

Enfriamiento por Aire Forzado *Modificado de J.F. Thompson et al. 1998**

El enfriamiento por aire forzado es un método ampliamente usado para frutas, hortalizas y flores cortadas. El enfriamiento se logra forzando el paso de aire frío a través de los envases (contenedores; empaques) y piezas individuales de producto. Casi todos los productos para el mercado fresco se pueden enfriar con aire forzado pero comúnmente se utiliza para frutas de árbol, frutillas, melones y flores cortadas. No requiere el empleo de envases resistentes al agua como los métodos de hidrogenfriamiento o enfriamiento con hielo. Las desventajas del enfriamiento por aire forzado son que generalmente es más lento que otros métodos (excepto el enfriamiento en cuarto frío), y que causa una excesiva pérdida de agua en algunos productos.

El enfriamiento por aire forzado exige el empleo de un sistema de empaque diseñado de tal forma que el flujo de aire frío pase por las piezas individuales de producto, y que el aire mantenga la baja temperatura en forma consistente.

Enfriador de Tunel

El enfriador de túnel es el diseño más común para forzar el aire a través del producto ya empacado. Las tarimas (pallets) de producto se colocan a ambos lados de un ventilador de extracción, formando dos filas paralelas y dejando un canal abierto en el medio de las dos filas (Fig. 1). Se pone una lona, cubriendo el canal central y el ventilador ubicado en el extremo succiona el aire del canal, generando una presión negativa que obliga al aire frío del cuarto a pasar a través del producto. El aire caliente que es removido se envía hacia los serpentines del evaporador, es reenfrinado y regresado al cuarto frío. En el pasado se empleaban bloques de hielo para enfriar el aire. Se pueden estibar a lo alto hasta dos tarimas para obtener un mejor uso del espacio del cuarto frío. El producto que se encuentre en cajas de campo (bins) también puede ser enfriado con este sistema si las paredes de las cajas poseen aberturas.

Este sistema enfría grandes cantidades de producto en una sola operación sin un manejo específico de la temperatura en las cajas o tarimas individuales. Muchas instalaciones están diseñadas de forma tal que cada lote de producto tiene un ventilador individual. El ventilador algunas veces está regulado por un controlador de velocidad del motor, y, en la medida que el aire circula se va enfriando, el ventilador disminuye las revoluciones, reduciendo el uso de energía, la entrada de calor al sistema de refrigeración, y, seguramente, la pérdida de agua del producto.

Enfriador de Pared Fria

El enfriador de pared fría se utiliza para enfriar eficientemente pequeños lotes y tarimas incompletas de producto. Las tarimas individuales se ponen lado a lado contra una falsa

* Commercial Cooling of Fruits, Vegetables and Flowers. Univ. California Publication 21567.

pared (plenum), generalmente en una sólo fila y en una o dos columnas arriba de ménsulas o anaqueles elevados (Fig. 2). El espacio interior de la falsa pared está bajo succión, o, en algunos enfriadores, bajo presión. Los reguladores de tiro (deflector) correspondientes a cada abertura de las cajas de las tarimas se abren con el contacto de las mismas, permitiendo que el aire empiece a fluir. Los deflectores se pueden ajustar para que abran sólo a la altura de las estibas de las tarimas, permitiendo que estibas de diferentes alturas sean enfriadas sin ajustes o pérdidas de aire.

Para las flores cortadas generalmente se utilizan enfriadores a presión. Las cajas empacadas se ponen contra una falsa pared presurizada a 2-4 cm (1-1.5 pulgadas) de columna de agua de presión estática. La falsa pared tiene aberturas que se alinean con los orificios de ventilación de las cajas y que están diseñadas como para que la caída de presión a través de las mismas sea relativamente grande comparada con la caída de presión a través de la caja. El flujo de aire a través de las aberturas de la pared no cambia mucho cuando la caja se pone en posición, por lo que siempre están abiertas y no hay necesidad de un sistema regulador de tiro o deflector.

El producto colocado en un enfriador tipo ménsula empieza a enfriarse inmediatamente. Los operadores no necesitan colocar lonas o encender ventiladores. Cada tarima o caja está accesible como para ser removida en cualquier momento y reemplazada por otra, permitiendo virtualmente el uso continuo de todas las posiciones del enfriador. Estas ventajas compensan el costo de las ménsulas y los deflectores de aire y la gran superficie necesaria en relación al volumen de material enfriado. Además, cada carga termina de enfriarse a diferente tiempo, de modo que el operador debe verificar continuamente la temperatura del producto para evitar la exposición innecesaria del producto al flujo de aire una vez alcanzada la temperatura deseada. Algunos enfriadores se han equipado con un sistema de control de tiempo: la abertura del deflector enciende una luz verde y el cronómetro; después de un período establecido, el cronómetro apaga la luz verde y enciende una luz roja, avisando al operador que registre la temperatura del producto en aquel sitio y determine si el enfriamiento ha terminado.

Tiempo de Enfriamiento

La temperatura promedio del producto durante el enfriamiento por aire forzado sigue un patrón como el mostrado en la Fig. 3 (este mismo patrón lo siguen los productos en un hidrogenfriador). La velocidad de disminución de temperatura está relacionada con la diferencia de temperatura entre el producto y el aire frío. La disminución de temperatura del producto es rápida al comienzo del enfriamiento y baja a medida que el producto se acerca a su temperatura final. Este tiempo a menudo se conceptualiza como el tiempo de semienfriado, que es el tiempo requerido para que la temperatura del producto se reduzca en la mitad de la diferencia de temperatura entre la temperatura inicial del producto y la temperatura del aire de enfriamiento. En la Figura 3, el producto se enfrió 10°C, de 20°C a 10°C, en el primer período de semienfriado. Durante el siguiente período de semienfriado, igual en tiempo que en el primero, el producto también pierde la mitad de la temperatura (la diferencia entre la temperatura del producto al inicio del período de enfriamiento y la temperatura del aire frío); pero, debido a que la diferencia de

temperatura al inicio del segundo período es la mitad de la diferencia al inicio del primer período de semienfriado, la caída de temperatura durante el segundo período de semienfriado es de sólo la mitad, 5°C. La mayoría de los productos se sacan del enfriador después de tres períodos de semienfriado (“siete octavos de enfriamiento”) o cuatro períodos de semienfriado (“15/16 de enfriamiento”).

Este patrón de enfriamiento muestra la necesidad de mantener la temperatura del aire lo mas cerca posible de la temperatura establecida, especialmente hacia el final del enfriamiento. Si la temperatura del aire de enfriamiento se eleva apenas unos grados en el tercer o cuarto período de semienfriado, el producto puede dejar de enfriarse. Los enfriadores de túnel deben estar contruídos como cuartos individuales o divididos en secciones de forma tal que el producto caliente que entra a lo largo del día no afecte la temperatura del aire cercano a los lotes que están casi fríos.

El tiempo total de enfriamiento depende de la velocidad del flujo del aire y del diámetro del producto. Una fruta de diámetro grande requiere considerablemente más tiempo para enfriarse que una de diámetro pequeño. Un melón Cantaloupe de 15 cm de diámetro (6 pulgadas) requiere el doble de tiempo de enfriado que una cereza de 1.3 cm de diámetro (0.5 pulgadas). Las flores cortadas, las cuales generalmente tienen diámetros muy pequeños, tienen tiempos de siete octavos de enfriamiento de 10 minutos a una hora en un enfriador que opera a 2.5 cm (1 pulgada) de columna de agua de presión estática y genera un flujo de aire de 2 a 4 l·seg⁻¹·kg⁻¹ (2 a 4 pies cúbicos·min⁻¹·libra⁻¹). La figura 13 también muestra que incrementando el flujo de aire, medido como volumen de aire por unidad de tiempo por masa de producto, se reduce el tiempo de enfriamiento. Los enfriadores a menudo se diseñan para proporcionar un flujo de aire de aproximadamente 1 l·seg⁻¹·kg⁻¹ (1 pie cúbico·min⁻¹·libra⁻¹) el cual proporciona un enfriamiento rápido y requiere un ventilador de dimensiones razonables. Aumentando la velocidad del flujo del aire al doble (2 l·seg⁻¹·kg⁻¹; 2 pies cúbicos·min⁻¹·libra⁻¹) se reducen los tiempos de enfriamiento de ciruelas y melones Cantaloupe en un 40% aproximadamente. Para duplicar la velocidad del flujo de aire es necesario que el ventilador opere contra una presión cuatro veces mayor para lo que requerirá un motor con una potencia 6-7 veces mayor. Al reducir el flujo de aire a la mitad se incrementa el tiempo de enfriamiento entre un 50 y un 75% para cerezas, ciruelas y melones y se reduce dramáticamente el tamaño del motor necesario y los costos de energía. Las desventajas de un enfriamiento lento son la necesidad de mayor superficie de piso del cuarto refrigerado para manejar la demanda diaria de enfriamiento y que aumenta ligeramente la pérdida de agua del producto.

Contenedores para el Enfriamiento con Aire Forzado

El método de empaqueo y los envases utilizados deben admitir el paso de un flujo del aire satisfactorio con una diferencia de presión razonable a través de las estibas. Los materiales auxiliares de empaque (como cubiertas de papel) ocupan espacio entre productos en el envase, restringiendo el flujo de aire y demorando el enfriamiento. Los forros de películas plásticas sin orificios evitan que el aire pase a través del empaque y provocan un enfriamiento muy lento. Las frutas empacadas en cajas plásticas se enfriarán

satisfactoriamente si están diseñadas para que el aire pase por arriba y por debajo de cada una de las cajas. Las cajas destapadas de frutillas son muy apropiadas para el enfriamiento por aire forzado ya que el aire que pasa entre las cajas entra en contacto directo con la fruta y se arremolina sobre la misma logrando un rápido enfriado.

El área de los agujeros de ventilación del envase deberá ser de por lo menos el 5% del área lateral total. Menores áreas de ventilación restringen el flujo de aire, incrementando los tiempos de enfriamiento y el costo del mismo. La mayoría de los envases de cartón corrugado pueden tener hasta 5% de área de ventilación sin que se reduzca drásticamente la resistencia al estibado de las cajas.

La ventilación de las cajas debe de estar diseñada de acuerdo a lo siguiente:

- El tamaño y forma de los agujeros no deben permitir que estos se bloqueen con el producto.
- Evitar los agujeros redondos si pudieran ser bloqueados fácilmente por la forma del producto.
- Es preferible que las cajas presenten las cajas pocos agujeros grandes en lugar de muchos pequeños.
- Los agujeros deberían ser de por lo menos 1 cm (0.5 pulgadas) de diámetro o mayor
- Mantener los agujeros a una distancia de 4 a 7 cm (2 a 3 pulgadas) de los bordes de la caja.
- El área de ventilación total de la caja debería ser del 5% del área lateral.
- Para el estibado cruzado, es recomendable utilizar el arreglo de ventilación ilustrado en la figura 16 y en la fotografía 6

Perdida de Humedad Durante el Enfriado por Aire Forzado

Bajo ciertas condiciones, el enfriamiento por aire forzado no causa pérdidas apreciables de agua. En otros casos, las pérdidas son lo suficientemente grandes como para dañar al producto y el uso de este método de enfriamiento no es posible. La cantidad de pérdida de agua depende de la temperatura inicial del producto, del coeficiente de transpiración del mismo, del uso de ceras, de la resistencia del empaque al paso de humedad, de la velocidad de enfriamiento, de la humedad del aire de enfriamiento y de la exposición innecesaria al flujo de aire una vez concluido el enfriamiento.

Si la humedad relativa del aire de enfriamiento es mayor que el 80%, éste tiene un efecto despreciable sobre la pérdida de agua del producto. La mayor parte de la diferencia de presión de vapor entre el aire de enfriamiento y el producto es el resultado de la alta temperatura del producto y no del contenido de humedad del aire de enfriamiento. Una ventaja de utilizar aire con alta humedad relativa durante el enfriamiento es que puede incorporar humedad a los cartones de las cajas de empaque reduciendo de esta manera la pérdida de agua en el manejo subsecuente, ya que el material de empaque no removerá tanta humedad del producto.

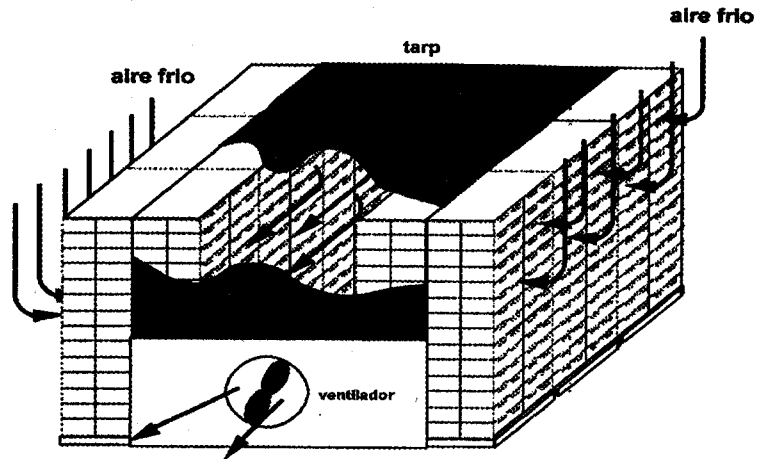


Figura 1. Esquema de un enfriador de aire forzado tipo túnel

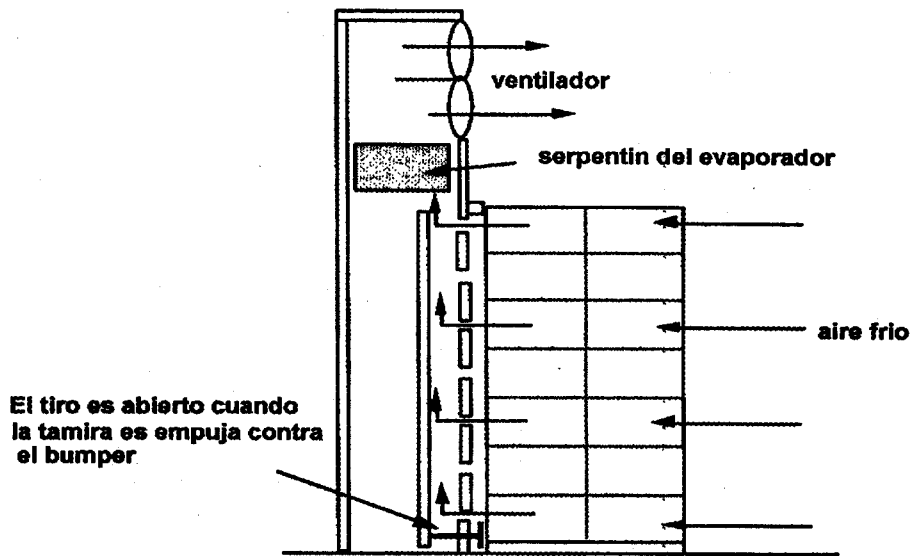
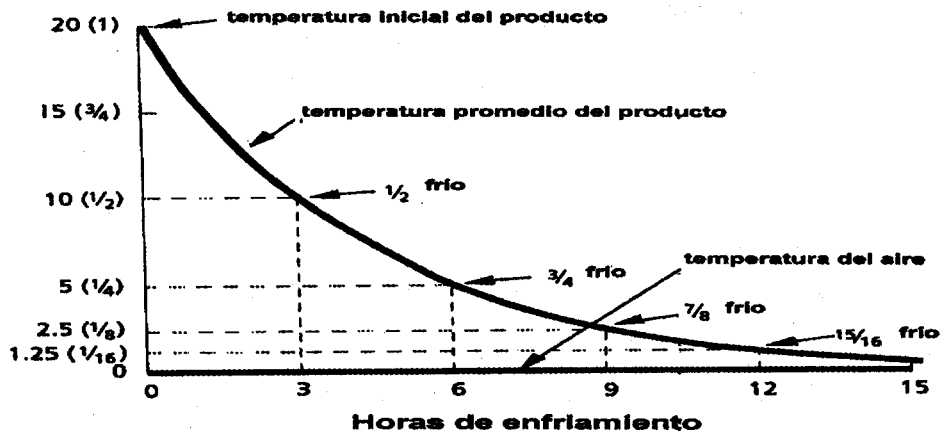


Figura 2. Esquema de un enfriador de aire forzado tipo pared fría.

Figura 3. Patrón típico de temperatura durante el enfriamiento de un producto. Los números entre paréntesis indican la fracción obtenida al dividir la diferencia de temperatura del producto y la temperatura del aire en el enfriador por la diferencia entre la temperatura inicial del producto y la temperatura del aire.

Temperatura del producto (°C)

Hidrogenfriamiento Modificado de J.F. Thompson et al, 1998*



El hidrogenfriamiento se utiliza para muchos productos frescos, incluyendo varios tipos de frutas de árbol, melones, hortalizas de raíz y de tallo. Este método nunca se usa para uvas, flores cortadas, frutillas ni la mayoría de las bayas debido a que el agua que queda en superficie aumenta las podredumbres. La mayoría de las hortalizas de hoja pueden ser hidrogenfriadas pero generalmente se enfrían al vacío con o sin aspersion de agua debido a que estos métodos son más rápidos y el enfriamiento al vacío sin aspersion no requiere cajas resistentes al agua. El hidrogenfriamiento no remueve agua del producto e inclusive puede revitalizar ligeramente un producto marchito. Para un hidrogenfriamiento eficaz es necesario que el agua de enfriado

- Se mueva sobre la superficie del producto.
- Entre en contacto con la máxima superficie del producto posible.
- Se mantenga tan fría como sea posible.
- Se mantenga libre de microorganismos causantes de podredumbres.

* Commercial Cooling of Fruits, Vegetables and Flowers. Univ. California Publication 21567.

Los dos principales tipos de diseño de hidrogenfriadores son los de cortina de agua y los de inmersión del producto. En los primeros, el agua se bombea por arriba del producto y llueve sobre el mismo a su paso. El producto, envasado o no, se mueve lenta y continuamente a través de la cortina de agua (Fig. 1); también el producto se puede cargar en el enfriador en cajas de campo por lotes (Fig. 2). Los enfriadores de cortina de agua tienen una bandeja metálica perforada que distribuye el agua fría sobre el producto. A veces se utilizan boquillas de aspersión para distribuir el agua, pero éstas requieren mucha más energía para bombear el agua que el sistema de distribución por la bandeja perforada. Los enfriadores por inmersión (Fig. 3) se usan principalmente para productos a granel. Estos son la mejor opción para productos como las cerezas que son más densas que el agua y se mantienen completamente sumergidas. A menudo se usa una banda transportadora con separadores sujetos por abrazaderas para mover la fruta a través del baño de agua fría.

El tiempo de enfriamiento en los enfriadores de cortina de agua depende, principalmente, del diámetro del producto (Fig. 4). Los productos de diámetros pequeños tales como espárragos y rábanos se enfrían en menos de 10 minutos, mientras que melones Cantaloupe grandes pueden requerir hasta 1 hora para enfriarse. Las hojas que cubren un producto, como las hojas del elote, causan mayores tiempos de enfriamiento que lo que se esperaría de un producto sólido con el mismo diámetro. Las capas de hojas en la col también retardan la transferencia de calor, causando que una cabeza de 13 cm (5.5 pulgadas) de diámetro tenga un tiempo a siete octavos de enfriamiento de 3.5 a 4 horas.

Para obtener un enfriamiento rápido de productos colocados en estratos no profundos en un enfriador de cortina de agua, el flujo de agua debe ser de 4.8 a 6.8 litros por segundo por metro cuadrado de área de enfriamiento (7 a 10 galones por minuto por pie cuadrado). Conforme la profundidad del producto se incrementa, particularmente cuando está en cajas de campo (bins) o en otros envases, el agua tiende a fluir por caminos preferenciales causando que el enfriamiento general del producto sea más lento. Al incrementar el flujo de agua uno se asegura que los sitios con flujos de agua restringidos tengan flujo suficiente. Los enfriadores comerciales diseñados para manejar dos cajas de campo (pallet bins) estibadas (1.2 m de profundidad de producto aproximadamente) usan flujos de 13.6 a 17.0 litros por segundo por metro cuadrado (20 a 25 galones por minuto por pie cuadrado). Con estos flujos hay poca diferencia de temperatura entre los estratos superiores y los del fondo de las cajas. Flujos mayores a estos raramente reducen el tiempo de enfriamiento.

Se puede obtener un enfriamiento rápido y uniforme con flujos menores que los recomendados en el párrafo anterior si los agujeros de ventilación de los envases están dispuestos de tal forma que el agua pueda ir llenando los envases durante el enfriamiento. Debido a las dificultades en ajustar y mantener los agujeros de ventilación del fondo de los envases abiertos para permitir el llenado con agua de las cajas apiladas, es preferible acelerar el enfriamiento incrementando el flujo de agua. Para aumentar la velocidad de enfriamiento se ha probado añadir agentes humectantes (surfactantes) al agua de

enfriamiento, sin embargo, su efecto ha sido inconsistente y no se utilizan comercialmente.

Los hidrogenfriadores deben estar diseñados de forma tal que la distancia entre la bandeja de distribución de agua y la parte superior del producto no supere los 15 a 20 cm (6 a 8 pulgadas). Las hortalizas de hoja y otras hortalizas como el brócoli y el espárrago son objeto de daño por impacto del agua si la altura de caída excede esta distancia. El daño aparece como áreas oscuras y acuosas (translúcidas) en los tejidos expuestos. Una distancia de caída de más de 20 cm (8 pulgadas) puede causar un picado superficial en cerezas dulces. Por lo anterior se debe instalar la bandeja de distribución de agua tan cerca del producto como sea posible. Si la altura del producto en el enfriador no es siempre la misma, se puede instalar, por debajo de la bandeja fija, una segunda bandeja de altura ajustable. Se puede aumentar la altura efectiva de caída del agua en productos envasados o en cajas de campo al cubrirlos con una tapa agujerada.

Los enfriadores por lote requieren los mismos flujos de agua que los enfriadores continuos de cortina de agua. Los enfriadores por lote generalmente se utilizan en operaciones que manejan menores volúmenes de producto acomodado en tarimas .

En el enfriamiento por inmersión, toda la superficie del producto entra en contacto con el agua fría, pero, para lograr un enfriamiento rápido, el agua debe circular activamente alrededor de cada unidad de producto. Debido a que el movimiento del producto a través del tanque de enfriamiento raramente es suficiente para lograr esto, se deben instalar propelas o bombas que hagan circular el agua. Bennett (1963) recomendó una velocidad promedio del agua de $0.076 \text{ m}\cdot\text{seg}^{-1}$ ($15 \text{ pies}\cdot\text{min}^{-1}$) para un enfriamiento rápido de duraznos. Algunos enfriadores utilizan un sistema de burbujeo de aire para agitar el agua. Esta técnica es ineficiente en el consumo de energía a menos que el aire, el cual se enfría conforme sube por el tanque, sea reciclado o usado para enfriar otra área de almacenamiento. Los enfriadores de inmersión generalmente requieren mayor tiempo de enfriamiento que los enfriadores de cortina de agua.

La temperatura del agua debe mantenerse entre 0° y 0.5°C (32 a 33°F) para la mayoría de los productos. Aún los productos sensibles al frío, que normalmente son enfriados a temperaturas superiores a 5°C (41°C), se pueden enfriar con agua a 0°C (32°F) si el tiempo de enfriamiento es limitado. Estos productos generalmente no sufren daño si la temperatura promedio de la pulpa no cae por debajo de su temperatura crítica.

Los envases deben tener adecuada ventilación, tanto en la parte superior como en el fondo, con el fin de permitir que el agua de enfriado fluya a través del empaque. Esto suele ser un problema en productos hidrogenfriados empacados en cajas de cartón corrugado, especialmente cuando las cajas se estiban. Los agujeros de ventilación deben estar alineados aún cuando las cajas se estiben en forma cruzada. Las hojas del producto pueden causar una canalización del agua o bloquear agujeros mal diseñados haciendo más lento el enfriamiento.

Los envases y materiales auxiliares de empaque deben ser resistentes al agua. Materiales como la madera y el plástico funcionan bien en los hidrogenfriadores, pero el cartón corrugado sólo puede ser utilizado si se encerado. Inclusive el cartón encerado a veces falla si se expone por largos períodos de tiempo al hidrogenfriamiento; el encerado incrementa los costos de la caja, y, algunas veces, el costo del encerado llega a ser cerca de la mitad del costo total del enfriamiento.

El agua utilizada en los hidrogenfriadores debe estar relativamente libre de microorganismos causantes de podredumbres con el fin de evitar la dispersión de enfermedades. El agua debe ser potable, proveniente de un pozo de agua limpia o del suministro para uso doméstico. El agua de ríos o estanques raramente está lo suficientemente limpia. Debido a que casi todos los enfriadores reciclan el agua, el enfriador debe estar diseñado para el control de los microorganismos de enfermedades que entran al sistema con el producto. Los productos que vienen del campo extremadamente sucios deben ser lavados antes de entrar al enfriador. En algunos casos, el agua de lavado también puede servir para un enfriamiento inicial, siempre y cuando sea fría y no sea reciclada. Se colocan tamices metálicos frente a la succión de la bomba para remover hojas o basura de gran tamaño. El cloro, un potente agente oxidante, se utiliza comúnmente para desinfectar el agua. Para optimizar la acción del cloro, el agua de temperatura cercana a 0°C (32°F) requiere de 100 a 150 ppm de cloro activo (disponible) y un pH cercano a 7.0. El ozono también se ha utilizado como desinfectante en algunas aplicaciones comerciales. El agua de enfriado se debe cambiar, por lo menos, diariamente, a menos que el producto esté inusualmente limpio. El agua de desecho, que puede contener residuos de pesticidas, sedimentos y cloro, generalmente se puede usar para regar tierras cercanas, pero las reglamentaciones de control de contaminación pueden llegar a prohibir esta forma de desecho.

El enfriador debe estar diseñado para permitir una limpieza fácil y completa. Todas las partes de la bandeja de distribución de agua deben estar accesibles. Si está cubierta con paneles aislantes, éstos deben ser fácilmente removibles para permitir la inspección de los agujeros tapados. El tanque o reservorio también debe ser de fácil limpieza, para que se puedan eliminar los sedimentos y desechos cuando se cambia el agua. El drenaje debe ser amplio para facilitar un drenado rápido, y debe estar ubicado lo suficientemente bajo como para que toda el agua de los escurrimientos salga. La mayoría de los hidrogenfriadores utilizan tamices de autolimpieza para basura que deben ser limpiados con frecuencia.

El cloro corroe la mayoría de los metales comunes, pero algunas partes del enfriador pueden estar hechas de plástico o madera, los cuales resisten el ataque del cloro. Aunque el acero inoxidable también es resistente al cloro, es caro. El acero de bajo carbono (acero suave) debe ser pintado para proporcionarle cierta protección, aunque la pintura también requiere de un mantenimiento regular.

El hielo se usa en enfriadores pequeños con períodos cortos de uso. El uso de hielo es caro porque, debido a que los grandes bloques no tienen suficiente área superficial para mantener el agua a temperaturas suficientemente bajas, se requiere

mucha mano de obra para romper los bloques y cargar los trozos pequeños dentro del enfriador.

Los serpentines del evaporador de refrigeración, tradicionalmente se instalan en el reservorio de agua por debajo del producto. Sin embargo, los evaporadores también se pueden colocar arriba de las bandejas de distribución de agua, lográndose, de este modo, un mayor flujo de agua a través del serpentín, aumentando la velocidad de intercambio de calor y permitiendo usar un serpentín más pequeño y económico. Los serpentines montados en la parte superior también admiten un reservorio de agua más pequeño, reduciendo con ello el uso de agua y el consumo de energía. Para los serpentines no sumergidos, el reservorio necesita ser lo suficiente grande como para acomodar la succión de la bomba y los tamices y tener un volúmen adicional durante la operación para manejar los arrastres de descarga causados por el llenado de los tubos, bandejas de distribución y empaques con agua.

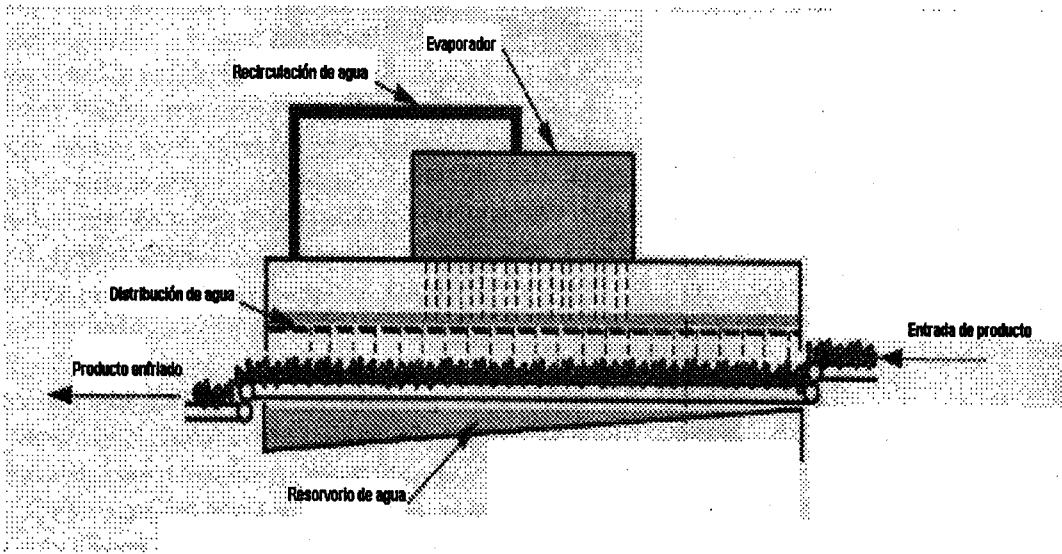


Figura 1. Vista en corte lateral de un hidrogenfriador de flujo continuo tipo cortina de agua.

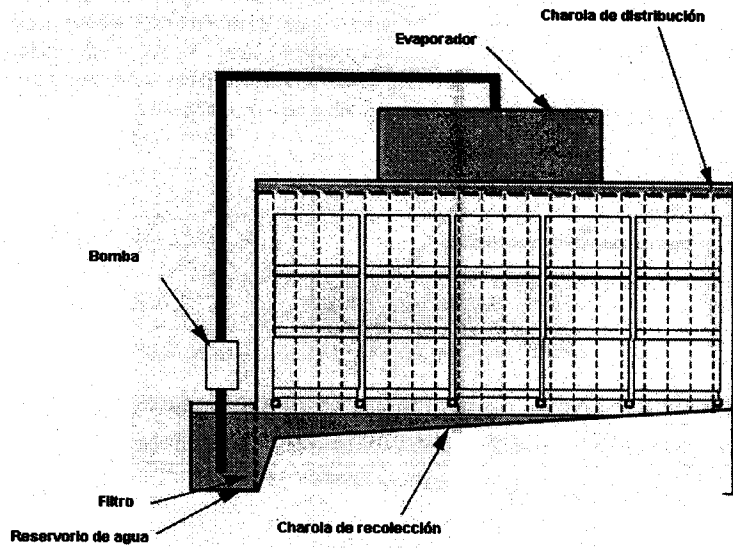


Figura 2. Vista en corte transversal de un hidrogenfriador de lotes con producto en caja de campo.

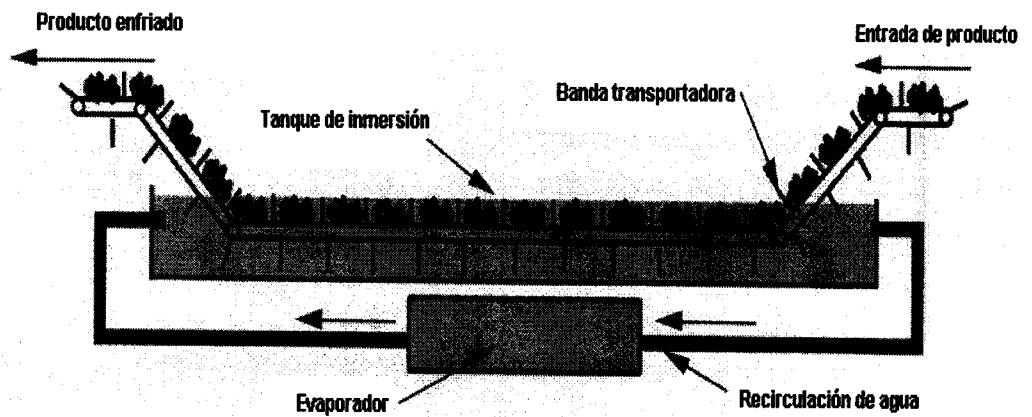


Figura 3. Vista en corte lateral de un hidrogenfriador por inmersión en flujo continuo.

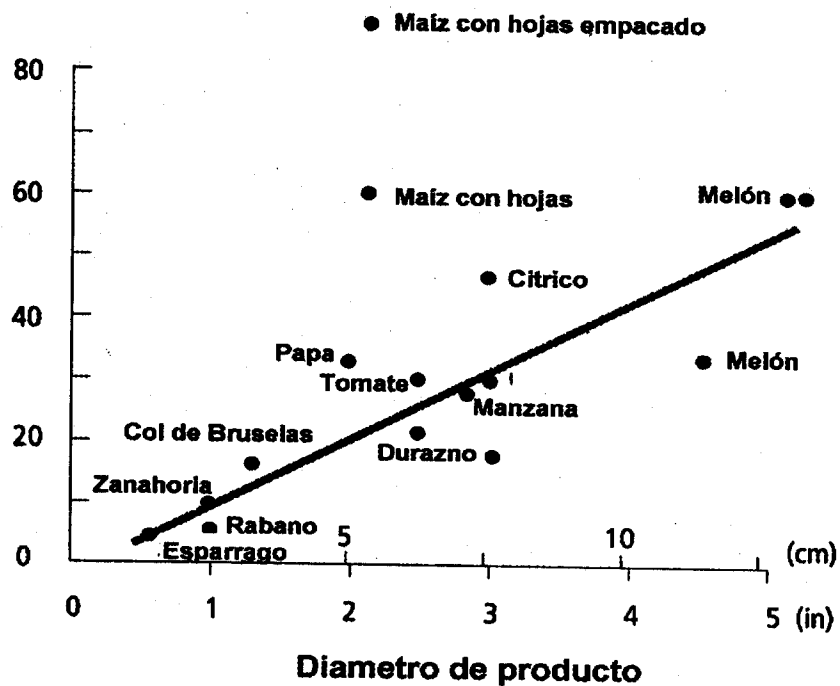


Figura 4. Efecto del diámetro mínimo del producto sobre el tiempo de enfriamiento en un hidrogenfriador tipo cortina de agua.