

EVALUACION DE SISTEMAS INTERMITENTES PARA LA DESHIDRATACION
DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS POR SUBLIMACION

TESIS PROFESIONAL
JULIO ANTONIO / GARCIA GONZALEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

EVALUACION DE SISTEMAS INTERMITENTES PARA
LA DESHIDRATACION DE PRODUCTOS
ALIMENTICIOS POR SUBLIMACION

T E S I S

que presenta para su examen profesional de

INGENIERO QUIMICO

JULIO ANTONIO GARCIA GONZALEZ

ante la

ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS QUIMICAS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

INSTITUTO MEXICANO DE INVESTIGACIONES
TECNOLOGICAS, A. C.

SECCION DE INGENIERIA

1 9 6 2

Deseo expresar mi reconocimiento a la
Dirección y Técnicos del Instituto Mexicano
de Investigaciones Tecnológicas, A. C., y
especialmente a la Sección de Ingeniería, por
la asistencia y facilidades que me fueron brin
dadas para la realización del presente trabajo.

Con profundo respeto,
admiración y cariño dedico este
humilde trabajo a mi padre como
una pequeña compensación a los
esfuerzos y sacrificios que ha
realizado en mi favor.

C O N T E N I D O.

- I. - INTRODUCCION.
- II. - GENERALIDADES SOBRE SECADO POR SUBLIMACION.
- III. - REVISION Y EVALUACION DE DIVERSOS SISTEMAS INTERMITENTES DE SECADO POR SUBLIMACION.
- IV. - DISCUSION DE LOS RESULTADOS.
- V. - CONCLUSIONES
- VI. - APENDICE
- VII. - BIBLIOGRAFIA

I. - INTRODUCCION.

La conservación de los alimentos ha sido siempre una de las mayores preocupaciones del hombre. De los diversos métodos observados para dichos fines, la deshidratación ha sido uno de los que se han practicado en mayor grado, de tal manera que difícilmente existe un pueblo que no haya usado este procedimiento de preservación.

Sin embargo, es bien sabido que los alimentos deshidratados distan mucho de poseer las mismas cualidades que tienen los alimentos frescos, ya que sus propiedades alimenticias, así como su aspecto y forma, desmerecen en menor o mayor grado al ser secados por los métodos convencionales. El secado por sublimación o liofilización es un proceso conveniente para deshidratar aquellos materiales que son sensibles al calor y cuya deshidratación no conviene llevarla a cabo por los métodos convencionales de secado.

Los materiales deshidratados por la referida técnica conservan sus propiedades originales en mayor proporción que aquellos deshidratados por otros métodos.

Al rehidratar los alimentos liofilizados, el color, olor, sabor y propiedades alimenticias, así como la forma en algunos casos, son casi los mismos que cuando están frescos. Estos productos se pueden guardar sin refrigeración durante largo tiempo y su transporte puede resultar más barato que antes del secado.

Aunque esta técnica se ha venido usando en la industria química farmacéutica desde antes de la Segunda Guerra Mundial y posteriormente en la liofilización de antibio

ticos, su aplicación a la industria alimenticia es bastante reciente, habiendo alcanzado gran auge principalmente en Estados Unidos, Inglaterra y Dinamarca, entre otros.

El objetivo principal de esta tesis, es comparar los distintos sistemas comerciales conocidos de secado por sublimación, con el fin de aportar información sobre la con veniencia de adoptar un sistema en un caso dado y además con base en los costos, tener una idea preliminar de la me dida en que este proceso tendría aceptación en México.

II. - GENERALIDADES SOBRE
SECADO POR SUBLIMA-
CION. (1).

Características del proceso.

El secado por sublimación consiste básicamente en congelar el material que se va a secar y eliminar el agua directamente del estado sólido al gaseoso mediante el suministro del calor necesario para la sublimación.

La temperatura debe mantenerse abajo del punto de congelación del producto, para evitar que éste funda, y la presión del sistema debe ser menor que la presión de vapor del hielo para asegurar una rápida sublimación.

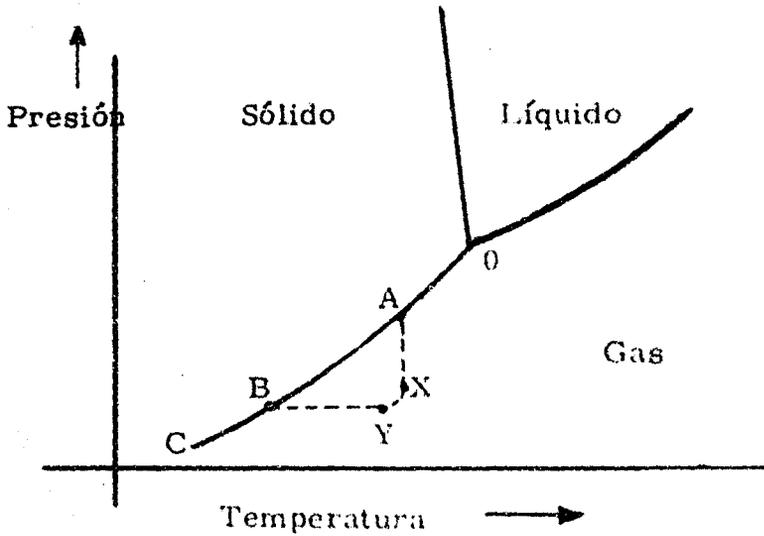
En condiciones de equilibrio, este es un sistema heterogéneo, formado por tres fases: el vapor, el hielo y el material disuelto en éste, por lo que existen dos componentes que son el agua y el soluto.

Las variables que determinan el estado de equilibrio son la temperatura y la presión, la concentración de sustancias disueltas no es una variable, ya que ésta permanece constante durante el secado, como se verá más adelante. Aplicando la regla de las fases al estado de equilibrio se tiene:

$$F = C - P + 2 = 2 - 3 + 2 = 1$$

Por lo tanto el sistema tiene un grado de libertad, es decir se puede definir este sistema indicando una sola variable, presión o temperatura.

En el siguiente diagrama de fases, se puede ver la línea de operación de la liofilización



El punto 0 es el punto triple, correspondiente a la concentración de materias disueltas en el agua, que tiene el material que se va a secar.

La línea de sublimación, que determina el estado de equilibrio entre el vapor y el sólido, está representada por la línea 0C. Para que toda la operación se lleve a cabo entre esas dos fases, se debe de trabajar siempre abajo del punto triple.

Si para eliminar el vapor producido se usa un condensador, entonces el punto B indica la presión de vapor del hielo en el condensador y el punto A, la presión de vapor del hielo en el material que se está secando.

Del punto A al punto X existe una reducción de presión a temperatura constante, el punto X representa las condiciones de presión y temperatura de la cámara de secado en la cercanía al hielo del material por secar. En la trayectoria X - Y hay una caída de presión y temperatura.

en este caso el punto Y indica la presión y temperatura en las cercanías del condensador.

La trayectoria Y-B pertenece totalmente al condensador, en la cual hay una disminución de la temperatura a presión constante, hasta alcanzar la línea de equilibrio, donde condensa el vapor.

Como durante el secado la presión del sistema se mantiene abajo de la presión de vapor del hielo, las condiciones de equilibrio no existen, de tal manera que aplicando la regla de las fases al área correspondiente a la fase de vapor, resulta que el sistema tiene dos grados de libertad:

$$F = C - P + 2 = 1 - 1 + 2 = 2$$

Esto es, hay que determinar tanto la presión como la temperatura para definir el sistema.

Cuando la operación de secado de productos alimenticios o biológicos, se efectúa a temperaturas elevadas, se observan ciertos cambios en los materiales que se están deshidratando. Los principales cambios que se han notado son los siguientes:

1. - Contracción o encogimiento de los sólidos.
2. - Migración de los constituyentes disueltos a la superficie cuando se secan materiales sólidos.
3. - Desnaturalización de las proteínas por el efecto de la temperatura.
4. - La formación de una capa relativamente dura e impermeable en la superficie del sólido, que es causada por alguno o algunos de los tres primeros cambios. Esta capa reduce tanto la velocidad de deshidratación como la de rehidratación.
5. - Formación de sólidos duros e impermeables

cuando se parte de una solución.

6. - Reacciones químicas indeseables en materiales sensibles al calor.
7. - Pérdida de constituyentes volátiles.
8. - Dificultad en la rehidratación como resultado de uno o varios de los cambios antes citados.

Los cambios antes citados afectan evidentemente la calidad de los productos. En el secado por sublimación se suprimen total o parcialmente estos inconvenientes, por ejemplo, debido a que el producto se mantiene congelado, se elimina el encogimiento y la emigración de sustancias disueltas a la superficie. Además el soluto permanece uniformemente dispersado sin sufrir ninguna concentración durante la eliminación del disolvente. El material seco se presenta como una estructura altamente porosa que ocupa prácticamente el mismo volumen que el material húmedo original. Como consecuencia de esto, no se produce endurecimiento superficial y la rehidratación es bastante rápida y completa.

Debido a las bajas temperaturas a las cuales se lleva a cabo la sublimación, la pérdida de componentes volátiles es mínima y la acción bacteriológica y enzimática está inhibida casi totalmente. De esta manera, los materiales sensibles al calor se deshidratan por sublimación, sin que sufran alteraciones sustanciales en su composición y forma.

Como el vacío es elevado y la cantidad de oxígeno presente es extremadamente pequeña, el riesgo de oxidación es mínimo, aún en los componentes fácilmente oxidables.

A medida que se lleva a cabo el secado, el frente de hielo retrocede dentro del material, dejando al descubierto un cuerpo muy poroso, lo que da origen a un producto de aspecto superior, a diferencia del polvo fino u otras formas que se obtienen en otros tipos de secado.

Puede obtenerse un contenido de humedad muy pequeño sin necesidad de utilizar una temperatura final excesivamente alta. De este pequeño contenido de humedad resulta un mayor grado de estabilidad, de tal manera que los productos liofilizados, debidamente sellados para protegerlos de la humedad ambiente, pueden ser almacenados durante largos períodos sin necesidad de refrigeración.

Como consecuencia de las ventajas anteriormente descritas, el secado por sublimación sobresale entre todos los métodos de deshidratación de alimentos, ya que asegura la más alta calidad del producto.

Métodos y equipo.

Para que el secado por sublimación se lleve a cabo son necesarios los siguientes requisitos:

1. - Mantener congelado el material durante todo el ciclo de secado.
2. - Efectuar el secado a un vacío elevado.
3. - Eliminar el vapor de agua producido en la deshidratación.
4. - Suministrar el calor latente de sublimación.

Los métodos y equipo necesarios para realizar tales requisitos y que caracterizan a los secadores por sublimación, son los correspondientes a congelación, vacío, eliminación de vapor de agua y suministro de calor.

Congelación. - Para mantener el material durante el secado completamente congelado es necesario determinar su punto de congelación. El caso más común es áquel en que el agua contenida en los materiales por secar lleva sustancias disueltas, que provocan un descenso en el punto de congelación. Para que el material no se funda durante el secado hay que mantenerlo a una temperatura menor

que la correspondiente al punto eutéctico. En soluciones complejas se puede dar lugar a un eutéctico aparente, y por lo tanto para evitar cualquier error la determinación de estas temperaturas debe hacerse experimentalmente.

La congelación puede ser lenta o rápida. Si la congelación es rápida se obtienen cristales de hielo pequeños y por consiguiente los poros son pequeños; por el contrario, si la congelación es lenta, los cristales de hielo son mayores y la estructura del material resulta dañada por ellos. En este último caso la rehidratación será más rápida, sin embargo tiene una apariencia menos aceptable, por esto en productos alimenticios se prefiere la congelación rápida.

Los métodos de congelación se pueden dividir en dos grupos, la precongelación y la autocongelación. La precongelación se lleva a cabo cuando el material se congela antes de ser sometido al vacío. Esta operación se puede efectuar en equipos convencionales fuera de la cámara de secado o bien dentro de la misma cámara sobre charolas refrigeradas.

La autocongelación consiste en provocar el enfriamiento del material dentro de la cámara de secado, por evaporación de una parte del contenido de humedad al aplicar el vacío. Para congelar el material es necesario evaporar alrededor del 16% del contenido de humedad. El primer método es el que asegura una mejor calidad del producto, sin embargo, existen materiales que pueden ser tratados por el segundo método si se toman ciertas precauciones.

Vacío. - La presión absoluta necesaria durante el secado, depende de las características físicas del material y de la temperatura a la cual se deba mantener el material. Con objeto de tener velocidades de secado óptimas, la presión total en la cámara de secado debe mantenerse alrededor de la mitad o la cuarta parte de la presión de vapor del hielo en el material congelado. En algunos casos es conveniente

secar a temperaturas de -20 a -30°C , a una presión total de 100 micras de mercurio. Estas presiones se pueden obtener fácilmente con las técnicas modernas de alto vacío, pero hay que tener ciertas precauciones en el diseño del equipo, como son usar las medidas adecuadas para las líneas de vapor a fin de evitar obstrucciones al flujo del gas, así como mantener el sello.

Existen dos tipos de equipo para la producción del vacío en los secadores: bombas mecánicas y eyectores de vapor. La selección del sistema de vacío está directamente asociada con el medio usado para eliminar el vapor de agua formado. Este se puede llevar directamente hasta la bomba de vacío o eyector, o bien se puede eliminar antes de llegar a la bomba por algún medio, como se verá más adelante.

Si se usa un eyector de vapor, el vapor formado se pasa directamente hasta dicho aparato, en cambio cuando se usan bombas de vacío generalmente el vapor se elimina antes de llegar a éstas. En este último caso, la bomba debe tener la capacidad suficiente para extraer durante la operación, todo el aire del sistema a una presión de trabajo conveniente y debe ser capaz de llevar la presión del sistema, desde la atmosférica hasta la de operación en un tiempo razonable. Si la bomba es pequeña para la etapa inicial, hay peligro de una fusión parcial del material antes de obtenerse el vacío y si tiene mayor capacidad que la necesaria durante el secado habrá un gasto innecesario de energía.

Eliminación del vapor de agua. - La eliminación del vapor de agua formado se puede realizar antes de llegar al equipo de vacío, o bien se puede bombear directamente hasta la bomba o eyector. La eliminación antes del equipo de vacío, se puede efectuar usando un condensador, un absorbente químico o un adsorbente físico. El bombeo directo es la manera más simple de eliminación, pero presenta el inconveniente de hacer pesada la carga al eyector o bom

ba.

El método que más comúnmente se usa para la eliminación del vapor de agua, cuando el vacío se realiza por medio de una bomba, es la condensación antes de ésta, para ello se coloca dentro de la cámara un condensador, en el cual se condensa el vapor de agua, formando una superficie de hielo. Para realizar lo anterior, la temperatura del hielo en el condensador debe mantenerse a un valor tal que la presión de vapor sea inferior a la presión total en la cámara. El condensador debe estar colocado de manera que todo el vapor pase por él antes de llegar a la bomba de vacío. Por lo que toca a la distancia entre el condensador y el producto, no tiene importancia, siempre y cuando la presión total sea más baja que la presión de vapor del hielo en el producto congelado.

A causa del efecto aislante del hielo, el espesor de éste en el condensador no debe exceder a cerca de media pulgada, para lo cual debe haber un área bastante grande de condensación. Al terminar el secado se debe descongelar el condensador; en operaciones intermitentes la descongelación se realiza después de haber desalojado el producto seco, haciendo pasar agua caliente o vapor por el condensador.

En operaciones continuas se usan condensadores cilíndricos, provistos de paletas rotatorias que raspan continuamente la superficie del hielo.

Eliminar el vapor por medio de adsorbentes y absorbentes es poco conveniente, debido a la dificultad de obtener un buen contacto entre la sustancia y el vapor sin producir una caída de presión alta.

Suministro de calor. - A medida que el secado se lleva a cabo, la superficie del hielo desde la cual se realiza la sublimación, retrocede dentro del producto.

Es por esta razón que el calor de sublimación se debe suministrar hasta dicha superficie, ya sea a través de la

capa de hielo o bien a través de la capa de material seco. Si el calor se suministra por el mismo lado donde se efectúa la sublimación, entonces tendrá que atravesar la capa de material seco, si por el contrario se suministra por el lado opuesto al cual se verifica la sublimación, el calor atraviesa la capa de material congelado. En el segundo caso la temperatura de la superficie calentada está limitada por la temperatura de fusión, mientras que en el primer caso es la temperatura máxima que pueda resistir el material seco sin deteriorarse, la que limita la temperatura de dicha superficie.

El calor necesario para la sublimación se puede suministrar por conducción, por radiación o por medio de microondas, este último método se conoce como calentamiento dieléctrico.

En el caso de la conducción, el método más común es colocar el material sobre charolas, que se calientan generalmente por medio de agua u otro fluido circulante a una temperatura conveniente. Este método es conveniente para materiales cuyas superficies no sean muy irregulares, ya que estas últimas dan como resultado un contacto muy pobre entre el material y la superficie de calentamiento. Tales irregularidades se pueden reducir a un mínimo si el material se coloca entre dos platos de calentamiento los cuales ejerzan una presión sobre él (2). Para materiales muy irregulares, tales como piezas de pollo, es preferible usar el calentamiento por radiación. La efectividad de este método depende de la transparencia de los materiales a las radiaciones. La mayor parte de los alimentos líquidos y casi todos los sólidos son bastante opacos, de manera que la radiación no penetra hasta una distancia considerable y la única ventaja que se obtiene usando este método, es la eliminación de la resistencia debida al contacto entre la charola y el producto. El tiempo de secado cuando se usa la radiación, es alrededor del doble del necesario cuando se usa la conducción.

El método de calentamiento por microondas consiste en colocar el material en un campo eléctrico de alta frecuencia, generalmente de 10 000 a 30 000 kilociclos, en estas circunstancias el material que se seca actúa como un dieléctrico. Al llegar las radiaciones al material hay una pérdida de energía que es la que se transforma en calor, esta pérdida es proporcional, para un voltaje y una frecuencia determinada, a una propiedad de cada sustancia llamada factor de pérdida. La velocidad de generación de calor es proporcional al producto del factor de pérdida, la frecuencia y el cuadrado del gradiente de voltaje. El hielo tiene un factor de pérdida relativamente alto, de manera que en el proceso de secado, el calor se genera en la capa de hielo de una manera selectiva y no en la capa de material seco, lo que contribuye a un control intrínseco del proceso.

El principal inconveniente de este método es la ionización de los gases a que da lugar el alto voltaje y el vacío elevado, esta ionización quema al producto hasta muy adentro de la superficie. Si el voltaje se mantiene bajo con objeto de evitar la ionización, la velocidad de calentamiento es baja y si la presión se eleva con el mismo fin, la velocidad de secado disminuye.

Mecanismo del secado por sublimación.

Durante el proceso de secado el vapor tiene que abandonar el material atravesando la capa porosa de material seco; dicha capa impone una resistencia al paso del vapor, además de la resistencia que existe en la cámara de vacío, aunque esta última es insignificante si la presión del sistema es apreciablemente menor que la presión de vapor del hielo. Hay tres variables en el proceso que son de gran importancia para establecer la velocidad de flujo del vapor, ellas son la presión de vapor del hielo, la presión total en la cámara de vacío y la presión parcial del vapor de agua en la superficie externa del producto. La presión total en la

cámara se controla por medio del equipo de vacío, la presión parcial del vapor la determina la temperatura del condensador o las características del medio usado para eliminar el vapor y la presión de vapor del hielo se controla por medio de la temperatura de éste, la cual a su vez depende de la velocidad a la que el calor se suministre, por lo que el secado se puede efectuar tan rápidamente como se realice el calentamiento. Sin embargo, la velocidad de flujo de calor está limitada por la máxima temperatura que el material seco pueda soportar o por la temperatura de fusión del material congelado.

Solamente en la etapa muy inicial del secado, la sublimación se lleva a cabo desde una superficie de hielo libre, tan pronto como la capa de hielo se adentra en el material a una distancia de la superficie externa igual al diámetro medio de los poros, la resistencia de la capa porosa empieza a tener efecto sobre la velocidad de flujo de vapor.

Existen dos mecanismos por los cuales se puede realizar el flujo de vapor, a saber, el hidrodinámico y el de di fu si ón. Si la presión absoluta dentro de la cámara de vacío es apreciablemente más alta que la presión de vapor del hielo, el flujo se lleva a cabo por difusión gaseosa. Por otra parte, si la presión absoluta dentro de la cámara es apreciablemente más baja que la presión de vapor del hielo, como es el caso más común, hay un gradiente de presiones, dando como resultado un flujo hidrodinámico.

Las velocidades de flujo de vapor más altas son las que se realizan por flujo hidrodinámico, por lo que la presión de operación de estos secadores debe mantenerse aba jo de la presión de vapor del hielo, para trabajar siempre en la región de presiones correspondientes a dicho flujo.

La ecuación de Darcy establece que la velocidad de un fluido a través de un medio poroso es proporcional al

gradiente de presiones e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. Esta ecuación se puede integrar suponiendo el flujo isotérmico de un gas perfecto. El flujo se supone isotérmico debido a que cuando un gas fluye por un medio poroso, se aproxima rápidamente al equilibrio térmico.

La ecuación de Darcy es la siguiente:

$$v = - \frac{K}{U} \frac{dP}{dL} \quad (1)$$

En la ecuación (1), dP/dL es el gradiente de presión a través del material que se va a secar, U es la viscosidad del fluido, v es la velocidad del fluido y K es una constante que varía con cada material y se llama permeabilidad, cuyo valor es el siguiente:

$$K = \frac{g_c D_p^2 F_{re}}{32 F_f} \quad (2)$$

En esta ecuación g_c es la aceleración de la gravedad, D_p es el diámetro de partícula del material, F_{re} es un factor de corrección del número de Reynolds para cuerpos porosos y F_f es un factor de corrección del factor de fricción, también para cuerpos porosos.

Multiplicando ambos miembros de la ecuación (1) por el área de sección del material y por la densidad del fluido, se tiene

$$\frac{dw}{Adt} = - \frac{K}{U} \frac{dP}{dL} d \quad (3)$$

Sustituyendo en la ecuación (3) el valor de la densidad de acuerdo con la ecuación de los gases ideales, es decir, $d = PM/RT$ se tiene:

$$\left(\frac{dw}{Adt}\right) dL = - \frac{KM}{RTU} P dP \quad (4)$$

Integrando la ecuación (4) entre cero y el espesor total del material (L) y entre la presión de vapor del hielo (Pv) y la presión parcial del vapor sobre la superficie externa del material (Pp) se tiene:

$$\frac{dw}{Adt} = \frac{KM}{ULRT} \frac{(Pv^2 - Pp^2)}{2} \quad (5)$$

Descomponiendo la diferencia de cuadrados de las presiones, se tiene:

$$\frac{dw}{Adt} = \frac{KM}{ULRT} (Pv - Pp) \left(\frac{Pv + Pp}{2} \right) \quad (6)$$

Por lo tanto, la ecuación de Darcy integrada es la siguiente:

$$\frac{dw}{Adt} = \frac{KM\Delta P}{ULRT} P_m \quad (7)$$

En la ecuación (7), dw/Adt es la velocidad de flujo por unidad de área de sección, M es el peso molecular del fluido, L es el espesor del materia, ΔP es la diferencia de presiones entre la presión de vapor del hielo y la presión parcial del vapor sobre la superficie externa del material, P_m es la media aritmética de las dos presiones anteriores, R es la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta. Esta ecuación se puede modificar si se considera al medio poroso como un haz de capilares. En el flujo de gases por capilares, existen tres regímenes que dependen de la presión y que están caracterizados por el cociente de la trayectoria libre media de las moléculas, dividida entre el diámetro del capilar; este cociente se conoce como el número de Knudsen. Para el flujo de gases a través de un medio poroso, el régimen que prevalece es el correspondiente a los números de Knudsen entre 0.001 y 2. Para estas condiciones la ecuación (7) se puede modificar de la siguiente manera:

$$\frac{dw}{Adt} = a/L \Delta P (P_m + b) \quad (8)$$

en donde $a = KM/\text{UTR}$ y $b = 0.0133 z^{0.8}/K^{0.5}$, Z es la trayectoria libre media de las moléculas.

Si el calentamiento se efectúa por el mismo lado donde se realiza la sublimación, la siguiente ecuación es válida:

$$k(t_s - t_i)/l = H a \Delta P (P_m + b)/L \quad (9)$$

Donde k es la conductividad térmica del material seco, t_s es la temperatura de la superficie del material seco, t_i la temperatura de la superficie del hielo y H es calor latente de sublimación.

La velocidad de secado está dada por la siguiente ecuación.

$$\frac{dw}{dt} = (X_o - X_e) d_m A \frac{dL}{dt} \quad (10)$$

En esta ecuación, X_o es la humedad inicial del material, X_e la humedad de equilibrio, d_m es la densidad media del material seco, A es el área de secado y L es el espesor del material. Combinando la ecuación (10) con la (8) tenemos:

$$dt = \frac{d_m (X_o - X_e)}{a \Delta P (P_m + b)} L \cdot dL \quad (11)$$

Si esta ecuación se integra para una temperatura de la superficie de hielo constante, como es el caso cuando el calentamiento se hace por el mismo lado donde se realiza la sublimación resulta:

$$t = \frac{d_m (X_o - X_e)}{a \Delta P (P_m + b)} \frac{L_o^2}{2} \quad (12)$$

L_0 es el espesor total del material. En caso de que el calentamiento se realice por el lado opuesto a la sublimación, la temperatura de la superficie de hielo no es constante y la ecuación (11) se tiene que integrar gráficamente.

III. - REVISION Y EVALUACION
DE DIVERSOS SISTEMAS IN
TERMITENTES DE SECADO
POR SUBLIMACION.

Revisión de sistemas comerciales.

Los sistemas intermitentes de liofilización se pueden clasificar, atendiendo al método de congelación, en sistemas que utilizan la autocongelación y sistemas que utilizan la precongelación.

El sistema que usa la precongelación requiere de un equipo de refrigeración para enfriar el condensador mientras dura la operación de secado y una vez que se termina ésta, se utiliza para la precongelación del producto. Los sistemas que utilizan la autocongelación y eliminan el vapor de agua formado por medio de eyectores de vapor, no requieren de una planta de refrigeración.

En cuanto al método de transferencia de calor, estos sistemas pueden clasificarse en sistemas de calentamiento por conducción, también llamado calentamiento por contacto, de calentamiento por radiación y de calentamiento dieléctrico. El método usado para suministrar el calor es de gran importancia ya que de él depende la duración del ciclo de secado, pues cuando existe un vacío suficiente dentro de la cámara de secado, el hielo sublimará tan rápidamente como se le suministre dicho calor.

A continuación se incluyen en la tabla No. 1 los métodos conocidos de suministro de calor en el secado por sublimación y sus principales características, entre las que se encuentran los tiempos de secado que se obtienen en la deshidratación de la mayor parte de productos alimenticios.

Son tres los métodos de calentamiento por contacto:

el método de contacto simple, el método de liofilización acelerada y el método de contacto por medio de clavos. Los dos primeros son los que más se usan en los sistemas comerciales de secado por sublimación.

En el método de contacto simple el material que se va a secar se coloca sobre una charola calentada por medio de un fluido; en este método se obtienen tiempos de secado, para un espesor de más o meros 1.3 cm., de 16 a 24 horas para gran cantidad de productos alimenticios; sin embargo, se pueden obtener tiempos de secado de 10 a 12 horas (4) (5).

El método de liofilización acelerada consisten en colocar el material congelado entre dos platos de calentamiento, móviles, que permiten ejercer una presión sobre el material, de este manera se asegura un calentamiento por los dos lados y contacto máximo. Con objeto de no obstruir el flujo de vapor se insertan mallas de metal entre el material que se seca y los platos de calentamiento (6) (7). El calentamiento de los platos se lleva a cabo por medio de un fluido que circula dentro de ellos.

El método de contacto por medio de clavos se efectúa colocando el material entre dos placas de calentamiento provistas de clavos de aluminio, los cuales se introducen dentro del material, asegurando así un mejor contacto y la transmisión de calor a las capas más profundas del producto.

Por lo que respecta al calentamiento por radiación, el tiempo de secado para ciertos materiales, es alrededor de la mitad que cuando se usa el calentamiento por contacto. Sin embargo, los costos de operación son altos, debido al alto consumo de energía de las resistencias eléctricas y la única aplicación atractiva desde el punto de vista comercial del calor radiante, se tiene con unos cuantos materiales que por ser transparentes permiten que la radiación

TABLA N^o. 1 (3)
METODOS DE SUMINISTRO DE CALOR EN EL SECADO POR SUBLIMACION Y SUS PRINCIPALES

CONCEPTO	CONTACTO SIMPLE	LIOFILIZACION ACCELERADA.	CONTACTO CON CLAVOS DE ALUMINIO	RADIACION
TIEMPO EN HORAS REQUERIDO PARA SECAR MATERIALES DE 1.30 CM. DE ESPESOR. DE 2.50 CM. DE ESPESOR.	16 - 24 36 - 48	4 - 7 6 - 12	3 - 6 3 - 6	
MANERA DE TRANSMITIR EL CALOR.	POR CONTACTO SOBRE CHAROLAS CALIENTADAS	POR CONTACTO POR LOS DOS LADOS ENTRE PLATOS DE CALENTAMIENTO MOVIBLES.	POR CONTACTO CON CLAVOS DE ALUMINIO INSERTADOS EN EL MATERIAL	POR RADIACION
EQUIPO ESPECIALIZADO QUE SE REQUIERE.		MECANISMO HIDRÁULICO PARA MOVER LOS PLATOS Y MANTENER EL CONTACTO CON EL PRODUCTO.	PLACAS PROVISTAS DE CLAVOS DE ALUMINIO	
MÉTODO DE CONTROL DE LA TEMPERATURA.	TERMOSTÁTICO	TERMOSTÁTICO	TERMOSTÁTICO	POR EFECTOS
VENTAJAS PARTICULARES		SECADO MODERADAMENTE RÁPIDO.	SECADO RÁPIDO DE PIEZAS ORUESAS.	
DESVENTAJAS PARTICULARES.	VELOCIDAD DE SECADO LENTA.	NECESIDAD DE AJUSTAR EL MECANISMO DE MOVIMIENTO DE LOS PLATOS DURANTE EL CICLO PARA ASEGURAR EL ÓPTIMO GRADO DE CONTACTO.	LAS PLACAS CON CLAVOS DE ALUMINIO DIFICULTAN LA CARGA Y DESCARGA.	VELOCIDAD

TABLA N^o. 1 (3)

DE CALOR EN EL SECADO POR SUBLIMACION Y SUS PRINCIPALES CARACTERISTICAS.

LIOFILIZACION ACCELERADA.	CONTACTO CON CLAVOS DE ALUMINIO	RADIACION POR RAYOS INFRA-ROJOS	CALENTAMIENTO DIELECTRICO
4 - 7 6 - 12	3 - 6 3 - 6	16 - 24 36 - 48	2 - 6 2 - 6
CONTACTO POR LOS DOS LADOS ENTRE PLATOS DE CALENTAMIENTO MOVIBLES.	POR CONTACTO CON CLAVOS DE ALUMINIO INSERTADOS - EN EL MATERIAL	POR RADIACION INFRA-ROJA	POR MEDIO DE MICROONDAS
MECANISMO HIDRAULICO PARA MOVER LOS PLATOS Y MANTENER EL CONTACTO CON PRODUCTO.	PLACAS PROVISTAS DE CLAVOS DE ALUMINIO	CALENTADORES INFRA-ROJOS.	EQUIPO ELECTRONICO DE MICRO-ONDAS.
TERMOSTÁTICO	TERMOSTÁTICO	POR MEDIO DE LA ENERGIA INTRODUCIDA AL SISTEMA.	POR MEDIO DE LA ENERGIA INTRODUCIDA AL SISTEMA.
SECADO MODERADAMENTE - RÁPIDO.	SECADO RÁPIDO DE PIEZAS GRUESAS.		SECADO RÁPIDO DE PIEZAS GRUESAS.
NECESIDAD DE AJUSTAR EL MECANISMO DE MOVIMIENTO DE LOS PLATOS DURANTE EL CICLO PARA ASEGURAR EL OPTIMO GRADO DE CONTACTO.	LAS PLACAS CON CLAVOS DE ALUMINIO DIFICULTAN LA CARGA Y DESCARGA.	VELOCIDAD DE SECADO LENTA, CONTROL DE TEMPERATURA DIFÍCIL.	CONTROL DE TEMPERATURA DIFÍCIL. EL MANTENIMIENTO DEL EQUIPO ELECTRONICO REQUIERE PERSONAL ESPECIALIZADO.

ción penetre hasta una distancia considerable.

En cuanto al método de calentamiento dieléctrico, el equipo necesario para realizarlo tiene un costo más elevado que cualquiera necesario para otros métodos de calentamiento, además el consumo de energía eléctrica es muy alto; sin embargo el tiempo de secado puede ser hasta de seis a ochos veces menor que el necesario en el método de contacto.

El sistema que se use para producir el vacío, está directamente relacionado con el sistema de eliminación de vapor de agua.

Cuando se usan eyectores para producir el vacío, estos mismos sirven para eliminar el vapor de agua formado. Si el vacío se realiza por medio de una bomba, se usa condensador para la eliminación del vapor formado.

El uso de adsorbentes físicos y absorbentes químicos está poco desarrollado en operaciones comerciales debido al alto costo de regeneración de estas sustancias. Tomando como base lo dicho hasta aquí, los sistemas comerciales de secado por sublimación se pueden reducir a dos grupos principales:

Grupo 1. - Sistemas de calentamiento por contacto, que usan eyectores de vapor para producir el vacío y eliminar simultáneamente el vapor de agua formado.

Grupo 2. - Sistemas de calentamiento por contacto, que usan bombas para producir el vacío y condensadores para eliminar el vapor de agua formado.

Selección de sistemas. -

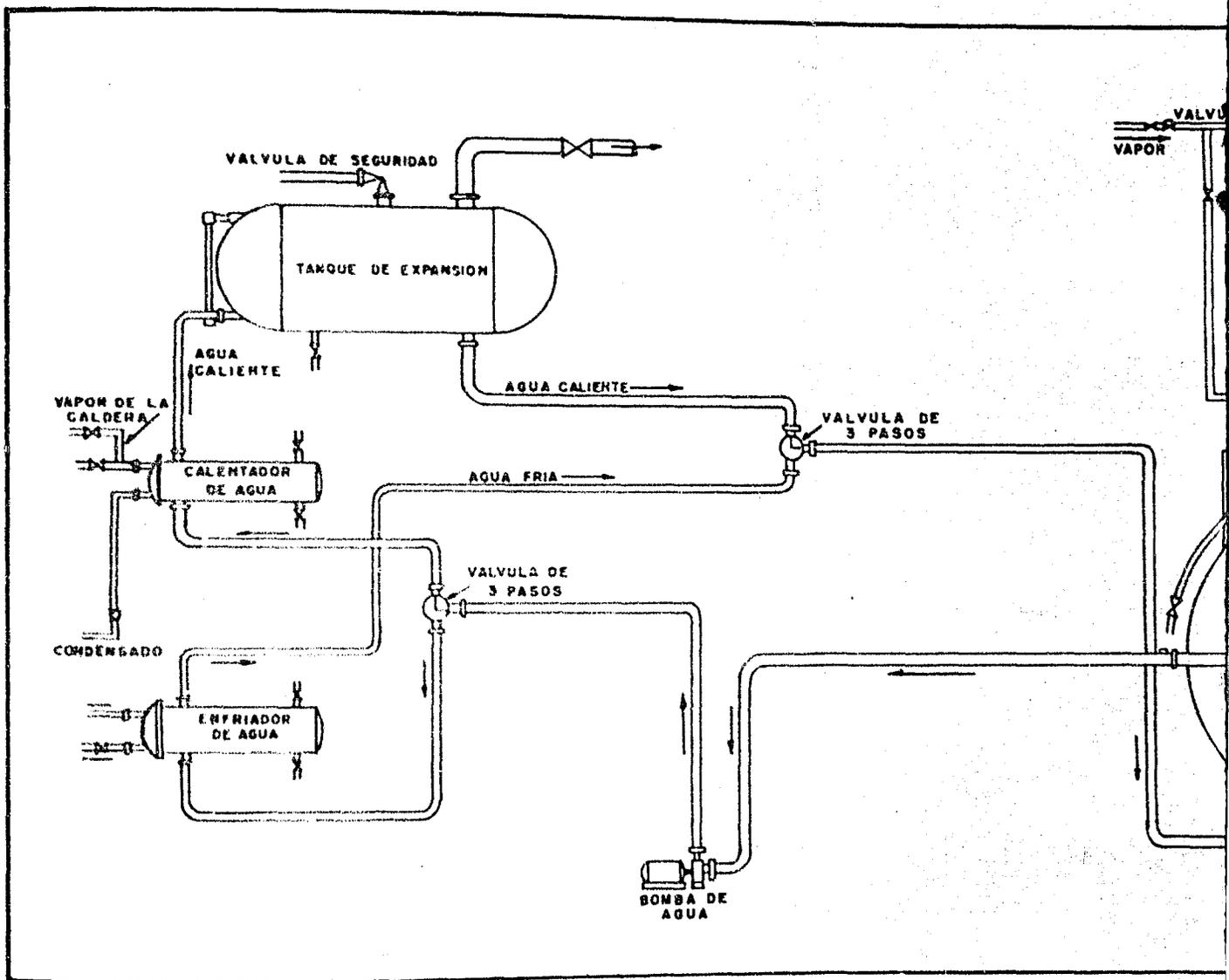
La selección del sistema más conveniente, ya sea

de eyectores o de bombas de vacío, depende de sus costos correspondientes. En los eyectores, tanto el costo inicial como el de mantenimiento son bajos, en las bombas de vacío estos costos son relativamente altos, sin embargo en los primeros el consumo de vapor y agua de enfriamiento es muy elevado, cosa que no sucede en el segundo caso.

Los eyectores de vapor dan mejores resultados cuando se usan con una carga constante, es decir para grandes instalaciones que tengan suficientes unidades de secado, de manera que la operación del sistema de vacío sea prácticamente continua, o bien cuando se tiene un suministro de agua y vapor barato.

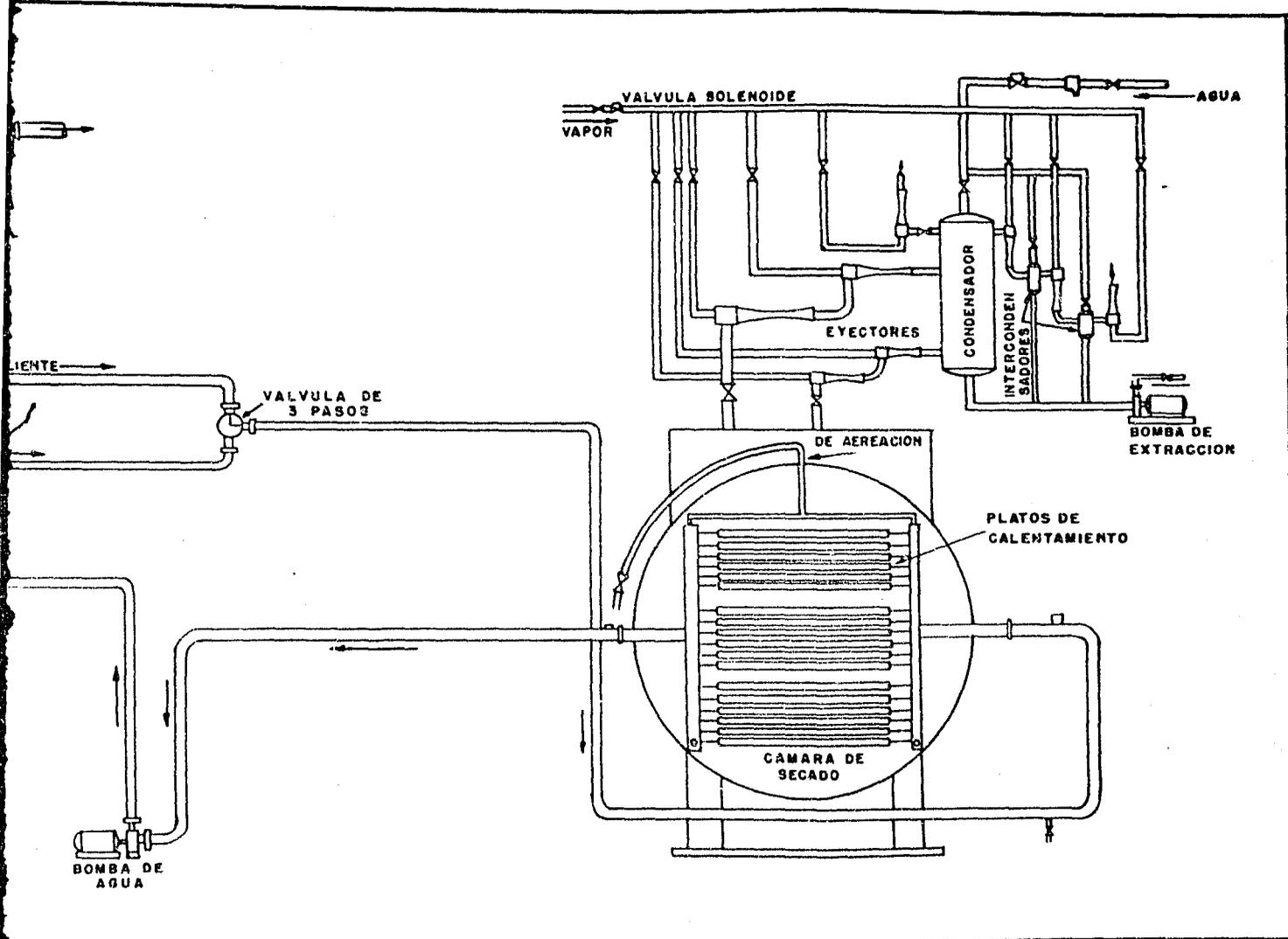
Cuando no se dispone de estos servicios baratos, o la instalación es pequeña, resulta más conveniente usar bombas de vacío y eliminar el vapor de agua formado por medio de un condensador. En este último caso, el tiempo necesario para descongelar el condensador al término del ciclo de secado representa una pérdida de capacidad, por lo que se debe procurar que la descongelación sea rápida.

Otro factor muy importante, cuando se usan eyectores de vapor, es la temperatura del agua de enfriamiento disponible, ya que el vacío que se pueda obtener depende en gran parte de la temperatura del agua de enfriamiento que se use en el intercondensador del sistema de eyectores; mientras más baja sea dicha temperatura mayor será el vacío producido. Para ciertos lugares cuyas condiciones climatológicas no permitan el uso eficiente de una torre de enfriamiento, será necesario un equipo de refrigeración para asegurar la temperatura requerida en el agua de enfriamiento. La selección del método de congelación depende del producto que se va a deshidratar. La autocongelación sólo es conveniente para alimentos líquidos tales como jugos de frutas y para carne precocida. La mayor parte de los alimentos sólidos se deben congelar antes de ser sometidos al vacío. Dicha congelación, para que sea rápida, se deberá efectuar



U. N. A. M.
Esc. Nat. de Ciencias Químicas
1962

DIAGRAMA DE FLUJO DE UN SISTEMA DE SE
CON EYECTORES DE VAPO

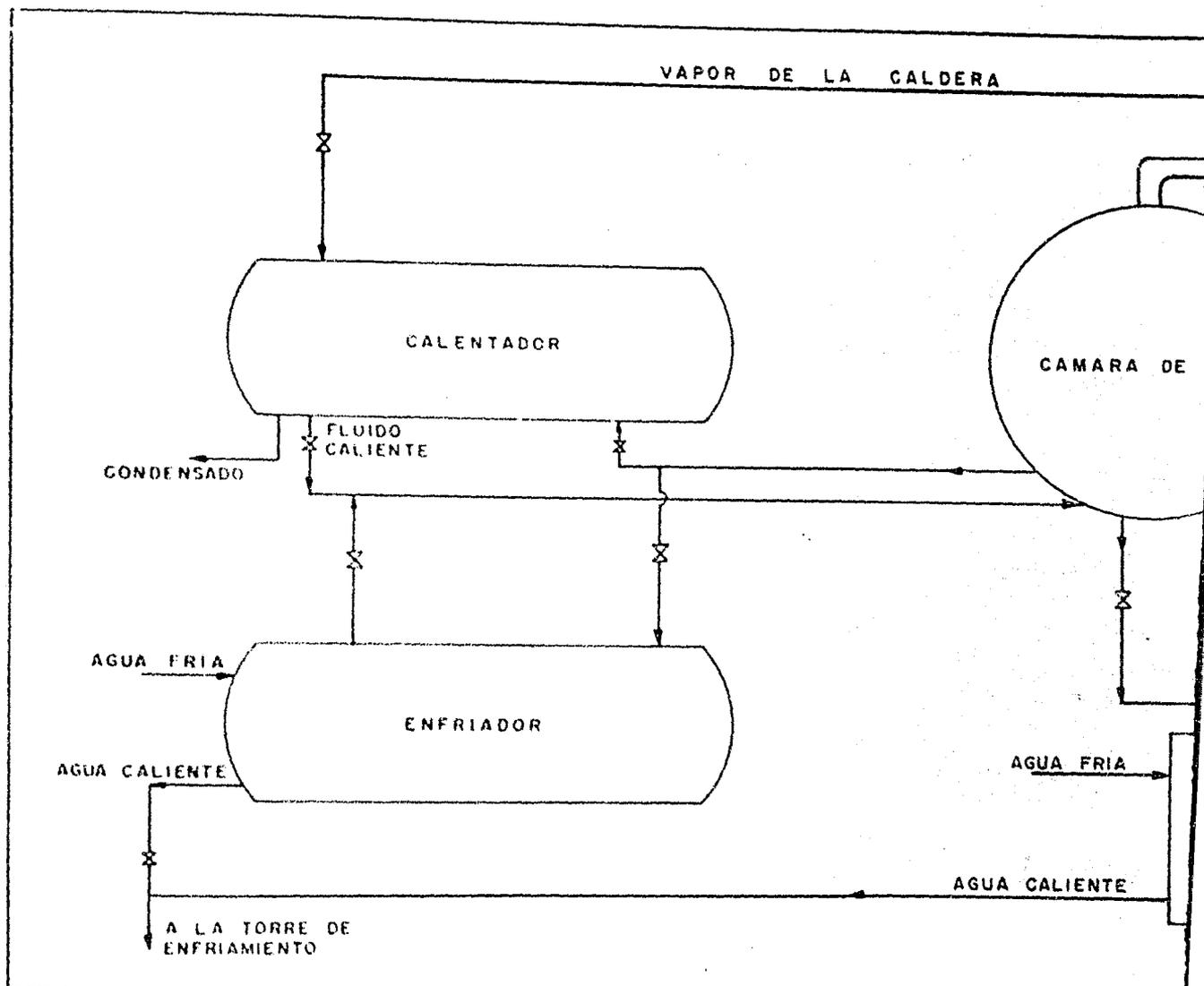


MA DE FLUJO DE UN SISTEMA DE SECADO POR SUBLIMACION
CON EYECTORES DE VAPOR (2)

JULIO GARCIA G

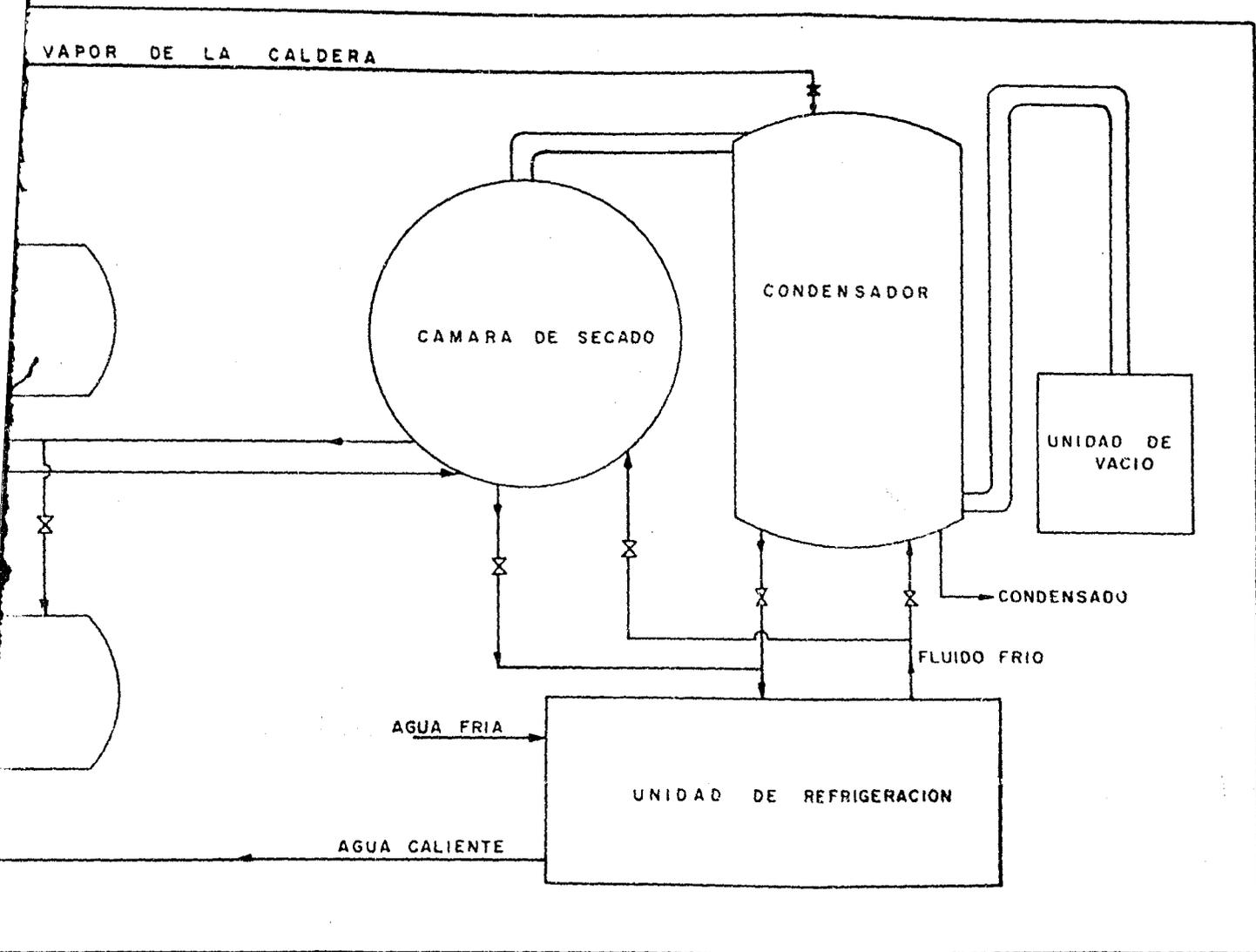
Tesis Profesional

Figura No 1



U N A M
Esc. Nal. de Ciencias Químicas
1962

DIAGRAMA DE FLUJO DE UN SISTEMA DE
CON BOMBAS DE VAC



DE FLUJO DE UN SISTEMA DE SECADO POR SUBLIMACION
CON BOMBAS DE VACIO

JULIO GARCIA G
Tesis Profesional
Figura No 2

en 40 o 60 minutos o menos, para materiales que tengan un espesor de dos centímetros (8).

Para ciertos materiales a los que se pueda aplicar la autocongelación, el sistema que usa eyectores de vapor tiene la ventaja de reducir la inversión inicial, debido a que no requiere equipo de refrigeración.

En las figuras 1 y 2 se muestran dos diagramas de flujo característicos, uno de ellos para sistemas que usan eyectores de vapor y otro para los sistemas que usan bombas.

En dichos diagramas se puede observar que el fluido que suministre el calor necesario para la sublimación en la cámara de secado, se calienta por medio de vapor en un calentador y que existe además un enfriador del mismo fluido con objeto de bajar la temperatura del material en la cámara de secado cuando la deshidratación ha llegado a su etapa final.

El fluido que se usa para calentar los platos movibles o charolas, es generalmente un líquido con un punto de congelación muy bajo; esto es con objeto de que el mismo fluido se haga pasar por la planta de refrigeración y sirva para congelar el material al hacerse circular a través de las charolas o platos de calentamiento movibles, en la misma cámara de vacío, antes de empezar la operación de secado, como se puede ver en la figura No. 2. En caso que la congelación se lleve a cabo fuera de la cámara de secado o bien el producto se someta a la autocongelación, generalmente el fluido de calentamiento que se usa es agua, tal como se puede ver en la figura No. 1

El agua que se usa, ya sea en el condensador del sistema de eyectores o en el enfriamiento del equipo de refrigeración, se hace pasar a través de una torre de enfriamiento y se recircula nuevamente al sistema.

A continuación se hará una evaluación de tres sistemas diferentes de secado por sublimación: un sistema de calentamiento por liofilización acelerada y que usa eyectores de vapor (2), otro sistema de liofilización acelerada empleando bombas de vacío (9) y un tercer sistema, de calentamiento por contacto simple y también con bombas de vacío (10).

Evaluación de tres sistemas de secado por sublimación.

Con fines ilustrativos se efectuó la comparación de los tres sistemas, con base en la deshidratación de plátano, tanto por la relativa importancia en términos del valor de este fruto, cuya producción ocupa en nuestro país el segundo lugar en la producción de frutos, como por representar un amplio grupo de productos similares a los cuales se les puede aplicar este sistema de secado.

En estos equipos se pueden acomodar alrededor de 15 Kg. de plátano, cortado en rodajas de 1.6 cms. de espesor (5/8 pulgada), por cada metro cuadrado de área de secado (3 libras de plátano por pié cuadrado).

Para los fines de evaluación, la planta se supone situada en la ciudad de Villahermosa, por ser el estado de Tabasco un importante centro productor de plátano, se consideran 280 días de trabajo efectivos al año, operando las veinticuatro horas del día.

Los datos sobre los costos de los equipos de secado, así como los consumos de electricidad, vapor y agua y los tiempos de secado, se obtuvieron directamente en los catálogos de los fabricantes de esta clase de equipo.

Se supone que la congelación del producto se lleva a cabo en la misma cámara de secado en los tres sistemas, de manera que el tiempo de operación se considera como la suma de los tiempos de secado, de carga y descarga y de congelación del producto. En el caso de los dos sistemas con

bombas de vacío habrá que añadir a estos tiempos el correspondiente a la descongelación del condensador.

El tiempo necesario para la congelación rápida del producto es de 40 minutos, el tiempo de carga y descarga de 20 minutos; el tiempo de descongelación del condensador es de 1 hora, por otra parte el tiempo de secado en los sistemas de liofilización acelerada es de 6 horas y en el sistema de contacto simple es de 10 horas, así que los tiempos de operación serán de 7 horas para el sistema de liofilización acelerada con eyectores de vapor, de 8 horas para el sistema de liofilización acelerada con bombas de vacío y de 12 horas para el sistema de contacto simple, también con bombas de vacío.

Los tres sistemas se van a comparar con base en la misma capacidad de producción suficiente para deshidratar 4091 Kg. de plátano al día (9 000 libras al día). Por lo tanto, el equipo que se usa en los dos sistemas de liofilización acelerada requiere un área de 93 metros cuadrados (1 000 pies cuadrados) y el sistema de calentamiento por contacto simple requiere un equipo con una área de 139 metros cuadrados (1 500 pies cuadrados).

Dada la naturaleza del producto que se va a deshidratar, los tres sistemas requieren de una planta de refrigeración para la precongelación del producto, en el caso de los dos sistemas que usan bombas de vacío, dicho equipo está incluido en el equipo de secado, pero el sistema que usa eyectores necesita la planta de refrigeración como un equipo adicional.

El agua de enfriamiento que requiere el condensador del sistema de eyectores de vapor debe tener una temperatura máxima de 18°C (65°F). Debido a las condiciones climatológicas de la ciudad de Villahermosa, en donde la temperatura media anual es de 26°C (79°F) y la humedad relativa es mayor de 80%, la temperatura de bulbo húmedo correspondiente es de 23°C (74°F), por lo que no

es posible usar una torre de enfriamiento para obtener la temperatura del agua recomendable para la operación. Por lo anterior, es necesario proveer al sistema de eyectores de vapor de algún otro medio de enfriamiento de agua, este medio puede ser una planta de refrigeración mecánica o una planta de refrigeración al vacío por medio de eyectores de vapor. En esta evaluación se revisarán las dos posibilidades.

Como equipo adicional en los tres sistemas se deben incluir las calderas y las torres de enfriamiento, las primeras para producir el vapor que se use en los eyectores, en el calentamiento del material y en la descongelación del condensador; las segundas se emplean para enfriar el agua que se usa en los equipos de refrigeración.

En la tabla No. 2, se dan las principales características de los dos sistemas con bombas de vacío y de las dos alternativas del sistema con eyectores de vapor, ya sea que el enfriamiento del agua se realice por medio de refrigeración mecánica o por medio de refrigeración al vacío. En esta tabla se incluye el equipo adicional necesario en cada uno de los sistemas, así como su consumo de vapor, agua y electricidad.

La capacidad y consumo de energía de los equipos de refrigeración, torres de enfriamiento y calderas fueron calculados tomando como base la información referente al consumo de agua y vapor, proporcionada en los catálogos de los fabricantes de los equipos respectivos.

Estimación de la inversión total. El capital fijo estimado para cada uno de los sistemas se tomó como la suma de los siguientes conceptos: equipo de secado, instalación, tubería e instrumentación, terreno y edificios, ingeniería y construcción e instalación de los equipos adicionales necesarios.

Todos los costos aquí considerados se refieren a los equipos puestos en la ciudad de Villahermosa, para lo cual

PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE DIFERENTES SISTEMAS DE SECADO POR SUBLIMACION

C O N C E P T O	SISTEMA CON EYECTORES DE VA POR. LIOFILIZACION ACELERA- DA. ENFRIAMIENTO DE AGUA -- POR MEDIO DE REFRIGERACION AL VACIO.	SISTEMA CON EYECTORES DE POR. LIOFILIZACION ACELERA DA. ENFRIAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE REFRIGERACION MECANICA.
CAPACIDAD DIARIA. MATERIAL HÚMEDO.	4091 Kg.	4091 Kg.
TIEMPO DE OPERACIÓN.	7 HORAS	7 HORAS
OPERACIONES POR DÍA.	3	3
AREA DE SECADO	93 m ² .	93 m ² .
EQUIPO NECESARIO PARA REA LIZAR LA PRECONGELACIÓN - DEL PRODUCTO.	PLANTA DE REFRIGERACIÓN ME CÁNICA DE 63 TONELADAS DE REFRIGERACION.	NO NECESITA. EL PRECONG ELAMIENTO SE EFECTÚA CON PLANTA DE REFRIGERACIÓN SE USA PARA ENFRIAR EL A
EQUIPO PARA ENFRIAR EL -- AGUA QUE SE USA EN EL CON DENSADOR DEL SISTEMA DE - EYECTORES.	PLANTA DE REFRIGERACIÓN AL VACIO POR MEDIO DE EYECTO RES DE VAPOR DE 420 TONELA DAS DE REFRIGERACIÓN.	PLANTA DE REFRIGERACIÓN CÁNICA DE 420 TONELADAS REFRIGERACIÓN.
EQUIPO NECESARIO PARA EN FRIAR EL AGUA QUE SE USA EN LOS EQUIPOS DE REFRIGE RACIÓN.	TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA 4015 KG/MIN. DE AGUA.	TORRE DE ENFRIAMIENTO 3030 KG/MIN. DE AGUA.
EQUIPO NECESARIO PARA PRO DUCIR EL VAPOR.	CALDERA DE 14 000 LB. DE VAPOR/HR.	CALDERA DE 5 200 LB. DE VAPOR/HR
CONSUMO DE VAPOR POR DÍA.	113 TONELADAS.	42 TONELADAS.
CONSUMO DE ELECTRICIDAD - POR DÍA.	2440 KWH.	8330 KWH.
CONSUMO DE AGUA POR DÍA.	131 TONELADAS.	68 TONELADAS.

T A B L A N º. 2

DE DIFERENTES SISTEMAS DE SECADO POR SUBLIMACION Y CONSUMO DE VAPOR, ELECTRICIDAD Y AGUA.

EYECTORES DE VA LIZACION ACELERA- MIENTO DE AGUA -- DE REFRIGERACION	SISTEMA CON EYECTORES DE VA POR. LIOFILIZACION ACELERA- DA. ENFRIAMIENTO DE AGUA -- POR MEDIO DE REFRIGERACION MECANICA.	SISTEMA CON BOMBAS DE VA- CIO. LIOFILIZACION ACELE- RADA.	SISTEMA CON BOMBAS DE VA CIO Y CALENTAMIENTO POR CONTACTO SIMPLE.
1 Kg.	4091 Kg.	4091 Kg.	4091 Kg.
HORAS	7 HORAS	8 HORAS	12 HORAS
3	3	3	2
3 m ² .	93 m ² .	93 m ² .	139 m ² .
REFRIGERACIÓN ME 63 TONELADAS DE CION.	NO NECESITA. EL PRECONGE- LAMIENTO SE EFECTÚA CON LA PLANTA DE REFRIGERACIÓN QUE SE USA PARA ENFRIAR EL AGUA.	NO NECESITA. EL PRECONGE- LAMIENTO SE EFECTÚA CON LA PLANTA DE REFRIGERACIÓN -- QUE SE USA PARA ENFRIAR EL CONDENSADOR.	NO NECESITA. EL PRECONGE- LAMIENTO SE EFECTÚA CON LA PLANTA DE REFRIGERACIÓN -- QUE SE USA PARA ENFRIAR EL CONDENSADOR.
REFRIGERACIÓN AL MEDIO DE EYECTO- POR DE 420 TONELA RIGERACIÓN.	PLANTA DE REFRIGERACIÓN ME- CÁNICA DE 420 TONELADAS DE REFRIGERACIÓN.	NO SE NECESITA.	NO SE NECESITA.
ENFRIAMIENTO PARA MIN. DE AGUA.	TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA 3030 Kg/MIN. DE AGUA.	TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA 628 Kg/MIN. DE AGUA.	TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA 524 Kg/MIN. DE AGUA.
A DE B. DE VAPOR/HR.	CALDERA DE 5 200 LB. DE VAPOR/HR.	CALDERA DE 700 LB. DE VAPOR/HR.	CALDERA DE 700 LB. DE VAPOR/HR.
TONELADAS.	42 TONELADAS.	4,5 TONELADAS	4,3 TONELADAS.
0 KWH.	8330 KWH.	3550 KWH.	3050 KWH.
TONELADAS.	68 TONELADAS.	16 TONELADAS	12 TONELADAS

se ha sumado al costo original de los equipos un 15% correspondiente a transportes y derechos de importación,

El costo de instalación, tubería e instrumentación relativos al equipo de secado se tomaron como el 60% del costo de dicho equipo para todos los sistemas.

El costo del terreno y edificios se tomó considerando una superficie total de 1 600 metros cuadrados, a \$ 100, 00 c/u y un precio promedio de \$ 400, 00 por cada metro cuadrado de construcción . Se estima que la superficie construida es de 960 m².

El costo de ingeniería y construcción se consideró como el 20% del equipo de secado, mientras que todos los costos del equipo adicional se refieren al equipo ya instalado. Los costos de operación se actualizaron por medio de los índices de costo de equipo de Marshall y Stevens (14).

Para la estimación del capital de trabajo, se consideró un precio de \$ 400.00 por tonelada de plátano en racimo (15), del cual el 60% en peso corresponde a pulpa (16).

Con los datos anteriores se estimó el capital necesario para materias primas para un mes. A la cantidad anterior se le adicionó el capital relativo a producto almacenado, cuentas por cobrar y dinero en caja: estos dos primeros conceptos se consideraron como el costo de operación y de materias primas correspondientes a un mes, mientras que el último de estos conceptos se consideró como el costo de operación de un mes.

Debido a que el capital de trabajo depende del material que se va a deshidratar, las cifras presentadas en este estudio son de carácter ilustrativo, ya que se incluyen para dar una idea del orden de magnitud de dicho capi-

tal para la deshidratación de plátano.

En la tabla No. 3 se muestra la estimación de la inversión total para los sistemas considerados. Al lado del costo de cada equipo hay un número entre paréntesis que indica la fuente de la cual se obtuvieron dichos costos.

Estimación de los costos de operación. - El costo de operación estimado para cada uno de los sistemas se tomó como la suma de los siguientes conceptos: mano de obra, supervisión, materiales indirectos, laboratorio de control, mantenimiento, gastos varios, depreciación, seguros e impuestos, intereses, administración, electricidad y vapor.

Debido a que la capacidad de producción en los sistemas considerados es la misma, se tomaron las necesidades de mano de obra igual para todos los sistemas. La mano de obra necesaria para la preparación del material antes de someterse al secado se basó en los datos proporcionados por un fabricante de equipo para secado por aspersión (17), método por el cual el plátano se deshidrata desde hace tiempo, por lo que ya se tiene experiencia sobre el particular. Para mondar el plátano y cortarlo se requieren ocho operarios por turno, a los cuales se les considera un sueldo de \$ 15,00 diarios. Se necesitan dos operarios más por turno para la operación de secado, un bodeguero y otro por turno para el manejo y cuidado de la caldera y torre de enfriamiento, a los cuales se les consideró un sueldo de \$ 20,00 diarios. Además, se requieren 3 jefes de turno por día con un sueldo de \$ 30,00 diarios.

En estas condiciones el gasto diario por concepto de mano de obra es de \$ 650,00, a esta cantidad se le aumenta un 20% por concepto de prestaciones, de manera que el gasto por día relativo a la mano de obra es de \$ 780,00 incluyendo prestaciones.

En la estimación del costo de mano de obra, no se

TABLA Nº. 3

ESTIMACION DE LA INVERSION TOTAL EN DIFERENTES SISTEMAS DE SECA

CONCEPTO	CIFRAS EN PESOS.			
	LIOFILIZACION ACELERADA. EYECTORES DE VAPOR Y EN- FRIAMIENTO DE AGUA POR ME- DIO DE REFRIGERACION AL - VACIO.		LIOFILIZACION ACELERADA. - EYECTORES DE VAPOR Y EN- - FRIAMIENTO DE AGUA POR ME- DIO DE REFRIGERACION MECA- NICA.	LIOFILIZACION ACELERADA. - EYECTORES DE VAPOR Y EN- - FRIAMIENTO DE AGUA POR ME- DIO DE REFRIGERACION MECA- NICA.
EQUIPO DE SECADO	2 510 000		2 510 000	
INSTALACIÓN, TUBERÍA E INS- TRUMENTACIÓN DEL EQUIPO DE SECADO.	1 506 000		1 506 000	
TERRENO Y EDIFICIOS	544 000		544 000	
INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN	502 000		502 000	
EQUIPO DE REFRIGERACIÓN PA- RA PRECONGELAR EL PRODUCTO (A)	580 000	(11)		
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PA- RA ENFRIAR EL AGUA HASTA - 18°C (65°F). (A)	620 000	(11)	775 000	(11)
CALDERA (A)	320 000	(12)	240 000	(12)
TORRE DE ENFRIAMIENTO (A)	137 000	(13)	90 000	(13)
CAPITAL FIJO	6 719 000		6 167 000	
CAPITAL DE TRABAJO	1 118 400		1 027 800	
INVERSION TOTAL	7 837 400		7 194 800	

(A) EL COSTO INDICADO INCLUYE INSTALACIÓN

T A B L A N º. 3

LA INVERSION TOTAL EN DIFERENTES SISTEMAS DE SECADO POR SUBLIMACION,

C I F R A S E N P E S O S.

ACELERADA. VAPOR Y EN- AGUA POR ME- ERACION AL -	LIOFILIZACION ACELERADA. - EYECTORES DE VAPOR Y EN- FRIAMIENTO DE AGUA POR ME- DIO DE REFRIGERACION MECA- NICA.	LIOFILIZACION ACELERADA. BOMBAS DE VACIO.	CALENTAMIENTO POR CONTAC- TO SIMPLE. BOMBAS DE VA- CIO.
000	2 510 000	3 013 000	3 594 000
000	1 506 000	1 808 000	2 156 000
000	544 000	544 000	544 000
000	502 000	603 000	719 000
000 (11)			
000 (11)	775 000 (11)		
000 (12)	240 000 (12)	70 000 (12)	70 000 (12)
000 (13)	90 000 (13)	19 000 (13)	16 000 (13)
000	6 167 000	6 057 000	7 099 000
3 400	1 027 800	867 500	934 600
7 400	7 194 800	6 924 500	8 033 600

consideró el gasto por concepto de horas extras debido a la diferencia que existe en la jornada máxima de trabajo en los turnos diurno, mixto y nocturno. En cuanto al concepto de supervisión se considera un técnico que gane \$3,500.00 mensuales.

Los materiales indirectos se tomaron en un 15% de la mano de obra sin incluir prestaciones, para el laboratorio de control se consideró un gasto mensual de \$2,000.00.

En el renglón correspondiente a mantenimiento, el gasto relativo se tomó de un 4% anual de capital fijo para los sistemas con bombas de vacío, es decir mayor que para los sistemas que usan eyectores de vapor a los cuales se les asignó un 2% anual de capital fijo correspondiente.

Los gastos varios considerados aquí incluyen vigilancia y superintendencia, se tomaron en un 30% de la mano de obra sin incluir prestaciones.

Los gastos por concepto de depreciación corresponden en todos los sistemas al 10% anual del capital fijo correspondiente y los relativos a seguros e impuesto predial al 2% anual del mismo capital. Para la estimación de los intereses, éstos se consideran como el 10% anual de la inversión total.

El gasto correspondiente a la administración se consideró de \$4,000.00 mensuales. Los gastos de los servicios se basaron en los siguientes datos: vapor a \$0.03 por kilogramo, electricidad \$0.25 por kwh y agua a \$0.10 por metro cúbico. El gasto correspondiente al agua resultó tan pequeño que se incluyó en el renglón de mantenimiento.

En la Tabla No. 4 se dan las estimaciones del costo de operación para los sistemas considerados, en ella se puede observar que los costos de operación más elevados

son los correspondientes a los sistemas que usan eyectores de vapor; esto es debido principalmente al gran consumo de vapor y energía eléctrica en dichos sistemas ya que el gasto por concepto de estos servicios significa, en el sistema que usa refrigeración al vacío, cerca del 35% del costo de operación, mientras que en el sistema que usa la refrigeración mecánica comprende cerca del 32% del costo de operación correspondiente.

Los costos de operación más bajos se indican en los dos sistemas que usan bombas de vacío, correspondiendo al sistema de calentamiento por contacto simple un mayor costo de operación. Esta circunstancia se debe principalmente al valor más elevado de los renglones correspondientes a la depreciación, mantenimiento e intereses, en el caso del sistema de calentamiento por contacto simple, representan alrededor del 69% del costo de operación y en el caso del sistema de liofilización acelerada representan cerca del 66% de ese mismo costo.

En la Tabla No. 5 se presentan diversos costos de operación unitarios para los diferentes sistemas estudiados.

Selección del sistema más conveniente. - Para la selección del sistema más conveniente, se usará el criterio del incremento del valor del producto. Este método se aplica generalmente en la evaluación de cualquier parte de una empresa, ya sea que se trate de seleccionar un equipo, proceso, sistema o sección de la misma. De esta manera se evita recurrir al cálculo de utilidades para aplicar el criterio de rentabilidad.

En este método se supone una determinada rentabilidad para estimar el monto de las utilidades que deberían obtenerse con una determinada inversión. Por definición la rentabilidad es la relación de las utilidades percibidas durante un período determinado, generalmen

T A B L A N o . 4
ESTIMACION DEL COSTO DE OPERACION EN DIFERENTES SISTEMAS DE :

C O N C E P T O	LIOFILIZACION ACELERADA, - EYECTORES DE VAPOR Y ENFRIA- MIENTO DE AGUA POR MEDIO DE REFRIGERACION AL VACIO.		LIOFILIZACION ACELERADA, - EYECTORES DE VAPOR Y EN- - FRIAMIENTO DE AGUA POR ME- DIO DE REFRIGERACION MECA- NICA.		LIOF BOMB
	P E S O S P O R D I A.	P O R C I E N T O D E L C O S T O - D E O P E R A C I O N	P E S O S P O R D I A	P O R C I E N T O D E L C O S T O - D E O P E R A C I O N	P
MANO DE OBRA	780.00	6.72	780.00	7.46	7
SUPERVISIÓN	135.00	1.16	135.00	1.29	1
MATERIALES INDIRECTOS	93.00	0.80	93.00	0.89	
LABORATORIO DE CONTROL	77.00	0.66	77.00	0.74	
MANTENIMIENTO	493.00	4.25	448.00	4.29	
GASTOS VARIOS	195.00	1.68	195.00	1.87	
DEPRECIACIÓN	2 400.00	20.67	2 203.00	21.10	2
SEGUROS E IMPUESTOS	480.00	4.13	441.00	4.22	
INTERESES	2 799.00	24.10	2 570.00	24.60	2
ADMINISTRACIÓN	154.00	1.33	154.00	1.47	
ELECTRICIDAD	610.00	5.25	2 084.00	20.00	
VAPOR	3 394.00	29.23	1 260.00	12.06	
COSTO DE OPERACION POR DIA	11 610.00	100.00	10 440.00	100.00	

T A B L A N º, 4

DEL COSTO DE OPERACION EN DIFERENTES SISTEMAS DE SECADO POR SUBLIMACION.

ACELERADA.- VAPOR Y ENFRÍA A POR MEDIO DE AL VACIO.		LIOFILIZACION ACCELERADA, - EYECTORES DE VAPOR Y EN- FRIAMIENTO DE AGUA POR ME- DIO DE REFRIGERACION MECA- NICA.		LIOFILIZACION ACCELERADA, BOMBAS DE VACIO.		CALENTAMIENTO POR CONTACTO SIMPLE. BOMBAS DE VACIO.	
POR CIENTO DEL COSTO - DE OPERACIÓN	P E S O S P O R D Í A	POR CIENTO DEL COSTO - DE OPERACIÓN	P E S O S P O R D Í A	POR CIENTO DEL COSTO - DE OPERACIÓN	P E S O S P O R D Í A	POR CIENTO DEL COSTO - DE OPERACIÓN	P E S O S P O R D Í A
6.72	780.00	7.46	780.00	9.30	780.00	8.43	
1.16	135.00	1.29	135.00	1.61	135.00	1.46	
0.80	93.00	0.89	93.00	1.10	93.00	1.00	
0.66	77.00	0.74	77.00	0.92	77.00	0.83	
4.25	448.00	4.29	867.00	10.33	1 016.00	10.98	
1.68	195.00	1.87	195.00	2.32	195.00	2.10	
20.67	2 203.00	21.10	2 163.00	25.77	2 535.00	27.39	
4.13	441.00	4.22	434.00	5.17	508.00	5.49	
24.10	2 570.00	24.60	2 473.00	29.46	2 869.00	31.00	
1.33	154.00	1.47	154.00	1.83	154.00	1.66	
5.25	2 084.00	20.00	888.00	10.58	763.00	8.24	
29.23	1 260.00	12.06	135.00	1.61	129.00	1.39	
100.00	10 440.00	100.00	8 394.00	100.00	9 254.00	100.00	

T A B L A N º. 5

DIVERSOS COSTOS DE OPERACION UNITARIOS PARA DIFERENTES SISTEMAS DE SECADO POR SUBLIMACION.

COSTOS DE OPERACION.	C I F R A S E N P E S O S			
	LIOfILIZACION ACELERADA. EYECTORES DE VAPOR. ENFRIAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE REFRIGERACION AL VACIO.	LIOfILIZACION ACELERADA. EYECTORES DE VAPOR. ENFRIAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE REFRIGERACION MECANICA.	LIOfILIZACION ACELERADA. BOMBAS DE VACIO.	CALENTAMIENTO POR CONTACTO SIMPLE. BOMBAS DE VACIO.
POR DÍA	11 610	10 449	8 394	9 254
POR AÑO	3 250 800	2 926 000	2 350 000	2 591 000
POR KILOGRAMO DE MATERIA PRIMA	2.84	2.56	2.06	2.26
POR KILOGRAMO DE PRODUCTO	9.33	8.40	6.75	7.44
POR KILOGRAMO DE AGUA ELIMINADA	4.07	3.67	2.95	3.25

te un año, a la inversión correspondiente.

$$R = \frac{U}{I} \quad (13)$$

A su vez las utilidades se pueden considerar como la diferencia entre el precio de venta y el costo de producción.

$$U = P \text{ venta} - C_p \quad (14)$$

El costo de producción es igual a la suma del precio de la materia prima más el costo de operación.

$$U = P \text{ venta} - (C_{op} + P_m) \quad (15)$$

El incremento del valor del producto ΔV es la diferencia entre el precio de venta y el precio de la materia prima o sea $P \text{ venta} - P_m$. De la ecuación (15) se tiene:

$$\Delta V = U + C_{op} \quad (16)$$

De las ecuaciones (13) y (16) se deriva la siguiente:

$$\Delta V = RI + C_{op} \quad (17)$$

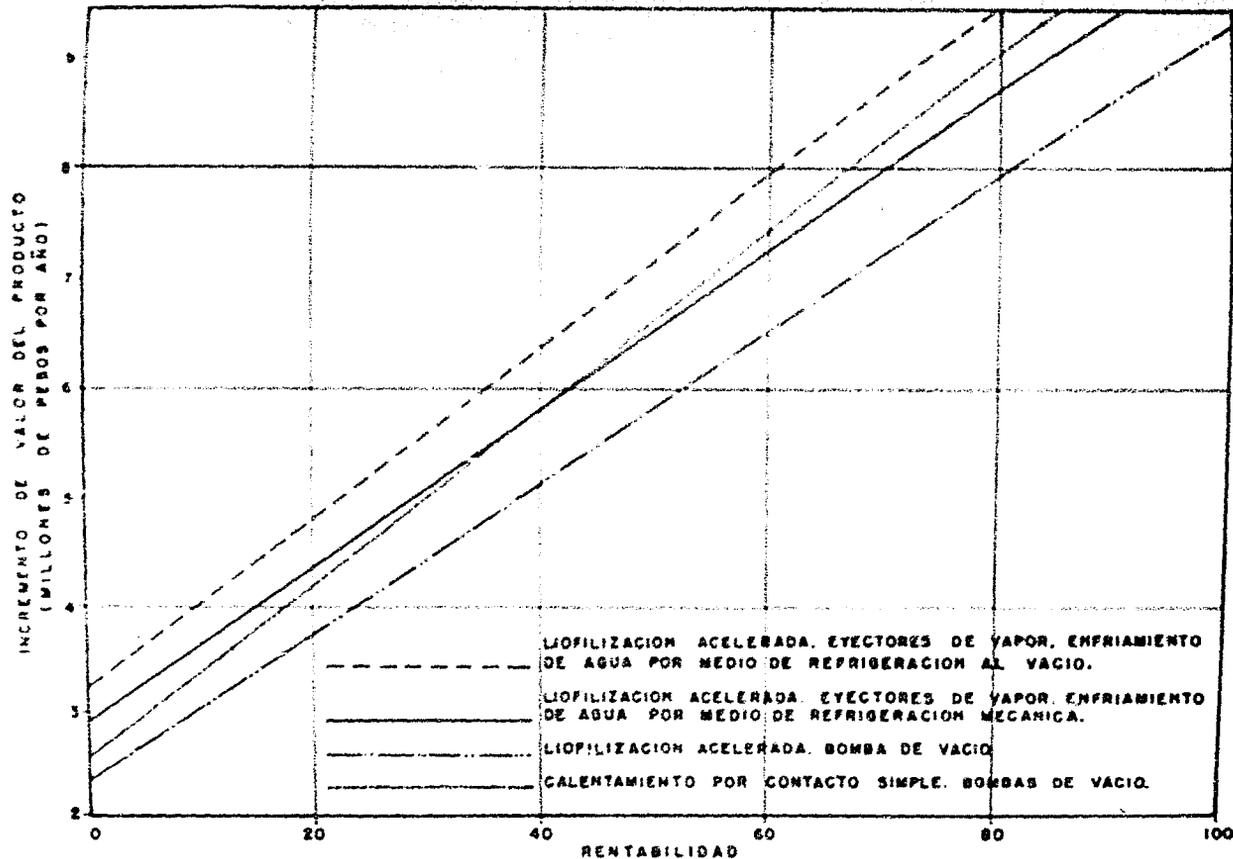
Con la ecuación (17) se determinan los incrementos de valor del producto a diferentes rentabilidades para los sistemas que están evaluando, y aquél que tenga el menor incremento de valor a una determinada rentabilidad, corresponderá al sistema más conveniente, puesto que un incremento de valor menor representa un menor precio de venta del producto a una rentabilidad dada.

Los incrementos de valor del producto, calculados para los sistemas que aquí se estudian aparecen en la Tabla No. 6 y están graficados contra la rentabilidad en la Gráfica No. 1.

En dicha gráfica se puede ver que para todas las rentabilidades, los incrementos de valor más pequeños son los correspondientes al sistema de liofilización acelerada y bombas de vacío, mientras que corresponden al sistema de liofilización acelerada con eyectores de vapor y refrigeración al vacío por medio de eyectores los incrementos más elevados de valor del producto.

El incremento del valor del producto para el sistema de bombas de vacío y calentamiento por contacto simple, así como el correspondiente al de liofilización acelerada por medio de eyectores de vapor y refrigeración mecánica, resultan iguales para la rentabilidad de 40%; abajo de esa rentabilidad, el sistema más conveniente de estos, es el de bombas de vacío y calentamiento por contacto simple. Se puede observar también que para un mismo incremento de valor del producto en todos los sistemas, el sistema de liofilización acelerada y bombas de vacío es el que tiene mayor rentabilidad.

Debido a lo anterior, el sistema de secado por sublimación que utiliza bombas de vacío y liofilización acelerada es el más conveniente para la deshidratación del plátano, para la capacidad y situación de la planta antes especificada.



U. N. A. M.	RELACION DEL INCREMENTO DE VALOR DEL PRODUCTO Y LA RENTABILIDAD PARA DIFERENTES SISTEMAS DE SECADO POR SUBLIMACION	JULIO GARCIA G
Esc. Nat. de Ciencias Químicas		Tesis Profesional
1952		Gráfico No 1

T A B L A N O. 6

INCREMENTOS DE VALOR DEL PRODUCTO A DIVERSAS RENTABILIDADES
PARA DIFERENTES SISTEMAS DE SECADO POR SUBLIMACION.

RENTABILIDAD EN POR CIENTO.	INCREMENTO DEL VALOR ANUAL EN PESOS			
	LIOFILIZACION ACE- LERADA. EJECTORES DE VAPOR. ENFRIA- MIENTO DE AGUA POR MEDIO DE REFRIGERA- CION AL VACIO.	LIOFILIZACION ACE- LERADA. EJECTORES DE VAPOR. ENFRIA- MIENTO DE AGUA POR MEDIO DE REFRIGER- ACION MECANICA.	LIOFILIZACION ACE- LERADA. BOMBAS - DE VACIO.	CALENTAMIENTO POR CONTACTO SIMPLE. BOMBAS DE VACIO.
5	3 643 000	3 282 000	2 697 000	2 993 000
10	4 035 000	3 642 000	3 043 000	3 394 000
20	4 818 000	4 362 000	3 735 000	4 198 000
25	5 210 000	4 721 000	4 081 000	4 599 000
30	5 602 000	5 081 000	4 428 000	5 001 000
40	6 386 000	5 801 000	5 120 000	5 805 000
50	7 164 000	6 520 000	5 813 000	6 608 000

**IV. - DISCUSION DE LOS
RESULTADOS.**

Analizando la ecuación (11) se puede ver que el tiempo de secado en las operaciones de deshidratación por sublimación, depende de las propiedades del material que se va a secar, de las condiciones de operación y de la presión de vapor de hielo en el material; esta última a su vez depende de la rapidez con que le sea suministrado el calor, es decir del método de calentamiento que se use, ya que al proporcionar mayor energía al sistema se eleva la temperatura y consecuentemente la presión de vapor.

Debido a que en las operaciones de secado por sublimación las propiedades del material son las que determinan las condiciones de operación, el tiempo de secado depende en última instancia de dichas propiedades y del método de calentamiento que se use para suministrar el calor necesario.

El costo de operación depende principalmente del tiempo de secado. Esto se debe a que para una capacidad del equipo determinada, un sistema que necesite menos tiempo de secado tendrá una capacidad de producción mayor que otro sistema que necesite más tiempo. En el primer caso, el costo de operación por unidad de producto, será menor que en el segundo.

El punto eutéctico del material tiene mucha importancia sobre el consumo de energía eléctrica o vapor y agua. Esto se explica porque dicho punto es el que determina la temperatura a la cual se debe mantener la superficie de hielo del material durante el secado; y la presión de vapor del hielo es la que determina a su vez, la presión que debe existir dentro de la cámara de secado. Di-

cha presión debe ser la mitad o la cuarta parte de la presión de vapor del hielo. Por consiguiente, mientras menor sea la temperatura eutéctica, menor deberá ser la presión en la cámara de secado y mayor el consumo de energía eléctrica o vapor y agua en la unidad de vacío.

Por otra parte, mientras menor sea la temperatura eutéctica, tendrá que ser menor la temperatura en el condensador, en caso que se use una bomba de vacío, y como ya se sabe, mientras mayor sea la diferencia entre la temperatura alta y la temperatura baja en un ciclo de refrigeración, la compresora de dicho equipo deberá efectuar un trabajo mayor.

De lo dicho hasta aquí se puede ver que el costo de operación va a variar de acuerdo con las propiedades del material, con el punto eutéctico del mismo y con el método de calentamiento.

Ahora bien, el punto eutéctico en una gran cantidad de productos alimenticios es alrededor de -6°C (22°F) (18), que equivale a una presión de vapor del hielo de 3mm. de mercurio, en las operaciones de secado por sublimación que usan el método de calentamiento de liofilización acelerada, ya sea con bombas o eyectores de vapor, la presión de trabajo más común en la cámara de secado es de 1mm. de mercurio, que es la necesaria para deshidratar aquellos productos cuya temperatura eutéctica sea de -6°C .

El tiempo de secado en las operaciones de liofilización acelerada varía desde 4 hasta 7 horas. Ahora bien, suponiendo que el tiempo de secado para el plátano represente aproximadamente la media aritmética de los tiempos anteriores y que su punto eutéctico correspondiente sea de -6°C , el cual se tomó aquí como base para efectuar los cálculos, entonces los costos de operación que se obtuvieron para la deshidratación de plátano se pueden considerar como valores promedio representativos para gran número

de productos, cuando se usa el método de liofilización ace
lerada, ya que el costo de operación para un método de ca
lentamiento dado va a variar de acuerdo con el tiempo de
secado y el punto eutéctico del material.

Hay que hacer notar que los resultados que se ob-
tuvieron son solo válidos para las condiciones climatoló-
gicas que se consideraron y es obvio que para unas condi
ciones distintas los resultados serían diferentes, así co
mo los costos de operación para los sistemas con eyecto
res de vapor serían más bajos.

Por lo anterior se puede derivar como conclusión,
que los sistemas que usen bombas de vacío son preferi-
bles para sitios que tengan condiciones climatológicas de
tipo tropical, como las aquí consideradas.

En general, tanto el costo de los equipos, como el
costo de operación del secado por sublimación, son más
altos que aquellos correspondientes a otros sistemas de
secado, sin embargo estos altos costos quedan justifica-
dos por la calidad del producto.

Aunque ya existen gran número de casas construc-
toras de equipo, que continuamente realizan investigacio-
nes con objeto de hacer de este método de secado un pro-
cedimiento más eficiente y barato y de obtener los datos
necesarios para el diseño de equipo, aún hay necesidad de
mayor número de investigaciones sobre el particular. En
opinión de J. C. Harper y de A. L. Tappel (1), la investi-
gación necesaria para el desarrollo de esta técnica se pue-
de dividir en dos grupos: investigación sobre el proceso
e investigación sobre los productos.

INVESTIGACION SOBRE EL PROCESO

1. - Medición de propiedades físicas de varios pro-
ductos alimenticios liofilizados. Tanto las permeabilida-

des al flujo de vapor, como las conductividades térmicas, son necesarias para el diseño de equipo.

2. - Determinaciones de la velocidad de secado bajo condiciones cuidadosamente controladas, que son necesarias para confirmar las ecuaciones de velocidad de secado que se obtengan.

3. - Investigar cuidadosamente la aplicación del calentamiento dieléctrico, con el objeto de encontrar condiciones que permitan la generación de suficiente calor sin la ionización de gas en la cámara de secado. Determinar las propiedades dieléctricas de los alimentos congelados.

4. - Desarrollo de equipo específicamente diseñado para que llene los requisitos necesarios para el secado por sublimación de los productos alimenticios; particularmente necesario es el desarrollo de métodos continuos.

5. - Estudio económico de la producción en gran escala de alimentos liofilizados.

INVESTIGACION SOBRE LOS PRODUCTOS

1. - Evaluación tecnológica de la aplicación del secado por sublimación a mayor cantidad de productos alimenticios, especialmente legumbres y frutas. Medición de la rehidratación y otras propiedades, así como una evaluación organoléptica del color, olor y sabor de legumbres y frutas.

2. - Mejores métodos de empaque en películas flexibles, para tiempos muy largos de almacenamiento.

3. - Mejores métodos de rehidratación con objeto de abatir el tiempo necesario para realizarla.

4. - Estudios químicos de los mecanismos de deterioro durante el almacenamiento de carnes, pollo, pescado,

huevos, frutas y legumbres liofilizadas.

5. - Evaluación del mercado para alimentos liofilizados, especialmente carnes.

V. - CONCLUSIONES.

La importancia de la aplicación del secado por sublimación productos alimenticios, deriva de las características de los productos que se obtienen por este sistema.

Las propiedades alimenticias de estos productos, así como sus propiedades organolépticas y su forma y aspecto con respecto a los mismos productos frescos, varían, en general, de una manera apenas apreciable.

Para un método dado de calentamiento, los sistemas de secado por sublimación se pueden dividir en dos grupos: aquéllos que usan eyectores de vapor y los que usan bombas de vacío. La elección entre un sistema con eyectores o un sistema con bombas de vacío, depende de los costos respectivos.

El costo de operación, para una determinada capacidad, va a variar de acuerdo con la naturaleza del material que se va a deshidratar, con su temperatura eutéctica y con el método de calentamiento que se use.

Para la deshidratación de plátano y la capacidad aquí considerada, así como para la localización de la planta que corresponde a lugares cuyas condiciones de humedad y temperatura atmosféricas son altas, el sistema de secado por sublimación más conveniente es el que utiliza bombas de vacío y método de calentamiento de liofilización acelerada. Para condiciones diferentes existe la posibilidad de que el sistema más conveniente sea distinto al antes señalado.

La inversión requerida para la implantación de esta clase de secado es alta, por lo que una de las características del secado por sublimación, es que los renglones del costo de operación correspondientes a depreciación e intereses, representan un porcentaje muy elevado de dicho costo.

El costo de operación en los sistemas de secado por sublimación es alto, sin embargo los productos que se obtienen son de más alta calidad y mejor aceptación, que los deshidratados por cualquiera otra técnica.

Los resultados obtenidos en esta tesis sólo dan una idea preliminar de los costos de operación, por lo que es de esperarse que estos datos sean útiles para posteriores investigaciones sobre el particular; en consecuencia es recomendable que tales investigaciones sean enfocadas también hacia los sistemas continuos, con objeto de tener una idea más completa de la conveniencia de la aplicación del secado por sublimación en México.

VI. - APENDICE.

1. - Balance de material.

El balance de material tuvo por objeto conocer las cantidades de agua eliminada y de producto seco obtenido. La pulpa de plátano tiene una humedad de más o menos 70% (base húmeda) (16) y la humedad del producto es de 2% (base seca). La capacidad de producción en los sistemas con siderados es de 4 091 Kg. de pulpa de plátano húmeda por día. Si se tiene que:

Humedad de la pulpa de plátano (Base húmeda)	$X_h = 0.7$
Humedad de la pulpa de plátano (Base seca)	$X_o = 2.33$
Humedad de producto (Base seca)	$X_1 = 0.02$
Cantidad de pulpa de plátano por día	$M_o = 4\ 091\text{Kg}$
Cantidad de pulpa seca de plátano	S
Cantidad de agua eliminada	ΔW
Cantidad de producto seco	M
(Las humedades están dadas en Lb. de agua por Lb. de material)	1

La cantidad de agua eliminada por día se calculó de la siguiente manera:

$$S = M_o (1 - X_h) = 4\ 091\ \text{Kg.} \times (1 - 0.7) = 1\ 227\ \text{Kg.}$$

$$W = S (X_o - X_1) = 1\ 227\ \text{Kg.} \times (2.33 - 0.02) = 2\ 847\ \text{Kg.}$$

La cantidad de producto secado se calculó como sigue:

$$M_1 = M_o - \Delta W = 4\ 091\ \text{Kg.} - 2\ 847\ \text{Kg.} = 1\ 244\ \text{Kg.}$$

2. - Cálculo del equipo de refrigeración mecánica, necesario para pre congelar el producto, en el sistema con evector de vapor, liofilización acelerada y enfriamiento de agua por medio de refrigeración al vacío.

El producto húmedo se va a enfriar de la temperatura ambiente (t_a), a la temperatura eutéctica (t_c), para congelar el agua contenida y después se va a enfriar hasta una temperatura más baja (t_b). El calor específico del plátano, arriba del punto eutéctico, es de $0.8\ \text{BTU/lb}^{\circ}\text{F}$ (C_a), abajo de dicho punto es de $0.42\ \text{BTU/lb}^{\circ}\text{F}$ (C_b) y el calor latente de fusión (C_f) es de $144\ \text{BTU/lb.}$ (19). La cantidad de material que se tiene que congelar en un día es de $9\ 000\ \text{lb.}$, pero la cantidad de material que se debe congelar en 40 minutos antes de cada carga a la cámara de secado es de $3\ 000\ \text{lb.}$ (M), lo cual representa un contenido de agua de $2\ 100\ \text{lb.}$ (W). La cantidad de calor (Q) que hay que eliminar al producto se calcula de la siguiente manera:

$$Q = MC_a (t_a - t_c) + WC_f + MC_b (t_c - t_b)$$

$$Q = 3000 \times 0.80 \times (79 - 22) + 2100 \times 144 + 3000 \times 0.43 (22 - 15)$$

$$Q = 449\ 000\ \text{BTU/40min.}$$

La cantidad de calor que hay que eliminar por hora en la cámara de secado será:

$$(449\ 000\ \text{BTU/40min.}) \times (60\ \text{min/hora}) = 674\ 000\ \text{BTU/hr.}$$

Si se toma en cuenta que el fluido refrigerante siempre absorbe calor antes de llegar a la cámara de secado, la capacidad de la planta de refrigeración tiene que ser mayor.

La cantidad de producto secado se calculó como sigue:

$$M_1 = M_0 - \Delta W = 4\,091 \text{ Kg.} - 2\,847 \text{ Kg.} = 1\,244 \text{ Kg.}$$

2. - Cálculo del equipo de refrigeración mecánica, necesario para precongazar el producto, en el sistema con eyectores de vapor, liofilización acelerada y enfriamiento de agua por medio de refrigeración al vacío.

El producto húmedo se va a enfriar de la temperatura ambiente (t_a), a la temperatura eutéctica (t_c), para congelar el agua contenida y después se va a enfriar hasta una temperatura más baja (t_b). El calor específico del plátano, arriba del punto eutéctico, es de 0.8 BTU/lb^oF (C_a), abajo de dicho punto es de 0.42 BTU/lb^oF (C_b) y el calor latente de fusión (C_f) es de 144 BTU/lb. (19). La cantidad de material que se tiene que congelar en un día es de 9 000 lb., pero la cantidad de material que se debe congelar en 40 minutos antes de cada carga a la cámara de secado es de 3 000 lb. (M), lo cual representa un contenido de agua de 2 100 lb.(W). La cantidad de calor (Q) que hay que eliminar al producto se calcula de la siguiente manera:

$$Q = MC_a (t_a - t_c) + WC_f + M C_b (t_c - t_b)$$

$$Q = 3000 \times 0.80 \times (79 - 22) + 2100 \times 144 + 3000 \times 0.43 (22 - 15)$$

$$Q = 449\,000 \text{ BTU/40min.}$$

La cantidad de calor que hay que eliminar por hora en la cámara de secado será:

$$(449\,000 \text{ BTU/40min.}) \times (60 \text{ min/hora}) = 673\,500 \text{ BTU/hr.}$$

Si se toma en cuenta que el fluido refrigerante siempre absorbe calor antes de llegar a la cámara de secado, la capacidad de la planta de refrigeración tiene que ser mayor.

Para calcular la cantidad real de calor que se debe eliminar en la planta de refrigeración (Q_r), se supone que la cantidad de calor que se elimina en la cámara de secado representa el 90% de la primera cantidad.

$$Q_r = \frac{674\ 000}{0.9} = 750\ 000 \text{ BTU/hr.}$$

Como una tonelada de refrigeración es igual a 12 000 BTU/hr., el número de toneladas de refrigeración (N) se calculó como sigue:

$$N = \frac{Q_r}{12\ 000} = \frac{750\ 000}{12\ 000} = 63$$

La potencia del motor de la compresora, se calculó con la siguiente fórmula:

$$\text{HP} = N \frac{4.72}{B \times \eta}$$

En donde B es el coeficiente de funcionamiento del refrigerante usado, en este caso amoníaco, cuyo coeficiente de funciona teórico es de 4.85. La eficiencia de la compresora η se tomo como 90%.

$$\text{HP} = 63 \frac{4.72}{4.85 \times 0.9} = 68$$

Cuya equivalencia en KW es la siguiente:

$$\frac{68 \text{ HP}}{1.34} = 50 \text{ KW}$$

Como la congelación dura 40 minutos y ésta se lleva a cabo tres veces, el tiempo requerido durante el día es de 2 horas. Por lo tanto el consumo de energía eléctrica por día para la congelación es:

$$50 \text{ KW} \times 2 \text{ horas} = 100 \text{ KWH.}$$

La cantidad de agua necesaria en el condensador del equipo de refrigeración, se calcula suponiendo un grado de enfriamiento de 15°F .

El calor que hay que eliminar en el condensador (Q_c), es igual a la suma del calor Q_r y el trabajo desarrollado por la compresora:

$$Q_c = \bar{\zeta} + Q_r$$

El trabajo desarrollado por la compresora se calculó de la siguiente manera:

$$\bar{\zeta} = \frac{Q_r}{B} = \frac{750\,000}{4.85} = 180\,000 \text{ BTU/hr.}$$

$$Q_c = 180\,000 + 750\,000 = 930\,000 \text{ BTU/hr.}$$

La cantidad de agua (W) será:

$$W = \frac{930\,000}{1 \times 15} = 62\,500 \text{ lb/hr.}$$

3. - Cálculo del equipo de refrigeración mecánico necesario para enfriar agua hasta 65°F .

El sistema de eyectores productor del vacío requiere 300 000 lb/hr de agua a 65°F (2), como en dicho sistema el agua de enfriamiento se calienta 15°F , la cantidad de calor que hay que eliminar en el equipo de refrigeración, haciendo las mismas consideraciones que en el cálculo del equipo anterior, será:

$$Q_r = \frac{300\,000 \times 15}{0.9} = \frac{5\,020\,000 \text{ BTU}}{\text{hr}}$$

La cantidad de toneladas de refrigeración (N) se cal-

cula de la siguiente manera:

$$N = \frac{Q_r}{12\ 000} = \frac{5\ 020\ 000}{12\ 000} = 420$$

La potencia del motor de la compresora será:

$$HP = N \frac{4.72}{B \times \eta} = 420 \frac{4.72}{4.85 \times 0.9} = 450$$

y su equivalencia en KW es la siguiente:

$$\frac{450\ HP}{1.34} = 336\ KW$$

Como el equipo de refrigeración se usa durante 18 horas en el día, el consumo de energía eléctrica por día será:

$$336\ KW \times 18\ \text{horas} = 6\ 000\ KWH$$

La cantidad de agua necesaria en el condensador de este equipo de refrigeración, se calcula suponiendo un grado de enfriamiento de 15°F.

$$Q_c = \delta + Q_r$$

$$\delta = \frac{Q_r}{B} = \frac{5\ 020\ 000}{4.85} = 1\ 040\ 000\ BTU/hr$$

$$Q_c = 5\ 020\ 000 + 1\ 040\ 000 = 6\ 060\ 000\ BTU/hr.$$

La cantidad de agua (W) será igual a:

$$W = \frac{Q_c}{15} = \frac{6\ 060\ 000}{15} = 400\ 000\ \frac{lb}{hr}$$

4. - Cálculo del equipo de refrigeración por eyectores de vapor necesario para enfriar agua hasta 65°F.

Como en el caso anterior, se requiere enfriar 300 000 lb/hr. de agua hasta 65°F, con un grado de enfriamiento de 15°F, por lo que es necesario un equipo de refrigeración de 420 toneladas de refrigeración.

En Cost Engineering de Zimmerman y Lavine de abril de 1957, se dan los consumos de agua y vapor por tonelada de refrigeración.

El consumo de agua es de 2.93 galones por minuto por cada tonelada de refrigeración. El consumo de vapor para el eyector primario es de 18.7 libras por hora por cada tonelada de refrigeración, y el consumo de vapor en el eyector secundario es de 775 libras por hora.

La cantidad de agua necesaria es de:

$$420 \text{ Ton.} \times 2.93 \frac{\text{Gal}}{\text{min.} \times \text{ton.}} = 1\,230 \frac{\text{Gal}}{\text{min}}$$

$$1\,230 \frac{\text{Gal}}{\text{min}} \times 3.785 \frac{\text{Kg}}{\text{gal}} \times \frac{60 \text{ min.}}{\text{hr.}} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{\text{Kg}} = 61\,000 \frac{\text{lb}}{\text{hr}}$$

La cantidad de vapor necesaria es:

$$420 \text{ Ton} \times 18.7 \text{ lb/hr} = 7\,850 \text{ lb/hr, para el eyector primario y para el eyector secundario es de } 775 \text{ lb/hr.}$$

$$\text{La cantidad de vapor total es } 775 + 7\,850 = 8\,625 \text{ lb/hr.}$$

El agua que se pierde por evaporación (W_e) en el equipo de refrigeración, se calculó como sigue: $1 \text{ lb}^s \times 15 = W_e \times \lambda$ donde λ es el calor latente de evaporación a 65°F.

$$W_e = \frac{15}{1\,054} = 0.0143 \frac{\text{lb. agua evaporada}}{\text{lb. agua alimentada}}$$

$$\frac{0.0143}{1-0.0143} = 0.0146 \quad \begin{array}{l} \text{lb. agua evaporada} \\ \text{lb. agua enfriada} \end{array}$$

$$W_e = 0.0146 \times 300\,000 = 4\,380 \quad \begin{array}{l} \text{lb. agua evaporada} \\ \text{hr.} \end{array}$$

5. - Cálculo de las torres de enfriamiento.

Las condiciones del aire en todos los casos van a ser las mismas por lo que la determinación de la cantidad de agua por unidad de aire empleado (W/G), así como el volúmen húmedo del aire (V_h), es válido para todos los ca sos.

t	=	Temperatura de bulbo seco del aire,	79° F
t^s	=	Temperatura de bulbo húmedo del aire,	74° F
H_r^w	=	Humedad relativa,	80%
$(t_o - t_1)$	=	Grado de enfriamiento del agua,	15° F
$t_i - t_w$	=	Aproximación a la temperatura de bulbo húmedo,	10° F
t_1	=	Temperatura de salida del agua,	84° F
t_o	=	Temperatura de entrada del agua,	99° F

Para calcular W/G, primero se determinó (W/G) máximo, con la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{W}{G}\right)_{\text{máx.}} = \frac{E_{t_o} - E_{t_w}}{t_o - t_1}$$

E_{t_o} es la entalpia del aire saturado a T_o

E_{t_w} es la entalpia del aire a T_w

$$\left(\frac{W}{G}\right)_{\text{máx.}} = \frac{61 - 30}{15} = 2$$

Con el valor de (W/G) máximo se calculó el valor de W/G de la siguiente manera:

$$\frac{W}{G} = \frac{2}{3} \left(\frac{W}{G} \right)_{\text{máx}} = \frac{2}{3} \times 2 = 1.3$$

El volúmen húmedo del aire a la salida, se calculó con la siguiente fórmula:

$$V_h = 359 \times \frac{460+t}{492} \left(\frac{1}{29} + \frac{H}{18} \right)$$

donde H es la humedad del aire a la salida y t es la temperatura del aire a la salida.

La temperatura del aire a la salida se puede considerar como la media aritmética de la temperatura de entrada y salida del agua (13), o sea 91^oF.

Para encontrar la humedad del aire a la salida, se determinó en primer término la entalpia del aire a la salida por medio de la siguiente fórmula:

$$E_2 = E_{t_w} + \frac{W}{G} (t_0 - t_1)$$

$$E_2 = 30 + 1.3 \times 15 = 49.5 \text{ BTU/lb. aire seco}$$

Con la entalpia y temperatura del aire a la salida, en la carta de humedad se encuentra que H es igual a 0.0315 lb agua
lb. aire seco

Con estos datos se determinó el volúmen húmedo del aire.

$$V_h = 359 \times \frac{460 + 91}{492} \left(\frac{1}{29} + \frac{0.0315}{18} \right) = 14.5 \frac{\text{pies cúbicos}}{\text{lb. aire seco}}$$

Para determinar el consumo de energía de los ventiladores y bombas se consideró que por cada 8 000 pies cúbicos por minuto de aire se requiere de un caballo de fuerza en el ventilador y que en las bombas se requieren siete caballos de fuerza por cada 1 000 galones de agua por minuto (13).

$$HP_{\text{total}} = \frac{G \times Vh}{8\,000 \times 60} + 7 \times \frac{W_a}{1\,000}$$

G es la cantidad de aire seco en libras por hora y W_a es la cantidad de agua en galones por minuto.

A. - Para la torre de enfriamiento usada en el sistema de liofilización acelerada, eyectores de vapor y enfriamiento de agua por medio de refrigeración de eyectores de vapor, se tiene que la cantidad de agua que hay que enfriar es de 614 000 libras por hora o sean 1 230 galones por minuto.

$$G = \frac{614\,000}{1.3} = 471\,000 \text{ lb/hr. de aire seco}$$

$$HP_{\text{total}} = \frac{471\,000 \times 14.5}{8\,000 \times 60} + 7 \frac{1\,230}{1\,000} = 23.0$$

y su equivalencia en Kilowatts es: $\frac{23HP}{1.34} = 17.1 \text{ KW}$

Para determinar las pérdidas de agua en las torres se consideró que por cada 10^oF de enfriamiento hay una pérdida de agua debido a la evaporación y al rociado que equivalen respectivamente al 1% y 0.35%, del agua empleada (20).

Como el grado de enfriamiento en las torres calculadas es de 15^oF, la cantidad de agua que se pierde es de 1.85%.

La cantidad de agua perdida en esta torre será:

$$614\ 000 \times 0.0185 = 11\ 420 \text{ lb/hr de agua}$$

Como las 614 000 lb/hr se hacen circular por la torre durante 18 horas en un día, la cantidad de agua perdida es:

$$11\ 420 \text{ lb/hr} \times 18 \text{ horas} \times \frac{\text{Kg}}{2.2 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ Ton.}}{1\ 000 \text{ Kg.}} = 93.6 \text{ Ton/día}$$

Además se hacen circular 62 500 lb/hr de agua durante 2 horas, correspondientes al equipo de refrigeración para precongelar el producto.

$$62\ 500 \times 0.0185 = 1\ 162 \text{ lb/hr de agua}$$

$$1\ 162 \text{ lb/hr} \times 2 \text{ horas} \times \frac{\text{Kg}}{2.2 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ Ton.}}{1\ 000 \text{ Kg.}} = 1.06 \text{ Ton. métrica/día}$$

Las pérdidas de agua totales por día son:

$$93.6 + 1.06 = 94.66 \text{ toneladas métricas por día}$$

B. - Para la torre de enfriamiento usada en el sistema de liofilización acelerada, eyectores de vapor y enfriamiento de agua por medio de refrigeración mecánica, se tiene que la cantidad de agua que hay que enfriar es de 400 000 libras por hora o sean 800 galones por minuto.

$$G = \frac{400\ 000}{1.3} = 308\ 000 \text{ lb/hr de aire seco}$$

$$\text{HP}_{\text{total}} = \frac{308\ 000 \times 14.5}{8\ 000 \times 60} + 7 \times \frac{800}{1000} = 15.5$$

La equivalencia de esta potencia en kilowatts es la siguiente:

$$\frac{15.5 \text{ HP}}{1.34} = 11.6 \text{ KW}$$

Como esta torre de enfriamiento se usa 20 horas durante el día, el consumo de energía eléctrica es:

$$11.6 \text{ KW} \times 20 \text{ horas} = 232 \text{ KWH por día}$$

Las pérdidas de agua en esta torre son las siguientes:

$$400\,000 \times 0.0185 = 7\,450 \text{ lb/hr de agua}$$

Que equivalen a 68 toneladas métricas por día.

C. - Para la torre de enfriamiento usada en el sistema de liofilización acelerada y bombas de vacío, se tiene que la cantidad de agua que hay que enfriar, según los datos del fabricante de este equipo, es de 166 galones por minuto o sean 82 500 libras por hora.

$$G = \frac{82,500}{1.3} = 63\,500 \text{ lb/hr de aire seco}$$

$$\text{HP}_{\text{total}} = \frac{63\,500 \times 14.5}{8\,000 \times 60} + 7 \times \frac{166}{1\,000} = 3.15$$

La equivalencia de esta potencia en kilowatts es la siguiente:

$$\frac{3.15 \text{ HP}}{1.34} = 2.36 \text{ KW}$$

Como esta torre de enfriamiento se usa 20 horas durante el día, el consumo de energía eléctrica es:

$$2.36 \text{ KW} \times 20 \text{ horas} = 48 \text{ KWH por día}$$

La pérdida de agua en esta torre es la siguiente:

$$82\,500 \times 0.0185 = 1\,550 \text{ lb/hr de agua}$$

que equivalen a 15.2 toneladas métricas por día.

D. - Para la torre de enfriamiento usada en el sistema de calentamiento por contacto simple y bombas de vacío se tiene que la cantidad de agua que hay que enfriar, según los datos del fabricante de este equipo, es de 138 galones por minuto o sean 69 200 libras por hora.

$$G = \frac{69\ 200}{1.3} = 53\ 300 \text{ lb/hr de aire seco}$$

$$\text{HP}_{\text{total}} = \frac{53\ 300 \times 14.5}{8\ 000 \times 60} + 7 \times \frac{138}{1\ 000} = 2.75$$

La equivalencia de esta potencia en KW es la siguiente:

$$\frac{2.75 \text{ HP}}{1.34} = 2 \text{ KW}$$

Como esta torre de enfriamiento se usa 22 horas durante el día, el consumo de energía eléctrica es:

$$2\text{KW} \times 22 \text{ horas} = 44 \text{ KWII por día}$$

La pérdida de agua en esta torre es la siguiente:

$$69\ 200 \times 0.0185 = 1\ 280 \text{ lb/hr de agua}$$

que equivalen a 12.3 toneladas métricas por día.

6. - Consumo de agua, vapor y electricidad en cada uno de los sistemas.

A). - Sistema de liofilización acelerada, eyectores de vapor y enfriamiento de agua por medio de refrigeración de eyectores de vapor.

Los datos proporcionados por el fabricante en el catálogo respectivo son los siguientes:

Para producir el vacío y calentar el material, se requieren 5 200 libras de vapor por hora. La unidad de vacío requiere 300 000 libras de agua de enfriamiento por hora y todo el equipo requiere 2 000 KWH por día.

El consumo total de agua es la suma de la cantidad de agua perdida en la torre de enfriamiento, más el agua perdida en el equipo de refrigeración por eyectores de vapor.

En el equipo de refrigeración se pierden 4 380 libras de agua por hora.

$$4\ 380\ \text{lb/hr} \times 18\ \text{horas} = 78\ 840\ \text{lb/día.}$$

que equivalen a 35.7 toneladas métricas de agua por día.

$$\text{Consumo total del agua} = 35.7 + 94.6 = 130.36\ \text{ton. métricas/día.}$$

El consumo de vapor es la suma del vapor que se requiere para producir el vacío en la cámara de secado y calentar el material, más el vapor que se requiere en el equipo de refrigeración.

$$\text{Consumo total de vapor} = 5\ 200 + 8\ 625 = 13825\ \text{lb/hr}$$

$$13\ 825\ \text{lb/hr} \times 18\ \text{horas} = 248\ 850\ \text{libras por día.}$$

que equivalen a 113 toneladas por día.

El consumo de electricidad es la suma de la energía requerida en el equipo de secado, más la energía necesaria para precongeler el material en el equipo de refrigeración mecánica, más la energía que se requiere en la torre de enfriamiento.

$$\text{Consumo total de electricidad} = 2\ 000 + 100 + 342 = 2\ 442\ \text{KWH por día.}$$

B). - Sistema de liofilización acelerada, eyectores de vapor y enfriamiento de agua por medio de refrigeración mecánica.

Dado que este equipo de secado es el mismo que el anterior y sólo se distingue por el sistema de enfriamiento de agua, los datos proporcionados por el fabricante en el equipo anterior, son válidos para éste.

El consumo total de agua es la cantidad de agua perdida en la torre de enfriamiento:

Consumo total de agua = 68 toneladas métricas por día.

El consumo total de vapor es el necesario para producir el vacío en la cámara de secado y calentar el material.

Consumo total de vapor = $5\ 200\ \text{lb/hr} \times 18\ \text{horas} = 93\ 600\ \text{lb/hr.}$, que equivalen a 42.5 toneladas métricas por día.

El consumo de electricidad es la suma de la energía que se requiere en el equipo de secado, más la energía necesaria para precongeler el material y enfriar el agua en el equipo de refrigeración mecánica, más la energía que se requiere en la torre de enfriamiento.

Consumo total de electricidad:

$2\ 000 + 100 + 6\ 000 + 232 = 8\ 332\ \text{KWH}$ por día.

C). - Sistema de liofilización acelerada y bombas de vacío.

Según los datos proporcionados en el catálogo correspondiente, la cantidad de vapor necesaria es de 4.5 toneladas por día, la cantidad de electricidad necesaria en el equipo de secado y de refrigeración es de 3 500 libras por día,

y la cantidad de agua necesaria es de 82 500 libras por hora.

El consumo total de agua es la cantidad de agua perdida en la torre de enfriamiento:

Consumo total de agua: 15.2 toneladas métricas por día.

El consumo total de vapor es el necesario para calentar el material y descongelar el condensador:

Consumo total de vapor = 4.5 toneladas métricas por día.

El consumo total de electricidad es la suma de la energía que requieren los equipos de secado y refrigeración más la energía que se requiere en la torre de enfriamiento.

Consumo total de electricidad:

$3\ 500 + 48 = 3\ 548$ KWH por día.

D). - Sistema de calentamiento por contacto simple de vacío.

Según los datos proporcionados en el catálogo correspondiente, la cantidad de vapor necesaria es de 4.3 toneladas métricas por día, la cantidad de electricidad necesaria en el equipo de secado y refrigeración es de 3000 KWH por día, y la cantidad de agua necesaria es de 69200 libras por hora.

El consumo total de agua es la cantidad de agua perdida en la torre de enfriamiento:

Consumo total de agua = 12.3 toneladas métricas por día.

El consumo total de vapor es el necesario para calentar el material y descongelar el condensador:

Consumo total de vapor = 4.3 toneladas métricas por día.

El consumo total de electricidad es la suma de la energía que requieren los equipos de secado y refrigeración más la energía que se requiere en la torre de enfriamiento.

Consumo total de electricidad = $3\ 000 + 44 = 3\ 044$ KWH por día.

VII. - BIBLIOGRAFIA.

1. - Harper, J.C. and Tappel, A.L. Freeze - drying of food products.
Advances in food research. Vol. VII
Academic Press Inc., Publishers N. Y. 1957
2. - Petersen, E. Development of dehydration from vacuum contact drying to accelerated freeze drying.
A/S. Atlas Danmark. Copenhagen.
Catalog. No. 1013 e.
3. - Smithies, W. R. and Blakey, T. S. Design of freeze-drying equipment for the dehydration of foodstuffs.
Food Technol. Vol. 13, (1959), pág. 610
4. - Ziemba, J. V. Freeze-drying.
Food Eng. Vol. 32, (1960), pág. 57.
5. - Comunicación personal enviada por la Agencia Comercial Anáhuac, representante de la casa F. J. Stokes Corp. Mayo de 1961.
6. - Burton P Accelerated freeze-drying equipment.
Technical Bulletin, No. 61/724. (1961), Vickers - Armstrongs, Ltd. England.
7. - Petersen, E. Industrial freeze drying of foods.
A/S Atlas Danmark, Copenhagen.
Catálogo No. 3669 e.
8. - Monvoisin, A. Conservación por el frío, pág. 197
Editorial Reverté, S. A.
Barcelona, España. 1953

9. - Vickers - Armstrongs, Ltd. England.
Catálogos de equipo de secado por sublimación, correspondientes a los modelos AFD/1/3, AFD/2/3 y FD/CÓN 1/3.
10. - Del-Vac, Engineering.
Catálogo del equipo de secado por sublimación correspondiente al modelo 2-167262. (1961).
11. - Chilton, C.H. Cost engineering in the process industries
pág. 57.
Mc. Graw - Hill Book Company, Inc. N. Y. 1960.
12. - Combustion Engineering de México, S. A.
Cotizaciones efectuadas en marzo de 1950.
13. - Mc. Kelvey, K. K. and Brooke, M. The industrial cooling tower Elsevier Publishing Company. Amsterdam. 1959.
14. - Peters, M. S. Plant design and economics for chemical engineers.
Mc Graw Hill Book Company, Inc. N. Y. 1958.
15. - Boletín mensual de la dirección de economía agrícola No. 409 pág. 381.
Secretaría de Agricultura y Ganadería. México 1960.
16. - Von Loesecke, H. W. Bananas.
Interscience Publishers, Inc. N. Y. 1949.
17. - Comunicación personal enviada por la agencia Comercial Danesa, representante de la casa Niro Atomizer, Ltd. Copenhagen. Mayo de 1961.
18. - Milleville, H. P. Industry interest mounts in freez drying
Food Processing. Noviembre 1960, pág. 28.
19. - Refrigerating Data Book. Applications Volume Pag. 19-02
The American Society of Refrigerating Engineers. 1952.

20. -Perry, J.H. Manual del ingeniero químico. Tomo 1
pág. 1225 Unión Tipográfica Editorial Hispano Ame-
ricana. México 1958.

BIBLIOGRAFIA GENERAL

21. -Flosdorf, E.W. Freeze drying. Reinhold Publishing
Corporation N. Y. 1949.
22. -Zamzow, W.H. and Marshall, W.R. Jr. Freeze dry-
ing with radiant energy.
Chem. Eng. Progr. Vol. 48, (1952) pág. 21.
23. -Tischer, R.G. and Brockmann, M.C. Freeze drying
ups quality of Q. M. quick serve rations: Quarter mas-
ter food and container institute for the armed forces.
Food. Eng. Vol. 30, (1958) pág. 110.
24. -Patton, P.W. Freeze drying looks up.
Food Eng. Vol. 31 (1959) pág. 78.
25. -Report in Aberdeen Conference. Fundamental aspects
of the dehydration of foodstuffs.
Chem. & Ind. Junio 1958 pág. 825.
26. -Copson, D. A. Microwave sublimation of foods. Freeze
drying.
Food. Technol. Vol. 12, (1958), pág. 270.
27. -Tappel, A. L. Conroy, A., Emerson, M. R. Regier,
L.W. and Stewart, G. F. Freeze dried meat. 1. -
Preparation and properties.
Food. Technol. Vol. 9, (1955), pág. 401.
28. -Hougen, O. A., Watson, D. M. and Ragatz, R. A. Chemi-
cal process principles. Part two: Thermodynamics.
John Wiley & Sons, Inc. N. Y. 1959.

29. -Faires, V. M. Applied thermodynamics.
The Macmillan Company, N. Y. 1955.
30. -Treybal, R. E. Mass - transfer operations.
McGraw - Hill Book Company, Inc. N. Y. 1955.
31. -Getman, F. H. y Daniels, F. Tratado moderno de ffsi
co-química.
Compañía Editorial Continental, S. A., México, D. F.
1955.
32. -Zimmerman, O. T. and Lavine, I. Cost Engineering .
Industrial Research Service, Inc. Dover, New Hamp-
shire. 1959.
33. -Sofer, G. A. and Weingartner, H. C. High Vacuum Tech
nology. Advances in chemical engineering. Vol. 11.
Academic Press Inc., Publishers. N. Y. 1958.