de conservación que sea económica.

El pimiento dulce bell, cuya composición general se indica en la tabla No. 2, tiene pared gruesa, forma de corazón, color rojo brillante y es dulce. El color rojo brillante y las características de sabor y aroma, lo hacen adecuado para la preparación de guisos, ensaladas, carnes para rellenar y condimentar muchos productos.

El secado de esta hortaliza como técnica de conservación se ha venido practicando en forma rústica desde hace centenares de años mediante la simple exposición a los rayos solares. El in-

conveniente de éste método, son los largos tiempos de secado, y por ende las bajas producciones que evitan también su exportación continua.

Dada la importancia que puede representar la comercialización de pimiento seco a la economía de los estados de Sinaloa y Jalisco, principalmente, en el presente trabajo se realizó el estudio experimental de la deshidratación de dicho producto en una corriente de aire caliente.

Además se hace la selección y diseño preliminar con la finalidad de contribuir, en alguna manera, a sentar las bases para la creación de una tecnología propia, encaminada a secar pimiento morrón en forma económica.

Se revisaron los censos económicos de 1980 y desafortunadamente no existe información acerca de las exportaciones de Pimiento Morrón fresco.

CUADRO (2) : Composición del Pimiento Morrón Fresco (Harris, S. R. and Karmes E., 1975).

COMPONENTES	VARIEDAD	
	VERDE	ROJO
% Agua	93.0	93.7
Calorías	22	31
% Proteínas	1.2	1.4
% Grasa	0.2	0.3
Carbohidratos totales (g)	4.8	7.1
Cenizas (%)	0.4	0.5

Continúa....

Calcio (mg)	9.0	13.0
Fósforo (mg)	22.0	30.0
Tiamina (mg)	0.08	0.08
Riboflavina (mg)	0.08	0.08
Niacina (mg)	0.5	0.5
Acido Ascórbico (mg)	128.0	204.0
Vit. A (I.U.)	420.0	4450.0

CAPITULO I.

GENERALIDADES.

1.1. El Pimiento Morrón.

El pimiento morrón es una hortaliza que se cultiva ampliamente en nuestro país. En el período 1974 - 1975, la producción media fué de 419 000 toneladas, lo cual constituyó un 10% de la producción mundial y sólo países como Nigeria, España e Italia superaron la producción mexicana (6). Esto coloca a México en un lugar muy importante en cuanto a producción de pimiento morrón.

Actualmente se estima que la superficie sembrada de ésta hortaliza se ha incrementado a más del doble desde entonces, ya que la producción en el período 1983 - 1984, fué de 1 005 000 toneladas, de las cuáles 1 000 000 toneladas correspondieron a la producción del estado de Sinaloa, repartiéndose el resto de la forma como se muestra en la figura No. 1. La producción de pimiento morrón por zonas, se muestra en la tabla No. 1.1.

El problema que se tiene en México es que una parte de ésta hortaliza, se exporta en forma fresca e importándose este mismo producto en forma procesada (seco, enlatado, etc.)

El pimiento morrón fresco que se cultiva en México, se vende a tal cual a Estados Unidos principalmente, sin embargo se ha vendido con éxito a países como Alemania, Canadá y Suiza. Este no



Fig. N° 1 : Distribución de la producción de pintura morron por zonas.

ha sido de manera continua, ya que no se emplean técnicas adecuadas para su conservación durante la transportación a esos países europeos, debido a que sufre muchos daños que merman en su precio, además de aumentar sus costos.

Dentro de los diferentes tipos de chile dulce, el pimiento morrón bell, ocupa el primer lugar en México en superficie sembrada, producción y valor de la cosecha (5).

TABLA No. 1.1.- PRINCIPALES ZONAS PRODUCTORAS DE PIMIENTO MORRÓN A NIVEL NACIONAL.

ZONA PRODUCTORA	AREA CULTIVADA	PRODUCCION TON.	PERIODO
Culiacán	15 000	350 000	dic - may
Los Mochis	15 000	350 000	
Guasave	15 000	350 000	
El Bajío	50	1 000	may - jul
B.C.N.	50	1 000	sep - nov
Huatabampo	100	2 000	nov - dic

FUENTE: Ocampo Aurelio. BELL PEPPERS DE MEXICO. DISTRIBUIDORA DE Pimiento Morrón. Bodega P-98, Central de Abasto, México, D.F.--- 1985 Comunicación Personal.

CAPITULO II : EXPERIMENTACION.

II.1.- OBJETIVOS.

La paprika es una variedad de pimiento deshidratado que se importa de España. Este producto, de elevado consumo en México, se emplea por su color característico en la preparación de guisos, ensaladas y algunos tipos de embutidos. Considerando que la paprika se puede sustituir por pimiento morrón tipo bell (variedad que más se cultiva en México) deshidratado bajo condiciones adecuadas, en el presente trabajo se fijó como uno de los principales objetivos, estudiar experimentalmente la influencia de las variables más significativas en el secado de dicho producto.

A fin de tener una base para el establecimiento de las variables a estudiar, y el rango de variación de cada una de ellas, se realizó una investigación bibliográfica del secado de pimiento. En los siguientes párrafos se da un breve resumen de los resultados obtenidos de dicha revisión.

De acuerdo con la literatura revisada, no existen investigaciones experimentales sobre la deshidratación de pimiento morrón rojo (pimiento dulce tipo bell), en México. Sin embargo, existen numerosas investigaciones publicadas en otros países acerca de la deshidratación de otras especies de pimientos.

Para los productos que van a ser deshidratados, es recomendable sumergirlos en una solución de hidróxido de sodio durante 5 minutos, con el objeto de que la piel sea más porosa y exista una mayor velocidad de secado (2). Para frutos que van a ser procesados, se ha establecido, que se les someta previamente a un escalde a determinada temperatura en una solución de hidróxido de sodio del 1 al 2% W/V (2).

Por otro lado, Luh (16) y Van Arsdel W.B. (23) recomienda la -- aplicación de una solución de sulfito o bisulfito, o una mezcla de ambos, antes de someterlos al secado: dicha solución debe -- proporcionar una concentración final de dióxido de azufre de -- 1 000 a 2 500 p p m. Lease y Lease (11), recomiendan un tiempo de exposición al antioxidante de 5 minutos, para lograr la pene-- tración de éste al producto. Duckworth P.B. (20), menciona que al anhídrido sulfuroso durante el escalde previo al secado, au-- menta la retención de ácido ascórbico. Además reporta que las cantidades máximas presentes en el producto seco oscilan desde las 200 a 500 ppm y en el caso de productos como las papas y co-- les de 2 000 a 2 500 ppm. Bergeret G. (2), recomienda emplear una mezcla de partes iguales de una solución de sulfito de sodio al 0.6% W/V y bisulfito de sodio también al 0.6% W/V, en coles, zanahorias, papas, etc.

Para el caso de área de contacto o tamaño de partícula, Lentz E. 4. (13), estableció que el cortado o rebanado de las vainas de -- rrimientos, reduce el tiempo de secado hasta cerca de la mitad en

oleando aire a una temperatura de 65°C. De acuerdo con lo anterior, Van Arsdel (23) y Luh (16) encontraron que a 65°C el tiempo de secado para las vainas enteras fue de 12 horas, mientras que para las vainas rebanaadas se necesitaron solamente 6 horas: además, las vainas no solamente secaron más rápido sino que también dieron un color final superior, con un contenido de humedad de 7-3% (en base seca). En éstas mismas referencias se reporta un corte de las vainas en partículas que van de 0.5 a 2.0 centímetros de lado. Así mismo, de acuerdo a Proctor & Schuartz INC. (19) a nivel industrial se manejan partículas de 1 cm. de lado.

Los investigadores Lease y Lease (10), establecen que los pigmentos del pimiento rojo se deterioran durante el procesamiento debido a variables, tales como: temperatura de deshidratación y el porcentaje de secado principalmente. Temperaturas de 80°C pueden ser empleadas para la deshidratación de pimientos rojos, adicionando previamente algún antioxidante. También establecen que el secado de las vainas rebanaadas y curadas a 65°C fué cualitativamente óptimo. Luh (16) y Van Arsdel (23) proponen que una temperatura de secado de 65 C dá como resultado una mayor retención de color y mencionan que a nivel industrial las temperaturas máximas utilizadas para secar éste producto alcanzan valores de hasta 70.5 C. Lentz F.M. (13) propone que las vainas rebanaadas de pimiento rojo pueden secarse adecuadamente a temperaturas de 60 a 70.5°C para no perder su color inicial.

Algunas referencias bibliográficas (11, 16, 21, 23) recomiendan -

que el pimiento rojo que vaya a ser secado, debe cosecharse en un estado de madurez máximo, ya que así se proporciona un mejor color inicial y una mayor retención del mismo.

Una de las formas recomendadas para secar casi cualquier producto, es por medio de una corriente de flujo de aire cruzado, es decir, que el material fresco sea depositado sobre una superficie perforada en la cual se sopla aire que atraviesa la superficie y el material. Este tipo de secado se puede usar en cualquier material que pueda disponer en forma de partículas discretas, siendo éstas por lo común de un tamaño comprendido entre 3 y 15 mm. El mérito particular de ésta forma de secar, consiste en reducir el tiempo de secado con eficiencia. Por lo tanto, es particularmente conveniente para secar materiales termosensibles y delicados (8).

Las velocidades de aire a nivel industrial para secado a flujo cruzado, se encuentran entre 1 y 1.5 m/seg. y espesores de lecho de 1.2 a 5.0 cm con tamaños de partícula de 3 a 10 mm. de diámetro (8).

De acuerdo a la literatura consultada, los pretratamientos o escaldeos aplicados al pimiento varían de un autor a otro, algunos recomiendan el escalde con hidróxido de sodio con el objeto de mejorar el proceso de secado, otros recomiendan el empleo de sulfito de sodio para lograr una mejor calidad (retención de color) del producto seco. Estos pretratamientos son recomendados en diferentes concentraciones.

Por otro lado se discute la forma de secar el pimiento, entero o troceado en diferentes dimensiones, prevaleciendo más la de cerca de 1 cm. de lado. Este troceado tiene el objeto de aumentar el área de contacto y por lo tanto disminuir el tiempo de secado.

Así mismo, se propone una serie de temperaturas de aire de secado unas con el objeto de cuidar la calidad o más bien el color del pimiento y, otras, con el objeto de acertar el tiempo de secado y lograr una pérdida de color mínima. Las temperaturas propuestas se encuentran en un rango de 60 a 90°C.

En general, los autores recomiendan que el pimiento a secar se encuentre en su estado máximo de madurez ya que con ello proporciona un producto con un color final mejor.

Con la información mencionada anteriormente, se planteó el cuadro de experimentos que se indica en la tabla (II.1.1.)

TABLA II.1.1

CUADRO DE EXPERIMENTOS

NOMBRE DEL EXPERIMENTO	NIVEL DE VARIACION	PARAMETROS A EVALUAR
FLUJO DEL AIRE PARALELO AL LECHO		
EFECTO DEL PRETRATAMIENTO CON HIDROXIDO DE SODIO.	0% W/V de NaOH	TIEMPO TOTAL DE SECADO gráficas de X vs θ .
	1% W/V de NaOH	Nc Vel de Secado en el -- Tiempo constante.
	2% W/V de NaOH	Xc Humedad crítica.
	3% W/V de NaOH	θ c Tiempo de secado en el período constante.
	4% W/V de NaOH	Xf Humedad final de seca- do. θ f Tiempo final de secado

EFECTO DEL PRETRATAMIENTO CON DIOXIDO DE AZUFRE EN EL PROCESO DE SECADO	0.3% W/V	TIEMPO TOTAL DE SECADO. Gráficas de X vs θ .
	0.6% W/V	Nc Vel de Secado en el -- Tiempo constante.
	0.9% W/V	Xc Humedad crítica.
	1.2% W/V	θ c Tiempo de secado en el período constante.
		Xf Humedad final de seca- do. θ f Tiempo final de secado

CONTINUA....

NOMBRE DEL EXPERIMENTO	NIVEL DE VARIACION	PARAMETROS A EVALUAR
EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE PRETRATAMIENTO.	40 °F 50 °F 60 °F 70 °F	TIEMPO TOTAL DE SECADO Gráficas de X vs θ . Nc Vel de secado en el - Tiempo constante. Xc Humedad crítica. ec Tiempo de Secado en - el período constante. Xf Humedad final de seca do. ef Tiempo final de seca- do.
EFFECTO DEL TAMAÑO DE PARTICULA EN LA VELO CIDAD DE SECADO.	ENTERO 4 cm. de lado. 3 cm. de lado. 1.5 cm. de lado 1 cm. de lado.	Gráfica X vs θ Nc Vel de secado en el -- tiempo constante. Xc Humedad crítica. ec Tiempo de secado en - el período de vel.cte. Xf Humedad final de seca do. ef Tiempo final de secado.

CONTINUA.....

NOMBRE DEL EXPERIMENTO	NIVEL DE VARIACION	PARAMETROS A EVALUAR
EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL PROCESO DE SECADO	50°F	Gráfica X vs θ
	60°F	Xc Vel de Secado en el tiempo constante.
	70°F	Xc Humedad Crítica.
	80°F	Xc Tiempo de secado en el período de la velocidad constante.
	95°F	Xf Humedad final. θ f Tiempo final de secado.
EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE (EMPLEANDO UNA SOLUCION DE Na OH AL 4% W/V).	50°F	Gráfica X vs θ
	60°F	Xc Vel de Secado en el tiempo constante.
	70°F	Xc Humedad crítica.
	80°F	Xc Tiempo de secado en el período de vel.cte.
	95°F	Xf Humedad final. θ f Tiempo final de secado

CONTINUA....

NOMBRE DEL EXPERIMENTO	NIVEL DE VARIACION	PARAMETROS A EVALUAR
EFECTO DEL GRADO DE MADUREZ DEL PIMIENTO MORRON EN EL COLOR DEL PRODUCTO.	Color ROJO Expresado en equivalente de $K_2C_{r_2}O_7 \times 10^2$	
	0.45	
	0.290	
EFECTO DEL GRADO DE MADUREZ DEL PIMIENTO MORRON, EN EL COLOR DEL PRODUCTO.	Color ROJO expresado en equivalente de $K_2C_{r_2}O_7 \times 10^2$	
	0.279	
	0.226	
	0.546	
	0.633	
FLUJO DEL AIRE A TRAVES DEL LECHO DE SECADO		
EFECTO DEL PRETRATAMIENTO EN EL PROCESO DE SECADO	PRETRAT. CON NaOH al 2% W/V. SIN PRETRATAMIENTO	TIEMPO FINAL Gráfica X vs θ

NOMBRE DEL EXPERIMENTO	NIVEL DE VARIACION	PARAMETROS A EVALUAR
EFECTO DEL ESPESOR DEL LECHO EN EL PROCESO DE SECADO	1 cm	Gráfica X vs θ
	2 cm	Nc Vel de secado en el --- -tiempo constante.
	3 cm	Xc Humedad Crítica.
	4 cm	θ_c Tiempo de secado en el período constante. Xf Humedad final de secado θ_f Tiempo final de secado.

II.2.- Descripción del Sistema Experimental de Secado.

En la mayoría de los casos, los experimentos mencionados en la tabla (II.1.1) fueron realizados en un horno con flujo de aire por convección forzada y control automático de temperatura marca --- "BLUE M" modelo Thelco. El horno de calentamiento se muestra en la figura (II.2.1) y consiste básicamente de un gabinete cuyas dimensiones son: 48 X 39 X 46 cm. En éste equipo, se puede variar la temperatura desde la ambiental hasta 250°C. El flujo de aire no se puede modificar ya que éste se encuentra en un valor fijo de 27.67 m³/h dadas las características del ventilador integrado al horno.

Para llevar a cabo el registro continuo de la pérdida de peso del material durante la deshidratación, se colocó en la parte superior-externa del horno una balanza granataria marca "OHAUS" con sensibilidad de 0.1 g.

La muestra fue colocada en una rejilla de 27 X 22.5 cm. de ancho por 4 cm. de profundidad. Esta rejilla se suspendió del platillo de la balanza de tal forma que se mantuviera en el interior de la estufa a una profundidad de 35 cm. con referencia a la pared superior-interior del horno.

Para el caso específico de los experimentos con flujo de aire perpendicular o "cruzado" al lecho de sólidos a secar, se acondicionó el horno como se muestra en la figura No. (II.2.2). Para el acondicionamiento se colocó dentro del horno una pared de -----

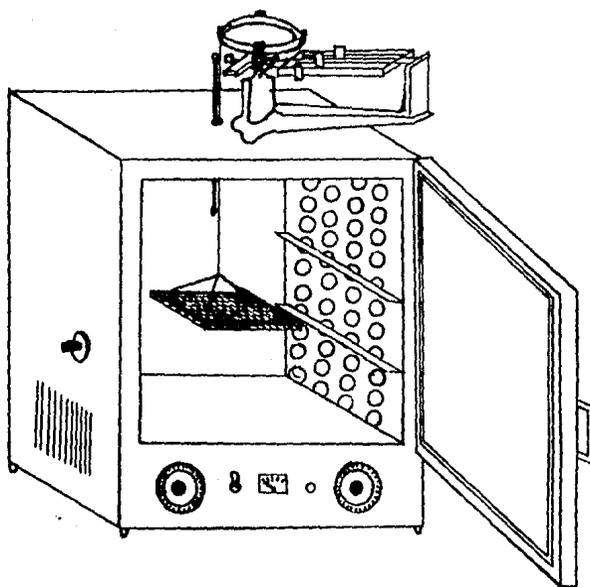


Fig. N° II.2.1 : Sistema experimental de secado para flujo de aire paralelo.

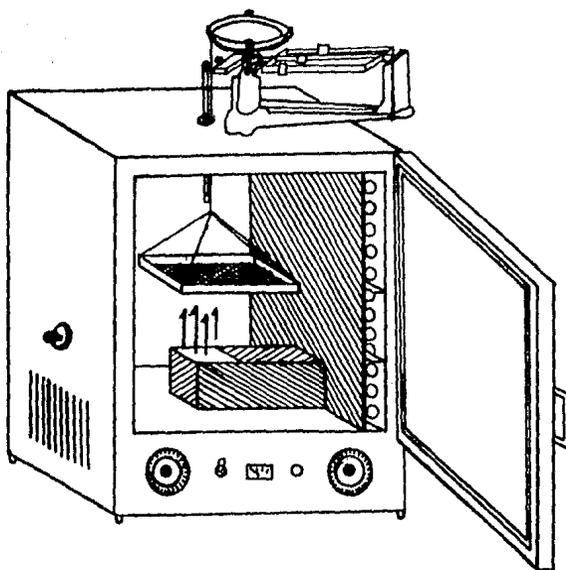


Fig. N°II.2.2 : Sistema experimental de secado para flujo de aire perpendicular al lecho.

plástico de alta densidad, a la cual se le adaptó un ducto de -
tal forma que el flujo de aire circulara por dentro de éste y -
saliera en forma ascendente por debajo de la rejilla. En éste
tipo de flujo, se colocó la rejilla a una profundidad de 26 cm.
con referencia a la pared superior-interior del horno.

II.3 Metodología General de Experimentación.

En la mayor parte de los experimentos, el pimiento morrón se sometió a un tratamiento previo al secado, con una solución de hidróxido de sodio o una solución de metabisulfito de sodio.

Para el estudio de la influencia del primer tipo de pretratamiento en el proceso de secado, se sumergió el pimiento entero en la solución cáustica a diferentes temperaturas y concentraciones (ver la tabla II.1.1) durante 5 minutos. Después se lavó y trocó en partículas de 1 cm. de lado.

En el pretratamiento con la solución acuosa de metabisulfito de sodio, primeramente se trocó el pimiento en partículas del mismo tamaño que el caso anterior y posteriormente se sumergieron en la solución de metabisulfito a temperatura ambiente, durante 5 minutos.

Para estudiar la influencia del tamaño de partícula en el secado, se escogió un solo pretratamiento que fue: 2% de concentración en la solución acuosa, con NaOH, la temperatura de la solución de 50°C, con un tiempo de inmersión de 5 minutos. Se trocó el pimiento a diferentes tamaños de partícula (ver cuadro - II.1.1).

Una vez pretratado y cortado el pimiento, se procedió a colocar en la rejilla la cantidad suficiente para que alcanzara un espe

sor de 1 cm. y luego se introdujo en el horno calentado previamente a una temperatura pre-establecida.

En el experimento donde solo se varió el grado de madurez, el pretratamiento y la temperatura de secado fueron las mismas para cada grado de madurez y el material fue secado sin tomar lectura de datos, solamente se retiró el material hasta que se terminó de secar.

Para la determinación de color al material, en el caso de la variable del grado de madurez y el efecto del dióxido de azúfre en el proceso de secado y el color final del producto, se procedió a hacer la extracción de los pigmentos con acetona. Al extracto se le determinó absorbancia a 460 nm (de acuerdo a la gráfica mostrada en el apéndice), expresando los resultados como --- equivalentes de solución de $K_2 Cr_2 O_7$ de concentración conocida (21).

Para el caso de flujo cruzado solamente se empleó el sistema experimental de secado de la figura No. II.2.2.

En las siguientes secciones, se hace un breve análisis de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales planteadas.

II.4. - Efecto del Pretratamiento en el Secado.

Uno de los objetivos de la experimentación es determinar el efecto que tiene en el proceso de secado y en el producto, la inmersión del pimiento fresco en soluciones cáusticas y de metabisulfito de sodio. En el pretratamiento con las soluciones de Hidróxido de sodio, se varió la concentración y temperatura, pero en el caso de las soluciones de metabisulfito de sodio únicamente se varió la concentración.

II.4.1.- Pretratamiento con Hidróxido de sodio.

Para estudiar el efecto de la concentración de hidróxido de sodio en el agua de pretratamiento, se mantuvo constante el tiempo de pretratamiento (5 min), la temperatura de la solución de pretratamiento (50°C), la forma y tamaño de la muestra (cuadros de 1 cm. de lado), temperatura de aire de secado (70°C) y volúmen de aire de secado (27.67 m³/h).

En la figura II.4.1 se muestran las curvas de secado de pimiento sumergido en soluciones cáusticas cuyas concentraciones fueron: 0, 1, 2, 3 y 4% peso/volúmen de hidróxido de sodio. En esta figura se puede observar que no existe una diferencia apreciable en la forma de la curva de secado de las muestras sin pretratar y aquellas que se sometieron a pretratamientos con solución al 1% p/v. Tal comportamiento puede deberse a que el hidróxido de sodio en ésta concentración no causa alteraciones significativas en la película protectora del pimiento morrón y por ello los cambios en el proceso de secado no son de importancia.

Refiriéndose nuevamente a la figura II.4.1, se observa que con un incremento en la concentración de hidróxido de sodio, el tiempo de secado tiende a disminuir para una misma humedad final X . Esto se atribuye a que el pimiento al ser una hortaliza, debe poseer lignina, la cual al solubilizarse más en soluciones cuyas concentraciones son más elevadas, origina un debilitamiento en los tejidos lo que trae como consecuencia que la humedad se elimine con mayor rapidez cuando se efectúa el proceso de secado.

Como ya se sabe, las curvas de secado X vs θ , se pueden transformar mediante dos sencillas técnicas a curvas de velocidad de secado N vs. X o bien a diagramas $dX/d\theta$ vs. X . Estas gráficas también se utilizarán en lo sucesivo para explicar en forma más clara los resultados obtenidos,

En el apéndice A se describe con un ejemplo, el método utilizado para transformar la gráfica de X vs. θ a una de $dX/d\theta$ vs. X . De acuerdo a esto, se obtuvieron la Tabla II.4.1 y la Fig. II.4.2

Para evaluar el efecto de la temperatura de pretratamiento en el secado de pimiento, se mantuvieron constantes las siguientes variables: el tiempo de pretratamiento (5 min), la concentración de NaOH en la solución de pretratamiento (2% W/V), la forma y tamaño de la muestra (cuadros de 1 cm. de lado), temperatura de aire de secado (70°C), volúmen de aire de secado (27.67 m³/h).

Los niveles de variación de temperatura se muestran en la tabla No. (II.1.1).

En la figura No. II.4.3, podemos observar que las curvas a pesar de ser bastante semejantes, tienen un ligero aumento en su pendiente conforme aumenta la temperatura de pretratamiento, - es decir, tienden a acercarse más hacia el eje de las ordenadas.

Si observamos la separación entre estas curvas, podríamos decir que la temperatura de pretratamiento, no es tan determinante - para el proceso de secado como sucede con otras variables que se manejan en el presente trabajo.

Los valores de la tabla No. II.4.2 obtenidos a partir de la--- figura No. II.4.3 podemos decir que al aumentar la temperatura - de pretratamiento hasta 50°C, la velocidad de secado en el período de velocidad constante aumenta, lo cual se puede explicar en función de la mayor solubilización de la película protectora del pimiento morrón.

En la figura No. II.4.4, se puede apreciar más claramente lo - que se ha discutido en los párrafos precedentes.

Variable concentración de Hidróxido de sodio pretratamiento: 5 min. 50 °C Temp. aire de secado 70 °C.

0.- 0 % W/V NaOH

1.- 1 % W/V NaOH

2.- 2 % W/V NaOH

3.- 3 % W/V NaOH

4.- 4 % W/V NaOH

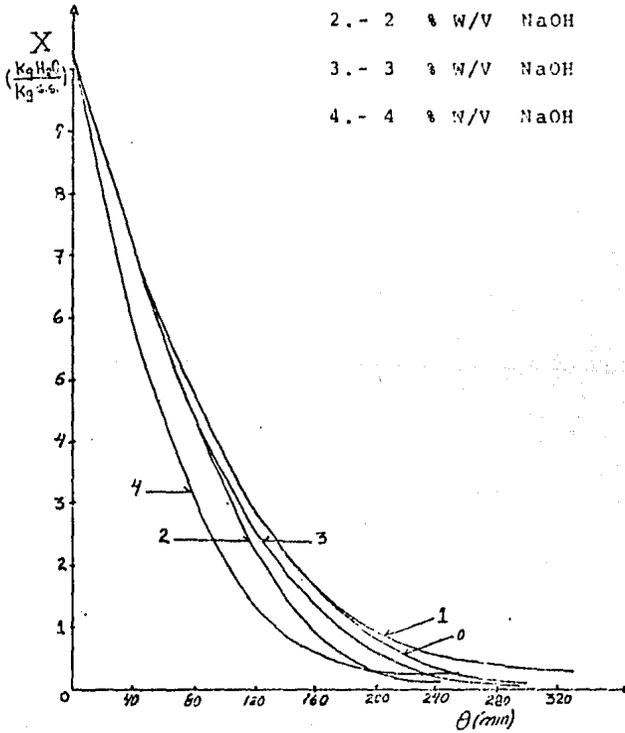


Fig. II.4.1. Influencia de la concentración de soluciones cáusticas en el tiempo de secado de pimiento morrón.

Tabla No. (II.4.1).- Efecto de la concentración de hidróxido de sodio en el agua de pretratamiento, en el proceso de secado de pimiento morrón.

Variable	X_c	θ_c	$(\frac{dX}{d\theta})_c$	X_f	θ_f	X (a 120 min)
NaOH en % en peso						
0	7.7	33	4.8	0.25	284	2.94
1	7.6	34	4.7	0.20	290	2.94
2	6.6	43	4.8	0.15	240	2.26
3	6.3	43	4.75	0.05	280	2.56
4	6.45	35	6.35	0.22	220	1.42

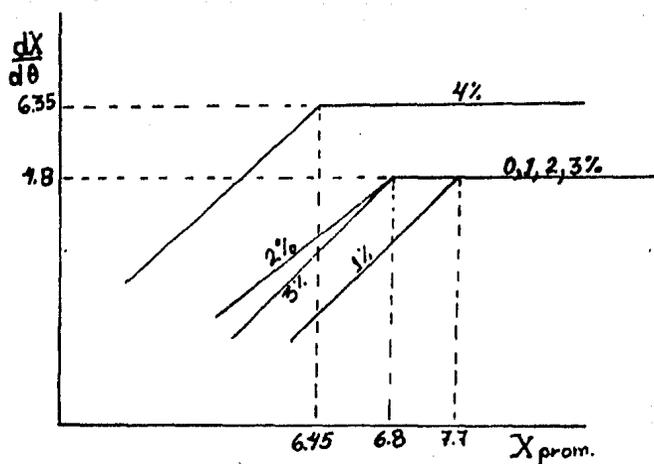
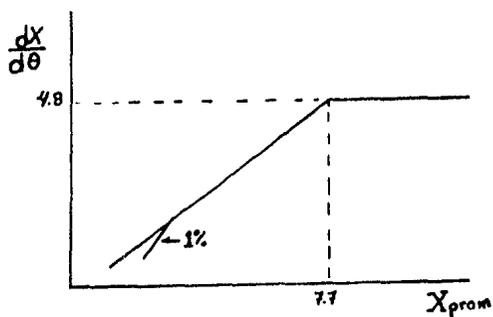


Fig. No. 11.4.2. Influencia de la concentración de hidróxido - de sodio en la solución de pretratamiento sobre la velocidad de secado.

Variable ; Temperatura de pre-
tratamiento.

Temperatura de secado: 70°C

Pretratamiento: 2% NaOH, 5 min.

- 1.- Temp. pret.: 40°C .
- 2.- Temp. pret.: 50°C .
- 3.- Temp. pret.: 60°C .
- 4.- Temp. pret.: 70°C .

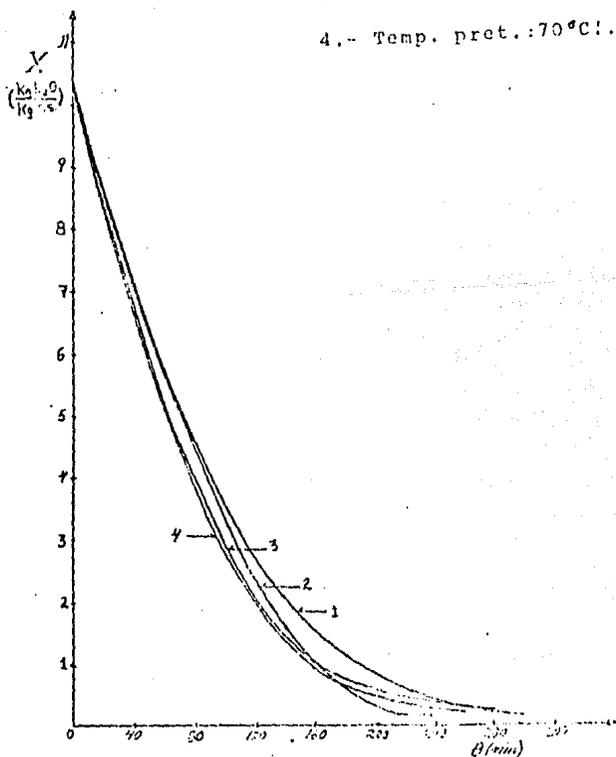


Fig. II.4.3 Influencia de la temperatura de pretratamiento en el tiempo de secado.

Tabla (II.4.2) Parámetros más importantes del secado de pimienta morrón manejando como variable la temperatura de pretratamiento.

Parámetro						
Nivel (°C)	x_c	θ_c	$(\frac{dx}{d\theta})_c$	x_f	θ_f	X (a 120 min)
40	7.25	36.5	4.9	0.211	296.8	2.73
50	5.32	66.0	4.5	0.16	238.3	2.33
60	7.40	32.5	5.3	0.31	270.3	1.97
70	8.16	22.5	5.9	0.23	260.6	1.96

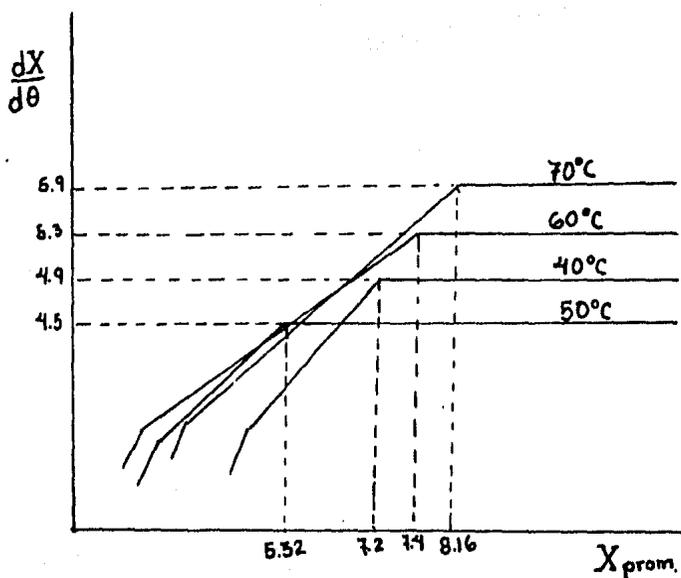


Fig. II.4.4 Influencia de la temperatura de pretratamiento en la velocidad de secado.

II.4.2 Pretratamiento con Dióxido de Azúfre.

Para estudiar el efecto de la concentración de dióxido de azúfre en el proceso de secado, las variables que se mantuvieron constantes fueron: tiempo de pretratamiento (5 min), temperatura de pretratamiento (ambiente), la forma y tamaño de la muestra (cuadros de 1 cm. de lado), temperatura de aire de secado (70°C), volúmen de aire de secado (27.67 m³/h).

Los valores de concentración empleados en esta parte experimental pueden ser vistos en la tabla No. II.1.1.

De la figura II.4.2.1 se puede ver gran semejanza entre las curvas b y c. En las curvas a y d existe una diferencia relativamente pequeña en los tiempos de secado.

Realizando un análisis de la tabla No. II.4.2.1, podemos decir que a las concentraciones manejadas de K₂S₂O₅ no se tiene prácticamente ninguna influencia en el proceso de secado.

Por otro lado, los datos presentados en la tabla II.4.2.2 sugieren, como era de esperarse, una ligera retención de color al aplicarse el pretratamiento con metabisulfito de potasio, lo cual nos dá una idea del pequeño daño ocasionado por las condiciones del secado al color rojo del pimiento morrón.

Variable: Concentración de $V_2S_2O_5$.
 Condiciones: Temperatura de secado: $70^\circ C$; Pretratamiento: 5 min. temp. ambiente.

- a) Muestra pretratada a 0.6 w/v.
- b) Muestra pretratada a 1.2 w/v.
- c) Muestra pretratada a 0.9 w/v.
- d) Muestra pretratada a 0.3 w/v.

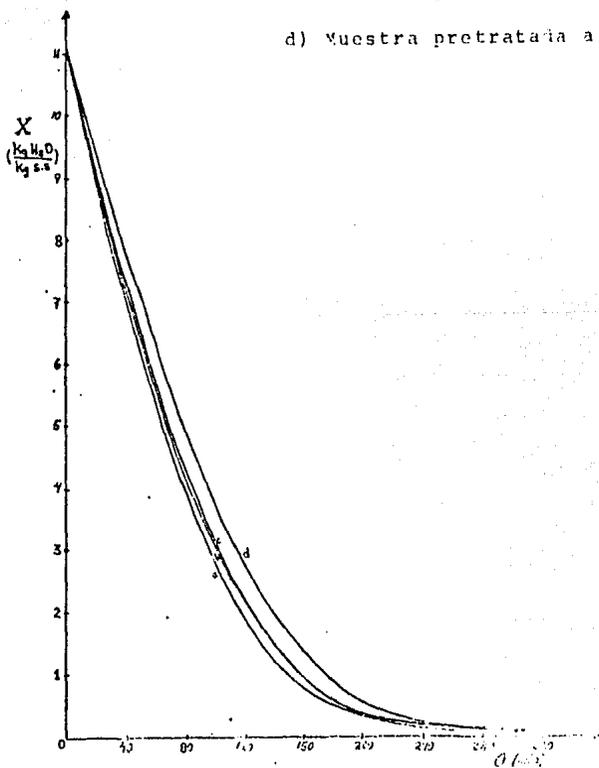


Fig. II.4.2.1 Influencia de la concentración de dióxido de azufre en el agua de pretratamiento, sobre el tiempo de secado.

Tabla No. (II.4.2.1) Parámetros más importantes del secado de Pimiento morrón manejando como variable la concentración de metabisulfito de potasio ($K_2S_2O_5$).

Parámetro							
%	W/V ($K_2S_2O_5$)	X_c	θ_c	$(\frac{dX}{d\theta})_c$	X_f	θ_f	X (a 120 min)
0.3		7.25	45.0	5.10	0.029	300	2.65
0.6		8.62	22.0	6.50	0.117	285	1.83
0.9		8.59	24.5	6.25	0.032	260	2.18
1.2		8.95	25.5	6.50	0.129	249	2.15

Tabla No. (11.4.2.2).- Resultados del efecto de la concentración de dióxido de azufre en el color del producto sometido al proceso de secado (expresado en equivalentes de $K_2Cr_2O_7 \times 10^2$).

(% W/V DE $K_2S_2O_5$)	Equivalentes de $K_2Cr_2O_7 \times 10^2$		Δ
	SIN PRET.	CON PRET.	
0.3	0.276	0.407	0.131
0.6	0.213	0.389	0.176
0.9	0.309	0.414	0.105
1.2	0.116	0.241	0.125

NOTA: Para mayor detalle en la técnica empleada en estas determinaciones, Ver el Apéndice B.

II.5 Efecto del tamaño de partícula en el secado.

En el estudio de ésta variable se mantuvieron constantes los siguientes valores: tiempo de pretratamiento (5 min), la concentración de NaOH en el agua de pretratamiento (2% W/V), temperatura de pretratamiento (50°C), temperatura de aire de secado (70°C), volúmen de aire de secado (27.67 m³/h).

Los niveles de variación que se manejaron se pueden observar en la tabla No. II.1.1.

Los resultados de este experimento se presentan en las figuras - No. II.5.1 y II.5.2 y en la tabla No. II.5.1.

Estos datos indican que cuando se disminuye el tamaño de partícula, la muestra se seca más rápidamente debido a que la trayectoria de la humedad a través del sólido es más pequeña y además el área de exposición es mayor.

Variable: Tamaño de partícula.

Pretratamiento: 2% NaOH, 50°C,

5 min., Temp. de secado: 70°C.

1) Pimiento cortado a 1 cm.

2) Pimiento cortado a 1.5 cm.

3) Pimiento cortado a 3.0 cm.

4) Pimiento cortado a 4.0 cm.

5) Pimiento cortado a 5.4 cm.

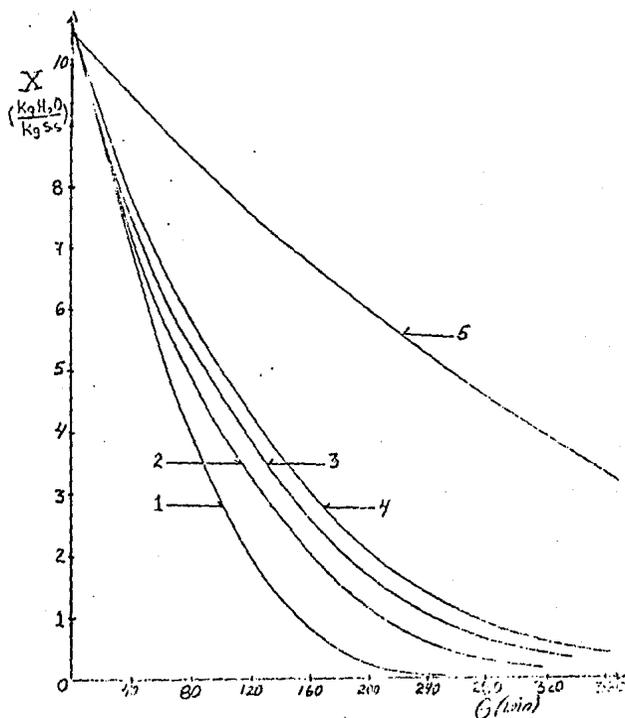


Fig. II.5.1 Influencia del tamaño de partícula en el tiempo de secado.

Tabla No. (II.5.1).- Efecto del área de contacto en el secado de
 miento morrón.

Parámetro	X_c	θ_c	$(\frac{dx}{d\theta})_c$	X_f	θ_f	X (a 120 min.)
Chile a la 1/2	6.25	134	1.5	0.25	720	7.52
4 cm. de lado	9.4	15	4.2	0.40	366	4.25
3 cm. de lado	9.1	18	5.15	0.35	340	3.77
1.5 cm. de lado	8.2	26	5.25	0.20	310	3.27
1 cm. de lado	7.2	36	5.30	0.06	246	1.97

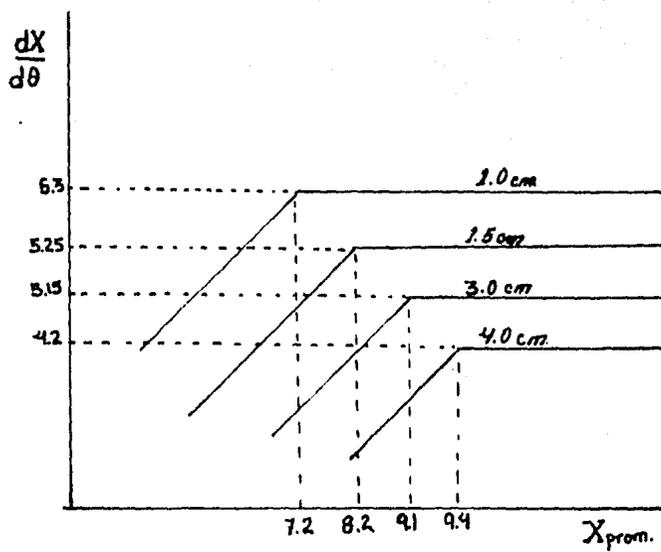


Fig. No. (II.5.2) Influencia del tamaño de partícula en la velocidad de secado.

II.6 Efecto de la Temperatura de secado.

II.6.1 Pimiento pretratado con solución de NaOH al 2% w/v.

Para éstas corridas experimentales, las variables que se mantuvieron constantes fueron: tiempo de pretratamiento (5 min), temperatura de pretratamiento (50°C), concentración de NaOH en la solución de pretratamiento (2% w/v), forma y tamaño de la muestra (cuadros de 1 cm de lado), volúmen del aire de secado --- (27.67 m³/h).

Los niveles de variación pueden ser consultados en la tabla No.

II.1.1.

Las figuras No. II.6.1.1 y II.6.1.2, presentan la influencia de ésta variable. Demuestran que los tiempos de secado tienden a disminuir considerablemente conforme se aumenta la temperatura de secado y es más notorio ésto cuando se observa la diferencia de tiempo total de secado entre la temperatura de 60 y 70 °C, existiendo una reducción en el tiempo de secado de casi la mitad.

De la tabla II.6.1.1, se podría decir que la temperatura de secado que más convendría usar, sería la de 95°C, por la gran reducción de tiempo de secado que se logra y por la alta velocidad de secado, sin embargo, existe el gran inconveniente de que a ésta temperatura, el producto presente indicios de quemado en

las etapas finales de secado, (a humedades inferiores al 30% ba
se húmeda).

De la tabla No. II.6.1.1, se observa que a 70°C, la velocidad
de secado el período constante es más prolongado que en el pro-
ceso realizado a 80°C.

Variable: Temperatura de aire de secado.

Pretratamiento: 2% NaOH, 5 min., 50°C

- 1.- Temperatura de secado 50°C.
- 2.- Temperatura de secado 60°C.
- 3.- Temperatura de secado 70°C.
- 4.- Temperatura de secado 80°C.
- 5.- Temperatura de secado 95°C.

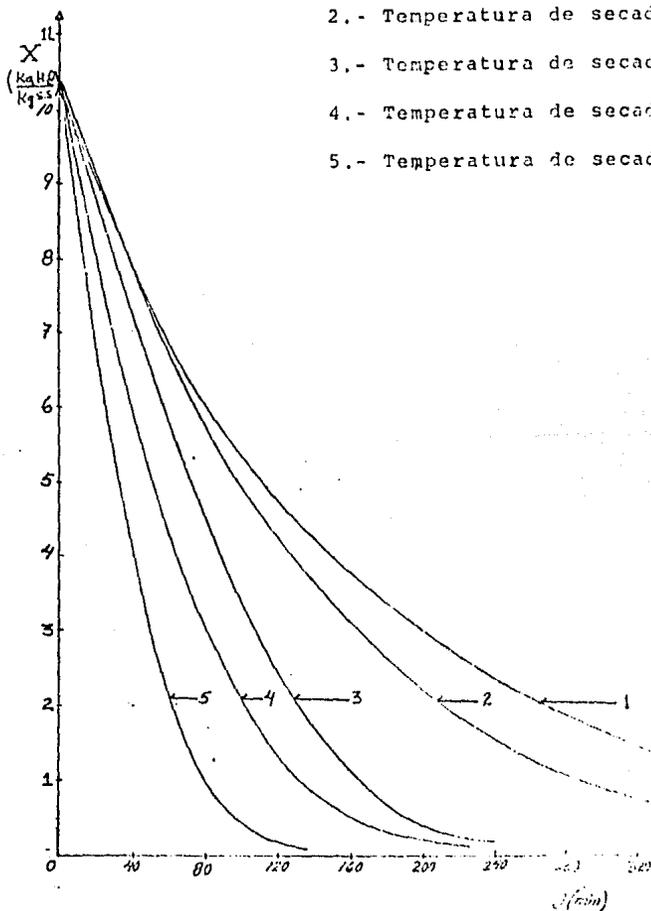


Fig. II.6.1.1 Influencia de la temperatura de secado en el tiempo total de secado.

DIAGRAMA ESQUEMATICO $dX/d\theta$ vs. X_{prom}

Variable: Temperatura de aire de secado

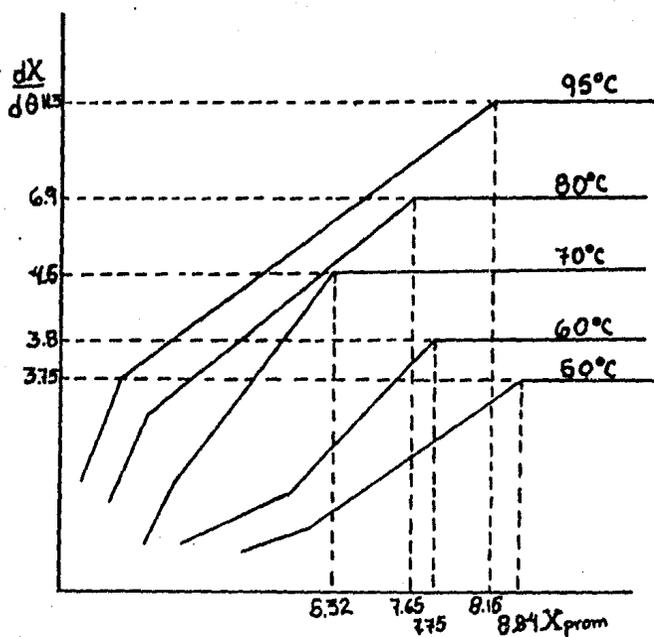


FIG. No. (II.5.1.2) Influencia de la temperatura de secado en la velocidad de secado.

Tabla No. (II.6.1.1).- Efecto de la temperatura del aire de secado (pretratamiento con sol., cáustica al 2% w/v durante 5 min., a 50°C,

Parámetro °C	X_c	θ_c	$(\frac{dX}{d\theta})_c$	X_f	θ_f	X (a 120 min)
50	3.84	23.0	3.75	0.35	539.6	4.70
60	7.75	25.9	3.80	0.264	437.3	4.20
70	5.32	67.0	4.50	0.16	240.0	2.42
80	7.65	23.5	6.90	0.116	229.5	1.30
95	9.15	12.5	11.30	0.161	134.33	0.15

II.6.2 Pimiento pretratado con solución de NaOH al 4% w/v.

Para estudiar este efecto, se mantuvo constante tiempo de pretratamiento (5 min), temperatura de pretratamiento (50°C), concentración de NaOH en la solución de pretratamiento de 4% w/v, forma y tamaño de la muestra (cuadros de 1 cm. de lado), volumen de aire de secado (27.67 m³/h).

Los niveles de variación que se manejaron pueden apreciarse en la tabla No. II.1.1.

En el presente experimento, se pretendió observar los cambios -- ocurridos en el proceso de secado, al variar las temperaturas de aire, manteniendo constante el pretratamiento de 4% de NaOH. -- Las principales observaciones fueron: los valores de la tabla -- No. II.6.2.1 nos indican que al aumentar la temperatura de aire de secado, X_c disminuye, $\left(\frac{dx}{d\theta c}\right)$ se incrementa y los valores de X -- (a un tiempo dado) disminuyen como era de esperarse.

El tiempo final de secado disminuye considerablemente al aumentar la temperatura de secado como se puede apreciar en la figura No. II.6.2.1.

Como vemos, el proceso de secado se hace más eficiente en todos los sentidos, al aumentar la temperatura de secado, dejando constante el pretratamiento de 4% de NaOH w/v. Atribuimos esto a -- que, a ésta concentración de hidróxido de sodio, se produce ma--

por daño en la película protectora del pimiento, debilitando el tejido y permitiendo la salida más rápidamente de las moléculas de agua.

En la figura No. II.6.2.2, se ilustran los cambios de velocidad de secado a diferentes temperaturas.

Variable: Temperatura de aire de secado.

Pretratamiento: 4% NaOH, 5 min., 50°C.

1.- Temperatura de secado 50°C.

2.- Temperatura de secado 60°C.

3.- Temperatura de secado 70°C.

4.- Temperatura de secado 95°C.

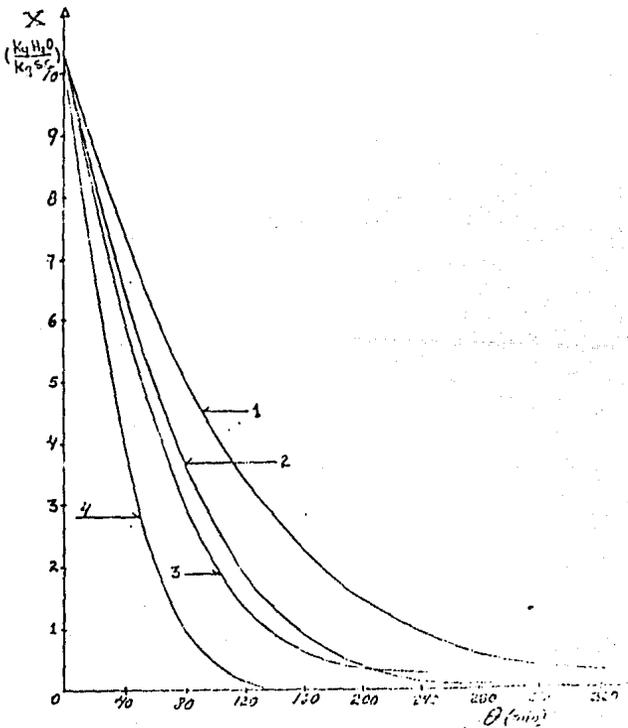


Fig. II.6.2.1. Influencia de la temperatura de secado en el tiempo total de secado.

Tabla No. (II.6.2.1).- Efecto de la temperatura del aire de secado en el proceso de secado. (pretratamiento: 5 min., 50°C, 4% de NaOH w/v).

Parámetro °C	x_c	θ_c	$\left(\frac{dx}{d\theta}\right)_c$	x_f	θ_f	x (a 120 min)
50	7.45	40	4.2	0.30	360	3.42
60	6.75	37	5.5	0.06	260	1.92
70	6.45	35	6.45	0.24	228	1.37
95	6.36	23	10.1	0.05	128	0.10

DIAGRAMA ESQUEMATICO DE W Vs. X

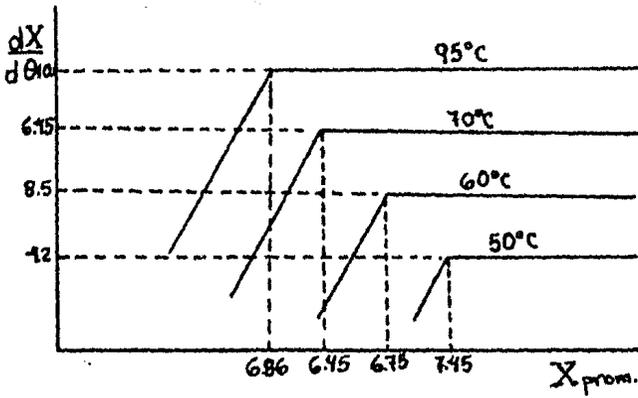


Fig. No. (II.6.2.2) Influencia de la temperatura de secado en la velocidad de secado.

II.7.- Efecto del Grado de Madurez del Pimiento en el Color del Producto Final.

Para estudiar éste efecto se mantuvo constante: tiempo de pretratamiento (5 min), temperatura de pretratamiento (50°C), concentración de NaOH en la solución del pretratamiento (2% w/v), forma y tamaño de la muestra (cuadro de 1 cm. de lado), temperatura de aire de secado (70°C) volúmen de aire de secado --- --- 27.67 m³/h).

Los niveles de variación que se manejaron, pueden apreciarse en la tabla No. II.7.1, y son aquellos en los cuales no se tomaron lecturas continuamente, sino solamente una vez que el material estuvo seco se retiró el pimiento del horno experimental de secado, posteriormente se procedió a seguir la técnica de extracción de pigmentos para evaluar el color (21). Ver apéndice B.

Como podemos observar en la tabla No. II.7.1, los datos sugieren un daño bastante bajo del pretratamiento con NaOH, en el color del producto final. Además de que la diferencia entre los datos de pretratamiento y sin pretratamiento se podría considerar despreciable.

Si se analiza a nivel cualitativo, los cuales presentados en el cuadro, podemos decir que, cuando aumenta el grado de madurez, el incremento en las lecturas de color es más notable a partir del color No. 3, lo cual se debe a que a medida que el pimiento

es más maduro, existe una mayor pigmentación.

En el mismo cuadro podemos observar la semejanza que existe entre los colores 5 y 6 y el color del pimiento morrón comercial o de importación. Debe agregarse que no se espera igualar dicho color debido principalmente a que no se sabe la variedad de pimiento -- que se empleó para obtener el producto comercial, así como las -- condiciones del secado. Sin embargo, es válido hacer la comparación, ya que el producto que se pretende obtener en el presente -- trabajo, es para una posible sustitución del comercial, que es la importación e incluso la posibilidad de poder exportar pimiento -- morrón seco.

Tabla No. (II.7.1).- Resultados del efecto del grado de madurez del pimiento morrón fresco en el color del producto final (expresado en equivalente de $K_2Cr_2O_7 \times 10^2$).

COLOR (Relación Grado de Madurez)	$K_2Cr_2O_7 \times 10^2$	
	SIN PRET	CON PRET
1	0.187	0.145
2	0.187	0.29
3	0.228	0.279
4	0.253	0.226
5	0.615	0.543
6	0.636	0.633

PIMIENTO MORRON DE IMPORTACION: 0.626

NOTA: Para mayor detalle en la técnica empleada en estas determinaciones, ver el apéndice B.

II.8.- Efecto de la dirección del aire en el secado.

II.8.1.- Comparación del pimiento pretratado y el pimiento sin pretratar.

En este experimento se manejó como variable independiente, el secado de pimiento morrón con pretratamiento y sin pretratamiento.

Las variables que se mantuvieron constantes, fueron: la forma y tamaño del material, cuados de aproximadamente 1 cm. de lado, -- temperatura de aire de secado de 70°C, el volúmen de aire de secado de 27.67 m³/h.

Procedimiento Experimental:

Para el pimiento morrón pretratado, se procedió de la siguiente forma: En la solución de NaOH con una concentración de 2% w/v, -- precalentada a 50°C, se sumergió el pimiento morrón entero durante 5 minutos. Una vez transcurrido el tiempo mencionado, el pimiento fué lavado y troceado, tratando de obtener un tamaño de partícula homogéneo de aproximadamente 1 cm. de lado. El material así pretratado se colocó en el horno experimental de secado, previamente estabilizado a las condiciones de operación deseadas. Las lecturas de peso se registraron cada 10 minutos, -- hasta que la balanza no registrara cambio en el peso.

Para el pimiento morrón sin pretratar, solamente se troceó a la misma forma que el pretratado, para colocarlo posteriormente en

el horno experimental de secado, previamente estabilizado a las mismas condiciones empleadas para el pimiento pretratado. Las lecturas de peso se realizaron de la misma forma.

Los resultados obtenidos se muestran gráficamente en la figura No. (II.8.1.1.)

Como se puede observar en la figura No. (II.8.1.1), ambas curvas describen un comportamiento muy semejante, por lo cual, se puede decir que el pretratamiento con solución cáustica, no tiene una influencia aparente en el proceso de secado cuando se emplea flujo de aire perpendicular al lecho, aunque es recomendable hacerlo, ya que su influencia quedó demostrada en experimentos anteriores.

Comparación del pretratamiento en el secado de pimiento morrón.

1.- Pretratamiento: 2% NaOH, 5 min., 50°C.

2.- Sin pretratamiento.

Temperatura de aire de secado: 70°C.

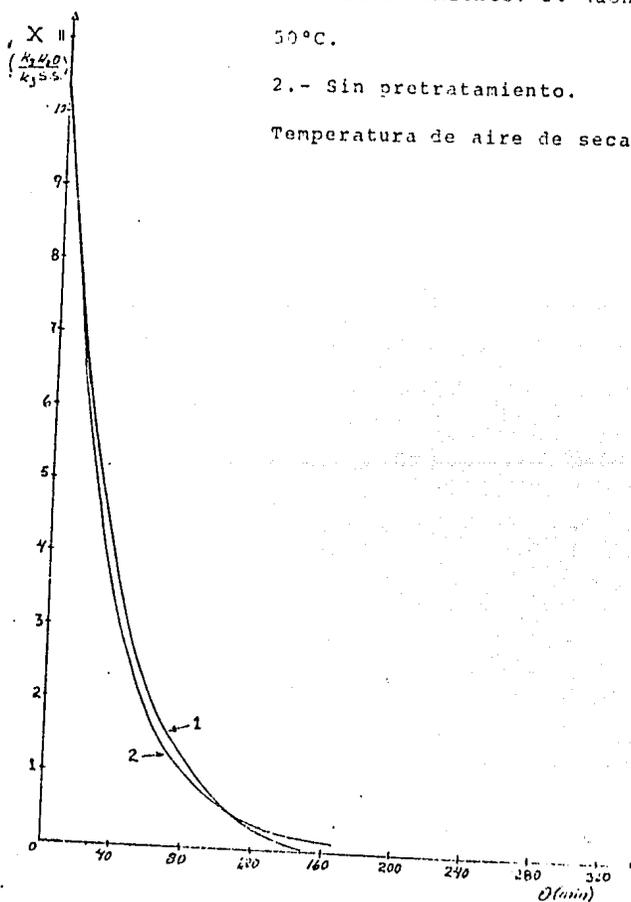


Fig. II.3.1.1 Efecto del pretratamiento en el tiempo total de secado.

11.8.2.- Efecto del espesor del lecho en el tiempo de secado.

En este experimento se manejó como variable independiente el espesor del lecho, el cual se varió en: 1, 2, 3, 4 centímetros.

Las variables que se mantuvieron constantes, fueron: el flujo de aire a través del material de $27.67 \text{ m}^3/\text{h}$. temperatura de secado de 70°C , tamaño de partícula, cuadros de aproximadamente 1 cm. de lado, tiempo de pretratamiento de 5 minutos, la temperatura de pretratamiento de 50°C , la concentración de Hidróxido de Sodio de 2% w/v.

Procedimiento Experimental:

En la solución de hidróxido de sodio, con la concentración de 2% w/v precalentada a 50°C , se sumergió el pimiento morrón entero durante 5 minutos. Una vez transcurrido el tiempo mencionado, el pimiento fue lavado y troceado, tratando de obtener un tamaño de partícula homogéneo de aproximadamente de 1 cm de lado. El material así preparado se colocó en el horno experimental de secado, previamente estabilizado a las condiciones de operación --deseadas. Las lecturas de peso se registraron cada 10 minutos, hasta que la balanza no registrara cambio en el peso.

En forma similar, se procedió para cada uno de los espesores propuestos.

Los resultados obtenidos se muestran gráficamente en la figura - No. (II.8.2J) y en la tabla No. (II.8.2.1).

De los resultados mostrados en la figura No. (II.8.2.1.), nos podemos dar cuenta que a medida que los espesores del lecho se incrementan, el tiempo de secado se va prolongando, sin ser esto, directamente proporcional, ya que, como se puede observar en dicha figura, en el espesor menor se logra un tiempo de secado bastante reducido, en comparación con el de 4 cm. de espesor. Así mismo, en los dos espesores intermedios, las curvas son bastante semejantes, esto puede ser atribuido a que bajo estas condiciones de secado, las caídas de presión del lecho, son bajas en el espesor menor y bastante altas en el mayor, mientras que en los espesores intermedios no es tan determinante.

En la tabla No. (II.8.2.1), se pueden apreciar con mayor claridad, la semejanza entre los parámetros de las curvas intermedias.

Variable: Espesor del lecho.

Pretratamiento: 2% NaOH, 5 min., 50°C.

Temperatura de secado: 70°C.

1.- Espesor 1cm.

2.- Espesor 2cm.

3.- Espesor 3cm.

4.- Espesor 4cm.

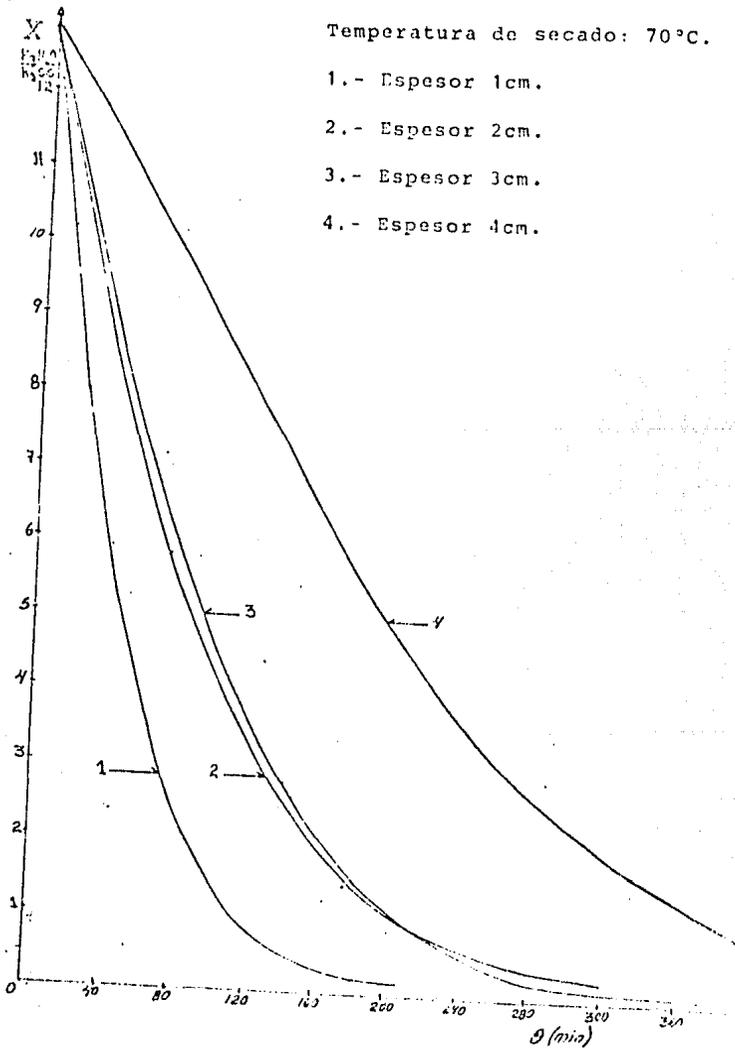


Fig. II.8.2.1 Efecto del espesor del lecho en el tiempo total de secado.

Tabla No. (II.8.2.1) EFECTO DEL ESPESOR DEL LECHO, EN EL PROCESO DE SECADO.

Espe so r (cm)	X_c	θ_c	$(\frac{dx}{d\theta})_c$	X_f	θ_f	X (a 120 min)
1	9.5	17	12.35	0.26	206	0.85
2	9.58	30	6.53	0.20	320	3.34
3	9.77	32	5.70	0.20	300	3.60
4	5.90	132	2.40	0.20	540	8.45

II.9.- BREVE ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

El análisis de esta parte experimental permite establecer las condiciones que se estiman son las más adecuadas para deshidratar el pimiento morrón. Revisando el efecto del pretratamiento con Hidróxido de sodio (Fig. No. II.4.1), podemos observar que existe un ahorro considerable de tiempo, conforme aumenta la concentración de Hidróxido de Sodio en el agua de pretratamiento, aunque es importante aclarar que esto se observa marcadamente cuando la dirección del flujo del aire de secado es paralela al lecho de sólidos húmedos. Sin embargo, analizando ésta misma variable, con flujo perpendicular al lecho (fig. No. 8.1.1) se puede ver que el efecto no es significativo y realmente no aporta un ahorro de tiempo.

Para el pretratamiento con dióxido de azufre (Fig. II.4.2.1), se puede apreciar que no existe un cambio importante en el proceso de secado. Bibliográficamente se sabe que el dióxido de azufre es un agente antioxidante actuando como preservador de color en períodos largos de almacenamiento. Este efecto no estuvo contemplado en el presente trabajo.

Se puede concluir que si se desea secar el pimiento morrón con flujo de aire paralelo al lecho de sólidos húmedos, el pretratamiento con hidróxido de sodio al 2% w/v. (revisar Sección II.4.1 y Sección II.6.2), tendría un efecto significativo y sería pertinente tomarlo en cuante. Si el producto se desea secar flujo perpendicular al lecho, el pretratamiento puede ser descartado.

Las secciones precedentes en donde se revisan el efecto de las variables enlistadas en la tabla de experimentos, aportaron las condiciones más adecuadas de secado, las cuales aparecen en la tabla No. II.1.1, y son las siguientes:

- 1.- El tamaño de partícula más adecuado para secar el producto fué de 1 cm^2 .
- 2.- El grado de madurez con que debe contar el producto a ser secado, debe ser el mayor posible ó el que aporte un color similar a la solución de 0.636 (equivalentes de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \times 10^2$) este grado de madurez aportará un color muy similar al comercial de la paprika, producto que fué usado como parámetro tecnológico.
- 3.- Con respecto a la temperatura, podemos decir que 75°C en el aire de secado, no daña el color final del producto. Sin embargo, se observó que -- las temperaturas altas de secado (95°C), no causan daño alguno en el producto, siempre y cuando la humedad absoluta del pimiento no disminuya en un rango de 0.8 a 0.5 ($\text{Kg. H}_2\text{O/Kg ss.}$) Por debajo de éste rango, la temperatura máxima permisible es de 70°C .

Este hecho permitirá establecer un secado con temperaturas altas al inicio y temperaturas relativamente bajas en las últimas etapas de secado (del orden de 70°C).

- 4.- La dirección del flujo de aire es mejor a través del lecho que paralelo a este, ya que reduce considerablemente el tiempo de secado.

Estas condiciones servirán como pauta para realizar el diseño del secador para la deshidratación del pimiento.

CAPITULO III.

EXPERIMENTACION EN DOS SECADORES DIRECTOS.

III.1. - Selección de los equipos para la experimentación.

En la industria alimentaria, los materiales sometidos a deshidratación se alimentan al secador en muy diversas formas físicas -- las cuales van desde líquidos, suspensiones, pastas, preformados granos, etc. Por tal motivo, existen una gran variedad de secadores en el mercado y la mayoría de estos pueden utilizarse para secar más de un tipo de material húmedo. Sin embargo, el equipo que se utilice deberá cubrir los siguientes aspectos.

- a).- Que el producto cubra las especificaciones de calidad como son: humedad, forma y algunas otras características específicas de cada producto.
- b).- Que el manejo del material dentro del equipo sea el más adecuado. Por ejemplo, partículas preformadas susceptibles a ser dañadas por el manejo mecánico.
- c).- Que el equipo en cuestión permita optimizar la operación.

La selección del secador que cubra estos requerimientos, se logra con mucho más eficiencia, si se tiene información previa sobre condiciones y comportamiento del material secado. En caso de no ser así, dicha información puede obtenerse de la literatura

ra especializada o bien, consultando a vendedores de equipo de secado. Si no se cuenta con ningún tipo de información en la literatura consultada, se sugieren los dos pasos siguientes:

- 1).- Enlistar los secadores que potencialmente serán adecuados para deshidratar el alimento en cuestión. Para esto se puede utilizar como guía la figura (III.1.1), en la que se clasifican los secadores de acuerdo a la forma física de la alimentación.
- 2).- Estimar el costo total (costos fijos más costos de operación) de cada uno de los secadores enlistados y eliminar los equipos con altos costos. En este renglón se considera que un secador resulta caro en su adquisición y manejo cuando su costo total es -- 2.5 veces mayor que el secador más económico de los enlistados en la selección.

Para realizar la selección final, se requiere:

- a). Realizar pruebas en equipo de secado piloto, para observar la facilidad que puede ser manejado el material, y determinar las condiciones de operación del secador. Para que estas pruebas de secado sean de máximo provecho, deberá tratarse de que las condiciones de operación sean lo más semejante a las condiciones que se manejen en el secador industrial

esperado. Así como también las características físicas y el acomodo del material sobre los soportes.

- b).- Hacer la selección final del secador sobre la base de los datos de operación proporcionados por las pruebas de la planta piloto.

Una vez elegido el equipo de secado y conociendo las condiciones de operación, se procederá a su dimensionamiento, ya sea por algunas formas derivadas mediante simplificaciones o bien correlaciones empíricas o semiempíricas.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se realizó una selección preliminar de los secadores potenciales, para hacer posteriormente las pruebas experimentales. Dicha selección se efectuó tomando como base las figuras (III.1.1) y (III.1.2) y además las siguientes características que tiene el material en estudio:

- Material a secar: Pimiento morrón rojo tipo bell.
- Forma geométrica: Partículas de un centímetro de lado.
- Tipo de material: Fibroso.
- Flamabilidad: No.
- Sensibilidad: a temperaturas altas.
- Forma especial del producto: No.

El material puede ser secado en forma continua o intermitente, de acuerdo a la producción deseada. Así mismo, se puede emplear secadores directos, ya que el producto no requiere temperaturas de secado demasiado bajas. En estos equipos se tiene la ventaja adicional de que el aire caliente de secado, proporciona un medio que ayuda a llevarse los vapores, eliminados del material.

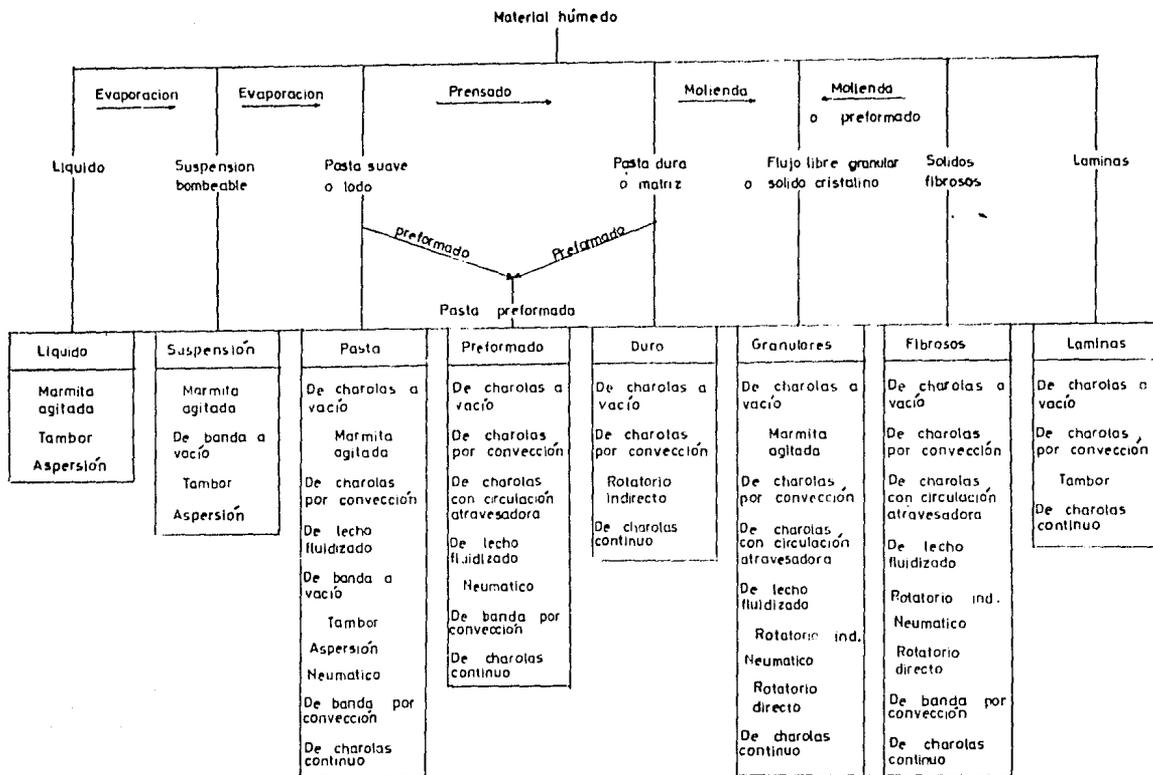


Fig. III.1.1 CLASIFICACION DE SECADORES DE ACUERDO CON LAS CARACTERISTICAS FISICAS DE ALIMENTACION

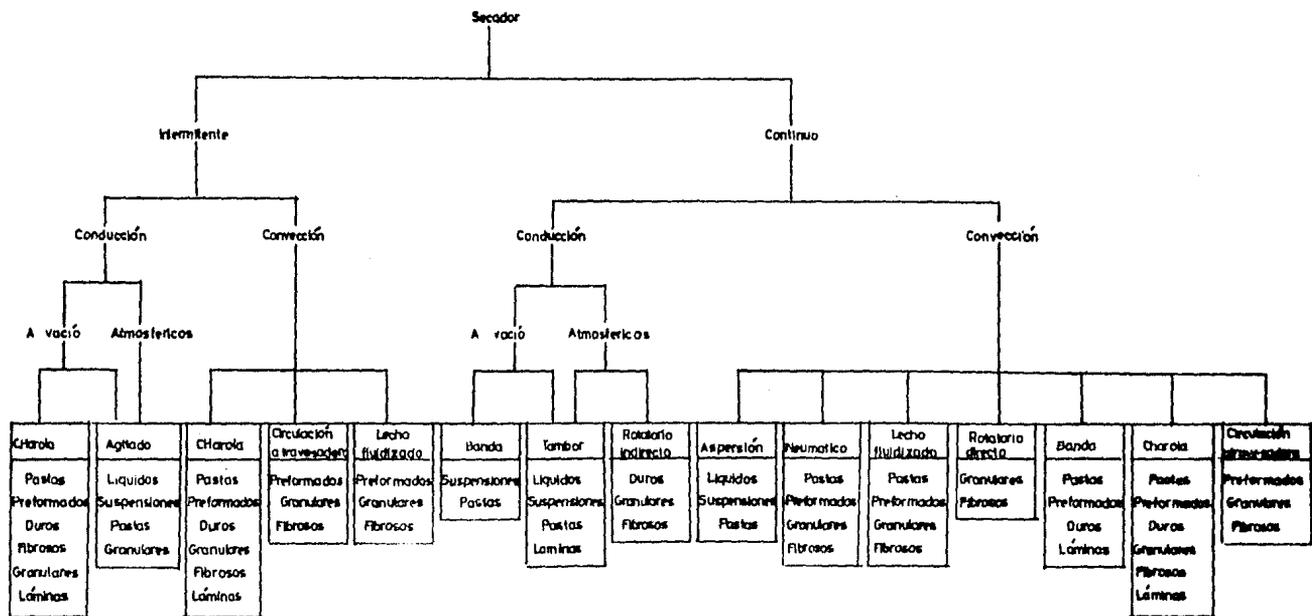


Fig. III.1.2 CLASIFICACION DE SECADORES DE ACUERDO A SU METODO DE OPERACION

Aunado a ésto el costo inicial para una capacidad dada, es menor que el de -- los secadores indirectos. De acuerdo a lo anterior, los secadores selecciona dos son:

- Secador con circulación atravesadora.
- Secador con charolas.
- Secador rotatorio directo.
- Secador neumático.
- Secador de lecho fluidizado.
- Secador de banda.

Como se observa, de ésta selección preliminar, el número de secadores que se pueden usar es grande; sin embargo, como en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, únicamente se tiene disponible un secador de charolas y un rotatorio, la experimentación se limitó al uso de éstos.

Debe hacerse notar que no se realizó la eliminación de los secadores mediante la relación; costo vs. tipo de secador, por falta de información actualizada; sin embargo, en la literatura consultada se menciona que los costos de los secadores neumáticos y de lecho fluidizado son elevados.

III.2.- DESCRIPCION GENERAL DE SECADORES ROTATORIOS Y DE CHAROLAS.

III.2.1.- Descripción de un secador rotatorio.

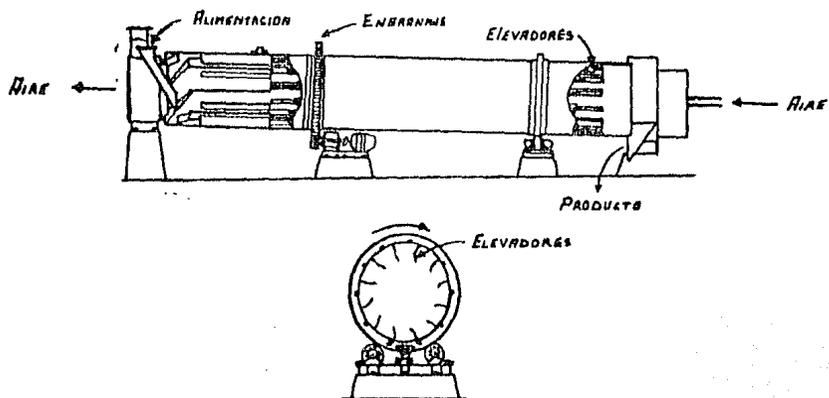
Este tipo de secador constituye una de las formas más ampliamente usadas para el secado continuo. Es sencillo y razonablemente versátil y en consecuencia, es adecuado para el secado de una amplia gama de materiales, en forma rápida y con un bajo costo unitario cuando se trata de grandes cantidades. Se puede diseñar este tipo de secadores para tiempos de secado comprendidos entre 5 y 60 minutos y capacidades de secado desde unos cuantos cientos de kilogramos - por hora hasta alcanzar las 200 ton/h. (18).

Los secadores rotatorios son muy adecuados para la deshidratación de productos granulares, con buenas características de flujo que requieren tiempos de secado moderados y materiales termosensibles, en los casos en que una restricción en la temperatura de secado no implique que tenga que haber un tiempo de secado muy prolongado.

En la figura III.2.1., se muestra un secador de este tipo, aún existen varios secadores de estos que operan de diferente forma (8,18,22), en el presente -- trabajo solo se discutirá el de aire caliente directo con flujo a contracorriente que es el que se emplea en los experimentos.

En este tipo de secador, el sólido por secar se introduce continuamente en uno de los extremos del cilindro giratorio, como se muestra en la figura III.2.1.- mientras que el aire caliente fluye desde el extremo contrario.

(a)



SECCION ROTATORIA

(b)

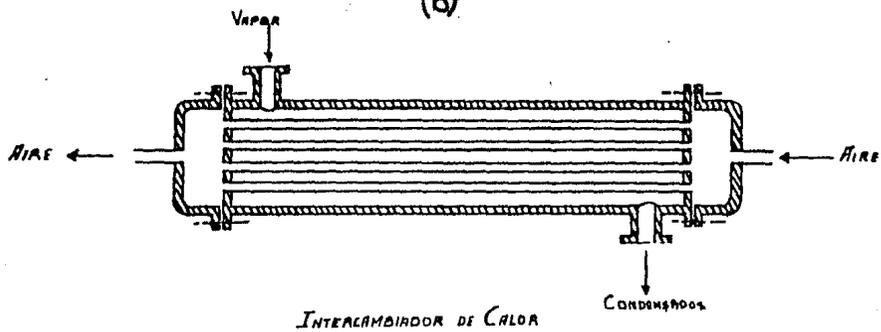


Fig. III.2.1.1

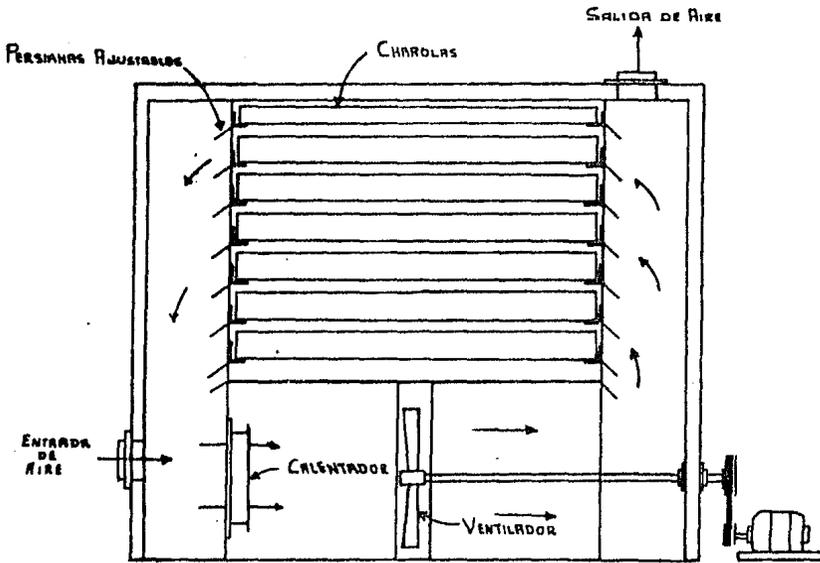
El cilindro está instalado en un pequeño ángulo con respecto a la horizontal; en consecuencia, el sólido se mueve lentamente a través del secador. Dentro del secador, unos elevadores que se extienden desde las paredes del cilindro en la longitud total del cilindro, levantan el sólido y lo riegan en una cortina móvil a través del aire; así lo exponen completamente a la acción secadora del aire. Esta acción elevadora también contribuye al movimiento hacia -- adelante del sólido. Es obvio que el sólido no debe ser ni pegajoso ni chicoloso, puesto que podría aglomerarse o pegarse a las paredes del secador.

III.2.2.- Descripción de un Secador de Charolas.

Estos secadores son útiles para secar casi cualquier material. Su costo operativo es alto debido a que el trabajo requerido es relativamente grande. Se emplea en aquellos casos donde se manipula una gran cantidad de productos diferentes, siendo relativamente pequeña la producción de cada uno de ellos.

La limpieza es fácil, reduciéndose en ocasiones a lavar las charolas fuera -- del secador y en caso de necesidad, es fácil construirlas de materiales resistentes a la corrosión. El material a secar se coloca sobre las charolas que pueden tener en la base o en el fondo de las mismas un tamiz, dejando pasar -- el aire libremente a través del sólido o bien el flujo de aire se hace pasar sobre o a lo largo del material. Existen diversos arreglos de éste tipo de -- secador (8, 18, 22), en el presente trabajo, solo se discute un tipo similar al que se encuentra disponible en la F.E.S.C. Una representación esquemática de este equipo se muestra en la figura No. (III.2.2.1).

El secador consiste básicamente de una cámara o compartimiento donde se ubi-- can las charolas removibles que contienen el material a secar.



SECADOR DE CARBOLAS

Fig. III.2.2.1

El secado se realiza con aire caliente forzado sobre las charolas, mediante un ventilador. En este caso las charolas están perforadas y el aire tiene la posibilidad de circular a través del material que está sobre ellas, si el espesor del lecho sólido es pequeño. El secador posee dos persianas que tienen el objeto de facilitar la distribución y recirculación del aire.

A este secador se le suministra el calor por medio de vapor de agua que circula por un radiador dispuesto fuera del compartimiento de secado.

III.3.- Experimentación en los secadores piloto.

III.3.1.- Descripción del secador rotatorio existente.

El secador rotatorio que se utilizó para esta parte experimental, se localiza en la F.E.S.C. La figura (III.2.1.1), muestra éste secador, el cual tiene -- las siguientes características:

- Diámetro interno y longitud del cilindro del secador 16, 152 cm. respectivamente.
- El cilindro rotatorio tiene una velocidad de giro de 23 rpm.
- Longitud total del equipo: 189 cm.
- Diámetro del conducto de salida y alimentación: 5.5 cm.
- Número de elevadores: 4.
- Material de construcción: acero al carbón.
- Angulo de inclinación: Variable.

El secador cuenta con un termostato, el cual registra la temperatura del aire a la entrada del secador y tiene un rango de 0 - 200 °C. Así mismo, cuenta con un motor el cual proporciona el movimiento y tiene las siguientes características:

H.P. : 1/4.

R.P.M. : 1650.

El aire se suministra al secador, se calienta en un intercambiador de calor - de tubos y coraza como el mostrado en la figura (III.3.b). Este entercambiador tiene las siguientes características:

- Diámetro de coraza: 13 cm.
- Número de tubos: 12.
- Longitud de tubos: 152 cm.
- Diámetro nominal de tubos: 13 mm. cédula 40.
- Arreglo: cuadrado.
- Material de construcción: Acero al carbón.

El intercambiador de calor cuenta con un manómetro que tiene un rango de ----
0.- 4 Kg/cm².

III.3.1.1.- Procedimiento de operación del secador rotatorio.

A continuación se menciona la secuencia de operación utilizada para el manejo del secador rotatorio disponible

- a).- Ajustar el ángulo de inclinación del secador.
- b).- Abrir la válvula de aire hasta alcanzar la velocidad deseada.
- c).- Abrir la válvula de vapor lentamente.
- d).- Esperar a que la temperatura del aire alcance el vapor deseado y regular la temperatura mediante la válvula de vapor y durante todo el tiempo que tarde el secado.
- e).- Poner en marcha el motor que hace girar el cilindro.
- f).- Iniciar la alimentación del material al secador.
- g).- Recolectar el material de secado en la descarga.
- h).- Una vez que sale todo el material seco, se detiene el secador.

Paro del equipo:

- a).- Cerrar la válvula de vapor.
- b).- Detener el motor.
- c).- Cerrar la válvula del aire.

III.3.2.- Descripción del secador de charolas existente.

Este secador también se encontró disponible en la F.E.S.-C y el cual se muestra en la figura (III.2.2.1).

El equipo tiene las siguientes características generales:

- Dimensiones externas: ancho 112 cm. x alto 213 cm. x 173 cm. de largo
- Dimensiones de la cámara de secado: Largo 75 cm. x ancho 101 cm. x -- altura 107 cm.
- Número de Charolas: 20.
- Dimensiones de cada charola: largo 70 cm. x ancho 41 cm. x espesor -- 4.5 cm.
- Número de ventiladores: 1.
- Diámetro del ventilador: 71.3 cm.
- Número de aspas del ventilador: 13.
- Motor: Eléctrico trifásico.
- H.Ps. del Motor: 0.35
- R.P.M. del Motor: 840.
- Flujo de aire manejado: $241 \text{ m}^3/\text{hr.}$

Calentador o intercambiador de calor: de vapor.

- Dimensiones: Largo 56 cm. x ancho 26,5 cm. x alto 56 cm.
- Tipo de tubos: con aletas.
- Número de tubos y diámetro: 28, 13 mm.
- Diámetro interno de los ductos de entrada y salida del aire: 20 cm.

III.3.2.1.- Procedimiento de operación del secador de charolas.

En las siguientes líneas se menciona brevemente la forma en que se opera el secador de charolas.

- a).- Cerrar la puerta de la cámara de secado.
- b).- Poner en marcha el ventilador.
- c).- Abrir las válvulas de purga del equipo.
- d).- Abrir la válvula de vapor lentamente para purgar la línea.
- e).- Cerrar la válvula de purga del equipo.
- f).- Esperar a que la temperatura del aire de secado alcance el calor deseado y regular la temperatura manualmente, con la válvula de vapor.
- g).- Cargar manualmente el material a secar en las charolas.
- h).- Colocar las charolas en el interior del secado.
- i).- Se extrae una muestra del secador casi al final del secado, para checar la humedad.

Una vez que se completa la deshidratación del material, se procede a detener el equipo de la siguiente manera:

Paro del secador:

- a).- Cerrar la válvula de vapor.
- b).- Detener el ventilador.
- c).- Descargar las charolas de material seco en bolsas para empacarlo.
- d).- Limpiar las charolas y colocarlas dentro del secador.

Para realizar las corridas experimentales en los secadores piloto (de charolas y rotatorio), primeramente se preparó el pimiento de la siguiente manera

El pimiento morrón fué pretratado con una solución de hidróxido de sodio al 2% w/v, durante 5 minutos y a una temperatura de 50°C. El material así preparado, se lavó con agua y posteriormente se cortó en partículas de 1 cm. de lado.

Posteriormente, se hizo el secado de acuerdo a las secuencias ya mencionadas la temperatura de secado empleada fué de 70°C.

III.3.3.- Resultados de la experimentación en los secadores piloto.

III.3.3.1.- Secador rotatorio.

En este secador se encontraron una serie de limitaciones, las cuáles se enumeran a continuación:

1.- No se logró elevar la temperatura hasta los 70°C requeridos a la entrada del secador, debido a que la presión máxima del vapor era de 1.5 Kg/cm², lo cual no proporcionaba el calor suficiente para elevar la temperatura hasta la requerida.

2.- Se optó por aumentar la velocidad del aire para aumentar la transferencia de calor en el intercambiador, este provocó que el único compresor de aire conectado, se sobrecalentara debido a que tuvo que trabajar continuamente por el exceso de aire que se estaba empleando. Con esto se logró aumen---

tar la temperatura a 60°C, con la desventaja de que se tenía que suspender la corrida experimental debido a que se debía cerrar la válvula del aire para -- darle tiempo de recuperación y reposo al compresor. El tiempo que se cerraba la válvula, del aire, era de 10 a 15 minutos, con lo cual provocaba una corrida de secado inadecuada.

3.- Se probó varios ángulos de inclinación, de los cuáles el menor fué de 5° y con este se trató de darle el máximo tiempo de residencia del material dentro del secador, encontrándose un tiempo de sólo 5 minutos. Este tiempo tan pequeño, no reducía la humedad del sólido, prácticamente nada. Se intentó hacer pasar el material varias veces por el equipo, lo cuál no dió resultados favorables. Por lo anterior, no se realizaron más corridas experimentales en dicho equipo.

III.3.3.2.- Secador de Charolas.

Durante la primera fase experimental, en la que se estudió el secado del pi-- miento con flujo de aire paralelo al lecho, se observaron los siguientes problemas:

1.- La temperatura del aire de secado, sólo se podía controlar en un rango de + 3°C con respecto a 70°C, es decir, había que checar continuamente esta temperatura para lograr mantenerla aproximadamente constante.

2.- El tiempo de secado se prolongó más allá de 8 horas y el material dispuesto en un lecho de 2 cm., no secó de forma homogénea, quedando en algunas partes casi totalmente húmedo. Esto se atribuyó a que en las condiciones prevalientes del secador:

- a).- La velocidad del aire proporcionada por el ventilador era muy baja (del orden de 0.4 m/seg).
- b).- La distribución del aire en la cámara no era homogénea, ya que en las partes superiores de la cámara de secado, se tenía un mayor flujo de aire que en la parte inferior.

En las pruebas de secado realizadas con flujo de aire transversal al lecho, se obtuvieron los siguientes resultados:

- a).- La temperatura del aire de secado se logró mantener en $\pm 2^{\circ}\text{C}$ con respecto a 80°C .
- b).- La velocidad del aire medido en el ducto de salida del secador, varió de 0.45 a 1.66 m/seg. debido a que el encogimiento del sólido en las etapas intermedias y finales de la deshidratación -- permitió un flujo mayor de aire a través del lecho.
- c).- El tiempo de secado fué de 2.2 horas; valor que es bastante más pequeño que el obtenido en las otras corridas experimentales.

Como podemos darnos cuenta y de acuerdo a los resultados obtenidos, esta -- parte experimental es determinante para elegir el secador a usarse, para -- deshidratar el pimiento morrón, el cual resultó ser un secador de banda perforada con flujo de aire a través del lecho, como el mostrado en la figura No. (IV.5).

Debe aclararse que el capítulo IV. sección IV.5, se describe con mayor detalle la forma en que se efectuaron estas corridas. Lo anterior obedece al -- hecho de que la información obtenida de ésta fase experimental, sirve como base para el dimensionamiento del secador propuesto en éste trabajo.

CAPITULO IV.- DISEÑO DEL SECADOR.

IV.1.- Teoría del Secado por Circulación Transversal.

Como su nombre lo indica, el flujo del aire se dirige perpendicularmente al lecho sólido, de manera que el aire pasa por los intersticios de las partículas individuales que conforman el lecho (fig. No. IV.1.1). Esta situación puede ocurrir cuando los sólidos se transportan en una banda perforada o cuando permanecen estáticos en una charola perforada.

Período de Velocidad Constante.

Se sabe que cuando la circulación del aire es paralela al lecho sólido, la velocidad de secado en el período constante está dada por la ecuación

$$N_c = \frac{L s (X_{in} - X_c)}{A \theta_c} \quad (1)$$

en donde:

N_c = Velocidad de secado en el período constante, Kg/hr m^2

Ls = Peso del sólido seco en el secador, Kg.

X_{in} = Humedad inicial del sólido, Kg agua/Kg sólido seco.

X_c = Humedad crítica del sólido, Kg agua/Kg sólido seco.

A = Área de superficie de secado a través de la cual se transfiere la materia y energía, m^2 .

θ_c = Tiempo de secado en el período constante, hr

Sin embargo, en el secado con flujo transversal, no es posible determinar el área superficial efectiva de las partículas. Por este motivo, la velocidad de

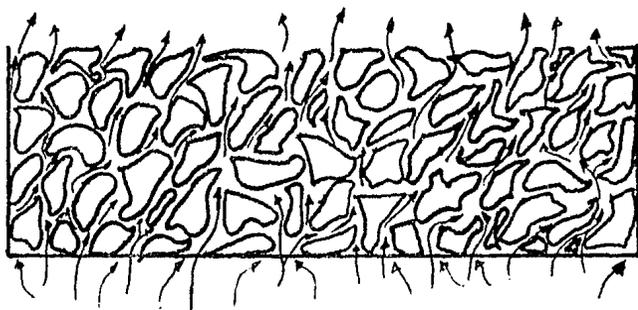


Fig. IV.1.1

secado con flujo perpendicular al lecho, se expresa en términos del área transversal del lecho, según se expresa en la siguiente ecuación

$$N'c = \frac{L s}{A'} \frac{(X_{in} - X_c)}{\theta_c} \quad (2)$$

en donde:

$N'c$ = Velocidad de secado en el período constante, referida al área transversal del lecho A'

A' = Área de sección transversal del lecho en el secador, m^2

Expresando las ecuaciones (1) y (2) en términos del coeficiente de transferencia de masa del aire y del gradiente de concentraciones (humedades) en esa misma fase, se tienen las siguientes expresiones

$$N_c = K_y (\Delta Y') \text{ ml}$$

$$N'c = K'y (\Delta Y') \text{ ml}$$

en donde:

K_y = coeficiente de transferencia de masa del aire de secado, $Kg/hr m^2 Y'$

$K'y$ = coeficiente de transferencia de masa del aire referido al área A' , $Kg/hr m^2 Y'$

$(\Delta Y')$ ml = diferencia media logarítmica de humedades del aire a la entrada y salida del lecho de sólidos.

$$(\Delta Y') \text{ ml} = \frac{(Y'_{as} - Y'_{1}) - (Y'_{as} - Y'_{2})}{\ln \frac{(Y'_{as} - Y'_{1})}{(Y'_{as} - Y'_{2})}}$$

en donde:

Y'_1 = Humedad del aire a la entrada del lecho, Kg agua/Kg aire seco.

Y'_2 = Humedad del aire a la salida del lecho, Kg agua/Kg aire seco.

Y'_{as} = Humedad de saturación del aire, evaluada a la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra al lecho, Kg agua/Kg aire seco.

Ahora, dividiendo la ecuación (2) entre la (1) se obtiene:

$$N'c = Nc \frac{A}{A'} \quad (5)$$

Sustituyendo la ec. (3) en (5)

$$N'c = Ky (\Delta Y') ml \frac{A}{A'} \quad (6)$$

Si se hace $L = Ls/A'$, se puede inferir fácilmente de (6) que

$$N'c = Ky (\Delta Y') ml \frac{A \cdot L}{Ls} \quad (7)$$

Por lo tanto, al combinar (4) y (7) se deduce la relación existente entre el coeficiente basado en el área del material Ky , y el coeficiente basado en el área del secador $K'y$.

$$\frac{K'y}{L} = \frac{KyA}{Ls} \quad (8)$$

De ésta ecuación se observa que el peso del sólido seco por unidad de área del lecho (L) es una medida del área de secado A , disponible.

Por otro lado, se ha comprobado experimentalmente que en el período constante,

la rapidez de evaporación de humedad por unidad de área transversal ($N'c$), es casi directamente proporcional al espesor o carga del lecho (L), como puede observarse en las columnas 2 y 3 de la tabla IV.1.1. De acuerdo a esto, la relación $K'y/L$ se puede incluir como una constante en la ecuación (4) en la forma siguiente:

$$N'c = \left(\frac{K'y}{L} \right) L (\Delta Y') m l \quad (9)$$

TABLA IV.1.1 DATOS EXPERIMENTALES DE CARGA DEL LECHO Y HUMEDAD DEL --
AIRE (8).

Humedad del aire Y' (Kg/kg)	Carga del lecho L (kg/m ²)	Velocidad de secado N'_c (g/s-m ²)	Diferencia media log de humedad ($\Delta Y'$) _{ml} (kh/kg)	Constantes de secado (de ec.9) K'_y/L (seg ⁻¹)
0.005	7.0	9.0	0.018	72
0.005	5.2	7.6	0.019	77
0.005	3.5	4.8	0.020	69
0.043	7.0	6.4	0.013	70
0.081	7.0	5.2	0.009	82

De los valores anotados en la 5a. columna de la tabla IV.1.1, se ve que en el rango de condiciones cubiertas K'_y/L , es razonablemente constante e independiente de la humedad del aire y espesor del lecho.

De hecho, las ecuaciones (2) a (9) describen la velocidad de secado considerando que el espesor del lecho es fijo y que se tienen condiciones constantes de secado, es decir, que la temperatura, velocidad y humedad del aire, se mantienen constantes todo el tiempo.

Sin embargo, esas mismas ecuaciones se pueden usar para extrapolar datos experimentales de velocidad de secado constante, a otras condiciones de secado, siempre y cuando no sean muy diferentes a las empleadas en las pruebas experimentales.

Debe resultar obvio que no se pueden extrapolar datos de un material determinado a otro diferente.

PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE:

Para extrapolar datos experimentales a otras condiciones en el período decreciente Nonhebel y Moss (8), recomiendan emplear un método de análisis gráfico de la curva experimental de secado en el período decreciente.

El primer paso de ese método, consiste en calcular la velocidad de secado -- constante para las condiciones requeridas, a partir de los datos experimentales del producto en estudio. Con ésta información, se traza la nueva curva de secado, según se muestra en la figura IV.1.2.

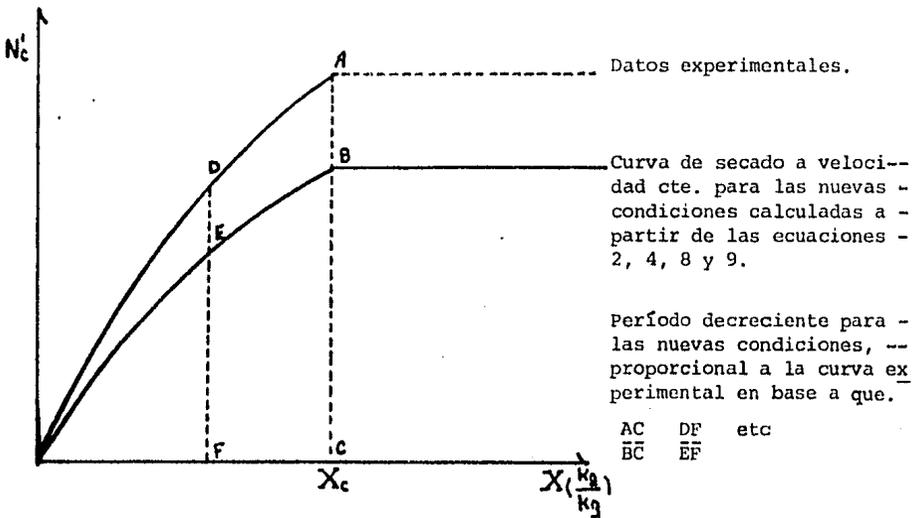


Fig. IV.1.2

De la figura IV.1.2, se observa que la nueva curva de secado se obtiene suponiendo que la forma y el contenido crítico de humedad no se afectan por la variación de las condiciones de secado.

A fin de predecir el área necesaria para secar un material (en las nuevas condiciones), desde su humedad crítica X_c , hasta una humedad final X_f , se puede descomponer la curva en el período decreciente, en una serie de rectas que --parten del origen. Para tal efecto, considerese en principio la ecuación que define a la velocidad de secado.

$$N = \frac{-Ls}{A} \frac{dX}{d\theta} \quad (10)$$

Integrando ésta expresión entre los límites de humedad crítica y final, se --tiene.

$$\int_{\theta=0}^{\theta=t} d\theta = \theta_d = \frac{Ls}{A_f} \int_{X_f}^{X_c} \frac{dX}{N'} \quad (11)$$

en donde:

θ_d = tiempo de secado en el período decreciente

A_f = área de la banda del secador para el período decreciente.

Si la velocidad de secado en el período decreciente disminuye linealmente con la humedad desde X_c hasta la humedad de equilibrio X^* , se tiene:

$$N' = mX + b \quad (12)$$

Siendo

$$m = \frac{N'_c - N^*}{X_c - X^*} \quad (13)$$

en donde

N^* = velocidad de secado cuando el sólido alcanza su humedad de equilibrio X^* .

Suponiendo que la humedad de equilibrio es despreciable ($X^*=0$) se tiene

que $b = 0$ y $m = N'_c/X_c$; entonces sustituyendo en (12).

$$N' = \frac{N'_c}{X_c} X \quad (14)$$

Esta expresión, es la ecuación de una recta que parte del origen y alcanza la humedad crítica X_c , como se observa en la figura IV.1.3

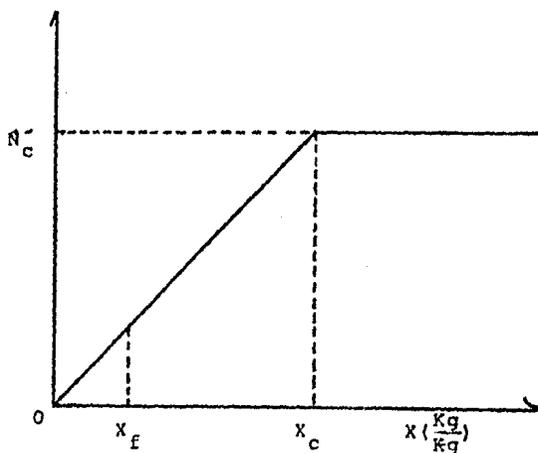


Fig. IV.1.3

Ahora, sustituyendo (14) en (11)

$$\theta_d = \frac{L_s X_c}{A_f N'_c} \int_{X_f}^{X_c} \frac{dX}{X} \quad (15)$$

Por lo tanto:

$$\theta_d = \frac{L_s}{A_f} \frac{X_c}{N'_c} \ln \frac{X_c}{X_f} \quad (16)$$

Resolviendo para A_f

$$A_f = \frac{L_s}{\theta_d} \frac{X_c}{N'_c} \ln \frac{X_c}{X_f} \quad (17)$$

Si se hace:

$$\frac{L_s}{\theta_d} = W_d = \text{rapidez de alimentación de los sólidos al secador kg de s.s./seg.}$$

La ecuación (17), se puede escribir:

$$A_f = W_d \frac{X_c}{N'_c} \ln \frac{X_c}{X_f} \quad (18)$$

Esta ecuación determina el área necesaria del secador para cambiar la humedad desde X_c hasta X_f , las curvas reales de secado, como la mostrada en la figura IV.1.4, se pueden analizar considerando que son equivalentes a una serie de líneas rectas que parten del origen, según se observa en la misma figura.

Si la curva decreciente de la figura IV.1.4 se hace equivalente a tres rectas el área total de secado en el período decreciente estará dada por:

$$A_f = A_{X_c \rightarrow X_1} + A_{X_1 \rightarrow X_2} + A_{X_2 \rightarrow X_f} \quad (19)$$

en donde:

$A_{X_c \rightarrow X_1}$ = área del secador requerida para disminuir la humedad del sólido desde X_c hasta X_1

$A_{X_1 \rightarrow X_2}$ = área del secador requerida para disminuir la humedad del sólido desde X_1 hasta X_2

$A_{X_2 \rightarrow X_f}$ = área del secador requerida para disminuir la humedad del sólido desde X_2 hasta X_f

De acuerdo a la ec. (18), se puede escribir la (19) de la siguiente forma:

$$A_f = W_d \frac{X_c}{(N'_c)_1} \ln \frac{X_c}{X_1} + W_d \frac{X_c}{(N'_c)_2} \ln \frac{X_1}{X_2} + W_d \frac{X_c}{(N'_c)_3} \ln \frac{X_2}{X_f} \quad (20)$$

Factorizando:

$$A_f = W_d X_c \frac{1}{(N'_c)_1} \ln \frac{X_c}{X_1} + \frac{1}{(N'_c)_2} \ln \frac{X_1}{X_2} + \frac{1}{(N'_c)_3} \ln \frac{X_2}{X_f} \quad (21)$$

o bien empleando logaritmos base 10.

$$A_f = 2.303 W_d X_c \frac{1}{(N'_c)_1} \log \frac{X_c}{X_1} + \frac{1}{(N'_c)_2} \log \frac{X_1}{X_2} + \frac{1}{(N'_c)_3} \log \frac{X_2}{X_f} \quad (22)$$

Para cálculos más precisos de A_f , se requiere trazar más líneas rectas equivalentes.

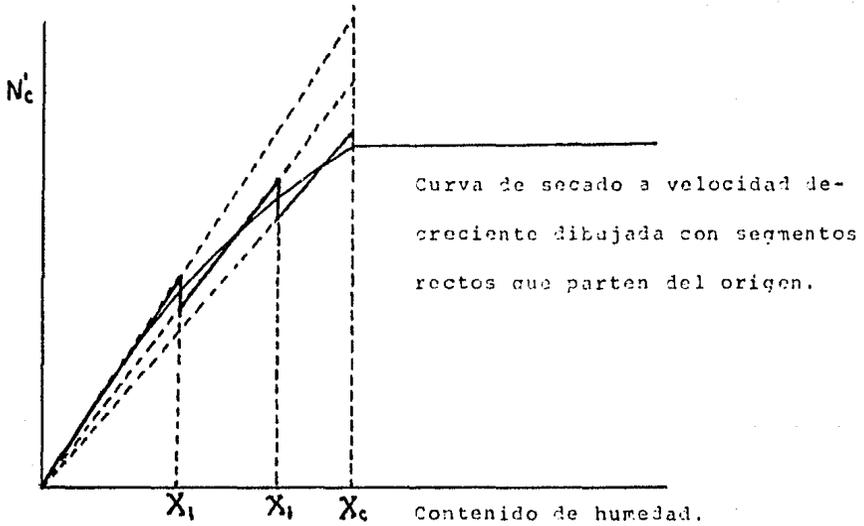


Fig. IV.1.4 Análisis de una curva experimental de secado en el período de velocidad decreciente.

IV.2.- Descripción de algunos secadores de banda transportadora.

Los primeros diseños de secadores de banda a flujo transversal, consisten de una sola banda que esta en movimiento continuo, a través de la cual se hace pasar una corriente de aire caliente, ya sea hacia arriba ó hacia abajo y a lo largo de toda ella. El producto a deshidratar se deposita sobre la banda, por medio de un alimentador oscilatorio, el cual logra que la distribución y espesor sea homogéneo, la banda tiene una velocidad lo suficientemente lenta como para permitir que el material se deshidrate hasta la humedad requerida, a la salida del secador.

Este tipo de secador se muestra en la figura No. (IV.2.1), en el cual además se emplea una sola temperatura de secado, flujo de aire, etc. Las longitudes de estas varía en función del material que se requiera deshidratar y van desde los 18.3 m (60 ft), hasta los 39.6 m (130 ft) Perry R.N. and CHILTON - (18).

Posteriormente, con el avance de la ingeniería y la tecnología, se comenzaron a diseñar y fabricar secadores como el mostrado en la figura No. (IV.2.2) en donde se emplea como variante, el dividir el secador en zonas, con lo cual se logran obtener diferentes condiciones de secado: temperatura, humedad, flujo de aire, etc., además, permite alternar la dirección del flujo de aire, ya sea hacia arriba ó hacia abajo por zona, de acuerdo a como lo requiere el producto. Este tipo de secadores se utiliza principalmente para la deshidratación de productos termosensibles como son; frutas, legumbres, productos farmacéuticos, etc. y el tamaño de cada zona se recomiendan sean del mis-

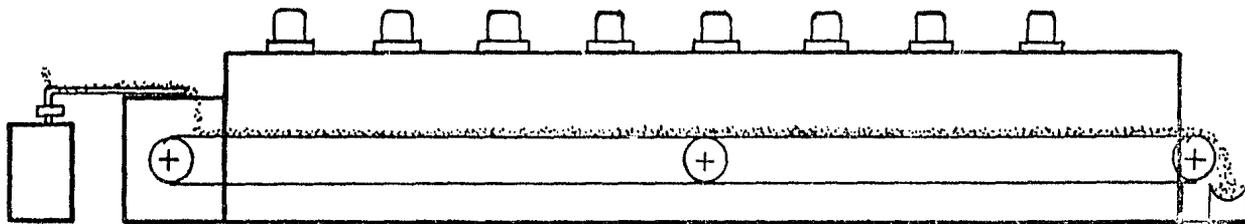


Fig. N° IV.2.1

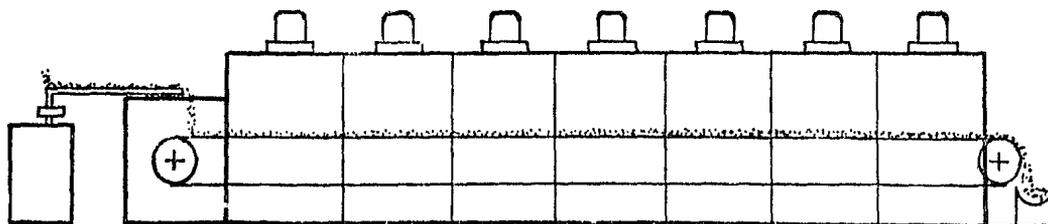


Fig. N° IV.2.2

mo tamaño, el cual como máximo deberá ser de 5 m^2 Nonhevel G. et. al. (8).

Uno de los últimos avances logrados en el diseño de secadores, es el que se muestra en la figura No. (IV.2.3), el cual aparte de contar con las características de los anteriores, logra una serie de cualidades casi inmejorables, debido a que, gracias a su diseño, permite evitar la adherencia de algunos productos vegetales, que en determinada etapa del secado tienden a pegarse a la superficie de la banda, esto se logra como se puede apreciar en la figura No. (IV.2.3), al realizar la caída del producto de una primera sección de banda, a una segunda. Con éste mismo seccionamiento de la banda, se realiza un reacomodo del producto, logrando con ello una mayor uniformidad en el secado, obteniendo así un producto de mayor calidad.

Cabe señalar que muchos productos, principalmente aquéllos con un alto contenido de humedad libre, tienen la particularidad de reducir su volúmen, conforme pierden la humedad. Por lo cual sucede que, en el caso de que estos productos se deshidraten en los secadores de banda y en cualquier otro tipo de secador, conforme avanza el secado, se comienzan a producir grandes espacios entre las partículas de producto, al ocurrir éste, se tiene como resultado un alto desaprovechamiento de espacio dentro de los secadores y por tanto una reducción de su eficiencia.

Si el material se deshidrata en un secador de banda como el mostrado en la figura No. (IV.2.3), el reacomodo del material para evitar el desperdicio de espacio, se puede lograr mediante la reducción de la velocidad de las bandas subsecuentes a la primera, de tal forma, que la velocidad de cada sección de banda empleada para todo el proceso de secado, tenga una velocidad menor con-

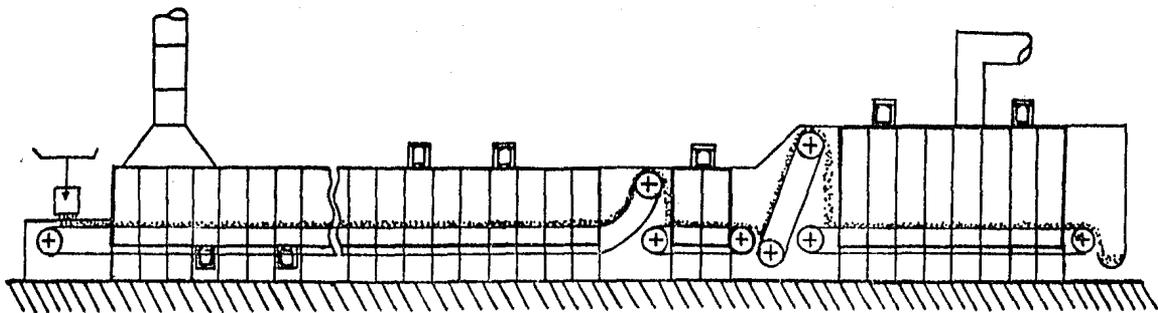


FIG. N^o IV.2.3

forme avanza dicho proceso.

El secador de banda mostrado en la figura No. (IV.2.4), es otra forma de tener dispuesta la banda, con la cual se logra una combinación de algunas de las características de los anteriores, ya que es para deshidratar productos que solo requieren un solo patrón de condiciones de secado, (temperatura, humedad, flujo de aire, etc.), durante todo el proceso de secado.

Otra de las características es la de tener una producción tan elevada como la obtenida en el secado de una sola banda, el cual se muestra en la figura No. - (IV.2.1), en un espacio mucho más reducido, y con una calidad mayor, ya que la humedad es más homogénea al permitir remover el producto conforme cae a la siguiente banda.

Los secadores mencionados antes, se usan actualmente en numerosas plantas deshidratadoras, así mismo, estos secadores también se pueden construir para uso en plantas piloto, para realizar pruebas experimentales, por lo cual se requiere de secadores bastante más pequeños y además no tan complicados como los más modernos. El secador mostrado en la figura No. (IV.2.5), es un ejemplo de --- ello, y con el cual se pueden lograr buenos resultados.

Algunas de las características de la banda transportadora es que esta debe ser capaz de retener el material a secar, permitir el paso del aire a través de -- ella, poder curvarse sobre rodillos impulsores y no causar rotura del material.

Los materiales de construcción son diversos, entre los cuáles se pueden enumerar el de malla de alambre entretejido de acero austenítico, metal monel, ace-

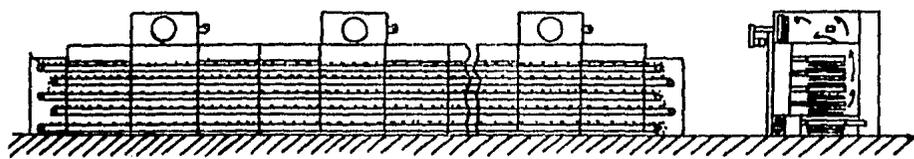
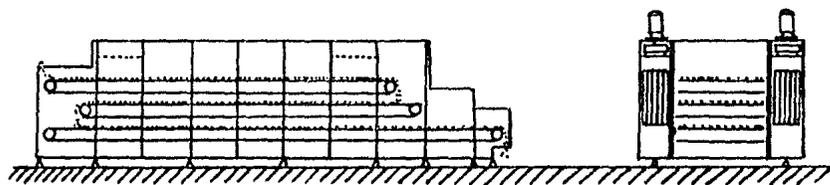


Fig. № IV.2.4

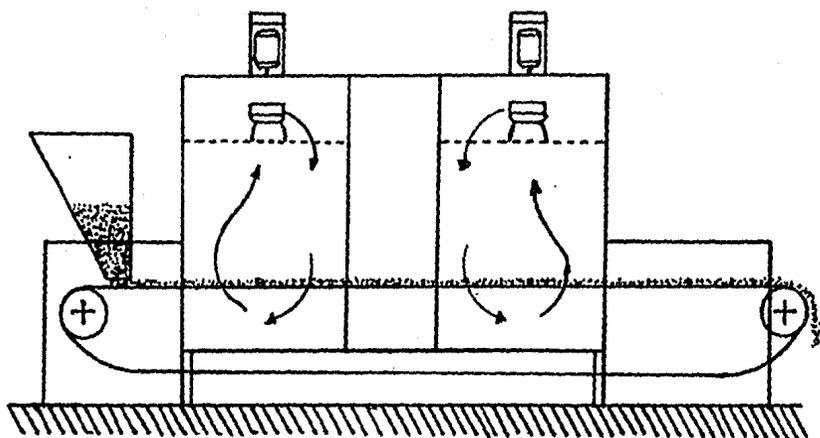


Fig. N^o IV.2.5

ro inoxidable, etc. Así mismo, la banda formada por una sucesión de tablillas de chapa perforada, o de mallas de alambre sobre un soporte, etc.

En este tipo de secadores también se requiere de un equipo de preformado que convierte la alimentación en partículas de forma definida, esta operación es necesaria en todos los casos, salvo en aquellos en los cuáles la alimentación ya se encuentra en una forma y tamaño adecuado.

Por otro lado, éstos secadores se controlan normalmente variando la temperatura y la velocidad de la banda (la cual controla el tiempo de secado y el espesor del lecho) manteniéndose constantes las demás variables. Por lo tanto, -- los instrumentos básicos a utilizar, son los termómetros. Esto es importante ya que por medio de ellos se controla la cantidad de calor requerida en los calefactores.

Los calefactores más empleados actualmente son los de tubos aletados en los -- cuáles se hace pasar vapor ó gases de combustión normalmente. Estos calefactores también pueden ser de resistencias eléctricas, los cuáles son de poco uso a nivel industrial.

IV.3.- Condiciones de operación usuales, en secadores de banda perforada.

Las condiciones de operación de estos secadores han sido estandarizadas por el uso de una velocidad de circulación del aire de 1.25 m/seg. (1350 g/s M^2) a través de un lecho de 12 a 50 mm. de espesor compuesto por un material preformado con tamaños de partícula de 3 a 10 mm. de diámetro, con estos rangos de operación se asegura que la pérdida de presión del aire al pasar a través de la banda, no excede de 1.5 - 2.5 milibares, ya que de lo contrario, el aire tendería a escapar por los bordes, reduciéndose así el flujo a través del material y pudiendo llegar a distorcionarse la circulación de flujo.

La temperatura del aire a la salida del intercambiador de calor, es de aproximadamente 150°C y se ajusta la humedad para dar la máxima velocidad de secado de acuerdo a una pérdida aceptable de calor sensible en el aire de salida (8). Esto corresponde a un margen de humedad entre 0.04 a 0.2 kg. de agua/kg. de aire seco.

Las condiciones de operación cambian de acuerdo a las limitaciones físicas de cada equipo.

No es recomendable usar tamaños de partícula menores de 3 cm., ya que dichos tamaños pueden ocasionar que los sólidos se fluidicen, ocasionando desacomodo del lecho y pérdidas. En muchos productos, es más conveniente usar un tamaño mayor de 10 mm.

A menudo, la máxima temperatura utilizable está limitada por el peligro de la degradación térmica del material a secar, pero por otra parte, debe ser lo ma-

yor posible. Sin embargo, las pérdidas de calor en el cuerpo del secador --
tienden a ser mayores cuando la temperatura del aire es muy alta y los efec-
tos de la radiación comienzan a tener relevancia. Puesto que las veloci-
dades de secado son relativamente altas en la generalidad de los casos, no es
recomendable operar estos secadores a temperaturas superiores a 150°C. La -
tabla IV.3.1 presenta algunos puntos sobre el funcionamiento de estos equi-
pos.

Tabla IV.3.1 Funcionamiento típico de los secadores continuos de banda circulación transversal.

ASPECTO FISICO de la alimentación.	Contenido de sólidos por ciento	Forma aproximada y tamaño de los prefermados. (mm)	Temperatura de secado (°C)	Contenido de humedad del producto (% BS)	Producción (g seco/sm)	Evaporación (g agua/sm)	Vapor utilizado (Kg/Kg agua).
Masa porosa húmeda	40		80-120	7.5	1.42	1.65	4-5
Pasta rígida	25	trozos rectangulares 6x4x12	150-170	3-75	2.74	8.07	19-
Pasta insoluble en agua con aspecto de galleta.	45.5	trozos rectangulares 6x12x12-20	100	0.2	2.18	2.82	2.23
	55.5		100	0.2	1.59	1.26	2.86
Pasta insoluble en agua con aspecto arcilloso	30	cilindros 4 días x12-20	120	trazas	2.40	5.82	
Pasta insoluble en agua con aspecto arcilloso	25	cilindros 4 días x 12-20	90	trazas	2.12	4.48	
Pasta soluble en agua con aspecto de grasa	33	cilindros 5 6-12	120	3.0	1.24	2.78	
Pasta soluble en agua con aspecto de grasa	55	Cilindros 4 días X	90	0.6	1.38	1.05	2.44
Pasta cristalina	50	Tabletas rectangulares 20x20x6	70	1.0	1.36	1.36	

Masa fibrosa húmeda	44	Sin preformar	-	0.5-1.0	3.39	4.20	
Pasta friable insoluble en agua	55	cilindros 4x12-20	100	0.5	6.02	4.81	
Pasta insoluble en agua con aspecto de masa	55	cilindros 4x12-20	70 85	0.5 trazas	2.71 3.77	2.21 3.09	
Pasta fina insoluble en agua	50	cilindros 4.6-12	90	0.5	3.55	3.52	
Pasta insoluble en agua con aspecto de masa	55	cilindros 4x12-20	80 90	trazas trazas	2.44 2.45	1.56 2.12	1.99 2.23

Estos datos sobre el comportamiento, corresponden a tiempos reales en el secador comprendidos entre 1/2 y 1 h y a cargas sobre la banda de secado comprendidas entre 5 y 10 kg/m.

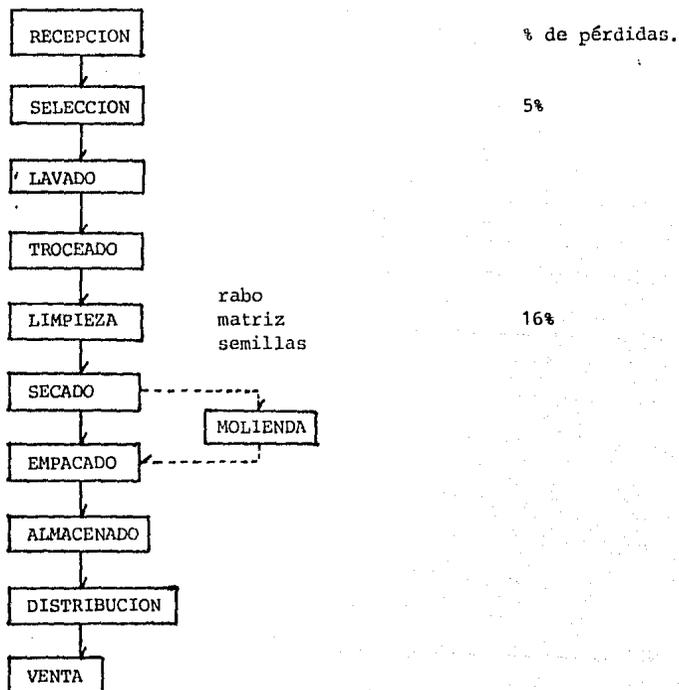
IV.4.- Condiciones preliminares para el diseño del secador.

En base a la revisión bibliográfica presentada con anterioridad y a los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo, se proponen las siguientes condiciones de operación para diseñar el secador.

- 1.- Dos etapas de secado: en la primera se tendrá una temperatura de aire de 95°C, y en la segunda 70°C. Esta última temperatura se propuso debido a que se observó experimentalmente que no daña el color del producto final. Además se pretende que la primera etapa tenga dos secciones de $4 \text{ m}^2 \text{ c/u}$, y la segunda etapa tres secciones de $4 \text{ m}^2 \text{ c/u}$, como el mostrado en la figura No. (IV.5).
- 2.- La humedad del pimiento morrón a la salida de la primera etapa será de 0.6 kg de agua/kg de sól. seco. Esto se planteó en base a que si se alcanzan valores de humedad por debajo del enunciado, a una temperatura de 95°C, puede sufrir daños irreversibles el color del pimiento morrón. El rango aceptable de humedad a manejar a una temperatura de 95°C está entre 0.4 y 0.3 kg de agua/kg. s.s.
- 3.- La humedad del aire al entrar al lecho húmedo será de -----
0.04 kg de agua/kg de s.s., esto corresponde al límite inferior da
do por bibliografía.
- 4.- El espesor del lecho húmedo a manejar por el secador de 5 cm., siendo el recomendado por diversos autores, para que la caída de pre
sión del aire no sea elevada, evitándose consumos altos de poten--

cia y no escape por los bordes de la banda transportadora.

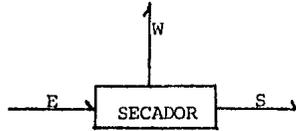
- 5.- Velocidad de aire de 1.2 m/seg. Este es el valor óptimo recomendado por diversos autores, para que el aire no forme turbulencia y -- realice eficientemente la acción de secado.
- 6.- La humedad final del pimiento morrón propuesta a la salida del seca dor, fué de 0.1 kg de agua/kg de sól. seco. Se consideró que ésta humedad permitiría que el producto, no tuviese contaminación por -- hongos, y no absorviera agua del medio ambiente.
- 7.- Con la finalidad de poder proyectar en una forma más eficiente el - secador, fué necesario establecer una base de cálculo, la cual no - fué basada en ningún estudio de factibilidad técnico-económico, di- cha base permitió realizar los balances de materia necesarios para poder dimensionar el secador. Dicha base de cálculo fué 10 tonela- das de pimiento morrón fresco a procesar en un día, se consideró que el secador trabajaría 3 turnos de 8 horas, cada uno; siendo el tiem po efectivo de 24 horas. De el forma que se tendría inicialmente 416.66 kg. de sól. húmedo/hr. Se propuso que el proceso siguiera - el siguiente diagrama de bloques:



Tomando en cuenta los porcentajes de pérdidas citados, se tendría a la entrada del secador:

$$\begin{aligned}
 \text{Material húmedo entrando al secador} &= 332.47 \frac{\text{kg de sól. húmedo}}{\text{hr.}} \\
 &= 333.0 \frac{\text{kg de sól. húmedo}}{\text{hr.}}
 \end{aligned}$$

Balance General de materia en el secador:



$$E = 332.48 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$$

$$S = ?$$

$$\text{Hum. Final} = 9.09\%$$

$$\times 0.10$$

$$\text{Hum. In.} = 93\%$$

Balance total:

$$E = S + W$$

Balance de sólidos secos.

$$E (1 - 0.93) = W (0) + S (1 - 0.0909)$$

$$S = \frac{E (1 - 0.93)}{1 - 0.0909} + \frac{332.48 (1 - 0.93)}{1 - 0.0909} = 25.60 \frac{\text{Kg. sól. seco}}{\text{hr.}}$$

Del balance total

$$W = E - S$$

$$W = 332.48 - 25.60 = 306.88 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}}$$

Condiciones de salida:

25.60 kg/hr

9.09 % de humedad final

65 °C de temperatura final

En el empaclado y almacenado no existen pérdidas y por tanto se conservan los 25.60 kg/hr de producto manejado en estas dos faces.

IV.5. DISEÑO DEL SECADOR.

Para esta parte del trabajo se procedió primeramente a realizar una corrida experimental en el secador de charolas existente en la F.E.S.-C. El pimiento morrón sin pretratamiento, fué troceado en partículas de 1 cm. de lado, colocandose en una malla perforada de 20 cm. de diámetro, la cuál se fijó en el ducto de salida del aire del mencionado secador. Con ésta disposición se obligó al aire a pasar a través del lecho de sólidos húmedos, hecho que no sucedió al usar el horno Blue-M.

En ésta prueba experimental, las condiciones de secado fueron: velocidad de aire 1.2 m/seg.; temperatura de bulbo seco 80°C; humedad del aire ----- 0.006 kg.de agua/kg de a.s.; espesor del lecho: 2.5 cm. Los datos de dicha corrida se presentan en las tablas IV.5.1 y IV.5.2, con sus respectivas figuras IV.5.1 y IV.5.2

De la fig. IV.5.2, se obtuvieron los siguientes valores:

$$N'_c = 16.9 \text{ kg de agua/hr m}^2$$

$$X_c = 5.7 \text{ kg de agua/kg de sól.seco.}$$

El valor de la humedad crítica (X_c) se considera constante para propósitos de diseño, según lo sugiere Nonhebel y Moss (8). Sin embargo, el valor de N'_c - tiene que modificarse para extrapolar los resultados experimentales a las condiciones requeridas para el diseño del secador. Las modificaciones obedecieron a los siguientes criterios.

Tabla IV.5.1 Valores de X vs θ obtenidos con flujo del aire a través del lecho de sólidos. Consideraciones de secado: vel., del aire 1.2 m/seg. temperatura de bulbo seco 80 °C temperatura de bulbo húmedo 29 °C. Espesor del lecho 2.5 cm, humedad del aire a la entrada del secador y 0.006 kg de agua/kg de aire seco.

θ (min)	Peso (g)	X (kg/kg)
0	465.8	10.7647
15	328.0	7.2842
30	197.5	3.9882
45	125.2	2.1631
60	80.3	1.0281
75	55.2	0.3941
90	46.1	0.1643
105	41.1	0.0806
120	39.8	0.0052
135	39.8	0.0052

Tabla IV.5.2 Datos necesarios para trazar la curva de velocidad de secado a 80 °C con flujo de aire a través del lecho.

θ (min)	X (kg/kg)	X _{medi} (Kg/kg)	N' (kg de agua/hr m)
0	10.76		
5	9.64	10.20	16.940
10	8.52	9.08	16.940
15	7.40	7.96	16.940
20	6.28	6.84	16.940
25	5.16	5.72	16.940
30	4.05	4.605	16.788
35	3.30	3.675	11.3438
40	2.72	3.01	8.7725
45	2.10	2.46	7.8650
50	1.71	1.955	7.4113
55	1.34	1.525	6.2265
60	1.03	1.185	4.6887
65	0.75	0.89	4.2350
70	0.55	0.65	3.0250
75	0.39	0.47	2.4200
80	0.27	0.33	1.5125
85	0.20	0.235	1.0587
90	0.15	0.175	0.7562
95	0.12	0.135	0.4537
100	0.08	0.10	0.6050
105	0.04	0.05	0.3025
115	0.03	0.035	0.1512
120	0.01	0.02	0.3025
125	0.01	0.01	

Condiciones:

Flujo a través del lecho húmedo.

Cuadros de 1 cm. de lado sin pret.

Temperatura de secado: 60°C.

Temperatura bulbo húmedo: 29°C

Espesor del lecho: 2.5 cm.

Veloc. prom. del aire: 1.2 cm/seg.

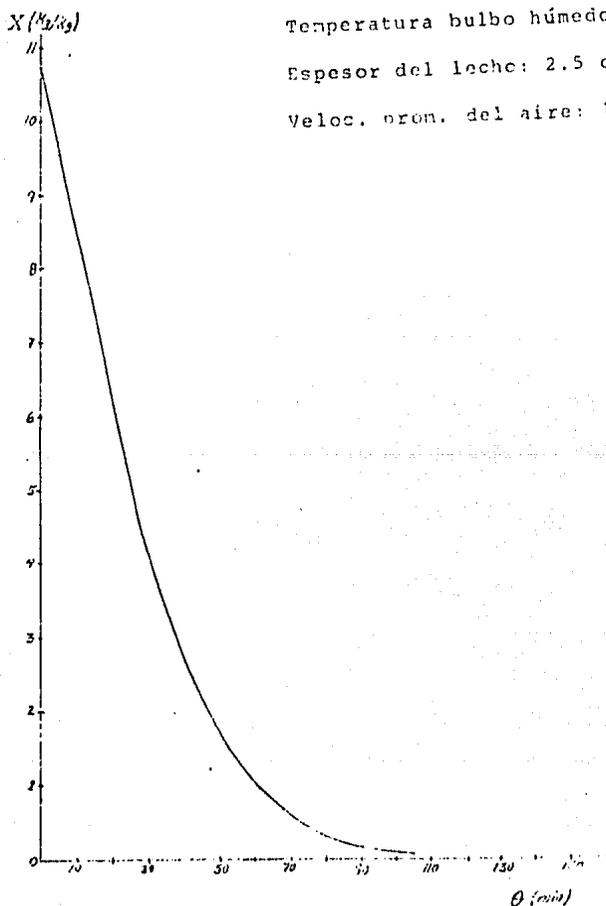


Fig. 17.3.1 Curva experimental de secado de pimienta morrón.

Condiciones:

Flujo de aire a travez del lecho.

Vel. prom. del aire: 1.2 m/seg.

Espesor del lecho: 2.5 cm.

Humedad inicial del aire $Y \approx 0.006$

(Kg de agua/Kg de a.s.).

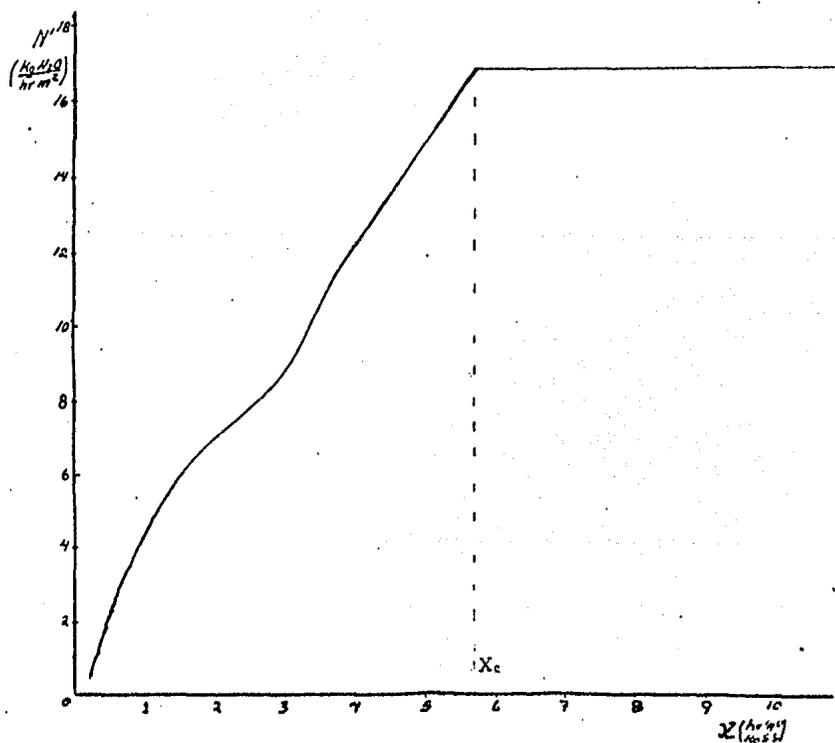


Fig. IV.5.2 Curva de velocidad de secado obtenida de datos experimentales.

Al analizar la tabla II.6.1.1. "Efecto de la temperatura de aire de secado". (datos obtenidos a flujo paralelo), se observó que al deshidratar el pimienta a 80°C y a 70°C, el valor de la velocidad de secado en el período constante ($dx/d\theta$) se reducía en un 34.78% de su valor inicial a 80°C. Y que al pasar de 80°C a 95°C, el valor de la velocidad aumentaba en un 63.7%. Por lo tanto, los valores de N'_c a 70 y 95°C con flujo de aire a través del lecho, serían los siguientes.

$$N'_c \text{ a } 70^\circ\text{C} = 11.2 \text{ Kg de agua/hr m}^2$$

$$N'_c \text{ a } 95^\circ\text{C} = 27.6 \text{ Kg de agua/hr m}^2$$

G. Nonhebel (8), en base a experiencias de secado en materiales orgánicos, demostró que la velocidad de secado en el período constante es prácticamente proporcional al espesor del lecho; por lo cual, los valores de N'_c con un espesor de 5 cm serán:

$$N'_c \text{ a } 70^\circ\text{C} = 2 N'_{c1}$$

$$N'_c \text{ a } 95^\circ\text{C} = 2 N'_{c2}$$

donde:

N'_{c1} = velocidad de secado en el período constante, con un espesor de 2.5 cm y 70 °C.

N'_{c2} = velocidad de secado en el período constante para un espesor del lecho de 2.5 cm y 95 °C.

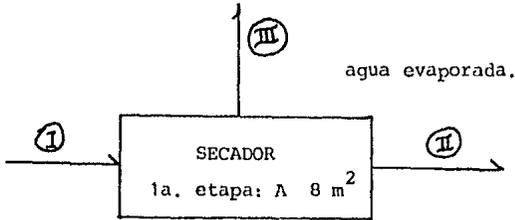
Por tanto, las velocidades de secado a 70 y 95°C con un espesor del lecho de 5 cm son:

$$N'_C \text{ (a } 70^\circ\text{C) } = 2 \times 11.2 = 22.4 \text{ kg de agua/hr m}^2$$

$$N'_C \text{ (a } 95^\circ\text{C) } = 2 \times 27.6 = 55.2 \text{ kg de agua/hr m}^2$$

Para analizar el efecto de la humedad del aire en la velocidad de secado, se realizaron balances de materia en cada fase del secador, procediéndose de la siguiente manera:

Balance de humedad en la primera fase de secado a 95°C.



Alimentación = 333 $\frac{\text{kg de sól, húmedo}}{\text{hr}}$

$\%H_{II} = 37.5$

Humedad inicial $\%H$ (base húmeda) = 91.5

$X_{II} = 0.6 \text{ kg/kg}$

Humedad inicial (base seca) $X = 10.76 \text{ Kg/kg.}$

$$\text{peso de sólidos secos } W_{s.s.} = 333 \frac{\text{kg de sól.húm.}}{\text{hr}} (1 - 0.915)$$

$$W_{s.s.} = 28.305 \text{ Kg de s.s./hr.}$$

Agua evaporada:

$$W_{H_2O \text{ III}} = 28.305 \text{ kg de s.s./hr } (10.76 - 0.6) \text{ kg de agua/kg de s.s.}$$

$$W_{H_2O \text{ III}} = 287.57 \text{ kg de agua/hr.}$$

Del balance total:

$$W_{II} = W_I - W_{III}$$

$$W_{II} = 333 \text{ kg/hr} - 287.5 \text{ kg/hr} = 45.43 \text{ Kg de s.h./hr.}$$

De acuerdo a lo que se mencionó anteriormente, la humedad del aire a la entrada del lecho es:

$$Y' = 0.04 \text{ Kg de agua/hr de a.s.}$$

y la velocidad promedio del aire es:

$$V = 1.2 \text{ m/seg.}$$

Entonces, se tiene que el volumen húmedo del aire está dado por:

$$h = (1/29 + 0.04/18) \left(\frac{95 + 273}{0.77} \right) \times 0.082 = 1.4384 \text{ m}^3/\text{kg de a.s.}$$

y la densidad del aire

$$= \frac{1.04 \text{ kg de s.h./kg de a.s.}}{1.4384 \text{ m}^3/\text{kg de a. s.}} = 0.7232 \text{ Kg de a.h./m}^3$$

Por lo tanto, el gasto másico del aire húmedo es:

$$G = \rho \cdot V \cdot \Delta t$$

$$G = 0.723 \frac{\text{kg de a.h.}}{\text{m}^3} \times 1.2 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 8 \text{ m}^2 = 6.9408 \text{ kg de a.h./seg.}$$

Ahora, el gasto másico del aire seco es:

$$G_s = 6.9408 \frac{\text{kg de a.h.}}{\text{seg}} \left(1 - \frac{0.04 \text{ kg de agua/kg de a.s.}}{1.04 \text{ kg de a.h./kg de a.s.}} \right)$$

$$G_s = 6.6738 \text{ Kg de a.s./seg} = 24025.68 \text{ kg de a.s./hr.}$$

Como el agua que pierde el sól. húmedo debe ser aceptada por el aire, se puede escribir.

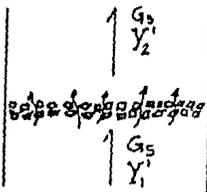


Fig. IV.1.1

$$287.57 \frac{\text{Kg de agua}}{\text{hr}} = G_s (Y'_2 - Y'_1)$$

$$287.57 \frac{\text{Kg de agua}}{\text{hr}} = G_s (Y'_2 - \frac{0.04 \text{ kg de agua}}{\text{kg de a.s.}})$$

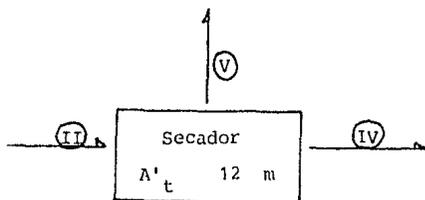
$$287.57 \frac{\text{Kg de agua}}{\text{hr}} = 24025.68 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{hr}} (Y'_2 - \frac{0.04 \text{ kg de agua}}{\text{kg de a.s.}})$$

$$Y'_2 = \frac{287.57 \text{ kg de agua/hr}}{24025.68 \text{ kg de a.s./hr}} + 0.04 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de a.s.}}$$

$$Y'_2 = 0.05196 \text{ Kg de agua/kg de a.s.}$$

humedad promedio del aire a la salida del lecho húmedo en la primera fase.

Balance de humedad en la segunda etapa de secado a 70°C



$$\text{Alimentación} = 45.43 \frac{\text{Kg de s.h.}}{\text{hr}}$$

$$X = \frac{0.1 \text{ kg de agua}}{\text{kg de s.s.}}$$

$$X = 0.6 \frac{\text{kg de agua}}{\text{Kg de s.s.}}$$

$$W_{\text{s.s.}} = 28.305 \text{ kg de s.s./hr.}$$

Agua evaporada:

$$W_{\text{H}_2\text{O}} \textcircled{V} = 28.305 \frac{\text{Kg de s.s.}}{\text{hr}} (0.6 - 0.1) \frac{\text{Kg de agua}}{\text{kg de s.s.}}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O}} \textcircled{V} = 14.15 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}}$$

Del balance total se tiene:

$$W_{\text{IV}} = W_{\text{III}} - W_{\text{V}} = 45.43 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} - 14.15 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$W_{\text{IV}} = 31.28 \text{ Kg de s.h/hr}$$

humedad y velocidad del aire a la entrada del lecho:

$$Y' = 0.04 \text{ kg de agua/kg de a.s.}$$

$$\text{Vel. promedio: } V = 1.2 \text{ m/seg.}$$

$$(1/29 + 0.04/18) \left(\frac{70 + 273}{0.77} \right) \times 0.082 = 1.3407 \text{ m}^3/\text{kg de a.s.} = V_h$$

$$\rho = \frac{1.04 \text{ kg de a.h./kg de a.s.}}{1.3407 \text{ m}^3/\text{kg de a.s.}} = 0.7757 \text{ kg de a.h./m}^3$$

$$G = \rho \cdot V \cdot \Delta t$$

$$G = 0.7757 \frac{\text{kg de a.h.}}{\text{m}^3} \times 1.2 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 12 \text{ m}^2 = 11.088 \frac{\text{kg de a.h.}}{\text{seg}}$$

$$G_s = 11.088 \frac{\text{kg de a.h.}}{\text{seg}} \left(1 - \frac{0.04 \text{ kg de agua/kg de a.s.}}{1.04 \text{ kg de a.h./kg de a.s.}} \right)$$

$$G_s = 10.661 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{seg}} \times 3600 \frac{\text{seg}}{\text{hr}} = 38379.6 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{hr}}$$

El balance de humedad en el lecho de sólidos queda de la siguiente forma:

$$14.15 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}} = G_s (Y_2' - Y_1')$$

$$14.15 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}} = 38379.6 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{hr}} (Y_2' - \frac{0.04 \text{ kg de agua}}{\text{kg de a.s.}})$$

$$Y_2' = \frac{14.5 \text{ kg de agua/hr}}{38379.6 \text{ kg de a.s./hr}} + 0.04 \text{ kg de agua/kg de a.s.}$$

$$Y_2' = 0.04336 \text{ kg de agua/kg de a.s.} \quad \text{humedad promedio del aire a la salida del lecho en la 2a. etapa.}$$

Con las humedades del aire calculadas anteriormente, se puede evaluar el efecto del cambio de humedad en la velocidad de secado constante, tomando en cuenta la siguiente expresión.

$$N'_c = \frac{K_y}{L} L \Delta Y'_{ml}$$

Esta ecuación fué revisada en la sección de conceptos teóricos, donde se afirma que (K_y/L) es constante y por tanto N'_c depende de la diferencia media logarítmica de humedad ($\Delta Y'_{ml}$) y del espesor del lecho. Como ya se ha considerado previamente, la influencia del incremento de la carga del lecho, se puede escribir:

$$\frac{N'_{c1}}{N'_{c2}} = \frac{(K_y/L) L Y_{ml} (1)}{(K/L) L Y_{ml} (2)} = \frac{Y'_{ml} (1)}{Y'_{ml} (2)} \dots \dots \dots A$$

Donde el suíndice 1, indica las condiciones a las cuáles se conoce el valor de N'_c , y el subíndice 2 las condiciones a las cuáles se desea conocer N'_c . En base a lo anterior, se puede calcular el valor de N'_c , a una humedad de aire de 0.04 kg/kg, y a temperatura de 95 y 70 °C.

CALCULO DE N'_c .

Este valor fué calculado a 95 °C y humedad del aire -----
 $Y' = 0.04$ kg de agua/kg de a.s., ya que el aire de secado en la prueba experimental, tenía una temperatura de 95 °C y una humedad -----
 $Y' = 0.006$ kg de agua/kg de a.s., se determina que la humedad de saturación adiabática para esas condiciones es $Y'_{as} = 0.26$ kg de agua/kg. de a.s.

Debido a que en el experimento se empleó un espesor de lecho pequeño, no se pudo detectar un cambio apreciable en la humedad del aire; por este motivo, se considera que, en forma aproximada

$$\Delta Y'_{ml} (1) = 0.026 - 0.006 = 0.02 \text{ kg de agua/kg de a.s.}$$

Para esta diferencia de humedades, se determinó que:

$$W_{c1} = 55.2 \text{ kg de agua/hr m}^2$$

Para las condiciones seleccionadas en el diseño:

$$T_{b.s.} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Y'_1 = 0.04 \text{ kg de agua/kg de a.s.}$$

$$Y_{s.w.} = 0.063 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de s.s.}}$$

$$Y'_2 = 0.05196 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de a.s.}}$$

Entonces, la diferencia media logarítmica de humedades es:

$$\Delta Y_{ml \ 2} = \frac{(0.063 - 0.04) - (0.063 - 0.0519)}{\ln \left(\frac{0.063 - 0.04}{0.063 - 0.0519} \right)}$$

$$\Delta Y_{ml \ 2} = 0.01633 \text{ kg de agua/kg de a.s.}$$

De acuerdo a la ecuación A.

$$N'_{c2} = \frac{W_{c1} Y_{ml \ 2}}{Y_{ml \ 1}}$$

Sustituyendo valores en esta expresión.

$$N'_{c2} = \frac{55.2 \text{ kg de agua/hr m}^2 \times 0.01633 \text{ kg de agua/kg de a.s.}}{0.02 \text{ kg de agua/kg de a.s.}}$$

$$N'_{c2} = 45.0708 \text{ kg de agua/hr m}^2$$

$$N'_{c2} = 45.0 \frac{\text{Kg de agua}}{\text{hr m}^2}$$

Cálculo de N'_c a la temperatura de 70 °C y humedad de aire -----

$$Y' = 0.04 \text{ kg de agua/kg de a.s.}$$

Procediendo de manera similar al cálculo anterior, se tiene:

Consideraciones experimentales:

$$N'_c = 22.4$$

$$\Delta Y'_{ml} = 0.02 \text{ kg de agua/kg de a.s.}$$

Determinación de $\Delta Y'_{ml 2}$:

$$T_{b.a.} = 70 \text{ °C:}$$

$$Y'_1 = 0.04 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de a.s.}}$$

$$Y'_{a.s.} = 0.053 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de a.s.}}$$

$$Y'_2 = 0.0436 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Debe recordarse que la humedad Y'_2 se determinó previamente de los balances de materia.

$$\Delta Y'_{ml 2} = \frac{(0.053 - 0.04) - (0.053 - 0.0436)}{\text{In } (0.053 - 0.0436)}$$

$$\Delta Y'_{ml 2} = 0.0111 \text{ kg de agua/kg de a.s.}$$

Por tanto:

$$N'_{c 2} = \frac{22.4 \times 0.0111}{0.02}$$

$$N'_{C2} = 12.432 \text{ kg de agua/hr m}^2$$

$$N'_{C2} = 12.5 \text{ kg de agua/hr m}^2$$

Como se puede observar, el valor inicial de N'_C (16.9 kg de agua/hr m^2), aumentó 2.66 veces al variar la temperatura a 95 °C, el espesor del lecho a 5 cm, y la humedad a 0.04 kg/kg, disminuyendo por otro lado 0.2604 veces en su valor inicial al cambiar la temperatura a 70 °C, y las condiciones mencionadas, correspondiendo a las fijadas para el diseño del secador.

En la tabla IV.5.3, se presentan los valores de N' en el período decreciente a las temperaturas de 70 y 95 °C.

Esta tabla, fué realizada de la siguiente forma: los datos de la 2a. columna fueron leídos de la fig. IV.5.1. Con las proporciones antes marcadas como resultado del cambio de condiciones, y aplicando el método geométrico revisado en la sección de conceptos teóricos se realizaron la 3a. y 4a. columna de la mencionada tabla. En base a ésta tabla, se obtuvieron las fig. IV.5.3 y IV.5.4.

Tabla IV.5.3 : Valores de Velocidad de secado en el período decreciente ---
 ($N' = \text{kg de agua/hr m}^2$) evaluado a las condiciones requeridas
 por el diseño del secador.

X' $\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de s.s.}}$	80 °C	95 °C	70 °C
5.7	16.9	45.0	12.5
5.5	16.3	43.35	12.05
5.25	15.6	41.49	11.53
5.0	15.0	39.9	11.09
4.75	14.3	38.03	10.57
4.5	13.6	36.17	10.05
4.25	12.95	34.44	9.57
4.0	12.2	32.45	9.02
3.75	11.55	30.72	8.54
3.5	10.55	28.06	7.8
3.25	9.6	25.53	7.10
3.0	8.8	23.40	6.5
2.75	8.25	21.94	6.1
2.5	7.85	20.88	5.8
2.25	7.45	19.81	5.51
2.0	7.0	18.62	5.17
1.75	6.55	17.42	4.84
1.5	6.0	15.96	4.43
1.25	5.5	14.09	3.92
1.0	4.5	11.97	3.33
0.75	3.6	9.57	2.66
0.5	2.5	6.65	1.85
0.25	0.7	1.86	0.5177

Condiciones experimentales.

Espesor del lecho: 5 cm.

$Y' = 0.04$ Kg de agua/Kg de a.s.

Veloc. del aire: 1.2 m/seg.

Flujo a travez del lecho.

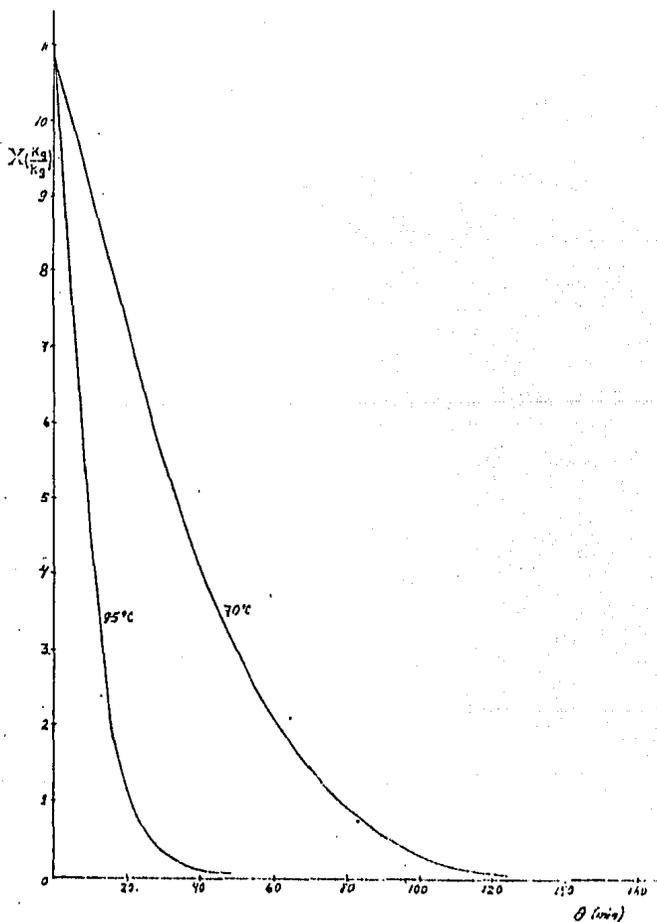


Fig. IV.5.3 Secado de pimienta a diferente temperatura.

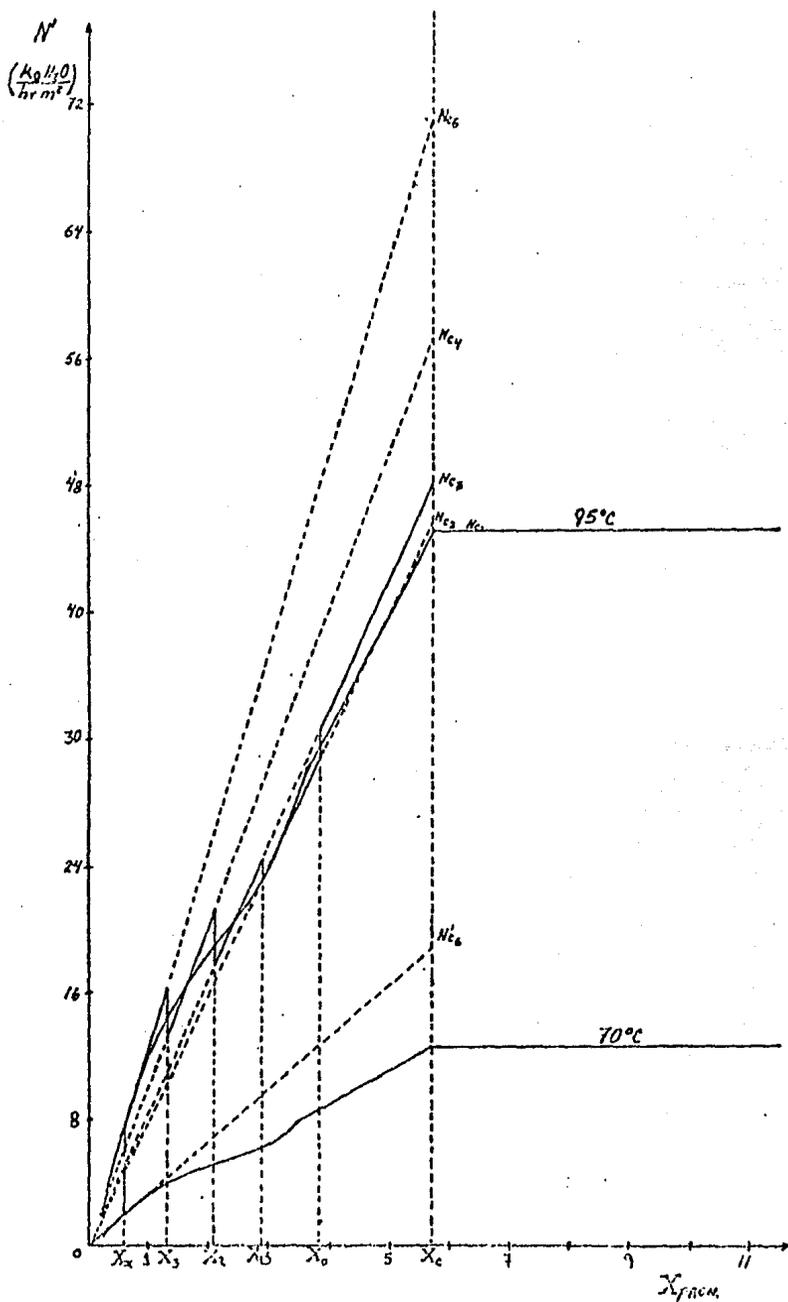


Fig. IV.5.4 Análisis de la curva experimental de secado en el período de secado a velocidad decreciente.

Como la velocidad de la banda es constante, en todos los puntos del secador --
puede escribirse:

$$\frac{\theta_{f1}}{\theta_{f2}} = \frac{L A'_{f1} / L_s}{L A'_{f2} / L_s} = \frac{A'_{f1}}{A'_{f2}}$$

$$\frac{A'_{f1}}{A'_{f2}} = \frac{5}{12} = 0.4166$$

Considerando que la curva de secado a 95 °C, en el período decreciente puede representarse mediante 4 líneas equivalentes que parten del origen, (como se muestra en la fig. IV.5.4).

Se tiene:

$$A'_{f1} = 2.303 \cdot X_2 \cdot L_s \left(\frac{1}{N'_{c1}} \log \frac{X_c}{X_0} + \frac{1}{N'_{c2}} \log \frac{X_c}{X_1} + \frac{1}{N'_{c3}} \log \frac{X_1}{X_2} \dots \right)$$

$$\dots + \frac{1}{N_{c4}'} \log \frac{X_2}{X_3} + \frac{1}{N_{c5}'} \log \frac{X_3}{X_x} \Bigg\}$$

$$A_{f1} = 2.303 \left(5.7 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de s.s.}} \right) \left(28.305 \frac{\text{kg de s.s.}}{\text{hr}} \right) \frac{1 \text{ hr m}^2}{45 \text{ kg de a.}} \log \frac{5.7}{3.85} +$$

$$+ \frac{1}{45.4} \log \frac{3.85}{2.8} + \frac{1}{48.2} \log \frac{2.8}{2.2} + \frac{1}{57} \log \frac{2.2}{1.27} + \frac{1}{71} \log \frac{1.27}{X_x}$$

$$A_{f1} = 371.562 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}} \quad 0.00378 \frac{\text{hr m}^2}{\text{kg de a.}} = 0.00334 + 0.00217$$

$$+ 0.0041 + 0.01408 \log \frac{1.27}{X_x}$$

$$A_{f1} = 371.562 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}} \quad 0.01309 \frac{\text{hr m}^2}{\text{kg de agua}} + 0.01408 \log \frac{1.27}{X_x}$$

Ahora sí, el secado a 40 °C desde X_x hasta $X_f = 0.1$ se representa por una sola recta que parte del origen (ver fig. IV.1.4) se tiene:

$$A_{f2} = 2.303 \times 5.7 \times 28.305 \quad \frac{1}{N_{c6}'} \log \frac{X_x}{0.1}$$

$$A_{f2} = 371.562 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}} \quad \frac{1}{18.6} \log \frac{X_x}{0.1}$$

Por lo tanto:

$$A_{f2} = 0.4166 = \frac{371.562 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}}}{371.562 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}}} \left(0.01309 + 0.01408 \log \frac{1.27}{X_x} \right)$$

$$A_{f1} \quad \quad \quad \left(0.05376 \log \frac{X_x}{0.1} \right)$$

Como ya se mencionó anteriormente, para el diseño se proponen 2 etapas de secado: una a 95 °C y otra a 70 °C. Además se supone que la primera etapa tiene 2 secciones de 4 m² cada una, y la segunda etapa 3 secciones de 4 m² c/u.

De acuerdo a esto, la masa de agua evaporada en el período constante a 95 °C, sería:

$$W_{H_2O} = 28.305 \frac{\text{kg de s.s.}}{\text{hr}} \left(10.76 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de s.s.}} - 5.7 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de s.s.}} \right)$$

$$= 143.22 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}}$$

Si la velocidad de secado en el período constante a 95 °C es -----
 $N'_C = 45 \text{ kg de agua/hr m}^2$, se tendrá que el área requerida para cambiar la humedad del sólido desde su valor inicial hasta la humedad crítica ($X_C = 5.7$) es:

$$A'_C = \frac{143.22 \text{ kg de agua/hr}}{45 \text{ kg de agua/hr m}^2} = 3.18 \text{ m}^2$$

El área restante ($8 - 3 = 5 \text{ m}^2$) de la 1a. etapa y el total de la segunda --
 etapa se utilizarán para reducir la humedad del sólido de -----
 5.7 a 0.1 kg de agua/kg de s.s.

A ésta altura del diseño, es conveniente revisar el valor de la humedad del sólido a la salida de la 1a. etapa, el cuál fué supuesto como -----
 $X_x = 0.6 \text{ kg de agua/kg de s.s.}$ Para comprobar si ésta valor es correcto, se tiene que:

$$\theta_{fl} = \frac{L A'_C}{L_s}$$

Con esta expresión puede ser calculado el tiempo de secado a 95°C, desde la humedad X_C hasta la humedad X_x .

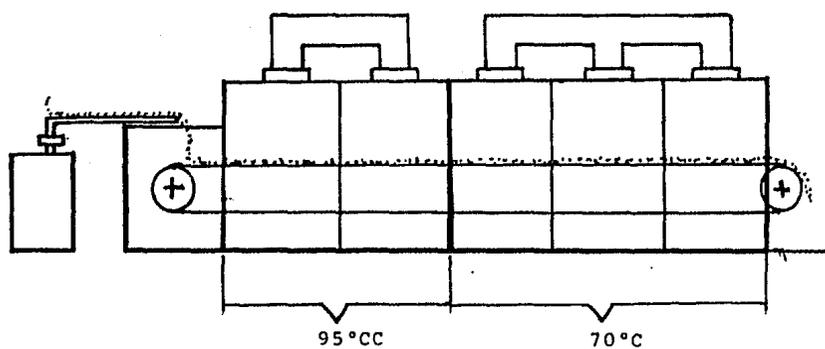


Fig. IV.5 Secador de banda perforada propuesto para la deshidratación de cemento morrón fresco.

en donde:

A'_{f1} = área del secador necesaria para disminuir la humedad del sólido desde X_c hasta X_x .

$$0.4166 = \frac{0.01309 + 0.0148 \log 1.27/X_x}{0.05376 \log X_x/0.1}$$

$$0.02239 \log X_x/0.1 = 0.01309 + 0.0148 \log 1.27/X_x$$

$$\log X_x/0.1 = 0.5844 + 0.6608 \log (1.27/X_x)$$

$$\log (X_x - 0.1) = 0.5844 + 0.6608 \log (1.27 - X_x)$$

$$\log X_x - \log 0.1 = 0.5844 + 0.6608 (\log 1.27 - \log X_x)$$

$$\log X_x + 1 = 0.5844 + 0.6608 (\log 1.27 - \log X_x)$$

$$\log X_x + 1 = 0.5844 + 0.06859 + 0.7259 + 0.7254 \log X_x$$

$$\log X_x + 1 - 0.6608 \log X_x = 0.65299 - 1$$

$$1.6608 \log X_x = -0.34700$$

$$\log X_x = \frac{-0.34700}{1.6608} = -0.2089$$

$$X_x = 0.6181$$

Como este valor es muy cercano al supuesto inicialmente, es por ello que se puede continuar.

Entonces el área requerida en el primer período decreciente (a 95 °C) es:

$$A'_{f1} = 371.562 \text{ kg de agua/hr} \left[0.0139 \text{ hr m}^2/\text{kg de agua} + 0.0148 \log \frac{1.27}{0.618} \right]$$

$$A'_{f1} = 6.58 \text{ m}^2$$

De manera similar; el área requerida en el segundo período decreciente (a 70 °C) será;

$$A'_{f2} = 371.562 \text{ kg de agua/hr} \left[0.0490 \log 0.618/0.1 \right]$$

$$A'_{f2} = 14.40$$

Por lo tanto la superficie de secado requerida es:

Zona 1	a velocidad constante	3.18 m ²
Zona 2	a velocidad decreciente	6.58 m ²
Zona 3	a velocidad decreciente	14.40 m ²
Total		24.16 m ² prácticamente 24 m ²

De lo anterior se deduce que el secador deberá tener 6 secciones de 4 m² cada una, dando un total de 24 m². La primera fase a 95 °C tendrá secciones -- (8 m²) y la segunda 70 °C tendrá 4 secciones (16 m²). En base a la infor

nación bibliográfica recabada, se propone que todas las secciones sean de 2 m de ancho por 2 m. de largo, de tal forma que la longitud total del secador sea 12 m. y su ancho de 2 m.

Cada sección tendrá su ventilador y su recalentador para que se realice convenientemente la recirculación del aire de secado.

El por ciento de recirculación en cada sección, se calculó de la siguiente manera:

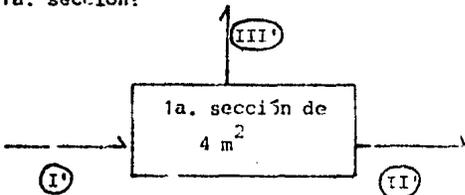
A partir de la fig. IV.5.3 se obtiene que el sólido alcanza en 25 minutos la humedad de 0.618 kg de agua/kg de s.s. El área requerida para obtener este valor de humedad fué de 9.76 m. $(A_c + A_{fl})$.

Como la velocidad de la banda será igual en todo el secador, se puede deducir fácilmente que en 10.24 min., la banda del secador habrá recorrido 4 m^2 , y el doble del área en el doble del tiempo para 8 m^2 a un tiempo de 20.5 min.

Cálculo del por ciento de recirculación en la primera sección:

El valor de X (kg de agua/kg de s.s.) leído a un tiempo de 10.24 min., da como resultado un valor de $X = 3.4 \text{ kg/kg}$. (De figura No. IV 5.3).

Balance en la 1a. sección:



$$333.0 \frac{\text{kg de s.h.}}{\text{hr}}$$

$$s h = 77.27$$

$$Ls = 28.305 \text{ kg de s.s./hr.}$$

$$X = 3.4 \text{ kg/kg}$$

$$\% H = 91.5$$

$$X = 10.76 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de s.s.}}$$

$$Ls = 28.305 \frac{\text{kg de s.s.}}{\text{hr}}$$

Agua evaporada:

$$W_{\text{agua}} = 28.305 \frac{\text{kg de s.s.}}{\text{hr}} (10.76 - 3.4) \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de s.s.}}$$

$$W_{\text{agua}} = 208.32 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}}$$

$$\text{humedad del aire a la entrada del lecho h\u00famedo } Y = 0.04 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de a.s.}}$$

$$\text{Velocidad promedio del aire } v = 1.2 \text{ m/seg.}$$

$$V_h = 1.4388 \text{ m/kg a.s.}$$

$$\rho = 0.7232 \text{ kg de a.h/m}$$

$$G = 0.7232 \frac{\text{kg de a.h}}{\text{m}^3} \times 1.2 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 4 \text{ m}^2 = 3.47139 \frac{\text{kg de a.h}}{\text{seg}}$$

$$G_s = 3.4713 \frac{\text{kg de a.h.}}{\text{seg}} (1 - \frac{0.04 \text{ kg de agua/kg de a.s.}}{1.04 \text{ kg de a.h /kg de a.s.}})$$

$$G_s = 3.3377 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{seg}} \times 3600 \frac{\text{seg}}{\text{hr}} = 12015.72 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{hr}}$$

El agua que pierde el sólido húmedo será eliminada en la corriente de aire de secado que atraviesa el lecho húmedo; por ello:

$$208.32 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}} = G_s (Y'_2 - Y'_1)$$

$$Y'_2 = \frac{208.32 \text{ kg de agua/hr}}{12015.72 \text{ kg de a.s./hr}} + 0.04 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg. de a.s.}}$$

$$Y'_2 = 0.0573 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}}$$

En la figura IV.9 aparecen las corrientes que entran en ésta sección.

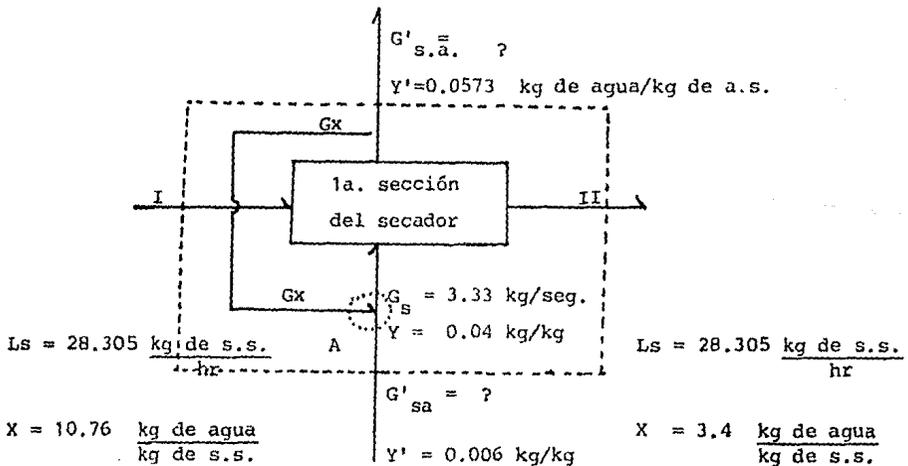


Fig. IV.5.5

Del balance de humedad en la zona punteada se tiene:

$$G'_{s.a.} (0.057 - 0.006) = 28.305 (10.76 - 3.4)$$

$$G'_{s.a.} (0.051) \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de a.s.}} = 208.3249 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}}$$

$$G'_{s.a.} = 4084.8 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ seg.}}$$

$$G'_{s.a.} = 1.1346 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{seg.}}$$

Del balance de aire seco en la zona sombreada A,

$$G_s = G_x + G'_{s.a.}$$

$$G_x = G_s - G'_{s.a.} = 3.33 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{seg}} - 1.1346 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{seg}}$$

$$= 2.1954 \frac{\text{kg de a.s.}}{\text{seg}}$$

Entonces el % de recirculación es:

$$\frac{G_x}{G_s} \times 100 = \frac{2.1954}{3.330} \times 100 = 66.0\%$$

Procediendo de igual manera, se obtuvo la tabla IV.5.4 donde se expresan los porcentajes de recirculación en cada sección.

Tabla IV.5.4. Por cientos de recirculación en cada sección del secador.

Sección		% de recirculación
95 °C	1a.	66
	2a.	87
70 °C	3a.	94
	4a.	98
	5a.	98
	6a.	98

La figura (IV.5.1), muestra el secador con la disposición de las zonas de --
distribución de temperatura y recirculación.

Capítulo V.- PROPUESTA DE DISTRIBUCION DE LA PLANTA DESHIDRATADORA DE PIMIEN-
TO MORRON.

V.1.- Lineamientos generales de distribución.

Van Arsdel (23), da una serie de recomendaciones que deben tenerse en cuenta para hacer una adecuada distribución de las diferentes áreas dentro del proyecto de una planta deshidratadora. Estas recomendaciones se enlistan a continuación:

- 1.- Las carreteras internas y áreas de estacionamiento para automóviles, camiones y trailers, deben ser de tamaño adecuado para ellos, además, se debe tomar en cuenta el espacio necesario para maniobras. Estas carreteras y estacionamientos deben tener un sistema adecuado de drenaje.
- 2.- El área de carga y descarga deberá ser proyectada de acuerdo al método y equipo necesario para el manejo de materia prima y productos. Su localización deberá basarse en los requerimientos del material a manejar en el sistema operacional de la planta.
- 3.- Debe existir un buen sistema de drenaje en las áreas de proceso de alimentos, si esto no se tiene, pueden ocasionarse olores desagradables, debido a la acumulación de materiales de desecho, lo cuál consecuentemente acarrea posibles contaminaciones.
- 4.- La proyección de las áreas dentro de la planta deberá permitir una expansión futura.

- 5.- Si existen diferentes áreas de proceso, éstas deben tener perfectamente divididas para evitar combinaciones de olores, humedades y hacer más -- ágil el manejo de los materiales. El material húmedo y el material seco deberán estar perfectamente separados para facilitar su manejo.
- 6.- En la planta debe existir un manejo adecuado de agua caliente y fría pa ra satisfacer los requerimientos de la planta.
- 7.- Los tanques en los que se manejen soluciones o calentamiento de agua, - deberán tener equipo de seguridad que impidan el paso de dichas solucio nes a las líneas de agua potable.
- 8.- El espacio mínimo permitido para que un trabajador desempeñe su función eficientemente, debe ser de 30 pulgadas x 30 pulgadas. Los trabajado-- res deben estar vigilados por personal de inspección.
- 9.- Deberá existir espacio suficiente para permitir la separación, reposi-- ción y dar servicio de mantenimiento al equipo.
- 10.- El flujo en línea recta en el proceso de materiales, es preferible que un flujo cruzado. El movimiento de los trabajadores deberá estar orga-- nizado de tal forma que permita un flujo regular en todas las líneas de proceso. Los pasillos de operación deberán ser amplios para permitir - el tráfico en ambas direcciones. Se deberán observar medidas de seguri dad e higiene en todo el personal que labore o esté en la planta.
- 11.- El conocimiento del proceso puede ayudar a relacionar funciones. Por - ejemplo; la caldera puede estar localizada cerca de donde existe un re-

querimiento alto de vapor.

- 12.- Todas las partes de la planta deberán tener luz, calor y ventilación -- adecuadas. Deberá existir una mejor iluminación en las áreas de inspección. En general, las áreas de la planta deben de tener una lámpara ca da 6 ó 7.5 m. lineales, para iluminar convenientemente.

El tipo de iluminación usado puede depender de los requerimientos de la instalación; una iluminación eficiente, favorece el mejor rendimiento - del personal. Se recomienda usar lámparas fluorescentes. Las paredes y techos deberán pintarse de colores que reflejen la luz. Las ventanas deberán tener vidrios que permitan el paso de la luz.

- 13.- Para que una planta deshidratadora de alimentos trabaje eficientemente cada equipo que interviene en una fase determinada del proceso, deberá diseñarse tomando en cuenta las propiedades iniciales del material a ma nejar como por ejemplo; su acomodamiento, humedad inicial, temperatura y la fase precedente.

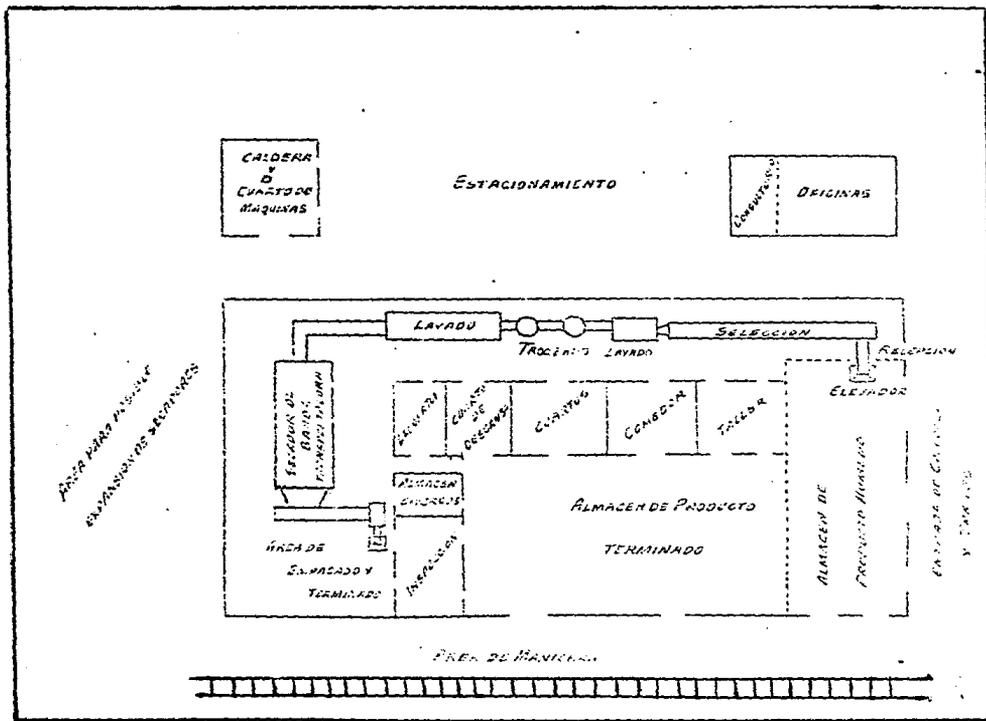
- 14.- Es muy importante tener en cuenta buenas condiciones para la higiene -- personal y de la planta misma; así mismo, se debe tener buena ventila-- ción, buena iluminación, baño y havitaciones de descanso, amplias - facilidades para poder asearse.

Estos factores son importantes para el confort y bienestar de los em--- pleados. Los baños deberán estar perfectamente rotulados (con respecto al sexo).

Los empleados deberán ser instruídos en cuanto a la limpieza de sus manos antes y después de ir al baño, deberá existir un uniforme con gorra para evitar que el pelo caiga en los alimentos. Se recomienda dar cursos de primeros --- auxilios a todo el personal que labore en la empresa. Así mismo, tener a la mano los nombre, teléfonos y direcciones de doctores y hospitales que estén - cercanos a la planta, para solucionar cualquier emergencia.

En la referencia antes citada (23), se presentan tres diferentes planos de -- distribución general de plantas deshidratadoras de alimentos para el procesa- miento de 100 ton. de material húmedo por día. En base a tales distribuciones en este trabajo, se presenta la que se estima es la más adecuada a las condi- ciones generales de procesamiento del pimiento morrón. Este diagrama es pre- sentado en la figura V.2.

FIG. V.2.- Distribución general de la planta deshidratadora.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La parte experimental aportó importantes resultados que es necesario remarcar; con respecto al pretratamiento con NaOH, se observó (fig. II.4.1) que el efecto general de esta variable, no fué significativo, ya que el ahorro en el tiempo total de secado no fué sustancial.

La figura No. (II.4.2.1) muestra que el pretratamiento con dióxido de azufre - no causa ningún efecto sobre el proceso de secado. Sin embargo, bibliográficamente el dióxido de azufre si tiene efecto en la conservación del color durante el almacenamiento ésta influencia no pudo ser evaluada adecuadamente, se propone para ello hacer experimentación donde se incluya períodos largos de almacenamiento (de 1 a 6 meses), y observar si el pretratamiento con dióxido de azufre, permite una mayor retención del color deseado.

De acuerdo a la observación experimental en el pretratamiento con hidróxido de sodio, podemos asegurar que dicho procedimiento se puede evitar, ya que se invertiría mucho dinero en activo fijo para montar el equipo necesario para desarrollar este pretratamiento y el ahorro en el tiempo de secado es pequeño.

El tamaño de partícula que aportó los mejores resultados, se encontró que fué de 1 cm. de lado; no siendo necesario tener una máquina que realice el cortado perfecto a esta dimensión.

Cuidando el parámetro tecnológico de color comercial, se encontró que la temperatura de 70 °C no afecta dicho parámetro. Es conveniente hacer incapié que esta variable puede dañarse por la temperatura y el contenido de humedad. Se observó que a humedades del sólido inferiores a 0.5 (base seca) y con tempera-

turas de aire de secado arriba de la mencionada, se daña sensiblemente el color del producto final. Debe resaltarse la posibilidad de efectuar la deshidratación del pimiento morrón a diferentes temperaturas, como se sugirió en el diseño del secador. Por ella, se propone realizar pruebas experimentales que inicien con temperaturas altas (90 °C), y necesariamente terminen con 70 °C, esto con la finalidad de disminuir el tiempo de secado y además cuidar el color del producto seco.

Durante las pruebas experimentales, se encontró que a la temperatura de 70 °C - el color final del producto fué muy similar al color de la paprika comercial.

Con respecto al flujo a través del lecho, es recomendable realizar pruebas de secado con pimiento morrón, tomando diferentes espesores de lecho húmedo en un rango de 5 a 12 cm. Esto para confirmar la teoría de que a mayor espesor de lecho, mayor velocidad de secado.

Desafortunadamente el equipo de la F.E.S.-C (secador de charolas) no permitió - variar adecuadamente esta variable, pero que se sabe es de vital importancia.

Por otro lado, se sugiere realizar experiencias de secado, cambiando la humedad del aire a la entrada del lecho, esto permitiría tener condiciones similares a las logradas cuando se efectúa la recirculación de aire en plantas deshidratadoras ya instaladas, y que son fundamentales por razones económicas.

El pimiento morrón de grado máximo de madurez (color 6 tabla II.7.1), fué el -- que dió el mejor color final, teniendo un valor próximo al color comercial.

El producto que finalmente se obtendría, sería un producto secado a 70 °C, -- con el color rojo dado por el pimiento morrón de máximo grado de madurez, con aroma y sabores característicos de la mencionada hortaliza mexicana.

Si se desea ingresar en el mercado nacional e internacional de la paprika, es recomendable realizar un estudio sobre la factibilidad técnica económica del producto mencionado, obtenido con las modificaciones experimentales analizadas en el presente trabajo. Dicho estudio sentaría las bases para observar - si realmente el producto es competitivo en el mercado interior y exterior.

A P E N D I C E A:

"Construcción de las curvas de secado a partir de datos experimentales".

A continuación se presenta la forma de construcción de las curvas de pérdida de humedad (base seca) X , contra el tiempo θ , y de las curvas de velocidad - diferencial de secado $dX/d\theta$ Vs. la humedad (en base seca) promedio $X_{prom.}$. Para ejemplificar la realización de antes mencionado, se tomaron datos de la corrida experimental. "Efecto del tamaño de partícula en la velocidad de se cado". Nivel de variación 3 cm. de lado.

En dicha prueba experimental, las condiciones de trabajo fueron:

- 1) Pimiento pretratado durante 5 min., con hidróxido de sodio al 2% w/v --- (peso a volúmen).
- 2) Pimiento morrón troceado en forma de cuadros de 3 cm. de lado.
- 3) Peso inicial de la muestra de 140.09 g.
- 4) Humedad inicial 91.5% determinada por termobalanza.
- 5) Temperatura del aire de secado, 70 °C, temperatura de bulbo húmedo -----
 $T_{b.h.} = 29$ °C.
- 6) Temperatura de bulbo seco del medio ambiente 20 °C.
- 7) Temperatura de bulbo húmedo del medio ambiente 16 °C.
- 8) Humedad del aire $Y = 0.008$ kg de agua/kg de a.s.
- 9) Velocidad del aire. $V = 1.55$ m/seg.
- 10) Dirección del aire de secado, paralela al lecho de sólido húmedo.

Bajo las condiciones anteriores, se obtuvieron los datos de las columnas 1 y 2 de la tabla A - 1.

El primer valor de la columna de peso, no corresponde al peso inicial de la muestra, debido a que se esperaba a que el sistema de secado, llegase a las condiciones de operación. Ocurrido esto, se tomaba la primera lectura.

La forma de evaluar las humedades del sólido en base seca X, fué la siguiente:

$$X = \frac{P - P_{s.s.}}{P_{s.s.}}$$

Donde:

P = Peso de la muestra a cualquier tiempo θ (g)

$P_{s.s.}$ = Peso de los sólidos secos (g)

X = Humedad del sólido en base seca (g de agua/g de sól.seco)

Determinación de valores:

$P_{s.s.}$ = Peso inicial de la muestra ($1 - \frac{\% \text{ de humedad inicial}}{100}$)

$P_{s.s.}$ = $140.09 (1 - 0.915) = 11.9075 \text{ g}$

Primer valor de X:

$X = \frac{137.5 - 11.9076}{11.9076} = 10.5470 \text{ g de agua/g de sól.seco}$

Los valores subsiguientes de X, se indican en la 3a. columna de la tabla A - 1. Con los datos de las columnas 1 y 3 se procedió a trazar la gráfica indicada en la figura A - 1.

De ésta gráfica se obtuvieron valores de X en intervalos de 5 minutos. Dichos valores se indican en la columna 2 de la tabla A - 2.

Tabla A - 1. Datos experimentales de la corrida "Efecto del tamaño de partícula en la velocidad de Secado". Nivel de variación de 3 cm. de lado.

(1) Tiempo (θ) min	(2) Peso g	(3) X g de agua/g de S.S.
0	137.5	10.5472
10	126.6	9.6310
20	117.1	8.8340
30	108.4	8.1034
40	100.8	7.4651
50	94.1	6.9025
60	87.4	6.3398
70	81.3	5.8275
80	75.8	5.3656
90	70.5	4.9205
100	65.7	4.5174
110	61.3	4.1479
120	57.0	3.7868
130	53.0	3.4509
140	49.2	3.1318
150	45.7	2.8378
160	42.6	2.5775
170	39.5	2.3172
180	36.5	2.0652
190	33.7	1.8301
200	31.7	1.6621
210	29.4	1.4690
220	27.3	1.2926
230	25.5	1.1414
240	23.9	1.0071
250	22.4	0.8811
260	21.1	0.7719
270	20.1	0.6879
280	19.2	0.6124

continuación..... Tabla A - 1:

(1) tiempo (θ) min	(2) Peso g.	(3) X g de agua/g de s.s.
290	18.3	0.5368
300	17.7	0.4864
310	17.0	0.4276
320	16.7	0.4024
330	16.2	0.3604
340	15.9	0.3352
350	15.9	0.3352

Condiciones:

Pretratamiento: 2% NaOH, 5 min. 50°C

Temperatura de secado: 70°C.

Tamaño de partícula: 3 cm. de lado.

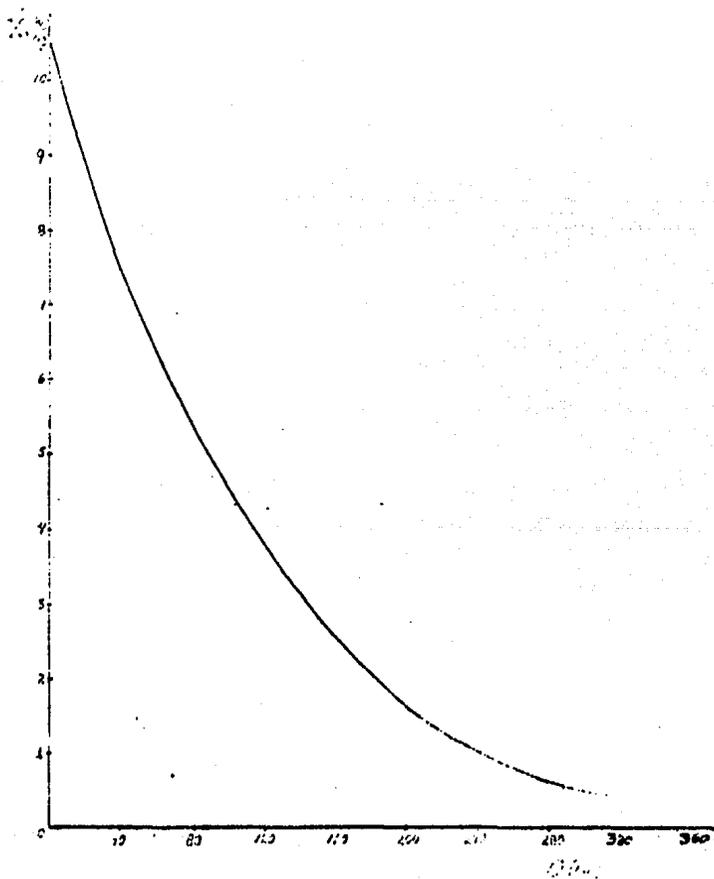


Fig. A-1 Curva de secado de pimiento morrón.

Cálculo de la Velocidad Diferencial de Secado ($-dX/d\theta$):

Para determinar la velocidad diferencial de secado en un intervalo de tiempo $\Delta\theta$ se partió de la siguiente expresión:

$$\frac{-dX}{d\theta} = \frac{X}{\Delta\theta} = \frac{-(X_2 - X_1)}{\Delta\theta} = \frac{(X_1 - X_2)}{\Delta\theta} \quad \frac{\text{g de agua}}{\text{g de sól.seco hr}}$$

Donde:

X_2 = Humedad final en el intervalo de tiempo.

X_1 = Humedad inicial en el intervalo de tiempo.

$\Delta\theta$ = Intervalo de tiempo.

La consideración anterior es válida cuando los incrementos de tiempo son relativamente pequeños. Para el intervalo de tiempo se tiene:

$$0=5 \text{ min} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 0.08333 \text{ hr} \quad \text{Este valor siempre fué considerado - constante.}$$

$$\frac{-dX}{d\theta} = \frac{10.55 - 10.117}{0.08333} = 5.196 \text{ g de agua/g de sól.seco hr.}$$

Por otro lado:

$$X_2 = \frac{X_1 - X_2}{2}$$

Primer valor:

$$X_{\text{prm}} = \frac{10.55 - 10.117}{2} = 10.233$$

Los datos subsecuentes de X_{prom} y de la velocidad diferencial de secado, son reportados en las columnas 3 y 4 de la tabla A - 2.

En la figura A - 2 se representan los valores de $-dx/d\theta$ vs. X_{prom} .

De las fig. A - 1 y A - 2, se obtuvieron los siguientes datos:

Humedad crítica $X_c = 9.0$ g de agua/g de sól.seco.

Tiempo crítico $\theta_c = 18$ min.

Velocidad diferencial de secado en el período constante -----

$\left(\frac{dx}{d\theta}\right)_c = 5.15$ g de agua/g de sól.seco hr.

Tabla A - 2. Obtención de valores promedio de X y los datos necesarios para obtener la vel.dif. de secado. Pimiento morrón troceado en -- cuadros de 3 cm. de lado.

(1) tiempo (θ) min.	(2) X	(3) X prom	(4) -dx/d θ g de agua/g de sol.seco hr
0	10.55		
5	10.117	10.333	5.196
10	9.685	9.901	5.184
15	9.2525	9.468	5.196
20	8.820	9.036	5.184
25	8.45	8.635	4.44
30	8.08	8.265	4.44
35	7.74	7.91	4.08
40	7.46	7.60	3.60
45	7.16	7.31	3.60
50	6.88	7.02	3.36
55	6.57	6.725	3.720
60	6.30	6.435	3.240
65	6.04	6.170	3.120
70	5.80	5.92	2.880
75	5.58	5.690	2.640
80	5.35	5.465	2.760
85	5.10	5.225	3.00
90	4.90	5.000	2.40
95	4.70	4.80	2.400
100	4.52	4.610	2.160
105	4.31	4.415	2.520
110	4.12	4.215	2.280
115	3.94	4.03	2.160
120	3.77	3.865	2.040
125	3.58	3.675	2.280
130	3.43	3.505	1.800
135	3.26	3.345	2.040
140	3.12	3.190	1.680

continúa.... Tabla A - 2.

(1) tiempo (θ) min	(2) X	(3) X_{prom}	(4) $-dX/d\theta$ g de agua/g de sól.seco hr
145	2.98	3.050	1.680
150	2.82	2.90	1.920
155	2.67	2.745	1.800
160	2.54	2.620	1.560
165	2.41	2.475	1.560
170	2.27	2.340	1.680
175	2.16	2.215	1.320
180	2.04	2.10	1.440
185	1.92	1.980	1.440
190	1.81	1.865	1.320
195	1.70	1.755	1.320
200	1.60	1.650	1.200
205	1.50	1.550	1.200
210	1.43	1.463	0.840
215	1.34	1.385	1.08
220	1.27	1.305	0.840
225	1.20	1.235	0.840
230	1.12	1.16	0.960
235	1.05	1.085	0.840
240	0.99	1.020	0.720
245	0.92	0.955	0.840
250	0.87	0.895	0.600
255	0.82	0.845	0.600
260	0.76	0.79	0.720
265	0.71	0.735	0.600
270	0.68	0.695	0.360
275	0.64	0.66	0.480
280	0.59	0.615	0.600
285	0.56	0.575	0.360
290	0.53	0.545	0.360
295	0.50	0.515	0.360

continúa..... Tabla A - 2.

(1) tiempo (θ) min	(2) X	(3) X prom	(4) -dX/d θ g de agua/g de sól.seco hr
300	0.46	0.480	0.480
305	0.44	0.450	0.240
310	0.42	0.430	0.240
315	0.40	0.410	0.240
320	0.38	0.390	0.240
325	0.36	0.370	0.240
330	0.35	0.355	0.120
335	0.33	0.340	0.240
340	0.31	0.320	0.240
345	0.31	0.310	0

Condiciones:

Pretratamiento: 2% NaOH, 5 min. 50°C

Temperatura de secado: 70°C.

Tamaño de partícula: 3 cm de lado.

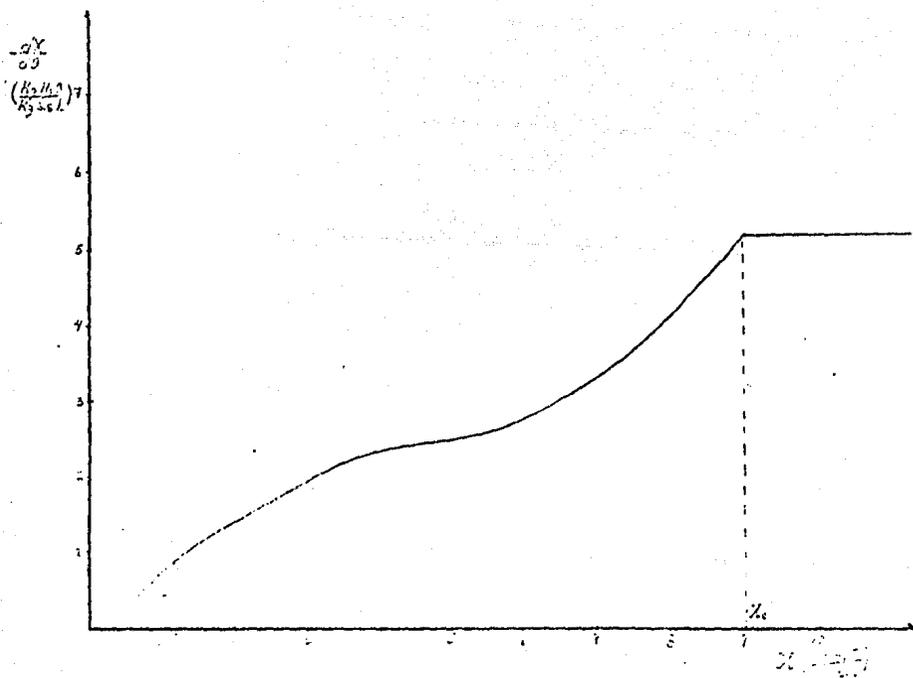


Fig. 1.2. Curva de velocidad de secado de pimienta morada.

Humedad final, X_f : 0.35 g de agua/g de sól. seco.

Tiempo final de secado, θ_f : 340 min.

Humedad de la muestra al transcurrir 120 min. de secado,

X (a 120 min): 3.77 kg de agua/kg de sól. seco.

APENDICE B.

"TECNICA DE DETERMINACION EN COLOR Y CURVAS EMPLEADAS PARA REALIZAR LAS LECTURAS".

El chile pimienta es cosechado totalmente maduro, limpiado y rebanado en partículas de 1 a 2 cm. de lado. Posteriormente se deshidrata en bandejas, con --- aire forzado y a temperatura constante de 65 °C, hasta alcanzar una humedad de 5 a 6% base seca. El pimienta así secado es pulverizado en un molino hasta un tamaño de partícula de malla 40.

En un frasco erlenmeyer de 250 ml. con tapón, se colocan 1,25 g de pimienta mo lido y 25 ml. de acetona. El frasco con la muestra se pone en agitación duran te 3,5 horas a temperatura ambiente. El sobrenadante se filtra por gravedad - para posteriormente realizar tres lavados con acetona, de tal forma que al fi nal de estos, se obtenga un volúmen de 25 ml., de solución.

Una dilución de 1:50 del extracto, es empleada para medir la absorbancia optica a 470 μm contra un blanco de acetona.

De acuerdo a la técnica anterior, se procedió a realizar un barrido en el es-- pectrofotómetro existente en el F.E.S.-C, para verificar si la longitud de onda empleada era la adecuada, obteniéndose la gráfica mostrada en la figura No. (B-1).

Como se puede observar, la longitud de onda de 470 μm , es la adecuada, con esta se procedió a construir la curva de calibración con dicromato de potasio -- ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) para realizar una comparación más real entre las diferentes tonalida

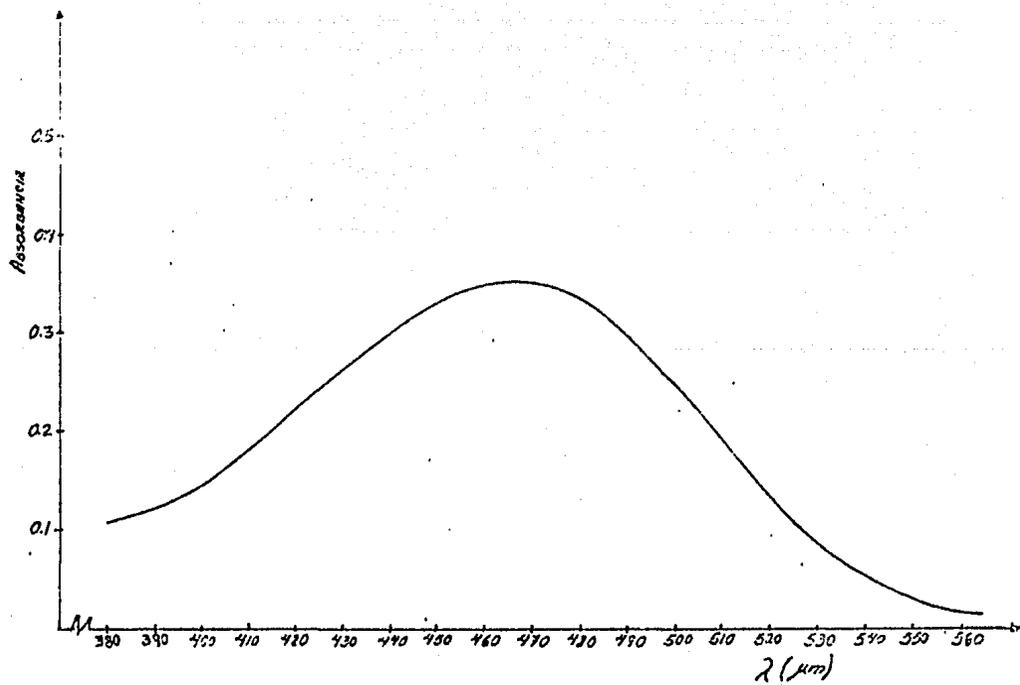


Fig. B-1 Barrido espectrofotométrico (color 5).

des de rojo del pimiento morrón, obteniéndose la gráfica No. (B-2).

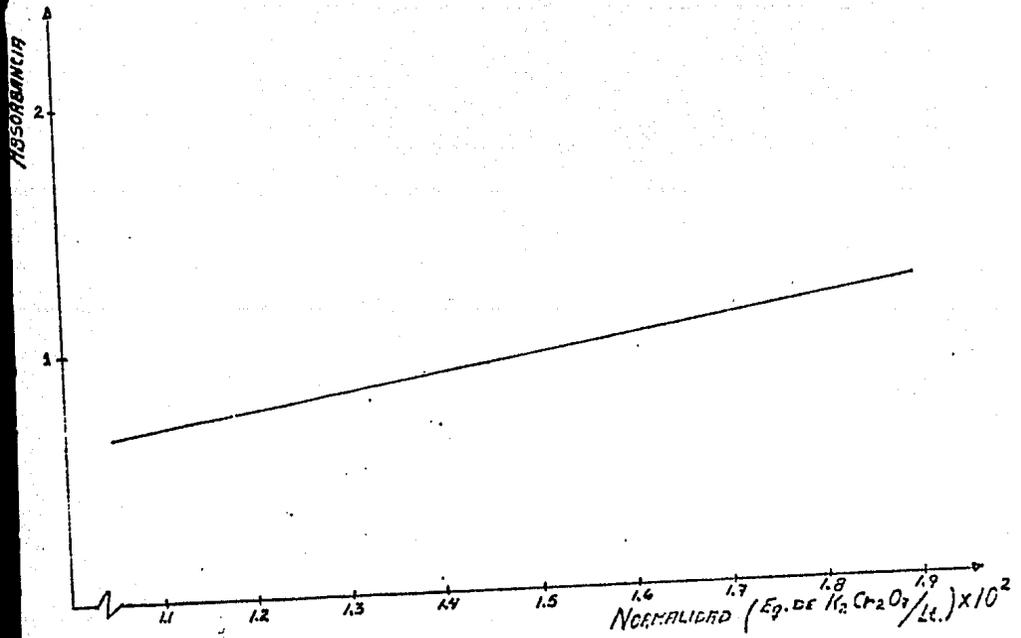


Fig. 2 Curva de calibración con dicromato de potasio a 470 μ m.

Nomenclatura:

- A Area de superficie de secado a través de la cual se transfiere la materia y la energía; (m^2).
- A' Area de sección transversal del lecho en el secador; (m^2).
- A_f Area de la banda del secador para el período decreciente; (m^2).
- A_{X₁-X₂} Area del secador requerida para disminuir la humedad del sólido de un punto a otro; (m^2).
- b Ordenada al origen.
- dX Diferencial de humedad; (kg agua/kg s.s.).
- dθ Diferencial de tiempo; (min).
- E Entradas; (kg prod/h).
- G Gasto másico; (kg/h).
- K_y Coeficiente de transferencia de masa del aire de secado; -----
($kg/h m^2 (Y')_{ml}$).
- K'_y Coeficiente de transferencia de masa del aire referida al área A';
($kg/h m^2 (Y')_{ml}$).

- L Espesor del lecho; (cm).
- LS Peso del sólido seco en el secador; (kg s.s.)
- m Pendiente.
- N Velocidad de secado; (kg de agua/ h m²).
- Nc Velocidad de secado en el período constante; (kg agua/h m²).
- Nc' Velocidad de secado en el período constante, referida a A';
(kg agua/h m²).
- N* Velocidad de secado cuando el sólido alcanza la humedad de equi-
librio; (kg agua/h m²).
- Ps.s. Peso del sólido seco; (g)
- P Peso de muestra; (g).
- S Salida; (kg prod/h).
- T_{wb} Temperatura de bulbo húmedo; (°C).
- T_{bs} Temperatura de bulbo seco; (°C).
- v Velocidad del aire; (m/seg).

v_h	Volúmen húmedo; (m^3/kg A.S.).
w	Peso de entrada ó salida; (kg/h).
W_d	Rapidez de alimentación de los sólidos al secador; (kg s.s./seg).
X_{in}	Humedad inicial; (kg agua/ kg s.s.)
X_c	Humedad crítica del sólido; (kg agua/ kg s.s.).
X_f	Humedad final del sólido; (kg agua/ kg s.s.)
X^*	Humedad de equilibrio; (kg agua/ kg s.s.)
Y'	Humedad del aire; (kg agua/ kg A.S.)
$Y_{a.s.}$	Humedad de saturación del aire; (kg agua/ kg A.S.).
$(\Delta Y')_{ml}$	Diferencia media logarítmica de humedad del aire a la entrada y salida del lecho de sólidos.
θ	Tiempo; (min).
θ_c	tiempo de secado del período constante; (h).
θ_d	Tiempo de secado del período decreciente; (h).
ρ	Densidad; (kg/m^3).

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Braverman J. B.S. Bioquímica de los Alimentos. Ed. El Manual Moderno, S.A. México (1980).
- 2.- Berqueret Gualberto. Conservas Vegetales. Salvat Editores, S. A. - - México (1953).
- 3.- Brown G.G. y Col. Unit Operations, New York; John Wiley & Sons Inc. - (1950).
- 4.- Cristie J. Geankoplis. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias Ed. C.E.C.S.A. (1982).
- 5.- El Chile Dulce, un Cultivo que se puede Intensificar. Gaceta Agrícola # 575 Año XX1, Guadalajara, Méx. (1977).
- 6.- F. A. O. Boletín. Production Yearbook. (1975).
- 7.- Foust A.S. y Col. Principles of Unit Operations. New York: John Wiley & Sons Inc. (1960).
- 8.- Nonhevel G. et.al. Drying of Solids in Chemical Industry. Ed. Butterworth & Co. Ltd. London. (1976).

- 9.- Global Production of Paprika and Trade in Pepper, IFW Compact. Information Service. Vol. 55, pp 82, 85, 87, 88.
- 10.- J. G. Lease and E. J. Lease; Effect of Drying Conditions en Initial Color, Color Retention, and Pungency of Red Peppers; Food Technology; Nov. (1951).
- 11.- J. G. Lease and E. J. Lease; Effect of Fat Soluble Antioxidants on -- The Stability of the Red Color of Peppers; Food Technology. Sep.(1956)
- 12.- J. G. Lease and E. J. Lease; Factor Efecting the Retention of Red Color in Peppers; Food Technology, Sep. (1956).
- 13.- Lentz E. M.; Effects of Canning and Drying on the Carotene and Ascorbic Acid Content of Chili, Bull 327, N. Méx. Agr. Exp.Sta. (1946).
- 14.- L. O. Van Blaricom and J. A. Martin; Retarding the Loss of Red Color in Caynne Pappers With Oil Antioxidants; Food Technology; Agost. (1951).
- 15.- L. Patricia M. P.; Tesis; Diseño y Selección del Equipo Principal de una Planta de Deshidratación de Chile Fresco; U.N.A.M. (1982).
- 16.- Luh and Woodrof; Comercial Vegetable Processing; A.V.I. (1978).
- 17.- M. A. González and E. Díaz Negrón, H. Cancel; Freeze-Drying of Swet Peppers The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico, Vol.1 (1970)

- 18.- Perry R. N. and Chilton, C. H.; Chemical Engineer's Handbook 5a. Ed. New York;. Mc Graw Hill, Inc. (1973).
- 19.- Proctor & Schuartz Inc. (Catálogo).
- 20.- R. B. Duckworth; Fruit and Vegetables; Ed. Pergamon Press Ltd. Oxford, Inglaterra. (1968).
- 21.- S. L. Chen and F. Gutmanis; Auto Oxidation of Extractable Color Pigments in Chili Peppers With Special Reference to Ethoxiquin Tratment.; Journal of Fooda Science, Vol. 33 (1968).
- 22.- Tewybal, R.E.; Mass Transfer Operations: 2a. Ed. New York; Mc. Graw Hill Inc. (1968).
- 23.- Van Arsel W.B. and M. J. Copley; Food Dehydratation; Vol. 2, the AVI Pub. Westport Conn. USA (1967).