

PRINCIPIOS BASICOS DE LA CRIOCONCENTRACION Y LA LIOFILIZACION

EDUARDO POSADA FLOREZ
Investigador principal, LIQC

1. INTRODUCCION

En este trabajo se presentan los principios básicos que rigen los procesos de conservación de alimentos que utilizan la congelación total o parcial del agua presente en el producto.

La primera parte está dedicada al estudio de la congelación de soluciones binarias y de soluciones complejas, tales como extractos de café, jugos de fruta, fluidos inter e intra celulares, etc.

Esas consideraciones se aplican luego al estudio de la concentración por congelación y de la deshidratación por sublimación o liofilización.

Por último, se examinan algunas aplicaciones prácticas de esos métodos al caso del café, frutas, verduras, etc.

2. BASES DE LA CONGELACION (1, 2)

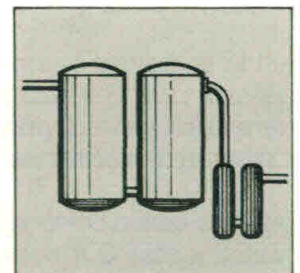
La congelación es uno de los métodos más antiguos para la preservación de alimentos. En el presente siglo, gracias al desarrollo de procesos de refrigeración mecánica, la industria de la congelación se ha convertido en una de las componentes más importantes de la tecnología de alimentos.

En el caso particular de la crioconcentración y la liofilización la manera como se lleve a cabo la congelación previa tiene una influencia decisiva sobre las características del producto final; por esta razón conviene examinar con algún detalle los principios que rigen la congelación tanto del agua pura como de las soluciones complejas.

2.1 Congelación en agua pura (1)

Consideremos el enfriamiento a presión constante entre las temperaturas T_2 y T_3 del diagrama de fases del agua (Figura 1), suponiendo que la rata a la cual se retira calor a la solución permanece constante durante todo el proceso. La variación de la temperatura de la muestra en función de la cantidad de calor retirada, aparece en la Figura 2.

Inicialmente, la temperatura decrece linealmente y el calor retirado es únicamente calor sensible de la muestra. El punto S corresponde al fenómeno de subenfriamiento, es decir, a un descenso de la temperatura por debajo del punto de congelación.



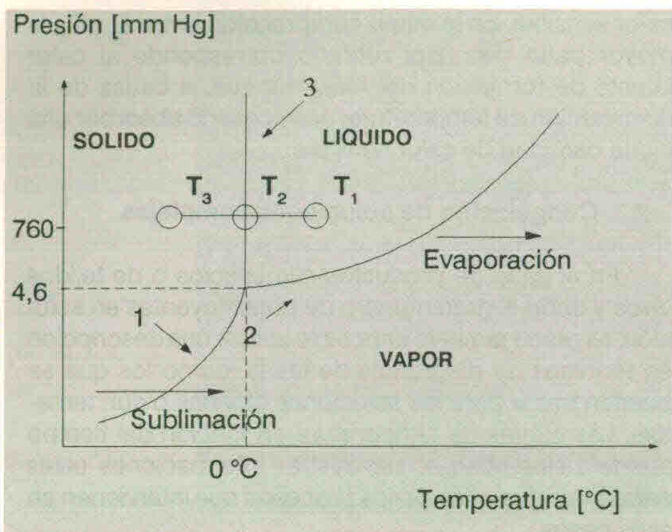


FIGURA 1. Diagrama de fases del agua

Una vez que la cristalización comienza, se observa un rápido aumento de la temperatura hasta T_2 (0°C). A partir de ese momento y durante todo el proceso, la temperatura permanece constante y el calor retirado corresponde al calor latente de congelación.

Una vez que toda el agua presente se ha convertido en hielo, se observa de nuevo un descenso lineal de la temperatura hasta el valor final T_3 . La pendiente de la recta es dos veces mayor que en la primera parte, ya que el valor del calor específico del hielo es la mitad que el del agua.

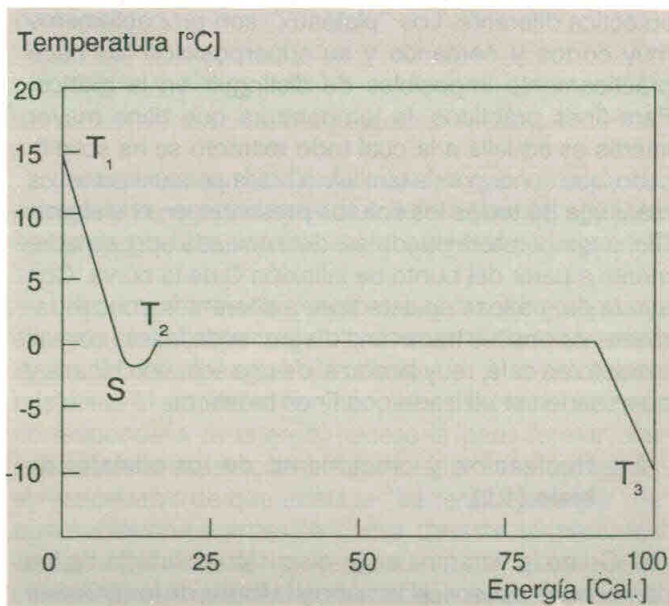


FIGURA 2. Calor retirado

2.2 Congelación de una solución binaria (2)

En la práctica, el estudio de sistemas tales como soluciones acuosas, jugos de frutas, tejidos naturales, etc., reviste un interés mucho mayor que el del agua pura. Las propiedades de dichos sistemas son en general de una gran complejidad, razón por la cual nos limitaremos aquí al estudio de soluciones binarias cuyo comportamiento es en muchos aspectos similar al de los productos naturales. La Figura 3 nos muestra el diagrama temperatura-composición de una solución acuosa-sucrosa.

El diagrama comprende cinco fases principales: Solución pura, hielo más solución, hidrato de sucrosa más solución y sucrosa más hielo. Las líneas de separación son las curvas de equilibrio entre las diferentes fases. Así por ejemplo, la línea AB, llamada curva de congelación, representa el equilibrio entre la solución y la fase sólida del componente presente en exceso (hielo). La línea BC corresponde al equilibrio entre la solución y el hidrato de sucrosa y se denomina la curva de super solubilidad. Estas dos curvas se cortan en el punto B, llamado punto eutéctico, que es la única combinación de concentración y temperatura a la cual la solución puede coexistir con formas sólidas del solvente y del soluto. La temperatura eutéctica (línea E, B, F) es la temperatura por debajo de la cual la totalidad de la solución se solidifica.

La curva AB tiene una pendiente negativa, lo cual indica una disminución de la temperatura de congelación cuando la concentración de soluto aumenta.

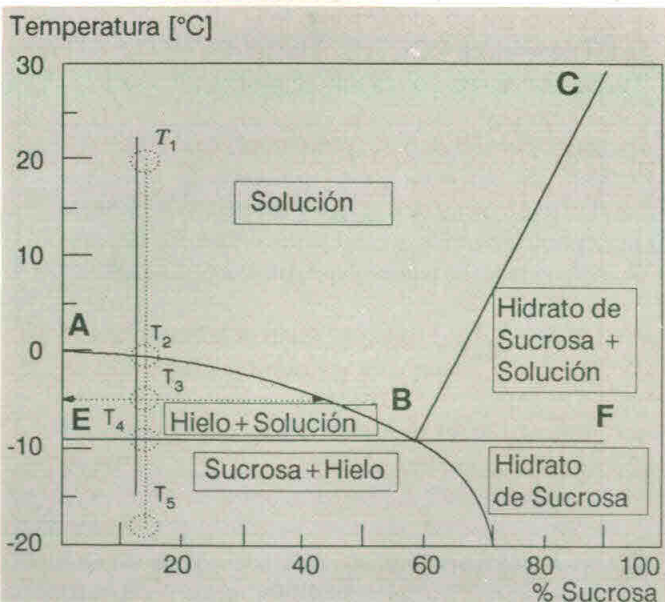


FIGURA 3. Diagrama de fases de una solución binaria.

Igualmente, la pendiente positiva de la curva BC indica un incremento de la solubilidad de la sucrosa al subir la temperatura.

Consideremos ahora el enfriamiento de la solución a partir de la temperatura T_1 hasta la temperatura T_5 de la Figura 3. Como en el caso del agua pura, supondremos que el calor es retirado a una rata constante. La curva de temperatura en función del tiempo aparece en la Figura 4.

Como en el caso del agua pura, la temperatura desciende linealmente en función del tiempo hasta alcanzar el punto de congelación. Se presenta entonces un cierto subenfriamiento que, como veremos más adelante, depende de la rata de enfriamiento. Cuando la cristalización comienza, la temperatura sube bruscamente hasta T_2 que corresponde al valor dado por la curva de congelación. La formación de cristales de hielo produce un aumento de la concentración de la solución restante cuyo punto de congelación disminuye. Por esta razón, al contrario de lo que ocurre con el agua pura, la temperatura no se mantiene constante.

Al llegar a la temperatura eutéctica (T_4) se observa un nuevo subenfriamiento y luego una zona de temperatura constante que corresponde a la formación del sólido eutéctico. Esta etapa no implica ningún aumento de la concentración de la solución ya que se produce la formación simultánea de cristales de hielo y de hidrato de sucrosa, en proporciones iguales.

Una vez terminada la solidificación, la temperatura vuelve a disminuir, pero el calor retirado es únicamente

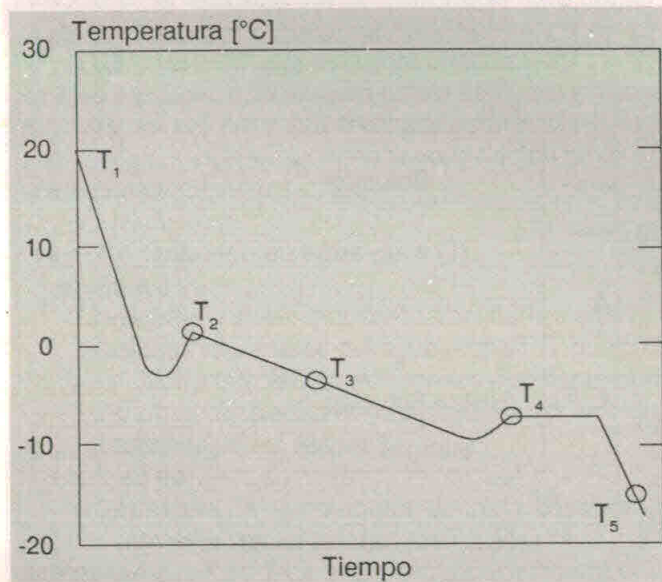


FIGURA 4. Curva de congelación de una solución binaria.

calor sensible. En la etapa comprendida entre T_2 y T_4 , la mayor parte del calor retirado corresponde al calor latente de formación del hielo aunque, a causa de la disminución de temperatura, es necesario absorber una cierta cantidad de calor sensible.

2.3 Congelación de soluciones complejas

En el caso de productos alimenticios o de tejidos vivos y dado el gran número de constituyentes en solución, es prácticamente imposible utilizar una descripción en términos de diagramas de fases, como los que se pueden trazar para las soluciones binarias o aún ternarias. Las curvas de temperatura en función del tiempo pueden, sin embargo, suministrar informaciones útiles para la comprensión de los procesos que intervienen en esos casos.

A título de ejemplo, la Figura 5 muestra la curva de congelación de un extracto de café, determinada experimentalmente. Como en las soluciones estudiadas anteriormente, se observa primero una variación lineal de la temperatura que prosigue hasta el comienzo de la cristalización en el punto S. Se ve luego un brusco aumento de la temperatura hasta el punto B que corresponde a la temperatura de congelación de equilibrio. Al igual que en las soluciones binarias, la temperatura desciende luego progresivamente, a medida que se forman los cristales de hielo y que la solución restante se concentra. En este caso, sin embargo, no se observa el "plateau" correspondiente a la temperatura eutéctica que aparece en las soluciones binarias. La explicación de este hecho reside en el gran número de sustancias presentes en el extracto, cada una de las cuales posee una temperatura eutéctica diferente. Los "plateaux" son probablemente muy cortos y cercanos y su superposición los hace prácticamente imposibles de distinguir en la gráfica. Para fines prácticos, la temperatura que tiene mayor interés es aquella a la cual todo extracto se ha solidificado, que corresponde también a la temperatura eutéctica más baja de todos los solutos presentes en el sistema. Dicha temperatura puede ser determinada aproximadamente a partir del punto de inflexión C de la curva. Con ayuda de gráficas de este tipo, a diferentes concentraciones es posible trazar un "diagrama de fases" para el extracto de café, muy similar al de una solución binaria y que puede ser utilizado con fines prácticos.

2.4 Nucleación y crecimiento de los cristales de hielo (1.2)

Como lo veremos en la discusión detallada de los diferentes procesos, el tamaño y la forma de los cristales de hielo juegan un papel esencial en el desenvolvimiento

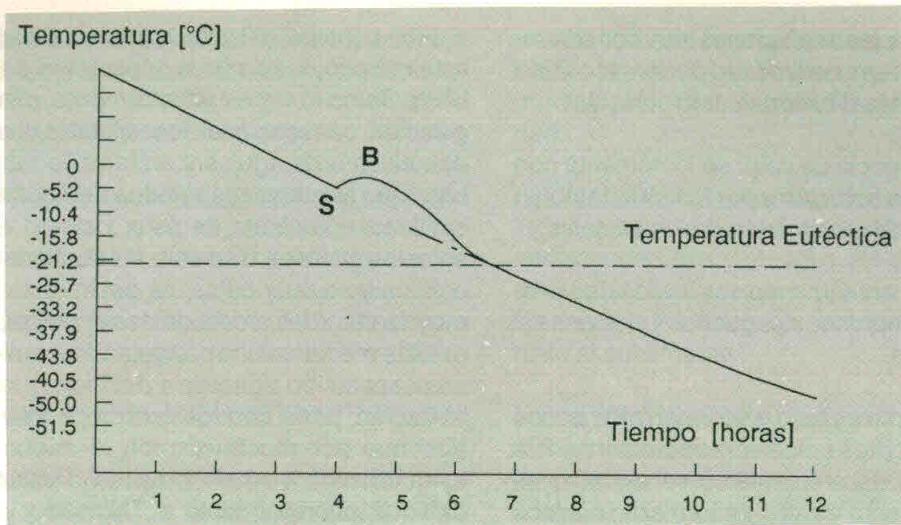


FIGURA 5. Curva de congelación de un extracto de café.

de cada uno de ellos y afectan de manera apreciable las características del producto final. En lo que sigue analizaremos los procesos de nucleación y crecimiento de los cristales y los factores que los rigen.

2.4.1 Nucleación

Como lo vimos anteriormente, la curva de enfriamiento del agua pura o la de una solución, presentan siempre un cierto subenfriamiento antes de que se inicie la congelación. Este hecho indica que existe una barrera de energía que es preciso sobrepasar para que los primeros cristales se puedan formar.

Consideremos la variación de energía libre ΔG del sistema, asociada con la formación de un cristal de hielo, que supondremos esférico por comodidad. ΔG estará dada por:

$$\Delta G = \frac{4}{3} r^3 \Delta g_p + 4\pi r^2 \delta$$

en donde r es el radio del cristal, Δg_p la variación de energía libre asociada con la solidificación del agua y δ es la energía libre superficial entre el hielo y el agua.

El primer término es siempre negativo y corresponde a la energía liberada cuando se forman los enlaces entre las moléculas de agua que conducen a la estructura cristalina. El segundo término, que es siempre positivo, corresponde a la energía necesaria para formar una superficie de separación sólido-líquido. Este término es el responsable de que exista la "barrera de energía" de que hablábamos antes. A causa de este término, los cristales deben tener un radio mínimo r^* para poder crecer. Si su radio es inferior a ese valor, tienden a fundirse ya que eso disminuye la energía del sistema.

El radio crítico r^* puede calcularse sin dificultad a partir de la ecuación anterior.

2.4.2 Crecimiento y forma de los cristales de hielo

La fase siguiente de la cristalización, es el crecimiento de los pequeños núcleos. Ese proceso requiere un cierto grado de subenfriamiento, aunque mucho menor que el que se necesita para la nucleación. El crecimiento tiene lugar por adición de moléculas individuales o, en algunos casos, de agrupaciones de moléculas.

Es bueno hacer notar que en el caso de las soluciones, los cristales de hielo que se forman son de una gran pureza y no contienen prácticamente traza alguna del soluto inicialmente presente. Este efecto es especialmente marcado si el crecimiento de los cristales es lento. La rata de crecimiento de los cristales está gobernada por dos fenómenos principales de transferencia:

- a) Transferencia de materia, ya que las moléculas de agua de la solución tienen que difundir hasta la superficie del cristal y luego a lo largo de ésta hasta encontrar un sitio apropiado y, al mismo tiempo, las moléculas de soluto deben alejarse de la superficie.
- b) Transferencia de calor, puesto que el calor latente de congelación debe ser evacuado.

En el caso de soluciones diluidas, la transferencia de masa es fácil y la rata de crecimiento está limitada más bien por la transferencia de calor. Sin embargo, se ha observado que algunos tipos de solutos retardan el crecimiento de los cristales, probablemente porque se adsorben en la superficie de los núcleos, impidiendo así la adherencia de nuevas moléculas de agua.

A baja temperatura, o en soluciones muy concentradas el crecimiento puede verse limitado por la viscosidad del líquido que dificulta la difusión de las moléculas.

La rata de transferencia de calor se incrementa con el subenfriamiento de la solución y por lo tanto, también aumenta la velocidad de crecimiento de los cristales.

Cuando la rata de enfriamiento es elevada, los cristales formados son numerosos y pequeños y viceversa si la congelación es lenta.

Si el subenfriamiento es bajo, se forman muy pocos núcleos y cada uno de ellos crece apreciablemente. Por el contrario, si la rata de enfriamiento es elevada, es decir, si el subenfriamiento es alto, se formarán núcleos muy numerosos que no podrán crecer sino hasta cierto límite.

En general, si el subenfriamiento es elevado, los cristales tendrán forma de agujas, mientras que con bajos subenfriamientos, los cristales tienden a tomar formas simples.

3. LA CRIOCONCENTRACION (3, 5)

Como lo vimos en el capítulo anterior, al congelar una solución de una concentración adecuada, se forman en el líquido cristales de hielo puro cuya aparición lleva a un aumento de la concentración de la solución restante. Este fenómeno es la base del proceso de crioconcentración, cuya utilización es especialmente interesante en el caso de productos alimenticios con un contenido elevado de volátiles. El hecho de que el proceso se efectúe a baja temperatura, junto con la gran pureza de los cristales de hielo que se forman, reduce a un mínimo el deterioro del producto y la pérdida de sustancias aromáticas.

La principal dificultad para la aplicación práctica de este método, reside en la separación de los cristales de hielo. Como lo vimos anteriormente, mediante una congelación convencional los cristales tienen una forma dendrítica o de agujas y un tamaño muy pequeño que hace que al intentar separarlos del líquido, arrastren una cantidad apreciable de éste, ocluido en los espacios entre los cristales. Tan sólo si se utilizan velocidades de enfriamiento muy bajas, es decir, ratas de crecimiento muy lentas (del orden de 1 cm por día o menos), es posible mediante una congelación convencional, lograr una separación adecuada del hielo y la solución. Esta limitación, junto con los costos de inversión elevados, hizo que por mucho tiempo la crioconcentración no fuera utilizada a escala industrial. Desarrollos recientes, debidos principalmente a Thijssen y su grupo en la universidad de Eindhoven, han llevado al proceso comercializado por Grenco, cuyo uso en la industria alimenticia y, especialmente en la del café soluble, se ha extendido considerablemente.

La condición esencial para lograr una buena separación de los cristales es que éstos tengan un tamaño lo más grande posible y una forma simple.

En la práctica, este resultado se logra mediante el uso de cristalizadores que pueden ser de diversos tipos. Los principales factores que afectan el tamaño promedio de los cristales son: la concentración de la solución, el subenfriamiento, el tiempo de residencia de la solución en el cristalizador y el grado de agitación de la mezcla.

El sistema desarrollado por Thijssen (Figura 6) utiliza un intercambiador de calor en el cual se forman cristales subcríticos. Las condiciones de operación del intercambiador de calor (de superficie raspada) son tales que los cristales producidos son muy pequeños y numerosos. Esto se logra principalmente mediante un

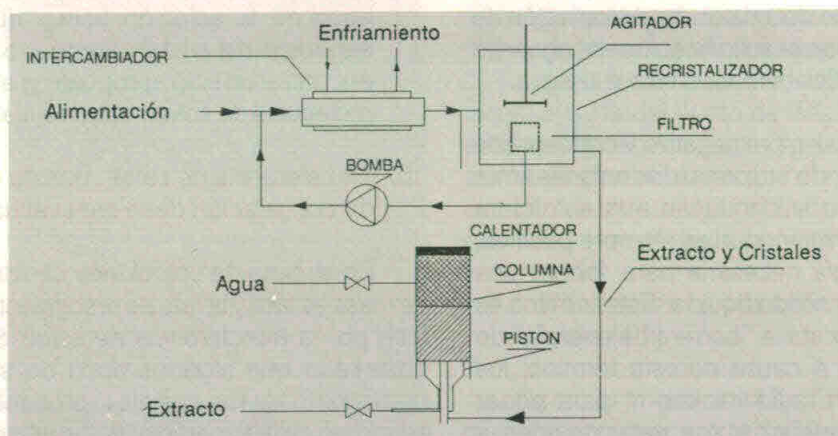


FIGURA 6. Diagrama esquemático de un crioconcentrador.

tiempo de residencia corto (algunos segundos) y un flujo de calor elevado a través de la pared del intercambiador. Los cristales producidos se llevan luego a un tanque de crecimiento en el cual, a causa de su pequeño diámetro se funden, permitiendo el crecimiento de cristales mayores. El subenfriamiento en el cristizador es pequeño (del orden de 0.02 grados C), lo cual permite el crecimiento de cristales esféricos de un diámetro de 1 mm, con un tiempo de residencia de cerca de 2 horas. La separación de los cristales de hielo y la solución concentrada se lleva a cabo mediante una columna de lavado. Esta denominación se aplica a todos los sistemas en los cuales la separación se efectúa por el desplazamiento del líquido concentrado mediante agua proveniente ya sea de la fusión parcial de los cristales de hielo o de una fuente externa. En una columna de lavado adecuadamente diseñada, la separación puede lograrse sin ninguna dilución de la solución concentrada. Se pueden distinguir diversos tipos de columna de lavado, según su principio de funcionamiento; en el equipo mencionado se utiliza una columna de pistón. Este tipo de columna ha sido estudiado principalmente por la Philips Petroleum Company y por el grupo de Thijssen.

En operación normal, las pérdidas de sólidos con los cristales de hielo son inferiores a 10 ppm, lo cual hace que sea el método de separación más eficiente de cuantos se ofrecen comercialmente en la actualidad. La capacidad de una de tales columnas es del orden de 1 kg hielo/hora por cm² de área de la columna.

Según Thijssen, y a pesar de los costos elevados de inversión, el sistema Grenco es actualmente el más económico del mercado, especialmente a causa de las muy bajas pérdidas de soluto.

4 LIOFILIZACION (4, 6, 7, 8)

4.1 Principios básicos

La liofilización es el método más apropiado para el secado de productos sensibles al calor y ricos en sustancias volátiles, tales como el café y otros productos alimenticios. Durante la liofilización, el agua es retirada directamente en forma de vapor, a partir del producto congelado.

Debido a que la operación se efectúa a baja temperatura, se evita cualquier tipo de deterioro térmico del producto. Adicionalmente, por razones que veremos más adelante, la liofilización permite una alta retención de volátiles, siempre y cuando se opere en condiciones adecuadas.

La liofilización propiamente dicha requiere la congelación previa del producto, que se lleva a cabo según los principios estudiados en detalle con anterioridad.

La liofilización consta de dos procesos que tienen lugar simultáneamente: La sublimación directa de los cristales de hielo y el retiro del agua aprisionada en el sólido eutéctico que se efectúa por difusión de las moléculas de agua hacia los poros dejados por los cristales de hielo al sublimarse.

Ambos procesos requieren el suministro de una cierta cantidad de calor: el calor de sublimación y el calor de desorción que puede ser superior al primero.

Para que el proceso sea posible, la presión parcial de vapor de agua en la superficie del producto debe ser inferior a la presión de vapor del hielo a la temperatura de operación (Figura 1).

La liofilización, en principio, puede llevarse a cabo a presión atmosférica, utilizando como medio de arrastre del vapor aire frío muy seco (de manera que la presión parcial de vapor de agua sea lo suficientemente baja). Este método presenta varios inconvenientes que hacen difícil su aplicación industrial. En la actualidad se prefiere efectuar la operación en vacío, a una presión total inferior a 1 mm Hg.

La temperatura de operación debe mantenerse por debajo de la temperatura eutéctica, con el fin de evitar la fusión total o parcial del producto.

El calor de sublimación puede ser suministrado al producto de tres maneras diferentes, como lo muestra la Figura 7.

- a) Por conducción, utilizando placas de calentamiento en contacto directo con la bandeja que contiene el producto.
- b) Por radiación, mediante placas de calentamiento (en general 2), situadas a cierta distancia de la bandeja de producto.
- c) Por microondas. A pesar de que, en principio, mediante este último sistema se pueden evitar problemas de transferencia de calor a través de la capa seca, los riesgos de fusión del producto y de descargas en el gas, han impedido hasta la fecha su aplicación a escala industrial.

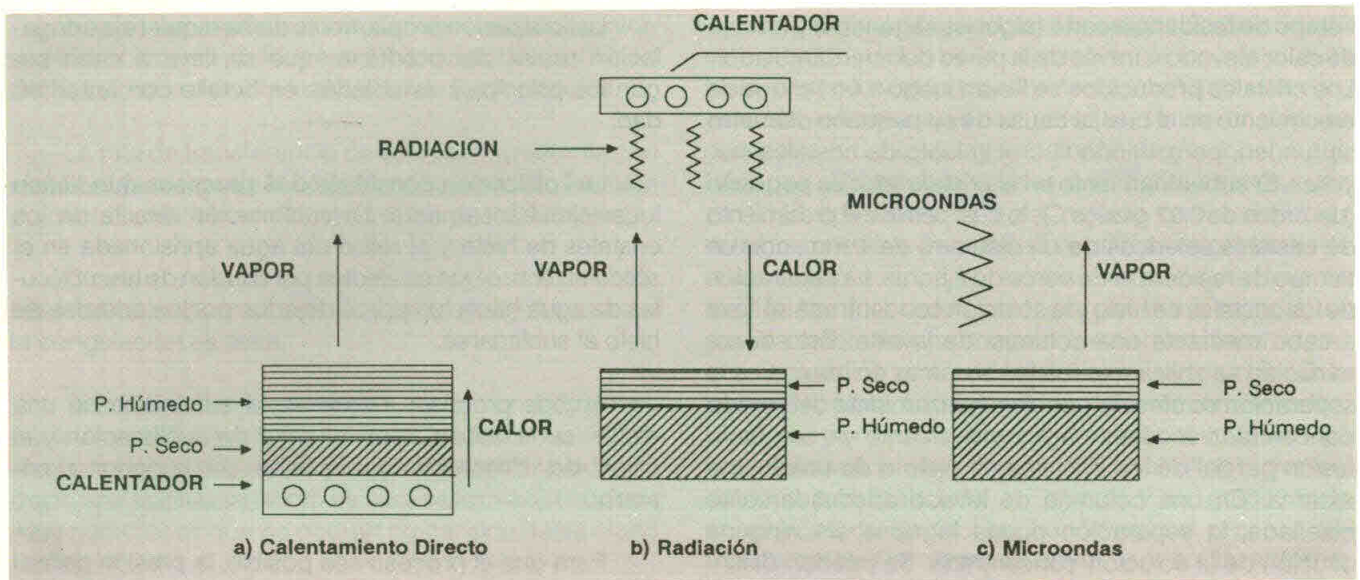


FIGURA 7. Diferentes sistemas posibles para suministrar el calor de sublimación

La Figura 8 muestra esquemáticamente un equipo de liofilización que consta esencialmente de una cámara de vacío, del sistema de suministro de calor al producto y de los equipos necesarios para mantener la presión requerida en la cámara. El sistema de vacío comprende una bomba de prevacío para la evacuación inicial de la cámara y el retiro de los gases no condensables presentes en el producto, además de un condensador refrigerado para la desublimación del vapor de agua. El uso de un condensador es indispensable dado el gran volumen ocupado por el vapor que se genera durante el proceso, que no podría ser manejado por ningún tipo de bomba mecánica de vacío. El condensador debe tener

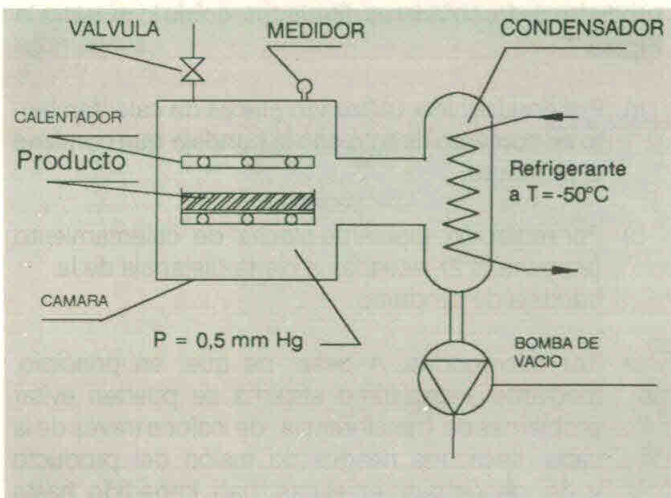


FIGURA 8. Esquema de un equipo de liofilización.

una temperatura tal que la presión de vapor de hielo a esa temperatura sea inferior a la presión que se quiere mantener dentro de la cámara. El calor de desublimación del vapor debe ser absorbido totalmente por el sistema de refrigeración, razón por la cual el consumo de energía de la liofilización es relativamente elevado.

La Figura 9 muestra esquemáticamente la liofilización de una carga de producto congelado en el caso en que el calor es suministrado por radiación desde la parte superior. Para el estudio del fenómeno, es necesario considerar dos procesos simultáneos: transferencia de calor a través de la capa seca para suministrar el calor latente al frente de sublimación y transferencia de materia desde dicho frente hasta la superficie del producto. Ambos procesos están regidos por las ecuaciones de difusión que deben resolverse simultáneamente, teniendo como condición de frontera común que la presión en el frente de sublimación es igual a la presión de vapor del hielo a la temperatura del frente.

La solución exacta de este problema es muy compleja, debido a la no linealidad de la condición de frontera. En el caso de la liofilización, y a causa de lo lento del proceso, es posible obtener una solución aproximada satisfactoria, suponiendo que la presión y la temperatura varían linealmente a lo largo de la capa seca. Este modelo es el que se denomina usualmente URIF (uniform retreating ice front).

Si J_q es la cantidad de calor transferida por unidad de área y de tiempo y J_m la cantidad de materia correspondiente, podemos escribir:

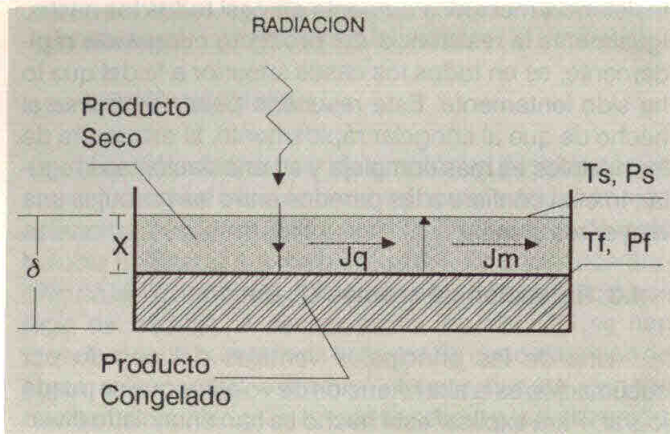


FIGURA 9. Liofilización de una capa de producto.

$$Jq = K \frac{T_s - T_f}{X} \quad ; \quad Jm = D \frac{P_s - P_f}{X}$$

donde P_f y T_f y P_s y T_s son las presiones y temperaturas respectivas del frente de sublimación y de la superficie del producto, X es el espesor de la capa seca, K su conductividad térmica y D su difusividad másica.

El calor transferido se utiliza en su totalidad para la transformación del hielo, es decir que:

$$Jq = L\rho \frac{dx}{dt} = L Jm$$

donde L es el calor latente de sublimación por unidad de masa, ρ el peso específico y dx/dt la velocidad de la frontera.

Con ayuda de esas ecuaciones obtenemos la relación entre la temperatura y la presión del frente de sublimación.

$$P_f = P_s + \frac{K}{LD} T_s - \frac{K}{LD} T_f$$

La presión y la temperatura del frente de secado deben satisfacer simultáneamente esta ecuación y la relación termodinámica entre la presión de vapor del

hielo y su temperatura. El punto de trabajo del sistema está situado en la intersección de la recta con la curva $P = P(T)$ como lo muestra la Figura 10. De esta gráfica podemos sacar las deducciones siguientes:

1. La posición del punto de trabajo es función de la temperatura y de la presión en la superficie. Un aumento de uno u otro de esos parámetros provoca un incremento de la temperatura del frente de secado que puede conducir a la fusión total o parcial del producto.
2. Si la presión y la temperatura superficiales son mantenidas constantes, la temperatura del frente de secado permanece fija durante todo el proceso de sublimación.
3. La pendiente de la recta depende de la razón K/D , la cual, a su vez, es función de la estructura del producto y por lo tanto de la congelación. Conociendo K y D es en principio posible calcular la presión y la temperatura que producen una tasa máxima de liofilización, compatible con la temperatura de fusión del producto. Es necesario tener en cuenta que, tanto K como D , dependen de la presión, especialmente en los rangos utilizados para la liofilización.

4.2 Variaciones de las propiedades físicas del producto durante la liofilización

4.2.1 El fenómeno de colapso durante la liofilización

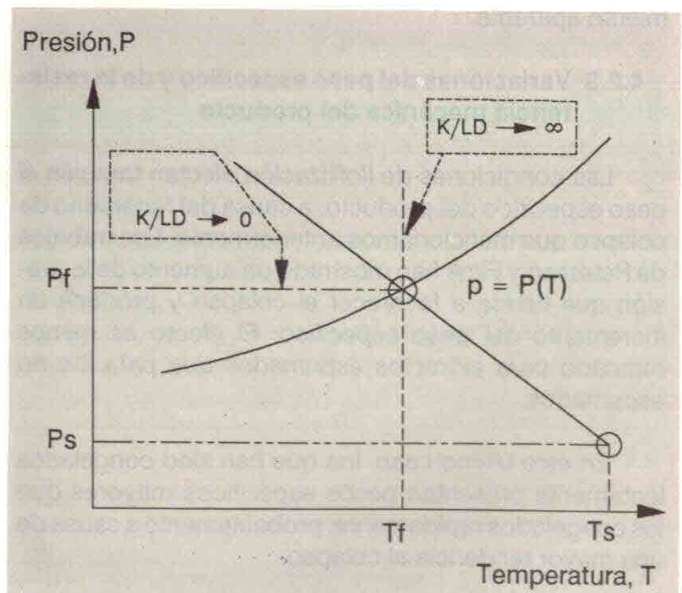


FIGURA 10. Determinación del punto de trabajo del sistema.

Según las condiciones en que se efectúe el proceso, los poros dejados libres por la sublimación del hielo pueden cerrarse en mayor o menor grado.

Dicho fenómeno, denominado colapso, puede ocurrir aún a temperaturas inferiores a la temperatura de fusión del producto. La importancia del colapso depende de la temperatura de operación y de la estructura del producto, la cual, como vimos, es función de las condiciones de congelación.

El colapso provoca un aumento de la densidad del producto ya que reduce su porosidad y, por la misma razón, puede alterar el desarrollo de la liofilización pues dificulta la transferencia de materia en el producto seco.

4.2.2 Cambios de color durante la liofilización (6)

Como lo mostraron los trabajos de Pettersen y Flink, es posible modificar el color del producto final, variando las condiciones de liofilización. En particular, se observa un oscurecimiento de aquel, cuando se aumenta la presión en la cámara.

Como lo vimos anteriormente, un aumento de presión provoca un desplazamiento del punto de trabajo (Figura 10) y una elevación de la temperatura del frente de secado. Dicho incremento favorece el colapso mencionado anteriormente y, puede, si es suficientemente alto, producir una fusión local del producto. Estos dos fenómenos modifican la estructura superficial y, por lo tanto, su reflectividad. Ello se traduce en un oscurecimiento aparente.

4.2.3 Variaciones del peso específico y de la resistencia mecánica del producto

Las condiciones de liofilización afectan también el peso específico del producto, a causa del fenómeno de colapso que mencionamos anteriormente. Los trabajos de Petersen y Flink han mostrado un aumento de la presión que tiende a favorecer el colapso y produce un incremento del peso específico. El efecto es menos marcado para extractos espumados que para los no espumados.

En este último caso, los que han sido congelados lentamente presentan pesos específicos mayores que los congelados rápidamente, probablemente a causa de una mayor tendencia al colapso.

En cuanto a la resistencia mecánica del producto terminado, se observa que al incrementar la presión, la

resistencia mecánica aumenta en casi todos los casos. Igualmente la resistencia del producto congelado rápidamente, es en todos los casos superior a la del que lo ha sido lentamente. Este resultado puede atribuirse al hecho de que al congelar rápidamente, la estructura de los cristales es más compleja y su orientación es irregular, lo cual confiere a las paredes entre las burbujas una mayor resistencia.

4.3 Retención de aromas (7, 8)

Una de las principales ventajas del secado por sublimación es la alta retención de volátiles que se puede lograr. Para explicar este hecho se han enunciado diversas teorías, entre las cuales podemos mencionar las siguientes:

- a) La teoría de la adsorción de Rey.
- b) La teoría de las microrregiones debida a Flink.
- c) La teoría de la difusión selectiva propuesta por Thijssen.

La primera de esas teorías no puede explicar sino una parte reducida de la retención de aromas, razón por la cual no la discutiremos aquí. En lo que se refiere a las otras dos teorías, King mostró que son equivalentes, siendo la de Flink una descripción microscópica y la de Thijssen un punto de vista macroscópico.

Estas teorías permiten hacer algunas predicciones sobre los factores que afectan la retención de aromas durante la liofilización que resumimos a continuación:

- a) Al disminuir la presión de la cámara, baja la temperatura del frente de sublimación, lo cual es favorable para una buena retención.
- b) Un producto congelado lentamente tiene una mayor porosidad, lo cual facilita el transporte de materia y permite que la liofilización se lleve a cabo a una temperatura más baja, mejorando así la retención. Adicionalmente la congelación lenta produce poros con paredes más gruesas, lo cual favorece la selectividad de la difusión.
- c) Si la capa de producto es gruesa, la temperatura del frente de secado tiende a incrementarse y por lo tanto la pérdida de volátiles.
- d) Una mayor temperatura de las placas de calentamiento a presión fija lleva a un incremento de la temperatura del frente y a una mayor pérdida.

e) Los volátiles de mayor peso molecular serán mejor retenidos.

5. CONCLUSIONES

Los métodos de concentración y deshidratación cuyos principios básicos hemos discutido aquí, han sido aplicados con gran éxito para la producción de café soluble liofilizado a escala industrial. La crioconcentración ha tenido además aplicación en la concentración de jugo de naranja. A escala piloto, en el LIQC se han llevado a cabo numerosos ensayos de concentración de jugos tales como maracuyá, lulo y curuba con un excelente resultado. En lo que se refiere a la liofilización, su uso industrial es bastante amplio, aunque en la mayoría de los casos se usa para productos costosos, tales como el café, los camarones o los champiñones. El interés de la liofilización reside en la gran calidad de los productos obtenidos; si el proceso se lleva a cabo en condiciones apropiadas, tanto el aroma y el sabor, el color, la forma y la textura se conservan perfectamente; la rehidratación de esos diversos productos es en la gran mayoría de los casos excelente y su conservación, si se utilizan empaques adecuados (bolsas o frascos herméticos), puede ser de varios meses. En el LIQC se han realizado ensayos de liofilización de frutas tropicales, hierbas aromáticas y especies que han demostrado claramente la factibilidad técnica de esos procesos. En vista, sin embargo, de su costo elevado la aplicación industrial requiere un cuidadoso estudio económico.

BIBLIOGRAFIA

1. P.V., HOBBS. Ice Physics. Clarendon Press, Oxford. 1974
2. O. FENNEMA; POWRIE, MARTH. The Freezing preservation of Foods. Marcel Dekker Inc., N.Y. 1973.
3. H.A.C., THIJSEN. In: Advances in preconcentration and dehydration of foods. A. Spicer ed. Applied Science Publishers Ltd. London. 1974.
4. J., KING. Freeze-Drying of Foods, Butterworths. London. 1971.
5. H.C.A., THIJSEN. In: Freeze-Drying and Advanced Food Technology, Goldblith, Rey and Rothmayr eds. Academic Press. 1975.
6. E. ETTRUP-PETERSEN; J., LORENTZEN; P., FOSBL. Proceedings of the Atlas International Freeze Drying Symposium, Copenhagen, August 1970.
7. J., FLINK. In: Freeze-Drying and Advanced Food Technology. Goldblith, Rey and Rothmayr eds. Academic Press. 1975.
8. Fundamentals and applications of freeze-drying to biological IIF, commission CI (Tokio) 1985.