


Modelos de predicción de las cargas térmicas en una cámara frigorífica de productos cárnicos

Prediction models of thermal loads in a meat products cold room

I. Benítez-Cortés  ; O. L. Reina-Estrada  ; D. Hernández-Rojas  ; R. González de la Cruz 
 ; O. A. Velazco Rosell  ; A. Pérez Sánchez 
 DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24740>
 Artículo de investigación científica y tecnológica

Abstract—The present work was carried out in the Industrial Center "2 de Diciembre", located in Camagüey, Cuba with the objective of obtaining mathematical models that characterize the thermal loads of the freezing tunnel, depending on the inlet temperature and the quantity of meat. It was observed that there is a direct relationship between the amount of meat to be cooled and the power demanded, that as the input temperature of the meat increases, the power demanded increases, being this value higher for the greater quantity of meat to be stored, as well as that the heat demanded decreases when the inlet temperature of the frozen meat increases. The mathematical models obtained are of great importance for the company since through them it is possible to predict energy consumption for the concept of cooling and freezing the meat, thus predicting the influence of the factors of quantity and temperature of the meat inlet on the energy needs of the company. The NEVERA software was used to obtain the numerical results, while the statistical package Statgraphics® Plus version 5.1 was used for the statistical processing of the data obtained.

Index Terms — Heat required, cold room, mathematical model, power demanded, meat products.

Resumen—El presente trabajo se llevó a cabo en el Centro Industrial "2 de Diciembre", ubicado en Camagüey, Cuba con el objetivo de obtener modelos matemáticos que caracterizan las cargas térmicas del túnel de congelación, en función de la temperatura de entrada y la cantidad de carne. Se observó que

Este manuscrito fue enviado el 01 de junio de 2021 y aceptado el 25 de noviembre de 2022.

I. Benítez Cortés, Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Camagüey, Carretera Circunvalación Norte, km 5 ½, Camagüey, Cuba. (email: isnel.benites@reduc.edu.cu).

O. L. Reina Estrada, Especialista de la Unidad Empresarial de Base COMAT, Empresa Militar Ignacio Agramonte y Loynaz, Circunvalación Norte km. 8 ½, Camagüey, Cuba. (email: francys65@nauta.cu).

D. Hernández Rojas, Especialista de la Unidad Empresarial de Base COMAT, Empresa Militar Ignacio Agramonte y Loynaz, Circunvalación Norte km. 8 ½, Camagüey, Cuba. (email: daynet.hernandez@nauta.cu).

R. González de la Cruz, Profesor Auxiliar Consultante de la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Camagüey, Carretera Circunvalación Norte, km 5 ½, Camagüey, Cuba. (email: raul.gonzalez@reduc.edu.cu).

O. Velazco Rosell, Especialista del Laboratorio Físico-Químico, Centro de Ingeniería Ambiental de Camagüey, Avenida Finlay km. 2 ½, Camagüey, Cuba. (email: osmani@ciac.cu).

A. Pérez Sánchez. Profesor Instructor de la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Camagüey, Carretera Circunvalación Norte, km 5 ½, Camagüey, Cuba. (email: amauryps@nauta.cu).

existe una relación directa entre la cantidad de carne a enfriar y la potencia demandada, que a medida que aumenta la temperatura de entrada de la carne la potencia demandada aumenta, siendo mayor este valor para la mayor cantidad de carne a almacenar, así como también que a medida que aumenta la temperatura de entrada de la carne congelada, el calor demandado disminuye. Los modelos matemáticos obtenidos son de gran importancia para la empresa ya que mediante ellos se puede predecir los consumos energéticos por concepto de enfriamiento y congelación de la carne, pronosticando así la influencia de los factores cantidad y temperatura de entrada de la carne en las necesidades energéticas de la empresa. Para la obtención de los resultados numéricos se utilizó el software NEVERA, mientras que para el procesamiento estadístico de los datos obtenidos se empleó el paquete estadístico Statgraphics® Plus versión 5.1.

Palabras claves — Calor demandado, cámara frigorífica, modelo matemático, potencia demandada, productos cárnicos.

I. INTRODUCCIÓN

LA refrigeración y sus diferentes aplicaciones son encontradas en casi cada rama de la industria. La refrigeración es el proceso de remover calor, y la aplicación práctica que presenta radica en producir o mantener temperaturas por debajo del ambiente, siendo los principios básicos aplicados aquellos relacionados con la termodinámica. El calor es una de las muchas formas de la energía y surge principalmente a partir de fuentes químicas. El calor de un cuerpo es su energía térmica o interna, y un cambio de esta energía puede mostrarse como un cambio de temperatura o un cambio entre los estados sólido, líquido o gaseoso [1].

Un refrigerante es cualquier cuerpo o sustancia que actúa como agente de enfriamiento absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia. Con respecto al ciclo compresión de vapor, el refrigerante es el fluido de trabajo del ciclo el cual alternativamente se evapora y se condensa, absorbiendo y cediendo calor respectivamente. Para que un refrigerante sea apropiado y se le pueda usar en un ciclo de compresión de vapor, debe poseer ciertas propiedades químicas, físicas y termodinámicas que lo hagan seguro y económico durante su uso [2].

Los denominados sistemas frigoríficos o sistemas de



refrigeración corresponden a arreglos mecánicos que utilizan propiedades termodinámicas de la materia para trasladar energía térmica en forma de calor entre dos o más focos, conforme se requiera. Están diseñados primordialmente para disminuir la temperatura del producto almacenado en cámaras frigoríficas o cámaras de refrigeración las cuales pueden contener una variedad de alimentos o compuestos químicos, conforme especificaciones [3].

Existen dos tipos o configuraciones fundamentales de sistemas de refrigeración, la de absorción y por compresión de vapor. El sistema de compresión de vapor es el método más extendido a nivel mundial para la producción de frío utilizándose en gran parte de aplicaciones en refrigeración doméstica, comercial, industrial y climatización. Este tipo de instalaciones suponen un alto porcentaje de consumo energético y pueden suponer un alto impacto económico y medioambiental [4].

El proceso de refrigeración por compresión se logra evaporando un fluido refrigerante en fase líquida a través de un dispositivo de expansión dentro de un intercambiador de calor, denominado evaporador. Para evaporarse este requiere absorber calor latente de vaporización. Al evaporarse el líquido refrigerante cambia su fase a vapor. Durante el cambio de fase el refrigerante como vapor absorbe energía térmica del medio en contacto con el evaporador, bien sea este medio gaseoso o líquido. A esta cantidad de calor contenido en el ambiente se le denomina carga térmica. Luego de este intercambio energético, un compresor mecánico se encarga de aumentar la presión del vapor para poder condensarlo dentro de otro intercambiador de calor conocido como condensador. En este intercambiador se liberan del sistema frigorífico tanto el calor latente como el sensible, ambos componentes de la carga térmica. Ya que este aumento de presión además produce un aumento en su temperatura, para lograr el cambio de fase del fluido refrigerante y producir el sub enfriamiento del mismo es necesario enfriarlo al interior del condensador; esto suele hacerse por medio de aire y/o agua conforme el tipo de condensador, definido muchas veces en función del refrigerante. De esta manera, el refrigerante ya en fase líquida, puede evaporarse nuevamente a través de la válvula de expansión y repetir el ciclo de refrigeración por compresión [3].

Una cámara frigorífica es todo local aislado térmicamente en cuyo interior pueden mantenerse razonablemente constantes la temperatura y la humedad relativa requeridas mediante la acción de una instalación frigorífica [5]. Existen varios tipos de cámaras frigoríficas, siendo las más importantes las siguientes [5]:

- Cámara frigorífica para productos congelados: Cámara frigorífica concebida para recibir y almacenar alimentos y productos alimentarios previamente congelados.
 - Cámaras frigoríficas para productos refrigerados: Cámara frigorífica concebida para recibir y almacenar alimentos y productos alimentarios previamente refrigerados.
 - Cámara frigorífica bitempera: Cámara frigorífica concebida para recibir y almacenar, alternativamente, alimentos y productos alimentarios previamente refrigerados o congelados.
 - Cámara frigorífica mixta: Se denominan mixtas (enfriamiento y conservación refrigerada) aquellas con suficiente capacidad frigorífica instalada para poder enfriar en un plazo máximo de veinticuatro horas los productos introducidos en las mismas a temperatura ambiente, manteniéndolos luego a la temperatura de almacenamiento refrigerado adecuada.
- En el estudio y diseño de estos sistemas frigoríficos se aplican diversas ciencias, tales como la química en las propiedades y composición de los refrigerantes; la termodinámica, en el estudio de las propiedades de la materia y su energía interna; la transferencia de calor, en el estudio de intercambiadores de calor y soluciones técnicas; la ingeniería mecánica, en el estudio de compresores de vapor para lograr el trabajo de compresión requerido; la electricidad desde los tradicionales conocimientos en corrientes trifásicas para la alimentación de los equipos, así como también los conocimientos relativamente avanzados en automatización y de PLC (*Programmable Logic Controller*), para el control automático que estos requieren cuando están operando en una planta frigorífica [3].
- En la industria cárnica, las principales aplicaciones de la refrigeración mecánica son [1]:
- Enfriamiento del animal muerto directamente después de la matanza y el aderezo.
 - Enfriamiento de habitaciones de manejo de carnes tales como carnicerías.
 - Agua fría o salmuera para el enfriamiento de carnes de aves de corral.
 - Enfriamiento frío de carnes comestibles, asaduras y residuos de matadero.
 - Enfriamiento de salmuera y tinas de adobamiento.
 - Congelación de la carne.
- En la industria moderna, el ahorro de energía es una de las claves para disminuir los costos. En aquellas cuya función sea la producción y conservación de alimentos, la refrigeración es esencial en la producción, distribución y mantenimiento de alimentos. Muchos de estos pueden almacenarse de forma natural u otros requieren de una preparación, como los productos lácteos, enlatados, cárnicos, bebidas entre otros, donde la refrigeración es el factor principal de esta preparación. En estas industrias, los consumos energéticos de esta área resultan ser los que más inciden en los costos de producción, específicamente en la partida de demanda eléctrica [6].
- Así, ante la necesidad de un consumo racional de la energía, existe un creciente interés en mejorar la eficiencia energética en los sistemas de compresión de vapor, bien a través de la optimización en el diseño de componentes, o bien mediante una mejora en la operación del sistema. En cualquier caso, es

conveniente disponer las instalaciones funcionando libres de anomalías y degradaciones con una operación energéticamente eficiente, y mantenimiento la calidad de las condiciones de producción [4].

Por encontrarse Cuba en una zona tropical es que un análisis correcto del sistema de refrigeración juega un papel muy importante para disminuir el consumo de energía en las distintas fábricas que necesitan de este servicio.

Son varios los autores que han estudiado sistemas de refrigeración industrial, específicamente en cuanto a la presentación de un caso de ahorro energético en un almacén de producto congelado (helado) para establecer las variables con mayor impacto e importancia en la planta frigorífica [7], utilizando para ello la metodología propuesta por [8]; la presentación de los modelos matemáticos más empleados en el desarrollo de software predictivo usado para la evaluación de estrategias energéticas, el desempeño de la planta en condiciones normales y máximas, y el diseño de instalaciones frigoríficas, donde los modelos están formados por ecuaciones diferenciales ordinarias que parten de la 1ra Ley de la Termodinámica [9]; la presentación de una metodología para la evaluación de diferentes sistemas de refrigeración industrial, la cual fue aplicada en una empresa cárnica de Cuba con resultados satisfactorios [10]; la propuesta y validación experimental de un modelo físico que permite obtener una completa caracterización del comportamiento de un sistema de refrigeración por compresión de vapores usando refrigerante R134a como fluido de trabajo [4]; el estudio de la transferencia de calor para la determinación de los índices de carga térmica en una cámara de congelación [11]; y la presentación de una metodología para desarrollar un modelo semiempírico de un sistema de refrigeración clásico compuesto de un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador, el cual es ensayado en un rango muy amplio de condiciones de operación [12]. También se ha efectuado el diseño y evaluación de cámaras de refrigeración en [2] [3] [5] [13] [14] [15] [16] [17] [18].

El Centro Industrial “2 de Diciembre” de Camagüey, Cuba pertenece al Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Cuba, y cuenta con cinco áreas de producción, matadero, deshuese, empacadora, dulcería y encurtidos; en la cual se elaboran varios productos destinados a la venta mayormente para el Ejército Oriental y en el menor grado para la venta a Cub-AGRO.

Según criterios de especialistas, los consumos energéticos de esta área resultan ser los que más inciden en los costos de producción, específicamente en la partida de demanda eléctrica. Por otra parte, existen una serie de factores o síntomas que evidencian una baja eficiencia energética con altos consumos de energía en el sistema de refrigeración, lo que evidentemente influye en el funcionamiento de la instalación. Sin embargo, durante el periodo de explotación de las mismas, se han evaluado algunas de estas neveras, existiendo otras que no se han sometido a un proceso de evaluación que permita evaluar su desempeño.

En el presente artículo se lleva a cabo la evaluación técnica del sistema de refrigeración del túnel de congelación del

Centro Industrial “2 de Diciembre” con el fin de obtener los modelos matemáticos que caracterizan las cargas térmicas de esta cámara frigorífica en función de la temperatura y cantidad de carne almacenada. Para ello se emplearon los software NEVERA y Statgraphics® Plus v. 5.1 [19] con el objetivo de obtener los resultados numéricos y procesar estadísticamente los valores obtenidos, respectivamente.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Descripción del flujo tecnológico

El proceso comienza con la recepción del ganado vacuno el cual se pesa y se envía a los corrales de sombra, donde permanecerá hasta el siguiente día donde serán sacrificados. Posterior a su sacrificio y faenado se deja escurrir durante 45 minutos en cuartos y posteriormente se lleva a la nevera de post mortem, donde permanecerá hasta el siguiente día. Al siguiente día es trasladado al deshuese para su despiece y deshuese y a continuación será llevado a los contenedores para su congelación y expendio con una temperatura Interior de la carne de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la salida y una durabilidad de 6 meses.

B. Caracterización general del área

La instalación cuenta con un total de 9 neveras, de las cuales 5 son de mantenimiento y 4 son de congelación de los productos cárnicos. Las mismas se caracterizan por ser cámaras independientes, siendo su capacidad de enfriamiento de $0\text{ a }5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las de mantenimiento y $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las de congelación. Son cámaras de paredes metálicas y poseen como material aislante Poliuretano con un espesor en dependencia de la superficie específica. Dentro de estas, se destacan la nevera de *post-mortem* para acondicionar la carne para su posterior deshuese, un túnel de congelación (Fig. 1) para congelar las carnes y dos contenedores para conservación de productos hasta su posterior extracción, las cuales son las principales consumidoras.



Fig. 1. El túnel de congelación

Por otra parte, aunque se ha realizado otras evaluaciones del sistema de enfriamiento, estas neveras no han sido estudiadas. Además, el túnel de congelación es la cámara frigorífica más novedosa instalada en la empresa, por lo que necesita ser modelada en cuanto a los modelos matemáticos que

caracterizan las cargas térmicas en esta cámara.

El refrigerante utilizado en todas las cámaras es R-134a, con excepción del túnel de congelación que opera con refrigerante R-404A, siendo el sistema de refrigeración en todos los casos por compresión de vapores.

C. Parámetros técnicos del túnel de congelación

La Tabla 1 expone los principales parámetros técnicos del túnel de congelación.

TABLA I.

PRINCIPALES PARÁMETROS TÉCNICOS DEL TÚNEL DE ENFRIAMIENTO		
Parámetro	Valor	Unidades
Marca del compresor	S6G-25.2Y	-
Voltaje del compresor	230/60	V/Hz
Potencia del compresor	29,16-18,80	kW
Refrigerante	R-404A	-
Capacidad	2000-2500	kg
Largo	5,0	m
Ancho	4,0	m
Altura	3,0	m

D. Metodología utilizada para la estimación del balance frigorífico

Consideraciones que se tienen en cuenta:

- El tiempo de trabajo se considera tomando en cuenta el horario de acomodo de cargas (horario pico).
- La temperatura del medio ambiente y superficie de las paredes exteriores de la cámara, se toman como el valor promedio de todos los días analizados.
- El tiempo de apertura es un tiempo estimado para tener en cuenta el tiempo promedio que demoran las puertas abiertas. Se contabiliza mediante la observación aleatoria de aperturas por el personal del área, a partir de lo cual se estima un promedio de los tiempos observados cada vez que se abre la misma según la operación realizada.
- La temperatura de la cámara es uniforme en toda su magnitud.
- Los estudios se realizan considerando que la nevera se utiliza solamente para conservar carne de res. En caso de utilizarse para otros alimentos, se deben tener en cuenta los cambios en las propiedades físicas de los mismos.
- Los modelos se proponen para el túnel de congelación.

E. Procedimiento de cálculo

Se parte de la metodología propuesta por [20]. Se incluyen términos como el tiempo de jornada de trabajo dado a que los métodos utilizados para la evaluación de sistemas están en función de la comparación entre la oferta y demanda frigorífica del sistema en estudio. Se incluyen otros términos para poder determinar las cargas térmicas con la mayor exactitud posible que serán aclarados a medida que sean utilizados en la metodología.

Se utiliza el software NEVERA, desarrollado por el Grupo de Energía de la Universidad de Cienfuegos, para evaluar las cargas por puertas abiertas y aperturas en las cámaras.

F. Carga por enfriamiento

Enfriamiento de los productos: Este incluye el enfriamiento del producto que se introduce diariamente en la

cámara. Debido a que en las cámaras de conservación no existe congelación, la expresión de la carga por este concepto viene dada por:

$$Q_{P.ent} = \sum_{i=1}^n \frac{m_{P.ent} \cdot C_{P.prod} \cdot (T_{P.ent} - T_{cám})}{t_{R.prod}} \quad (1)$$

Dónde: $Q_{P.ent}$ - Carga térmica por enfriamiento del producto (kcal/h); $m_{P.ent}$ - Masa del producto entrante a la cámara (kg); $C_{P.prod}$ - Calor específico de la carne (kcal/kg°C); $T_{P.ent}$ - Temperatura del producto entrante a la cámara (°C); $T_{cám}$ - Temperatura interior de la cámara (°C); $t_{R.prod}$ - Tiempo de régimen para el producto (h).

Enfriamiento de embalajes: En un gran número de procesos de enfriamiento en cámaras, la entrada del producto se ve acompañada de su correspondiente embalaje. Si bien este hecho no es universal, en cámaras de conservación de carnes en canales o cuartos, en los que el embalaje es inexistente o muy limitado (envolturas de plástico), en contraposición para otros productos como las frutas, la masa de embalaje no es en lo absoluto despreciable frente a la del producto. En consecuencia, para aquellas aplicaciones en la que deba considerarse la presencia de envolturas de protección o simplemente de presentación del producto, se hace necesario contabilizar su correspondiente carga de enfriamiento según:

$$Q_E = \sum_{i=1}^n \frac{m_{E.ent} \cdot C_{PE} \cdot (T_{E.ent} - T_{cám})}{t_{RE}} \quad (2)$$

Dónde:

Q_E - Carga térmica por enfriamiento de embalajes (kcal/h); $m_{E.ent}$ - Masa del embalaje entrante a la cámara (kg); C_{PE} - Calor específico del embalaje (kcal/kg°C); $T_{E.ent}$ - Temperatura de entrada del embalaje (°C); t_{RE} - Tiempo de régimen para el embalaje (h).

Enfriamiento de plataforma: Se considera como carga adicional al enfriamiento de entrada diaria, la posible utilización de sistemas de plataformas o tarimas donde se soporta la materia prima cárnica, impidiendo su contacto directo con el piso. Como en el caso del embalaje, la utilización de tarimas implica su necesario enfriamiento desde la temperatura de entrada hasta la final de la cámara. La forma más habitual de contabilizar el enfriamiento del empaquetamiento (embalajes más tarima), pasa por la suposición de una temperatura inicial, y la consideración de una masa como porcentaje de las del producto, con la que la carga de enfriamiento total se calcula adicionando este término a través de:

$$Q_{PA} = \sum_{i=1}^n \frac{m_{PA.ent} \cdot C_{P.PA} \cdot (T_{PA.ent} - T_{cám})}{t_{RPA}} \quad (3)$$

Dónde:

Q_{PA} - Carga térmica por enfriamiento de plataforma (kcal/h); $m_{PA.ent}$ - Masa de plataforma entrante a la cámara (kg); $C_{P.PA}$ - Calor específico de la plataforma (kcal/kg°C); $T_{PA.ent}$ - Temperatura de entrada de la plataforma (°C); t_{RPA} - Tiempo de régimen de la plataforma (h).

Luego, la potencia por enfriamiento total se determina por:

$$Pot_{enf} = Q_{P.ent} + Q_E + Q_{PA} \quad (4)$$

Dónde:

Pot_{enf} - Potencia por enfriamiento de productos embalajes y plataforma (kcal/h).

G. Carga por respiración de los productos

En este trabajo no se tiene en cuenta esta carga ya que solo se considera cuando se almacenan frutas y verduras, que son las que intercambian dióxido de carbono con el medio.

H. Carga por transmisión de calor a través de las paredes

Se incluyen las pérdidas frigoríficas asociadas a las ganancias de calor que se producen por transmisión a través de las paredes de la cámara. Para esto, es necesario conocer la diferencia de temperaturas, la superficie y espesor de aislante en cada pared y la velocidad promedio del viento en el interior de la cámara. El cálculo debe realizarse para cada pared, dado a que la superficie, el espesor o la diferencia de temperaturas pueden ser diferentes. La pérdida total por transmisión será la suma de las ganancias de calor a través de cada pared.

Para la convección forzada en el interior de las cámaras no se puede definir la dirección del movimiento del fluido, por lo que se determina la longitud característica como si fuese una pared horizontal considerando que la transferencia de calor ocurre de la misma forma, por tanto:

$$x = \frac{A_{Pi}}{P_{Pi}} \quad (5)$$

Dónde: x - Longitud característica (m); A_{Pi} - Área de la pared i (paredes, piso o techo); P_{Pi} - Perímetro de la pared i (paredes, piso o techo) (m).

Para las paredes, se determina según:

$$\text{Paredes laterales} \quad x = \frac{L_{cám} \cdot h_{cám}}{(2 \cdot L_{cám} + 2 \cdot h_{cám})} \quad (6)$$

$$\text{Paredes frontales y traseras} \quad x = \frac{a_{cám} \cdot h_{cám}}{(2 \cdot a_{cám} + 2 \cdot h_{cám})} \quad (7)$$

$$\text{Piso y techo} \quad x = \frac{L_{cám} \cdot a_{cám}}{(2 \cdot L_{cám} + 2 \cdot a_{cám})} \quad (8)$$

Dónde: $L_{cám}$ - Longitud de la cámara (m); $h_{cám}$ - Altura de la cámara (m); $a_{cám}$ - Ancho de la cámara (m).

I. Mayoración de las cargas

En estos sistemas deben considerarse cargas y pérdidas que, en la práctica, resultan difíciles de contabilizar. Dentro de estos se destacan las asociadas a la transferencia de calor por convección – radiación, migración de vapores de agua desde el ambiente externo al interno, calor aportado en los procesos de eliminación de escarchas periódicos en cámaras con temperaturas inferiores a cero, entre otros. Es práctica normal nombrar todos los términos no calculados dentro del

coeficiente de seguridad denominado Mayoración de las Cargas, el cual suele establecerse en el orden del 10 % de la suma de todas las cargas.

J. Estimación del comportamiento de los parámetros de operación del túnel

Se requiere conocer los parámetros de operación del túnel que rigen la transferencia de calor en estos sistemas. Dentro de ellos se parte de carne de res como producto a congelar. Se toma un valor de capacidad calorífica de 0,75 kcal/kg°C y una capacidad calorífica después de congelar de 0,4 kcal/kg°C [20]. Se toma un valor de la temperatura de congelación de -1,8 °C ya que es la temperatura a la que empieza a congelar la carne [20] y un calor latente de 54,5 kcal/kg. Para lograr los parámetros de calidad que implica la duración de la carne en congelación por espacio de 6 meses, se toma un valor de -18 °C de almacenamiento en el túnel. Estos parámetros de operación y diseño, están establecidos en la normas para la conservación de la calidad [21] [22] y son valores predeterminados en el software.

K. Diseño experimental para la simulación

Se trabaja en el túnel de congelación y se parte de conocer los parámetros de operación que rigen la transferencia de calor en estos sistemas. Se parte de carne de res como producto a congelar. Se toma un valor de capacidad calorífica de 0,75 kcal/kg°C, una capacidad calorífica después de congelar de 0,4 kcal/kg°C [20]. Se toma una temperatura de congelación de -1,8 °C ya que es la temperatura a la que empieza a congelar la carne [20] y un calor latente de 54,5 kcal/kg [20]. Para lograr los parámetros de calidad que implica la duración de la carne en congelación por espacio de seis meses, se toma un valor de -18 °C de almacenamiento en el túnel. Estos parámetros de operación y diseño, están establecidos en la normas para la conservación de la calidad [21] [22] y son valores predeterminados en el software.

Se diseña un experimento simulado en el software NEVERA, soportado en una hoja de cálculo en Microsoft Excel. Primero, se obtienen, los modelos que caracterizan la carga antes de congelar, la carga durante la congelación, carga después de congelar y carga total del producto. Para esto, se utilizaron diferentes entradas del producto a las neveras: 500, 1 000, 15 00, 2 000, 2 500 y 3 000 kg/d.

Se determina los modelos que caracterizan el efecto de la variación de la temperatura de entrada de la carne al túnel (10, 15, 20 y 25 °C) sobre el calor demandado de los productos para diferentes cargas: 500, 1000, 15000, 2000, 2500 y 3000 kg/d.

Se realiza un diseño experimental 2k y se simula en las condiciones límites de operación del túnel, el efecto de: temperatura de entrada de la carne (10 - 20 °C) y la cantidad de carne (500 - 3000 kg) en el comportamiento de la carga antes de congelar, la carga durante la congelación, carga después de congelar y carga total del producto. Se parte solo del enfriamiento de los productos porque es la carga más influyente a extraer. En el caso de los estantes, estos se mantienen siempre dentro del túnel y no se tiene en cuenta el

embalaje ya que sus niveles de influencia están en el orden de las 60-70 kcal [20]. Para el caso de las cargas por cerramiento y otros, estas no varían debido a que las que se determina por paredes, techos y pisos no varían. Los resultados de este análisis se procesan en el Statgraphics® Plus [19] donde se aplica un análisis de regresión para la obtención de los modelos.

Se determinan los modelos que caracterizan el efecto de la variación de la temperatura de entrada de la carne congelada a las neveras (-5, -10, -15, -20 °C), sobre el calor demandado de los productos para diferentes cargas (500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 500 y 3 000 kg/d). Se determinan los modelos que definen este comportamiento a partir de un diseño experimental 2k, simulado en el software NEVERA y se simula para evaluar, en las condiciones límites de operación de la nevera de almacenamiento de la carne, el efecto de la temperatura de entrada de la carne congelada (-5 hasta -20 °C) y masa de carne (500 - 3000 kg).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de la modelación y simulación del proceso de enfriamiento en el túnel de congelación.

A. Potencia demandada en función de la cantidad de carne

La Fig. 2 muestra el comportamiento de la potencia demandada en función de la cantidad de carne, así como los modelos que caracterizan esta relación. Se observa que existe una relación directa entre la cantidad de carne a enfriar y la potencia demandada. Por otra parte, las mayores cargas son las asociadas a la congelación de los productos. Dentro de los aspectos que influyen en esta partida están el tiempo de congelación y la temperatura de entrada de la carne. Por tanto, cualquier acción que se pueda realizar para disminuir la temperatura de entrada de estos, así como el tiempo de congelación, reduciría considerablemente el calor total del producto y, con ello, la potencia demandada.

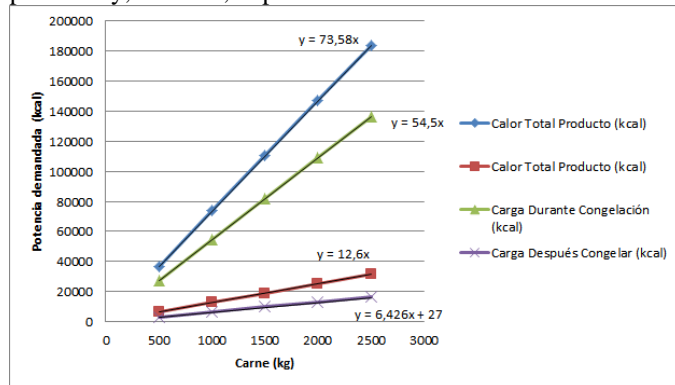


Fig. 2. Potencia demandada en función de la cantidad de carne.

B. Calor demandado por los productos en función de la temperatura de entrada de la carne

En la Fig. 3 se observa que, a medida que aumenta la temperatura de entrada de la carne, la potencia demandada aumenta, siendo mayor para la mayor cantidad de carne.

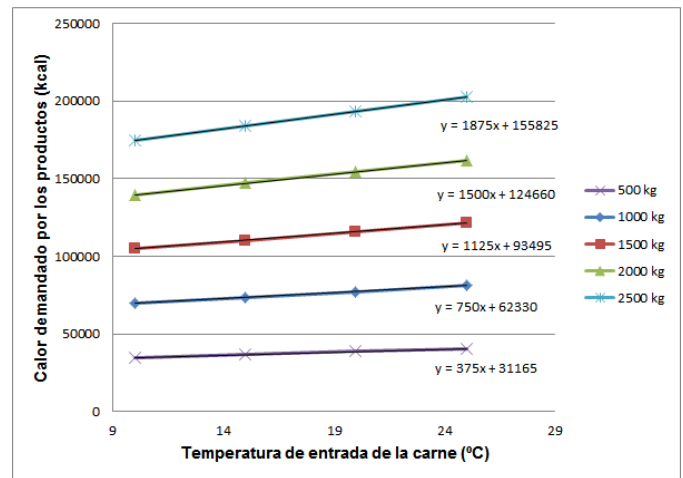


Fig. 3. Relación entre la cantidad de calor demandado por los productos y la temperatura.

A continuación se muestran los modelos que relacionan los consumos energía en función de la temperatura de entrada y cantidad de carne.

Modelo 1:

$$CAC = -229688 + 1312,5 \cdot T_{P_{ent}} + 14,475 \cdot m_{P_{ent}} \quad (9)$$

Modelo 2:

$$CDC = 0,0 + 0,0 \cdot T_{P_{ent}} + 54,5 \cdot m_{P_{ent}} \quad (10)$$

Modelo 3:

$$CDeC = 0,0 + 0,0 \cdot T_{P_{ent}} + 6,48 \cdot m_{P_{ent}} \quad (11)$$

Modelo 4:

$$CTP = -22968 + 1312,5 \cdot T_{P_{ent}} + 75,455 \cdot m_{P_{ent}} \quad (12)$$

Modelo 5:

$$CTP_{cong} = 6650,0 + 700,0 \cdot T_{P_{ent}} + 3,4 \cdot m_{P_{ent}} \quad (13)$$

Dónde:

CAC - Carga antes de congelar (kcal); CDC - Carga durante la congelación (kcal); CDeC - Carga después de congelar (kcal); CTP - Carga total del producto (kcal); CTP_{cong} - Carga de congelación (kcal); $T_{P_{ent}}$ - Temperatura de entrada del producto (°C); $m_{P_{ent}}$ - Masa de entrada del producto (kg).

En los modelos 2 y 3, que representan la carga durante y después de la congelación, se aprecia que la temperatura no influye en esta. Esto se debe a que la carne ya ha alcanzado la temperatura requerida para su congelación. En el caso del modelo 1 (carga antes de la congelación), la temperatura tiene una marcada influencia ya que no se ha alcanzado la temperatura de congelación de la carne de -1,8 °C. Se observa que, a medida que la temperatura de entrada aumenta, aumenta considerablemente, el calor antes de la congelación. Por su parte, en el modelo 3, la influencia de la temperatura de entrada es cero. Esto es debido a que el software solo tiene en consideración que esta carga se debe al proceso de extracción de calor desde los -1,8 °C, que es la temperatura de congelación. Entonces, para el caso donde se requiera continuar congelando una carne con una temperatura de entrada inferior a la de congelación, se trabajará con el modelo 5. Para esto, se simula desde una temperatura de entrada de -2 °C hasta los -17 °C que es la que garantiza la durabilidad de seis meses de la carne.

De forma general, estos modelos resultan una herramienta

importante para estimar los consumos de energía del túnel de enfriamiento para diferentes condiciones de operación y para realizar los balances energéticos en la industria. De igual forma, son factibles de utilizar en la planificación de la demanda energética en un tiempo determinado según una capacidad de producción planificada. En ocasiones, en la empresa se ha conectado el grupo electrógeno sin conocer previamente si soporta la carga de refrigeración. Esto conlleva a un uso irracional de portadores energéticos con su consecuente efecto económico, el cual recomendamos determinar en estudios posteriores.

A continuación se exponen los resultados estadísticos obtenidos en el software Statgraphics® Plus [19] para cada uno de los modelos anteriormente mostrados.

TABLA II

RESULTADOS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS EN EL SOFTWARE STATGRAPHICS PARA CADA UNO DE LOS MODELOS OBTENIDOS.

Parámetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
R-cuadrada (%)	89,5638	100,0	100,0	99,4533	99,7854
R-cuadrado (ajustado para g.l.) (%)	68,6914	0,0000	0,0000	98,3598	98,4120
Error estándar del est.	14062,5	0,0000	0,0000	14062,5	10256,4
Error absoluto medio	7031,25	0,00	0,00	7031,25	3258,90

C. Calor demandado por los productos en función de la temperatura de entrada de la carne congelada

La Fig. 4 muestra el comportamiento de la relación del calor demandado por los productos en función de la temperatura de entrada de la carne congelada al túnel de congelación. En la misma se aprecia que, a medida que aumenta la temperatura de entrada de la carne congelada, el calor demandado disminuye. Esto se debe a que está cada vez más cerca de la temperatura final de congelación para la carne de res que es de -18 °C. Por otra parte, se aprecia que, a medida que aumenta la cantidad de carne congelada que entra al túnel de congelación, aumenta este consumo. En este caso, la carga antes y durante la congelación no se tiene en cuenta ya que este proceso ocurre a temperaturas por debajo de la temperatura de congelación de la carne.

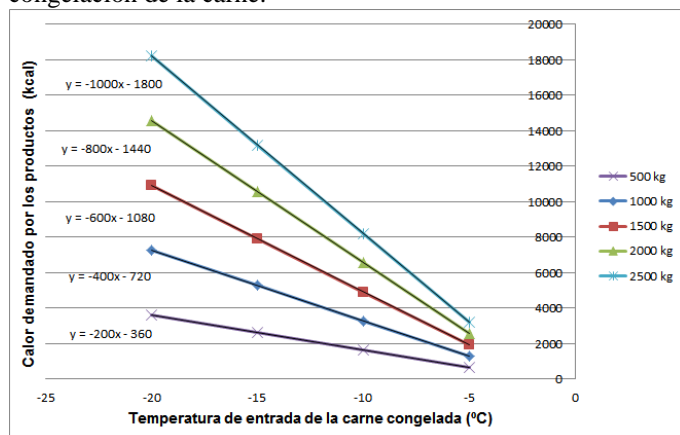


Fig. 4. Calor demandado en función de la temperatura de entrada de la carne

congelada.

El modelo que caracteriza este proceso es:

Modelo 6:

$$CD = -7604,17 - 603,333 \cdot T_{pent} + 4,305 \cdot m_{pent} \tag{14}$$

Dónde:

CD - Calor demandado (kcal).

Los parámetros estadísticos que se ajustan a este modelo son los siguientes [19]:

- R-cuadrada = 81,5070 %
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 44,5209 %
- Error estándar del est. = 5950,0
- Error absoluto medio = 2975,0

De forma general, estos modelos reportados son de gran importancia para la entidad ya que, a partir de ellos se hace posible predecir los consumos energéticos por concepto de enfriamiento y congelación de la carne. Por otra parte, permite pronosticar la influencia de los factores cantidad de carne y temperaturas de entrada en las necesidades energéticas de la empresa. De esta forma, se puede establecer la demanda energética para un periodo de tiempo determinado en función de las posibles entradas de carne a las neveras.

IV. CONCLUSIONES

Existe una relación directa entre la cantidad de carne a enfriar y la potencia demandada, mientras que las mayores cargas obtenidas son las asociadas a la congelación de los productos.

A medida que aumenta la temperatura de entrada de la carne, la potencia demandada aumenta, siendo mayor para la mayor cantidad de carne de entrada.

A medida que aumenta la temperatura de entrada de la carne congelada, el calor demandado disminuye.

A medida que aumenta la cantidad de carne congelada de entrada al túnel de congelación, aumenta el calor demandado por los productos.

Se obtienen modelos matemáticos mediante los cuales se estiman los consumos energéticos por concepto de enfriamiento y congelación de la carne en el túnel de congelación, además de predecir la influencia de los factores cantidad de carne y temperaturas de entrada sobre las necesidades energéticas de la empresa. Los modelos obtenidos en este estudio permiten establecer la demanda energética para un período de tiempo determinado en función de las posibles entradas de carne a la cámara frigorífica.

REFERENCIAS

- [1] A. R. Trott and T. Welch, *Refrigeration and Air-Conditioning*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2000, pp. 25–37.
- [2] J. L. Vásquez, y J. N. Jara, “Cálculo de una cámara de frío para conservación de hielo, hortalizas y frutas congeladas,” Tesis de Diploma, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, 2013.
- [3] J. S. Flores, “Diseño, cálculo y evaluación económica de cámara frigorífica,” Tesis de Diploma, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, 2012.
- [4] J. M. Belman, “Desarrollo de un modelo físico para una instalación de producción de frío por compresión de vapor utilizando el refrigerante R134a. Validación experimental y aplicación para la simulación energética,” Tesis Doctoral, Departamento de

- Ingeniería Mecánica y Construcción, Universidad Jaume I, Castellón, España, 2008.
- [5] D. Torres, "Diseño de cámara para la congelación y almacenamiento de pan," Tesis de Diploma, Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2014.
 - [6] H. C. Terán, O. B. Arteaga, W. E. Sánchez, Y. Morales, y J. G. Fausto, *Diseño de Cámaras Frigoríficas*. Sangolquí, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2019, pp. 8–14.
 - [7] C. A. Olvera, y S. Estrada, "Estudio comparativo de estrategias de ahorro eléctrico-económico en sistemas frigoríficos," *Industria Alimentaria*, pp.7–13, 2000.
 - [8] A. C. Cleland, and D. J. Cleland, *Cost-Effective Refrigeration*. Auckland, New Zealand: Massey University, 1995, pp. 12-19.
 - [9] M. d. J. E. Valencia, y S. Estrada, "Modelos matemáticos recomendados para la simulación de circuitos frigoríficos," *Industria Alimentaria*, pp. 16-24, 2000.
 - [10] R. González, y R. González, "Metodología para la evaluación de sistemas de refrigeración industrial," *Scientia Et Technica*, vol. XII, no. 30, pp. 215-217, 2006.
 - [11] M. Guananga, y A. Cornejo, "Estudio y análisis de transferencia de calor para determinar índices de carga térmica en una cámara de congelación de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal de Milagro," Tesis de Diploma, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador, 2015.
 - [12] C. Cuevas, y N. Fonseca, N. "Modelado de un sistema de refrigeración caracterizado en un rango amplio de condiciones de operación," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 24, no. 4, pp. 728-739, 2016.
 - [13] E. A. Saldías, "Diseño de una cámara de refrigeración para zanahoria (*Daucus carota* L.), betarraga (*Beta vulgaris* L.) y repollo (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) adaptada a las condiciones de Coyhaique, en la XI Región," Tesis de Diploma, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2003.
 - [14] J. Farré, "Cálculo y diseño de una instalación de conservación de fruta," Tesis de Diploma, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2011.
 - [15] V. Arteaga, "Cálculo y dimensionamiento de una cámara de refrigeración para productos orgánicos perecederos," Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad EIA, Envigado, Colombia, 2016.
 - [16] D. Vázquez, "Diseño de cámara frigorífica de 1500 toneladas de capacidad para conservar productos hidrobiológicos congelados a una temperatura de -20 °C en la Empresa Arcopa S.A – Paita," Tesis de Diploma, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú, 2018.
 - [17] E. Jordán, "Diseño de tres cámaras frigoríficas de conservación y una de congelación para almacenamiento de productos avícolas situada en la población de Hellín (Albacete)," Tesis de Diploma, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España, 2018.
 - [18] M. A. Díaz, y J. C. Zapata, "Diseño de una cámara frigorífica para la refrigeración de 3 ton de pescado en el Mercado Zonal de Lambayeque," Tesis de Diploma, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, 2020.
 - [19] Statpoint Technologies, "Statgraphics Plus," Statpoint Technologies, Inc., Version 5.1, 2005.
 - [20] J. M. Pinazo, *Cálculos en instalaciones frigoríficas*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, 1995, pp. 10-58.
 - [21] *Carne y productos cárnicos - Carne deshuesada de ganado bovino - Especificaciones de calidad*. NC 678, 2009.
 - [22] *Carne y productos cárnicos - Canales, bandas, piezas y carne de cerdo - Requisitos*. NC 823, 2011.



Isnel Benitez Cortés nació en Camagüey, Cuba, en el año 1970. Recibió su título de Ingeniero Químico de la Universidad de Camagüey en 1993, y su grado de Doctor en Ciencias Técnicas de la Universidad de Camagüey en el año 2008. Actualmente se desempeña como

Profesor Titular y Decano de la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba. Sus áreas de investigación incluyen la evaluación y diseño de plantas y procesos de la industria petroquímica, la modelación y simulación de procesos químicos, evaluación de sistemas y operaciones de combustión, así como también el análisis, diseño y evaluación de sistemas termoenergéticos, generadores de vapor, y procesos y equipos de intercambio de calor y masa.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2427-640X>.



Ornelio Lázaro Reina Estrada nació en Camagüey, Cuba en el año 1986. Recibió el título de Ingeniero Químico en la Universidad de Camagüey en 2012. Se desempeña profesionalmente como Especialista de la Unidad Empresarial de Base COMAT, de la Empresa Militar

Ignacio Agramonte y Loynaz, Camagüey, Cuba. Su área de investigación abarca la evaluación energética de sistemas de refrigeración industrial, y la tecnología de muebles. Es Máster en Análisis de Procesos de la Industria Química por la Universidad de Camagüey desde el año 2016. Actualmente se encuentra cursando una Maestría de Dirección.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0561-7774>.



Daynet Hernández Rojas nació en Camagüey, Cuba en el año 1989. Recibió el título de Ingeniero Químico en la Universidad de Camagüey en 2015. Se desempeña profesionalmente como Especialista de la Unidad Empresarial de Base COMAT, de la

Empresa Militar Ignacio Agramonte y Loynaz, Camagüey, Cuba. Su área de investigación abarca el diseño y análisis termodinámico de sistemas de refrigeración industrial y la tecnología de muebles. Actualmente se encuentra cursando una Maestría de Dirección.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1659-693X>.

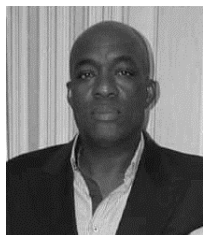


Raúl González de la Cruz nació en Camagüey, Cuba en 1944. Recibió el título de Ingeniero Químico en la Universidad de Camagüey, Cuba en el año 1978. Se desempeña profesionalmente como Profesor Auxiliar Consultante en la Universidad de Camagüey, Cuba. Su área de

investigación comprende la evaluación termo-energética y termodinámica de sistemas, operaciones y procesos de la industria química, cálculos medioambientales y diseño de

equipos de transferencia de calor y masa. Es Máster en Análisis de Procesos de la Industria Química desde el año 2008.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-239X>.



Osmani Alberto Velazco Rosell nació en Camagüey, Cuba en 1967. Recibió su título de Ingeniero Químico por la Universidad de Camagüey en el 2001. Actualmente se desempeña como Especialista en el Laboratorio de Físico-Químico del Centro de Ingeniería Ambiental de Camagüey. Su área de

investigación consiste en la gestión medioambiental de procesos y operaciones de la industria química, determinación de parámetros físico-químicos de aguas y aguas residuales, y la evaluación medioambiental de plantas químicas. Es Máster de Química Analítica por la Universidad Central de las Villas desde 2017.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5364-7420>.



Amaury Pérez Sánchez nació en Camagüey, Cuba en 1984. Recibió su título de Ingeniero Químico por parte de la Universidad de Camagüey en 2009. Actualmente se desempeña como profesor instructor de la Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Camagüey.

Sus áreas de investigación incluyen la modelación y simulación de procesos químicos y biotecnológicos, diseño de equipos de transferencia de calor y masa, y el diseño de plantas y operaciones de la industria biotecnológica.

Su producción abarca la publicación de 40 artículos en revistas científicas, y la elaboración de un libro de simulación de procesos. Actualmente se encuentra cursando una Maestría en Biotecnología.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0819-6760>.