

El empleo de bajas temperaturas para la conservación de alimentos es un método ampliamente utilizado en la industria, incluso se puede afirmar que al igual que la deshidratación, es uno de los tratamientos más antiguos para tal fin, cuya aplicación a nivel industrial y comercial tiene más de un siglo de adecuación y evolución. La importancia de la conservación por frío se manifiesta en el amplio alcance que tiene sobre los diversos sectores, ya que permite mantener la calidad de la mayoría de los productos alimenticios a un costo competitivo. Es así que en todos los procesos de producción y elaboración se incluye al menos una etapa de conservación a bajas temperaturas, ya sea de materias primas o de producto final.

En general se emplean sistemas de conservación por frío, ya sea refrigeración o congelación, para mantener la calidad y extender la vida útil de alimentos cárnicos y sus derivados, alimentos vegetales y sus derivados, pescados y otros productos de la pesca, huevos, leche y derivados lácteos, productos de alto contenido graso, productos de panadería y confitería, jugos y pulpas, etc. Es decir todos aquellos que se caracterizan por tener una actividad de agua (aw) cercana a la unidad y a su vez un elevado contenido de humedad, propiedades que determinan que sean muy sensibles al deterioro, ya sea microbiológico, físico, químico o bioquímico. Al respecto, la refrigeración o congelación resultan eficientes para evitar o retrasar tales efectos, ya que las bajas temperaturas disminuyen la velocidad de las reacciones químicas o bioquímicas responsables de la pérdida de calidad de los alimentos. Con ello se logra detener o inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos o alterantes (efecto bacteriostático o bactericida dependiendo de la reducción de la temperatura que se alcance) y también disminuir la actividad de las enzimas que causan deterioro.

Refrigeración y congelación son los dos tipos de tratamientos por frío más conocidos, se distinguen por la temperatura de conservación alcanzada y por los efectos que causan sobre las características físicas y químicas del producto. La refrigeración es una técnica de conservación a corto plazo que aplica temperaturas ligeramente superiores a los 0° C. Por su parte la congelación permite la conservación a largo plazo e implica condiciones de temperaturas por debajo de las de refrigeración, en un rango de -15 a -25° C o menores. Del mismo modo corresponde diferenciar dos tipos de instalaciones de frío usadas actualmente en las industrias, según los fundamentos físicos aplicados para conseguir el descenso de la temperatura. Estas son las instalaciones de frío mecánico que utilizan la compresión de gases refrigerantes y las de frío criogénico que usan nitrógeno (N₂) o dióxido de carbono (CO₂) licuados (a condiciones de temperatura menores a las de su punto de licuefacción) en contacto directo con



los productos.

Vale destacar que la conservación por frío, al igual que cualquier tecnología de conservación, no mejora la calidad del producto final, sino que solo evita o retarda su deterioro, por lo que la calidad de las materias primas es fundamental. Igualmente existen otros factores que influyen en la calidad de los productos refrigerados o congelados, principalmente: el proceso aplicado, el material y tipo de envase, los tiempos y temperaturas usadas en la cadena de frío, así como la descongelación y cocción final (si es necesaria) antes del consumo.

Si bien, como se dijo, este no es un método innovador, los distintos sistemas e instalaciones de frío industriales se actualizan permanentemente. Asimismo se diseñan y prueban nuevas tecnologías con el fin de optimizar las variables del proceso y lograr conservar la calidad e inocuidad de los productos por tiempos más prolongados, además de buscar disminuir los costos de instalación y operativos. Por otro lado se busca desarrollar equipos a pequeña escala que logren satisfacer las necesidades de procesamiento y conservación de volúmenes menores de producción, aplicando o adaptando tecnologías similares a las implementadas para escalas industriales.

En este informe se presentará la tecnología de fluidos criogénicos, se describirá su funcionamiento y principales aplicaciones, y se comparará con la extensamente conocida refrigeración y congelación mecánica.

TECNOLOGÍAS DE FRÍO: MECÁNICO O FLUIDOS CRIOGÉNICOS

Si bien la conservación por frío mediante procesos mecánicos es una tecnología ampliamente usada y de extensa trayectoria en la industria, presenta algunas desventajas, por ejemplo en la calidad final de los productos, el alto costo de inversión inicial, entre otros, que han llevado a buscar nuevos métodos para la reducción de temperatura de alimentos. El objetivo era hallar tecnologías de conservación por frío que no causen el deterioro de los atributos sensoriales que dan identidad al producto, para ello era necesario encontrar un método que permita el rápido descenso de la temperatura, ya que cuánto más rápido se produce la congelación de un alimento, más pequeño son los cristales de hielo que se forman y menor es el daño que estos pueden provocar sobre la integridad de la matriz alimenticia.

Así surgió la tecnología de fluidos criogénicos, ya que estos al cambiar de estado de líquido a gaseoso absorben gran cantidad de calor de forma abrupta y como consecuencia de esa transferencia se produce el rápido descenso de temperatura de los elementos que se encuentran en contacto directo. Esto último es la característica más destacada de la tecnología de frío criogénico. Como ya se mencionó, cuando la temperatura desciende rápidamente, el agua se congela formando muchos cristales pequeños, los cuales no dañan la microestructuras del alimento, al contrario de lo que sucede cuando la congelación es lenta, allí el agua se congela formando cristales grandes que sí destruyen la matriz perjudicando la calidad del producto. Vale mencionar también que cuando los alimentos tratados por frío criogénico son descongelados mantienen su integridad y calidad sensorial, lo que en algunas ocasiones se pierde por congelado mecánico.

Fundamentos de la tecnología de frío criogénico

Para que un compuesto cambie de estado debe disponerse de determinada cantidad de energía en forma de calor. Esto se denomina calor latente, ya que si bien existe una pérdida o ganancia de energía en forma de calor, no se observan cambios de temperatura (todo cambio de estado se lleva adelante a

temperatura constante). Desde que se desarrollaron los primeros equipos de refrigeración o congelación mecánica, se utiliza el calor latente liberado por un fluido refrigerante al cambiar su estado de líquido a gaseoso para disminuir la temperatura de los productos. Es decir, ese calor latente es aprovechado dentro de las cámaras frigoríficas como calor sensible, generando una diferencia de temperatura, ya que el gas refrigerante siempre se encuentra a una temperatura menor a la de los alimentos, entonces la transferencia de calor se produce desde los alimentos, que disminuyen su temperatura como consecuencia de la pérdida de calor, hacia el fluido refrigerante, que no modifica su temperatura pero se evapora. En tales equipos de conservación por frío mecánico, el gas refrigerante se encuentra en un sistema donde cumple un ciclo continuo de compresión, condensación, expansión, evaporación y una nueva compresión. Lo innovador en el uso de fluidos criogénicos, que lo diferencia de estos ciclos de refrigeración mecánica, es que el cambio de estado (evaporación) se lleva a cabo cuando los fluidos están en contacto directo con los productos y, en general, no hay un ciclo para su reutilización, sino que son liberados directamente a la atmósfera luego de producido su cambio de estado de líquido a gaseoso.

Fluidos criogénicos: nitrógeno (N₂) licuado y dióxido de carbono (CO₂) licuado

El N₂ y el CO₂ se caracterizan por ser gases inertes, incoloros, aptos para su contacto con alimentos, que forman parte de la atmósfera y por lo tanto no resultan tóxicos. Es así que se emplean en distintos procesos en la industria alimentaria, por ejemplo el CO₂ en estado supercrítico se aplica para la extracción de aromas, antioxidantes, u otras sustancias de interés en la industria (Ver Ficha N° 1: Fluidos Supercríticos); asimismo tanto el N₂ como el CO₂ se usan para el diseño de las atmósferas modificadas para el envasado de alimentos (Ver Ficha N° 23: Envasado en Atmósfera Modificada y Controlada).

Ambos son gases a temperatura ambiente, y cuando se comprimen a presiones del orden de los 10 bar pasan a estado líquido, es decir son gases licuados, y alcanzan en ese estado temperaturas muy bajas, para dar un ejemplo de ello, el N₂ líquido almacenado a una presión de 2 bar se encuentra a -187° C aproximadamente, y el CO₂ líquido almacenado a 20 bar alcanza una temperatura de -20° C. Luego cuando estos fluidos se expanden hasta condiciones de presión atmosférica, se evaporan y absorben una gran cantidad de energía correspondiente a su calor latente, lo que produce el descenso abrupto de la temperatura de todo lo que se encuentre en contacto con estos. Esto es, en resumen, el funcionamiento de la tecnología de fluidos criogénicos, es decir los fluidos criogénicos que se encuentran almacenados en estado líquido se expanden y evaporan directamente sobre el producto alimenticio y esto genera una transferencia rápida de calor desde los alimentos hacia los fluidos y el descenso de la temperatura de estos últimos. Por lo tanto, si bien el requerimiento de inversión de capital es bajo, porque en relación a los sistemas de frío mecánico la instalación de equipamiento es simple, el mayor costo del proceso lo define el abastecimiento del gas licuado que se utilice, ya sea N₂ o CO₂.

En general, las mismas empresas que comercializan e instalan los equipos para refrigeración o congelación criogénica son quienes proveen luego los gases licuados a granel, se trata de empresas dedicadas a la producción y comercialización de gases usados como insumos industriales. Estos se comercializan en tanques de distinta capacidad dependiendo de la capacidad instalada de la industria. Por lo tanto las industrias que emplean esta tecnología deben abastecerse del gas licuado a granel de manera continua, como un insumo más de su proceso industrial, ya que solo en algunos casos puntuales el diseño del proceso permite su reutilización, pero en general son liberados a la atmósfera y

se pierden. Otra posibilidad es instalar en la planta un sistema de generación in situ del fluido criogénico, que también es provista por las empresas que producen gases para la industria.

La elección entre N₂ o CO₂ para el proceso dependerá del o los productos a tratar, analizando cuál de los dos gases se adapta mejor a los requerimientos de la línea de producción. El N₂ se caracteriza por lograr una velocidad de congelación mayor ya que la temperatura en estado líquido es significativamente menor a la del CO₂ y por lo tanto la transferencia de calor es más rápida. Por su parte, el CO₂ es un gas bacteriostático, por lo que adicionalmente a la disminución de la temperatura del producto logra tener una acción antimicrobiana, aunque la velocidad de transferencia de calor es menor.

EQUIPAMIENTO INDUSTRIAL PARA FRÍO CRIOGÉNICO

Los equipos que integran la instalación para tratamiento con fluido criogénico deben ser especialmente diseñados para esa aplicación, cumpliendo con las normas de seguridad e higiene correspondientes. Es por ello que, como ya se mencionó, los mismos son ofrecidos por las empresas que producen y comercializan los gases licuados. En muchos casos estas empresas no comercializan los equipos, sino que realizan contratos de comodato con las industrias, de esta forma si bien no se debe costear el equipamiento, si se debe comprar para su operación el fluido criogénico a la empresa que entregó el equipamiento en comodato. Dada la gran versatilidad de operación que presenta la tecnología de fluidos criogénicos y su fácil instalación, ha sido posible diseñar e implementar de manera exitosa una gran variedad de equipamientos industriales que satisfacen la demanda de las industrias y permiten el desarrollo de nuevos productos.

- **Túneles de congelado criogénico continuo:** son de los más utilizados en la industria, por ser versátiles y fáciles de instalar e incorporar a las líneas de producción. Utilizan N₂ licuado que ingresa al túnel de diferentes formas según el diseño del equipo, en general el N₂ ingresa en forma de spray y así se dispersa sobre los alimentos que circulan sobre la cinta. Para optimizar el rendimiento del fluido criogénico algunos equipos incorporan sistemas de recirculación de estos sobre los productos. La principal ventaja de los túneles de enfriamiento criogénico es el reducido espacio que ocupan en la planta, es a su vez lo que los diferencia de las grandes instalaciones de enfriamiento mecánico.
- **Gabinetes para enfriado o congelamiento de alimentos semicontinuo:** funcionan de forma similar a los túneles, pero de manera discontinua. Son útiles para el congelado de productos en lote. Tienen como ventaja la fácil instalación y el mínimo espacio que ocupa en la planta, así como la facilidad de mantenimiento y limpieza del equipo derivada del práctico diseño. Algunos de estos gabinetes de congelación por lote tienen un diseño en espiral que permite optimizar el espacio y procesar un mayor volumen de producto por cada operación.
- **Tambores para congelado de pequeños productos de forma individual:** se desarrollaron con el objetivo de lograr el congelado de productos de forma individual, garantizando la calidad de cada uno de ellos, evitando que sufran daños por aglomeración o adherencia durante la línea de producción que se traduzcan en un deterioro al descongelarse. Esta tecnología es la denominada IQF, por sus siglas en inglés Individual Quick Freezing, y se destaca por la alta calidad de los productos obtenidos. Se aplica principalmente para productos pequeños o en trozos, que tienden a adherirse entre sí. Los tambores cuentan con un sistema mecánico de rotación que moviliza a los productos a la vez que se inyecta el fluido criogénico, de esa forma

se logran la congelación uniforme, ya que los productos quedan inmersos en el fluido. La tecnología presenta grandes ventajas, además de la calidad de los productos obtenidos, es de fácil instalación y puede incorporarse a líneas de proceso en continuo.

- **Tambores para congelado y recubrimiento o glaseado de alimentos de forma individual:** combinan la tecnología IQF con sistemas de recubrimiento o glaseado. Al igual que se explicó anteriormente se trata de tambores rotatorios donde los fluidos criogénicos son inyectados y dispersados de forma tal que alcanzan a cada producto individualmente, además se suma un sistema de inyección del recubrimiento específico. Las ventajas de combinar ambas operaciones en un mismo equipo es la simplificación de las etapas productivas, un mayor rendimiento y a la vez una mayor uniformidad en el recubrimiento, lo que se traduce en un producto que presenta una forma y textura definida.
- **Equipos de congelado rápido por contacto directo sobre cintas transportadoras:** son sistemas de tecnología IQF que funcionan de manera más eficiente ya que permiten un mayor rendimiento del fluido criogénico que el de los tambores rotatorios. Estos equipos cuentan con una cinta transportadora hecha de un polímero específico, apto para el contacto con alimentos, que es impregnado con el fluido criogénico. De esta manera los alimentos se congelan por contacto directo con la cinta transportadora en su parte inferior, simultáneamente se dispersa fluido supercrítico sobre la parte superior de los alimentos, y así se obtiene un congelado uniforme. Algunos equipamientos incorporan un sistema vibratorio a la cinta transportadora para optimizar el congelado individual de productos que tienden a adherirse entre sí. Se aplica para congelado de productos que requieren una rápida congelación para mantener su forma, tal como helados, hamburguesas, etc.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> – Elevada transferencia térmica entre el fluido criogénico y el producto, lo que favorece el rendimiento del proceso, disminuyendo las pérdidas de energía. – Velocidad de congelación alta, lo que permite mantener la calidad organoléptica de los productos luego de descongelados. – Inversión inicial menor a la necesaria para la instalación de sistemas de refrigeración o congelación mecánica. – Uso de gases inertes, que no suponen un riesgo para la seguridad de los operarios ni el proceso en sí. 	<ul style="list-style-type: none"> – Costo operativo alto, debido al requerimiento de fluidos criogénicos licuados. – El fluido criogénico en la mayoría de los equipos disponible para esta tecnología no puede reutilizarse. – Se requieren instalaciones de frío adicionales para el almacenamiento de los productos congelados.

ELECCIÓN DEL MÉTODO DE CONSERVACIÓN POR FRÍO

La elección del método de refrigeración o congelación no es simple, sino que deben tenerse en cuenta determinados factores, sin que el costo por kg de producto sea el único factor determinante. En la práctica, para esa elección se hace un análisis donde se tiene en cuenta el costo del capital o inversión inicial, costo operativo, requerimientos para el cumplimiento de la normativa, y calidad del producto, todo ello a fin de definir la tecnología más adecuada para satisfacer la demanda de la industria y del consumidor.

En la siguiente tabla se muestran las principales diferencias entre congelado mecánico y por fluidos criogénicos.

	CONGELADO CRIOGÉNICO	CONGELADO MECÁNICO
Costo de inversión	Bajo costo de inversión inicial. Instalación simple.	Alto costo en la inversión de capital y equipamiento. Instalación compleja.
Costo operativo	Costo elevado para el abastecimiento de nitrógeno (N ₂) o dióxido de carbono (CO ₂) licuados.	Relativo bajo costo energético, sólo la energía necesaria para el funcionamiento de los equipos.
Costo de mantenimiento	Bajo, las instalaciones no tienen requerimientos altos de mantenimiento ni de limpieza.	Alto, principalmente para el mantenimiento de los equipos y del gas refrigerante, en general amonio.
Temperaturas de congelación	Si se opera con N ₂ se alcanzan temperaturas menores a - 190°C, y - 78° C con CO ₂	En general las temperaturas mínimas que se alcanzan son de - 18° C.
Calidad de alimentos	La congelación rápida reduce las pérdidas por deshidratación hasta un 1%, manteniendo la textura y el sabor.	La congelación es más lenta que con el método criogénico, por eso se observa una deshidratación superficial y la pérdida de peso del producto.
Consideraciones ambientales	Tecnología amigable con el medio ambiente, tanto el N ₂ como el CO ₂ son gases inertes que forman parte de la atmósfera.	El amoníaco es un buen refrigerante pero resulta tóxico, es un gas irritante.
Espacio de la planta necesario para instalación	Se alcanzan temperaturas más bajas a menor tiempo, por eso la permanencia del producto en el congelador es más corta. El equipo puede ser más pequeño y lograr igual rendimiento que los sistemas mecánicos más grandes.	Las temperaturas de congelación a las que se llega son menores y se requiere un tiempo más largo, dependiendo siempre de la circulación forzada de aire. Por eso el espacio que ocupan las instalaciones de congelación mecánica son mayores.
Flexibilidad de operación	Puede adoptarse fácilmente en nuevas líneas de producción o para la expansión de líneas de producción ya instaladas.	No es tan fácil incorporar cambios en el tipo de producto, decidir cambiar la forma de congelado o expandir la línea de producción requiere cambios mayores que la criocongelación.