

Universidad de Burgos

Facultad de la Politécnica Superior

Ingeniería Técnica Agrícola,

especialidad en industrias agrarias y alimentarias

Asignatura: Física Aplicada a las Industrias Agroalimentarias

Primer curso.

Burgos, 2000

ÍNDICE:

- **INTRODUCCIÓN pag.**
- **DESCRIPCIÓN, CARACTERÍSTICAS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ARMARIOS DE REFRIGERACIÓN Y CONGELACIÓN pag.**
- **DESCRIPCIÓN, CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS TÚNELES DE REFRIGERACIÓN Y CONGELACIÓN**

pag.

- **PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA DE TIPO MECÁNICO pag.**
- **EL FRÍO CRIOGÉNICO Y LA ESTRUCTURA DE LOS ALIMENTOS: INFLUENCIA DE LA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO pag.**
- **VENTAJAS DE LA CONGELACIÓN CRIOGÉNICA (CALIDAD MICROBIOLÓGICA, CALIDAD FÍSICA) pag.**
- **VENTAJAS DE LA CONGELACIÓN CON NITRÓGENO LÍQUIDO SOBRE**

OTROS SISTEMAS (POR ANHÍDRIDO CARBÓNICO, POR FRÍO MECÁNICO)

pag. 3. DESCRIPCIÓN, CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS TÚNELES DE REFRIGERACIÓN Y CONGELACIÓN.

Para la congelación o refrigeración de alimentos por nitrógeno líquido, en sistema continuo, se utilizan unos túneles especiales como el siguiente que vemos en la foto:

ESQUEMA N° 7

Estos túneles consisten en un recinto aislado a través del cual circulan los productos mediante un sistema de transporte, a velocidad regulable. En el último tercio del transportador, una rampa de pulverización dispersa sobre el producto el nitrógeno líquido ($-196^{\circ}\text{C}.$) en finísimas gotas. El gas frío resultante de la vaporización, se dirige por acción de unos ventiladores, en contracorriente con el producto, lo que propicia un excelente rendimiento térmico en la instalación.

El funcionamiento y regulación de este tipo de túneles es muy sencillo, solo basta con controlar:

- La velocidad de transporte del producto en el interior del túnel, que será en función de las dimensiones y características del alimento. En general basta un paso de 3 a 5 min. Para conseguir su congelación o refrigeración, según se desee.
- El caudal de nitrógeno líquido suministrado, que también será función de la masa de producto y de sus temperaturas a la entrada y salida del túnel.
- La pulverización del nitrógeno líquido se realiza por medio de boquillas dispuestas en rampa. Su situación se puede variar con objeto de conseguir el perfil térmico más adecuado en el interior del túnel.

La regulación automática del caudal de nitrógeno líquido es función de la temperatura que marque la sonda colocada en el interior del túnel.

Los modernos túneles como el que vemos en la foto, están constituidos por un recinto aislado, atravesado por tres cintas transportadoras de acero inoxidable. Son tres las etapas que podemos distinguir en el funcionamiento de un túnel de este tipo.

! **1º. Etap**. Los productos se cargan a granel en la cinta transportadora superior, que se desliza rápidamente con el fin de que el nivel de carga no sea excesivo, evitándose así que las diferentes piezas de producto se peguen entre sí.

! **2º. Etap**. Los productos caen en la segunda cinta transportadora formando una capa de mayor espesor.

! **3º. Etap**. En la tercera cinta continúa la congelación hasta el centro del producto.

La caída de una a otra cinta ayuda a evitar el fenómeno de pegaduras en los productos tratados.

Estos túneles son muy flexibles y pueden tratar todo tipo de productos tales como hamburguesas, salchichas, carnes troceadas, filetes de pescado, mejillones, gambas, champiñones, cebollas, etc.

El túnel Zip–Freeze está construido con materiales de calidad alimentaria tales como acero inoxidable o poliéster, siendo recomendable la utilización de este último, pues su menor conductividad térmica, permite un ahorro considerable de pérdidas de frío por transmisión, dado los elevados gradientes de temperatura con los que se trabaja. Por otra parte, el poliéster, es más cómodo de limpiar y sufre menos contracciones y dilataciones durante su utilización. No requiere instalación especial previa, pudiéndose colocar directamente en el suelo. El enfriamiento y limpieza del túnel son muy rápidos, reduciéndose considerablemente los tiempos muertos improductivos.

Gracias a la gran potencia frigorífica del túnel Zip–Freeze, las pérdidas de peso por deshidratación y las deformaciones de los productos son prácticamente nulas. Las estructuras celulares quedan muy bien preservadas y los fenómenos de alteración enzimática bacteriana son mínimos.

A continuación vamos a ver como tiene lugar el intercambio térmico entre el producto y el nitrógeno líquido dentro del túnel. Se puede destacar tres zonas:

- **ZONA** = Intercambio frigorífico gas – producto. Esta zona constituye el tramo más largo del túnel. Cerca de la entrada del producto, el nitrógeno gaseoso circula en contracorriente con el aquél, gracias a un sistema de ventilación. La extracción y salida al exterior del nitrógeno gaseoso se hace mediante una chimenea colocada en la zona de entrada del producto.
- **ZONA** = Pulverización. Aquí es donde tiene lugar la inyección de nitrógeno líquido sobre el producto, para lo que se dispone de un dispositivo de pulverización de gran capacidad. La regulación del caudal de nitrógeno líquido que se debe inyectar, se puede efectuar con dos electroválvulas colocadas en paralelo y mandadas por una sonda de medida de temperatura o bien con una válvula proporcional.
- **ZONA** = Estabilización. Esta parte es muy corta. La estabilización rápida de la temperatura del producto se

consigue con la ayuda de ventiladores. A continuación se produce la salida del producto.

4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA DE TIPO MECÁNICO

En el esquema numero 10 vemos el principio de funcionamiento de una instalación de frío mecánico. Un liquido para pasar al estado gaseoso necesita consumir calor, con lo que tiene que "robar" ese calor a otro cuerpo, que quedara mas "frío" de lo que estaba antes de producirse el fenómeno en cuestión. Por ello en la instalación que vemos en el esquema numero 10, el fluido que actuara como refrigerante pasa del estado liquido al gaseoso robando calor (por ejemplo al aire que se enfría y que se utiliza a su vez para enfriar productos alimenticios). Después es necesario volverlo a comprimir y enfriar para reanudar el ciclo.

Las partes principales de una instalación frigorífica de tipo mecánico son:

- Él evaporador
- Él compresor
- Él condensador
- La válvula de expansión.

Hay un lado de alta presión y otro de baja presión. El compresor extrae el fluido frigorífico del evaporador y lo comprime a una presión mas alta que la que tenia a su entrada. Desde el compresor va al condensador, donde es enfriado hasta pasar del estado gaseoso al liquido. En la válvula de expansión, se produce una bajada de la presión y el fluido frigorígeno pasa al estado gaseoso en el evaporador. Como ya dijimos, para conseguir ese cambio de estado necesita robar calor de otro fluido (aire o agua por ejemplo) que se enfriará.

Por ello, si por el vaporizador circula aire o agua, se enfriarán a temperaturas que pueden oscilar de cinco a menos 40 grados centígrados, según el programa frigorífico. Como el agua congela a cero grados centígrados, se suelen utilizar salmueras, agua glicolada, etc., cuando se quiere bajar de esos cero grados centígrados el punto de congelación del liquido utilizado como refrigerante.

Vamos a ver cada una de las partes de una instalación frigorífica.

El evaporador es la parte de la instalación donde se produce el cambio de estado, liquido a gas, del fluido frigorífico (freón, amoniaco). Los hay de varios tipos:

- Evaporador con circulación de aire
- Evaporador tubular
- Evaporador de inmersión.

En el primer tipo el refrigerante circula por aletas, alrededor de las cuales pasa aire que de ese modo es enfriado.

El evaporador tubular se utiliza cuando se quiere enfriar agua, agua glicolada, salmuera, etc. El refrigerante circula por el interior de tubos, mientras que el producto que queremos enfriar (agua, salmuera) baña estos tubos.

El agua se puede enfriar de esta forma hasta dos o tres grados centígrados. Pero si se le añade sal, etanol o

glicol su punto de congelación pasa de cero grados centígrados a temperaturas mas bajas ($-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ a -25°C), pudiendo ser enfriada entonces por debajo de esos 0°C sin miedo a su congelación.

En el evaporador por inmersión se deja que el agua se convierta en hielo (durante la noche, por ejemplo) y luego se le deja fundir nuevamente, con lo que tendremos agua fría a 1 o 2°C .

El compresor en donde se aumenta la presión del refrigerante que viene del evaporador, lo que produce también una subida de la temperatura del fluido frigorígeno. El tipo más común es el de pistones, aunque también se está popularizando mucho el de tornillo (esquema n° 11).

Como se ve en este esquema, el fluido entra por la derecha procedente del evaporador, siendo succionado por el compresor. Entonces se encuentra con los tornillos que giran y entre cuyos dientes se va comprimiendo el fluido, ya que el volumen disponible entre las ranuras que dejan los tornillos va disminuyendo gradualmente.

Esto hace que suba la presión del fluido, hasta que sale por el otro extremo hacia el condensador.

El fluido comprimido y caliente, pero aun en estado gaseoso, pasa al condensador de tipo tubular.

El condensador esta refrigerado por agua o aire o por una combinación de ambos.

De este modo, el fluido frigorífico(amoniaco, freón, etc.) es enfriado y licuado, estando así dispuesto para iniciar un nuevo ciclo.

Cuando la refrigeración del condensador se hace con agua, se produce un calentamiento de la misma, pero puede ser neutralizada si se enfría una torre.

De todas formas cada vez mas se están empleando condensadores refrigerados por aire, cuando no se dispone de un suministro aceptable de agua.

Los túneles de refrigeración de tipo mecánico (véase esquema numero 12), incorporan los elementos que acabamos de describir para enfriar aire a bajas temperaturas ($-25/40^{\circ}\text{C}$). Este aire se hace circular entre el producto por medio de ventiladores. A su vez, el producto va colocado sobre una cinta transportadora que se va desplazando por el interior del túnel.

En el caso del túnel que se muestra en el esquema numero 12, se incorpora un sistema de transporte en espiral, de forma que aumente el recorrido del producto por el túnel, con lo que permanece mas tiempo en su interior y da tiempo a su refrigeración o congelación, que ya no es tan rápida como en los túneles que funcionan con gases licuados.

Si en los túneles que funcionan con nitrógeno liquido decíamos que la congelación del producto se podía conseguir entre 3 y 10 minutos, en los túneles con equipos de frío mecánico, el tiempo suele ser muy superior (20 a 120 minutos e incluso mas)

5.EL FRÍO CRIOGENICO Y LA ESTRUCTURA DE LOS ALIMENTOS: INFLUENCIA DE LA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO.

A la hora de estudiar la influencia de los procesos de refrigeración y congelación sobre los productos alimentarios, es necesario establecer una distinción entre:

1°. Alimentos de estructura celular, que son la mayoría (carne, pescados, verduras, frutas, legumbres, etc.)

2°. Alimentos sin estructura celular (algunas salsas).

La unidad básica del primer tipo de alimentos es la célula. El esquema numera 13 nos, presenta un cuerpo unicelular, correspondiente a una bacteria, que nos puede ilustrar muy bien sobre los componentes de la citada unidad básica de la vida.

Como se aprecia en dicho esquema, la estructura celular consta de:

–Un núcleo central que contiene la información genética que controla sus procesos de reproducción y desarrollo vital.

–Él citoplasma o sustancia básica de la célula, compuesto por agua, hidratos de carbono, proteínas, etc.

La membrana celular, que en el caso de las células de origen animal está compuesta por una serie de capas lipoproteínicas, y que en el caso de las células vegetales puede intervenir también una capa de celulosa para dar consistencia a la célula. Los flagelos que aparecen en el esquema nº 13 les sirven a los seres unicelulares para desplazarse en su medio vital. Las células de los tejidos no suelen tener flagelos.

La función de la membrana celular es básica para la vida de la célula ya que es la encargada de dejar pasar nutrientes hacia en interior y de permitir la salida de las sustancias tóxicas resultantes de su metabolismo. La membrana ejerce por lo tanto una función permeable selectiva. Esto es muy importante durante los procesos de refrigeración y congelación de los alimentos.

Asimismo, para explicar los cambios que se producen en la estructura de los alimentos durante su congelación, es muy importante saber como se encuentra el agua en los tejidos. Tenemos:

–Agua ligada a proteínas, lipoproteínas, etc., que no sufre cambios durante el enfriamiento o congelación.

–Agua retenida en las estructuras celulares e intercelulares que es la que se transforma en cristales de hielo durante el proceso de enfriamiento por debajo de cero grados centígrados.

Básicamente podemos diferenciar dos procesos de congelación:

–1º . Congelación lenta, conseguida con sistemas tradicionales.

–2º . Congelación muy rápida, conseguida con gases criogénicos y sobre todo, con nitrógeno líquido, que es el gas criogénico por excelencia.

Cuando la congelación es lenta, el agua retenida se congela formando cristales grandes. Pero hay que distinguir entre el agua retenida en el interior de las células y el agua retenida en los espacios intercelulares.

El agua presente en los espacios intercelulares tiene una concentración menor de nutrientes que la que hay en el interior de la célula. Por ello congela antes haciendo que el fluido extracelular se concentre en nutrientes, lo que provoca una salida de agua de las células circundantes para compensar esa concentración. Esto provoca una concentración de las células, una deshidratación y desnaturalización de las proteínas contenidas en ellas, rotura de la membrana celular, etc. En resumen, con la congelación lenta se provoca la rotura de la estructura celular de los alimentos.

Cuando la congelación es muy rápida, como cuando se utiliza nitrógeno líquido, se congela el agua presente en el interior de la célula formando pequeños cristales, antes de que se formen cristales más grandes extracelulares. De esta forma se preserva la estructura celular del producto congelado.

6. VENTAJAS DE LA CONGELACIÓN CRIOGENICA (calidad MICROBIOLÓGICA, CALIDAD FÍSICA)

La primera y principal ventaja de la congelación criogénica, sobre todo con nitrógeno líquida, es la calidad del producto. Como ya hemos visto en el epígrafe anterior, la calidad en la congelación depende de la rapidez del proceso y se presente bajo un doble aspecto:

1º. Calidad bacteriológica. Mediante la acción de bajas temperaturas sobre los alimentos, se consigue reducir o eliminar las actividades microbianas o enzimáticas que provocan su destrucción. Los microorganismos, al igual que el hombre, necesitan unos elementos nutrientes. Una de las maneras de defendernos contra esa competencia es por la aplicación del frío a los alimentos. Efectivamente, al igual que el hombre encuentra su temperatura óptima para vivir entre los 15 y 25°C, la mayoría de esos microorganismos se desarrollan a temperatura de 23 a 30°C. Por ello, si descendemos a temperaturas de 2°C/–40°C podemos inhibir o detener totalmente su crecimiento. A este respecto es interesante conocer la siguiente clasificación de los microorganismos (véase esquema nº14):

- Microorganismos psicrófilos
- Microorganismos psicrófilos
- Microorganismos mesófilos
- Microorganismos termófilos

Los dos primeros son los que pueden desarrollarse a bajas temperaturas, entendiendo por tales las comprendidas entre 0°C y 7°C para los psicrófilos y 7°C a 18°C para los psicrófilos. Estos microorganismos son los menos abundantes. Para temperaturas de 0°C a –10°C la inhibición del crecimiento es casi total para cualquier tipo de microorganismo. Y para temperaturas de –18°C/–40°C, la inhibición es total e incluso se produce la destrucción de la mayoría de los microorganismos presentes en el producto de forma que este apenas experimenta cambio alguno de tipo microbiológico mientras permanezca congelado a bajas temperaturas. En la descongelación posterior si se pueden presentar infecciones microbianas si no se cuida la asepsia en su manipulación. Las atmósferas inertes en estos procesos de manipulación son muy favorables para evitar infecciones.

Viendo la clasificación que damos en el esquema nº 14 para los microorganismos podemos diferenciar dos sistemas de conservación por frío desde el punto de vista microbiológico:

- Refrigeración a temperatura de 0 a 8° C, que inhibe el desarrollo de los microorganismos mesófilos y termófilos, pero que aún permite en parte el de los psicrófilos (7 a 18°C). Con este procedimiento no se frena el desarrollo de los organismos psicrófilos (0 a 7°C).
- Congelación o ultracongelación a temperaturas –18/–40°C, que frena casi totalmente el desarrollo de los cuatro grupos de microorganismos citados en el esquema nº 14.

De todo esto se deduce que cuanto más baja sea la temperatura de conservación del alimento y cuanto más rápidamente se efectúe el descenso de la temperatura, más rápida y completamente se detiene el desarrollo de los microorganismos presentes.

- Calidad física. Cuando el enfriamiento es lento, se provoca la formación de cristales de hielo gruesos en los espacios intercelulares que rompen la estructura de los tejidos del alimento. Si la velocidad de congelación es rápida, se forman cristales de hielo más pequeños tanto en las células como en los espacios intercelulares, conservándose así mucho mejor las estructuras del alimento. Esto lleva consigo una serie de ventajas de orden físico (véase tabla nº5).

7. VENTAJAS DE LA CONGELACIÓN CON NITRÓGENO LÍQUIDO SOBRE OTROS SISTEMAS (POR ANHÍDRIDO CARBÓNICO, POR FRÍO MECÁNICO)

Vamos a comparar a continuación el sistema de congelación con nitrógeno con los restantes sistemas que básicamente son:

- Congelación con anhídrido carbónico
- Congelación por sistemas mecánicos

La tabla nº16 nos presenta de forma esquemática la comparación entre la congelación por N₂ y CO₂.

En primer lugar, el nitrógeno pasa de líquido a gaseoso a -196°C mientras que el anhídrido carbónico lo hace a -79°C , lo que supone una diferencia de 117°C , que le da al nitrógeno líquido una mayor rapidez de congelación. Como ejemplo citaremos que un túnel de CO₂ de iguales características que uno de nitrógeno da 2/3 de la producción de éste último.

En segundo lugar, el nitrógeno es un gas produciendo ácido carbónico, que puede dar un cierto sabor picante, cambiando las características del citado alimento.

En tercer lugar, el nitrógeno al pasar de -196°C a -20°C (temperatura normal de congelación de los alimentos), cede 72 Kilocalorías/litro. Por su parte, un kilo de CO₂ al pasar del estado líquido (forma en que está almacenado) al sólido (nieve carbónica) proporciona 60 frigorías.

En cuarto lugar, para el mismo precio de un litro de nitrógeno líquido que un litro de C=2 este último tendría un coste como fluido de congelación del orden del 20% más, ya que veíamos que el N₂ da 72 Kilocalorías/litro u el CO₂ da 60 kilocalorías/Kilo.

En quinto lugar, los tanques de almacenamiento de nitrógeno líquido van superaislados a temperatura ambiente, con unas pérdidas diarias para un depósito de 20.000 litros del orden del 0.4% de su capacidad, solo cuando no existe consumo. Los tanques de CO₂ llevan un equipo de frío a fin de licuar los gases que se producen por la evaporación de CO₂, como consecuencia del calor que entra por las paredes. No existen pérdidas de CO₂ en estos tanques, pero en cambio necesitan el equipo de frío mencionado y consumen energía. Por ejemplo, un depósito de 20.000 kilos de CO₂ lleva un equipo de frío de 6 C.V. equivalente a un consumo de energía eléctrica de 4.5 Kw/h, lo que supone un coste algo mayor que el equivalente por pérdidas en el depósito de N₂.

En sexto lugar, el nitrógeno ofrece mayor seguridad ya que al ser inerte y respirarlo continuamente no presenta ningún riesgo para la salud, mientras que el CO₂ es tóxico y a dosis superiores al 4.6% acaba por producir muerte por asfixia.

En séptimo lugar, el N₂ se almacena a baja presión (unos $3\text{Kg}/\text{cm}^2$) lo que presenta muchos menos riesgos que el CO₂ que se conserva a $20\text{Kg}/\text{cm}^2$ y a una temperatura de -20°C . la vigilancia y la seguridad debe controlarse muy cuidadosamente en el caso del CO₂. Si el tanque baja de $5.12\text{Kg}/\text{cm}^2$ (presión del punto triple), todo el CO₂ líquido pasa a CO₂ sólido, tardándose días en deshacer el bloqueo, para lo que hay que tomar sus debidas precauciones, pues se corre el riesgo de explosión en los circuitos.

En octavo lugar, el CO₂ es mucho más pesado que el aire, lo que hace que se acumule en el fondo de los depósitos creando situaciones de peligro y haciendo difícil su evacuación. El N₂ es menos pesado que el aire.

En noveno lugar, el CO₂ líquido puede producir atascos en la canalización, debido a que se puede formar nieve carbónica que bloquea la conducción al pasar de $20\text{Kg}/\text{cm}^2$ a la presión atmosférica, por lo que la congelación puede sufrir interrupciones.

En décimo lugar, los túneles de congelación de CO₂, son difíciles de regular. Es normal ver salir del túnel junto con el producto, trozos de nieve carbónica. Esto se debe a un mal intercambio térmico entre el CO₂ y el

producto a congelar y como consecuencia de ello, el consumo aumenta considerablemente.

Como resumen, vemos que en todos los puntos analizados, las ventajas de la congelación con N₂ sobre la congelación con CO₂, son evidentes.

A continuación vamos a comparar la congelación por nitrógeno líquido con la efectuada por sistemas mecánicos.

Como vemos en la tabla nº 17, en primer lugar y debido a la rapidez de congelación, las pérdidas de peso son inapreciables (menos del 0.1%) en la congelación con N₂, mientras que con frío mecánico estas pérdidas son 30 veces mayores.

En segundo lugar, la velocidad es mucho mayor con el nitrógeno ya que se puede conseguir que un alimento esté congelado en solo unos minutos (3 a 15 normalmente) mientras que en los túneles de frío mecánico, el tiempo de permanencia del producto en los mismos hasta alcanzar la temperatura fijada, puede ser de 20 minutos a 3 horas.

En tercer lugar, el nitrógeno es un gas que se inyecta a una temperatura muy baja (-196°C), mientras que en los túneles de frío mecánico, es el aire el que circula a temperaturas más altas (-25/-40°C). Además, la intensa circulación de aire sobre los productos no es buena ya que puede contribuir a la oxidación de los mismos.

En cuarto lugar, el precio de un túnel con equipo incorporado de frío es cuatro veces más caro que un túnel de nitrógeno.

También el mantenimiento es lógicamente más caro (4-6% aproximadamente).

En sexto lugar, los gastos anuales (fijos más variables) en los que se incluyen gastos financieros, mantenimiento, electricidad, coste del frío, etc, son un 35-45% superiores en el caso del frío mecánico.

En séptimo lugar tenemos un factor importantísimo de comparación: la calidad microbiológica. Debido a la velocidad más rápida de congelación con el nitrógeno líquido, la detención del crecimiento microbiano también es mucho más rápida que cuando se utiliza el frío mecánico. Además, el nitrógeno es inerte, mientras que el aire en circulación que se utiliza en los túneles mecánicos contiene oxígeno que es necesario para la vida de los microorganismos.

En octavo lugar tenemos otro importante punto de comparación: la calidad física. En el túnel de nitrógeno líquido se consigue una congelación rápida que mantiene muy bien las características iniciales del producto (color, olor, sabor, textura, frescura). Incluso al descongelar, apenas si se produce exudado (pérdida de agua). Con los túneles de frío mecánico, la congelación es más lenta lo que puede favorecer la formación de cristales gruesos en los espacios intercelulares de los tejidos de los alimentos. Esto lleva consigo una destrucción mayor de la estructura inicial del producto, dando lugar a pérdidas del agua en su posterior congelación. También se pueden producir cambios sensibles en otras características físicas del alimento (pardeamiento, oxidación por el aire, etc.).

. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA .

- **REFRIGERACIÓN, CONGELACIÓN Y ENVASADO DE LOS ALIMENTOS.**

A. Madrid, J. Gómez Pastrana, F. Santiago y J. M. Madrid.

AMV EDICIONES MUNDI – PRENSA

9

12