

ARTICULO ORIGINAL

## **Evaluación técnico-económica del sistema de refrigeración de una empresa cárnica**

### **Techno-economic evaluation of the refrigeration system at a meat company**

**Rondón González, Y.<sup>1</sup>; González de la Cruz, R.<sup>1</sup>; \*Pérez Sánchez, A<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Facultad de Ciencias Aplicadas, Departamento de Ingeniería Química. Cuba

#### **RESUMEN**

El presente trabajo se desarrolló en la empresa cárnica "Raúl Cepero Bonilla", en Camagüey, Cuba con el objetivo evaluar el sistema de refrigeración. Se obtuvieron valores de coeficiente de rendimiento y de eficiencia termodinámica para el compresor de 3,849 y 59,86%, respectivamente, los cuales pueden considerarse aceptables. El consumo diario de energía frigorífica fue de 4 332 kW, el cual se reduce en un 61,18 %, con ambas propuestas de mejora, lo que implica un ahorro económico anual de \$ 27 114,32. El costo de inversión de la instalación del aislante Armaflex en las tuberías de refrigeración ascendió a \$ 103 234,24, mientras que el costo de inversión de la instalación del aislante Poliuretano en las cámaras frigoríficas tuvo un valor de \$ 506 536,38. La inversión del aislante en las redes de tuberías de refrigeración se recupera en 4,76 años. Se emplearon hojas de cálculo Excel para la realización de los cálculos.

**Palabras clave:** Sistema de refrigeración, compresor, cámaras frigoríficas, aislamiento, costo.

#### **ABSTRACT**

The present work was carried out at "Raúl Cepero Bonilla" Meat Company in Camagüey, Cuba, with the objective of evaluating its refrigeration system. Values for the parameters thermodynamic efficiency and COP of 3.849 and 59.86% were obtained for the compressor, respectively, which can be considered acceptable. The daily consumption of frigorific energy was of 4 332 kW, which is reduced by 61.18% with both improvement proposals, thus implying \$ 27 114.32 of annual economic savings. The investment cost of installing Armaflex insulation at refrigeration pipes ascended to \$ 103 234.24, while the investment cost of installing Polyurethane insulation at refrigeration chambers had a value of \$ 506 536.38. The insulation investment in refrigeration pipes is recovered in 4.7 years. Excel spreadsheets were used to carry out calculations.

**Keywords:** Refrigeration system, compressor, frigorific chambers, insulation, cost.

#### **INTRODUCCIÓN**

La refrigeración se define como el proceso de extraer calor desde una fuente de calor, sustancia, o medio de enfriamiento a baja temperatura, y transferirlo hacia un sumidero de calor de alta temperatura. La refrigeración mantiene la temperatura de la fuente de calor por debajo de aquella que tienen sus

---

**\*Autor Correspondiente: Amaury Pérez Sánchez.** Departamento de Ingeniería Química; Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Cuba. Correo electrónico: amaury.psanchez@reduc.edu.cu  
Fecha de recepción: 18/12/2018 Fecha de aceptación: 02/02/2019

alrededores a medida que transfiere el calor extraído, así como también cualquier consumo de energía requerido, hacia un sumidero de calor, aire atmosférico o agua superficial (Wang, 2001).

Un sistema de refrigeración es una combinación de componentes y equipos conectados en un orden secuencial para producir el efecto de refrigeración deseado. La gran mayoría de las plantas destinadas a la refrigeración industrial, sea cual sea el tamaño, desde los frigoríficos domésticos hasta los más grandes sistemas industriales, utilizan el sistema de compresión del vapor para la producción de frío (ASHRAE, 2017). El principio de este sistema de refrigeración consiste en la activación del refrigerante por medio de compresión hasta un nivel elevado de temperatura y presión después que ha producido su efecto de refrigeración. El refrigerante comprimido transfiere entonces su calor hacia el sumidero y es condensado en forma líquida. El refrigerante líquido es luego estrangulado hasta obtener un vapor de baja presión y temperatura con el fin de producir el efecto de refrigeración durante la evaporación.

El amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) se ha venido empleando de forma continua como fluido frigorífero desde que el ciclo de refrigeración por compresión de vapor tuvo uso práctico. Ha permanecido como principal refrigerante empleado en los sistemas de refrigeración industrial a causa de sus propiedades termodinámicas superiores y bajo costo (ASHRAE, 2017).

La refrigeración industrial es muy empleada en la industria alimenticia, así como también por otras industrias tales la biotecnológica y pesquera. Con el fin de promover el uso eficiente de la energía en este tipo de sistemas, es necesario conocer con detalle las diferentes opciones presentes en los sistemas de generación y distribución, así como también las oportunidades existentes para su uso final eficiente. Si la refrigeración industrial se definiera dentro de la tecnología utilizada en la industria de los alimentos y productos químicos, esta definición incluiría aproximadamente las dos terceras partes de las instalaciones (Balmer, 2011).

Dada la creciente preocupación por el uso de energía, y en particular, con la necesidad de reducir la liberación de dióxido de carbono y el uso de combustibles fósiles y con los costos de energía cada vez mayores, la sostenibilidad y la competitividad de las industrias que emplean la refrigeración industrial en todas sus variantes depende, en cierta medida, en su capacidad de utilizar la energía de una manera más racional y eficiente (Nunes et al., 2011).

La industria cubana actual tiene la necesidad de tomar otra perspectiva en la explotación energética encaminada a la evaluación de las tecnologías existentes, y a la introducción de técnicas ahorradoras en las instalaciones industriales que permitan hacer más competitivos los precios y productos elaborados. Debido a esto, y tomando en cuenta la premisa vigente del país consistente en tomar la eficiencia energética como su fuente de energía más barata y menos contaminante, es que la evaluación termodinámica de instalaciones de refrigeración ocupa en la actualidad un lugar importante para los profesionales y técnico de la rama (Toledo et al., 2017).

Son varios los autores que han evaluado sistemas de refrigeración de diversos tipos. En este sentido, (González & González, 2006) propusieron una metodología para evaluar energéticamente sistemas de refrigeración industrial, la cual fue aplicada en un combinado de procesamiento de productos cárnicos en la provincia de Camagüey, Cuba, con resultados satisfactorios y confiables. En otro estudio (Mumanachit et al., 2012) compararon el rendimiento energético y económico de dos sistemas de refrigeración: (1) sistema directo de

amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) de dos etapas y (1) sistema de refrigeración amoníaco-dióxido de carbono ( $\text{NH}_3\text{-CO}_2$ ) en cascada para aplicaciones a bajas temperaturas (por debajo de  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ), obteniéndose modelos por componente y por sistema para ambas opciones, los cuales proporcionan la base para cuantificar los costos de operación relativos de ambos sistemas en base anual y por ciclo. También (Dopazo & Seara, 2011) efectuaron el diseño, construcción y posterior evaluación de un prototipo de sistema de refrigeración en cascada con  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_3$  para aplicaciones y procesos de congelación operando a  $-50\text{ }^\circ\text{C}$ . Por otro lado Toledo y col. (Toledo et al., 2017) se llevó a cabo la evaluación de la eficiencia energética del sistema de refrigeración en la planta de producción de helados del Complejo Lácteo Habana, en Cuba, obteniendo como resultados que el mismo trabaja con un coeficiente de funcionamiento de 1,75, un rendimiento relativo de 58,35%, y un índice de consumo energético de 0,047 kW-h/kg. Además, Nunes y col. (Nunes et al., 2011) evaluaron la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración de la industria de procesados cárnicos en Portugal, en particular las de manufactura de jamón, obteniendo como resultado que los sistemas frigoríficos son los responsables primarios del consumo de energía en estas industrias, con un consumo específico de electricidad de 1208 kWh/ton. Por último, Acosta y col. (Acosta et al., 2011) llevaron a cabo un estudio sobre la eficiencia energética de la Empresa Nacional de Frigoríficos Enfrigo, en Cuba, con el fin de conocer sus parámetros de consumo más importantes, y proponer variantes de mejoras en base a los resultados obtenidos.

La empresa cárnica "Raúl Cepero Bonilla", ubicada en la ciudad de Camagüey, Cuba, tiene como objetivo producir y comercializar de forma mayorista diferentes tipos de carnes, así como también sus derivados y subproductos, tanto comestibles como no comestibles, provenientes fundamentalmente del ganado vacuno y porcino. En esta empresa la refrigeración constituye la base fundamental para la conservación de la mayoría de los productos cárnicos obtenidos, además de la creación y mantenimiento estricto de ambientes artificiales refrigerados durante las operaciones de producción de los diferentes surtidos. Debido a la explotación continua e intensiva del sistema de refrigeración de esta fábrica en los últimos años, así como también considerando el mantenimiento no adecuado de algunos de sus componentes y equipos, se hace necesario realizar una evaluación técnico-económica de dicho sistema, específicamente en cuanto a las cargas frigoríficas de cada una de sus neveras, y las ganancias de calor experimentadas en las tuberías por donde circula el refrigerante refrigeración, para de esta manera conocer cuáles son las causas que motivan las principales deficiencias en su funcionamiento actual y proponer variantes de mejoras con el fin de incrementar su eficiencia energética.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Descripción del sistema de refrigeración**

El sistema de refrigeración de la empresa cárnica "Raúl Cepero Bonilla" se muestra en la Figura 1. El amoníaco líquido sale del tanque receptor a una presión de  $12,0\text{ kgf/cm}^2$  y a una temperatura de aproximadamente  $32\text{ }^\circ\text{C}$ . A estas condiciones es trasladado por tuberías hasta las cámaras o neveras, donde en cada una de éstas pasa por un dispositivo (válvula) de expansión, saliendo una mezcla bifásica (líquido-vapor) a una temperatura de  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  y una presión de  $2\text{ kgf/cm}^2$ . La fracción de amoníaco líquido se evapora en los evaporadores-difusores que se encuentran en el interior de cada nevera,

saliendo de dichos equipos como vapor saturado con una pequeña fracción de líquido no evaporado, los cuales se unen a la fracción vapor que se había formado a la salida de la válvula de expansión, retornando esta mezcla hacia la sala de máquinas. Se introduce esta mezcla en el tanque separador de modo que los vapores se acumulan en la parte superior de dicho tanque, mientras que el líquido se mantiene debajo, pasando luego hacia un tanque auxiliar que tiene la función de retener el líquido remanente no evaporado en las cámaras, para de esta forma permitir que en la línea de succión del compresor sólo se manejen vapores de amoníaco. Los vapores succionados por el compresor son comprimidos hasta una presión de 12 Kgf/cm<sup>2</sup> y una temperatura de 120 °C, y a continuación son enviados hacia los condensadores evaporativos, donde se enfrían hasta alcanzar la condición de líquido saturado a la misma presión, pero a una temperatura de 32°C aproximadamente. A continuación este amoníaco líquido saturado es enviado hacia el tanque recibidor, completándose de esta forma el ciclo.

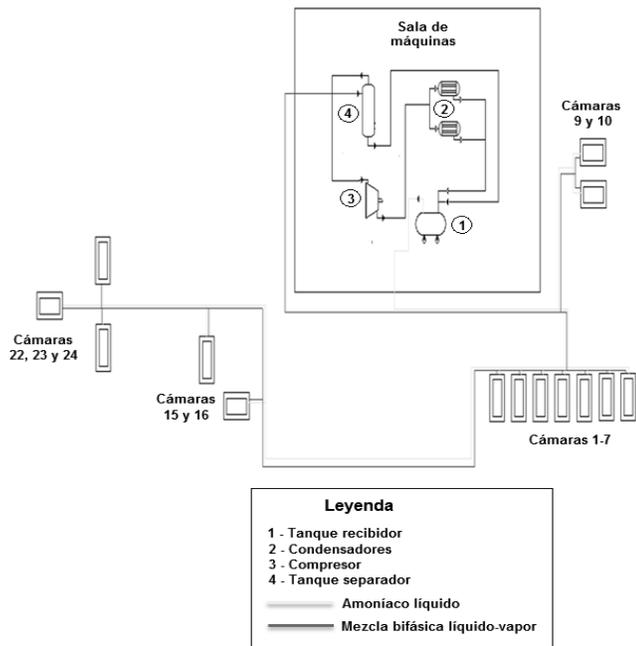
**Metodologías empleadas para la evaluación del sistema de refrigeración**

- Evaluación del compresor:

Se empleó la metodología descrita en (Fernández, 1994), la cual emplea las siguientes correlaciones (Tabla 1):

**Tabla 1.** Ecuaciones empleadas para llevar a cabo la evaluación del compresor

Parámetro	Ecuación	No. ecuación
Relación de incremento de presión	$\tau = \frac{P_2}{P_1}$	(1)
Eficiencia volumétrica	$\eta_{vol} = 1 - 0,05 \cdot \tau$	(2)
Volumen teórico de amoníaco comprimido por el compresor (m <sup>3</sup> /h)	$V_{t(NH3)} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot N \cdot A$	(3)
Volumen real de amoníaco comprimido por el compresor (m <sup>3</sup> /h)	$V_{r(NH3)} = V_{t(NH3)} \cdot \eta_{vol}$	(4)
Caudal másico de amoníaco trasegado por el compresor (kg/h)	$M_{(NH3)} = \frac{V_{r(NH3)}}{V_{esp}}$	(5)
Potencia requerida por el compresor (reversible) (kW)	$P_{rev} = M_{(NH3)}(H'_2 - H_1)$	(6)
Potencia requerida por el compresor (real) (kW)	$P_{real} = M_{(NH3)}(H_2 - H_1)$	(7)
Capacidad de refrigeración (kW)	$Q_0 = M_{(NH3)}(H_1 - H_3)$	(8)
Eficiencia frigorífica teórica o de Carnot	$COP_t = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$	(9)
Eficiencia frigorífica real del proceso	$COP_r = \frac{Q_0}{P_{real}}$	(10)
Eficiencia termodinámica (%)	$\eta_t = \frac{COP_r}{COP_t} \cdot 100$	(11)



**Figura 1.** Diagrama de flujo del sistema de refrigeración de la empresa cárnica "Raúl Cepero Bonilla"

- Ganancias de calor en las tuberías

Para determinar las ganancias de calor en las tuberías el sistema de refrigeración por donde circula amoníaco se empleó la metodología reportada en (Isachenko et al., 1973) (Mijeev & Mijeeva, 1979). Debido al elevado deterioro que presenta el aislamiento en aquellas tuberías por donde circula el refrigerante amoníaco, se asumió durante la realización de los cálculos que ningún tramo de tubería posee aislamiento térmico. Las tuberías se clasificaron en dos grupos: succión y líquido, los cuales se dividieron a su vez en tramos tomando en cuenta el diámetro de la tubería y su posición (verticales u horizontales).

- Evaluación energética de las cámaras de refrigeración

La evaluación energética de las cámaras de refrigeración se efectuó mediante la hoja de cálculo Excel "Evaluación de cámaras frigoríficas" del autor Ing. Amaury Pérez Sánchez, basada en la metodología definida en (Pinazo, 1995 ). El resultado final a obtener será la carga frigorífica total.

**Cálculo del gasto económico diario y anual a causa de las ganancias de calor en las tuberías sin aislar**

Considerando que  $1 \text{ kW}_{\text{frigorífico}} = 857,1 \text{ kcal/h}$  (Pinazo, 1995 ), el calor frigorífico total que absorbe el  $\text{NH}_3$  que circula por las tuberías sin aislamiento se describe mediante las ecuaciones (12 – 14):

$$Q_{NH3(succión)}^{sin aislar} = Q_{succión}^{sin aislar} \cdot \frac{1 kW_{frigorífica}}{857,1 kcal/h} \tag{12}$$

$$Q_{NH3(líquido)}^{sin aislar} = Q_{líquido}^{sin aislar} \cdot \frac{1 kW_{frigorífica}}{857,1 kcal/h} \tag{13}$$

$$Q_T^{sin aislar} = Q_{NH3(succión)}^{sin aislar} + Q_{NH3(líquido)}^{sin aislar} \tag{14}$$

Luego, tomando en cuenta la potencia real requerida por el compresor ( $P_{real}$ ), determinada mediante la ecuación (7), y la potencia eléctrica nominal de este equipo ( $P_{nom}$ ), que es 56,05 kW/h, se determinará el consumo de energía eléctrica debido a las ganancias de calor en las tuberías sin aislar, a través de las ecuaciones (15 – 18).

- Cantidad de compresores necesarios para hacerle frente a las ganancias de calor en las tuberías:

$$N_{compresores} = \frac{Q_T^{sin aislar}}{P_{real}} \tag{15}$$

- Energía eléctrica a consumir por hora debido a las ganancias de calor en las tuberías sin aislar:

$$E_{(h)}^{sin aislar} = P_{nom} \cdot N_{compresores} \tag{16}$$

- Energía eléctrica a consumir en un día (24 h/día) y en un año (365 días/año):

$$E_{(día)}^{sin aislar} = E_{(h)}^{sin aislar} \cdot 24 \tag{17}$$

$$E_{(año)}^{sin aislar} = E_{(día)}^{sin aislar} \cdot 365 \tag{18}$$

En la actualidad, la empresa cárnica desglosa las horas de funcionamiento diarias de las cámaras de refrigeración en tres grupos: (1) Horario del día; (2) Horario pico; y (3) Horario de madrugada, las cuales tienen valores de 12, 4 y 8 horas, respectivamente. Cada uno de estos horarios presenta una tarifa económica de consumo de energía eléctrica diferente, la cual es fijada por la Empresa Eléctrica de Cuba y cuyos valores se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Tarifas fijadas por la Empresa Eléctrica en dependencia de los horarios de funcionamiento establecidos para las cámaras frigoríficas.

Horario	Horas de funcionamiento de las cámaras (h)	Tarifa (\$/kW)
Día	12	0,042
Pico	4	0,083
Madrugada	8	0,028
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>-</b>

De esta manera, el consumo de energía eléctrica en cada uno de estos horarios (12, 4 y 8 horas), debido a las ganancias de calor en las tuberías sin aislar, será determinado mediante las ecuaciones (19 - 20):

$$E_{(12h)}^{\text{sin aislar}} = E_{(h)}^{\text{sin aislar}} \cdot 12 \quad (19)$$

$$E_{(4h)}^{\text{sin aislar}} = E_{(h)}^{\text{sin aislar}} \cdot 4 \quad (20)$$

$$E_{(8h)}^{\text{sin aislar}} = E_{(h)}^{\text{sin aislar}} \cdot 8 \quad (21)$$

El gasto o costo económico obtenido para cada horario establecido producto a las ganancias de calor en las tuberías sin aislar se determinará utilizando las ecuaciones (22 - 24):

$$G_{(12h)}^{\text{sin aislar}} = E_{(12h)}^{\text{sin aislar}} \cdot T_{(12h)} \quad (22)$$

$$G_{(4h)}^{\text{sin aislar}} = E_{(4h)}^{\text{sin aislar}} \cdot T_{(4h)} \quad (23)$$

$$G_{(8h)}^{\text{sin aislar}} = E_{(8h)}^{\text{sin aislar}} \cdot T_{(8h)} \quad (24)$$

Luego, el gasto económico total alcanzado por esta causa, tanto diario como anual, será:

- Diario:

$$G_{(\text{día})}^{\text{sin aislar}} = G_{(12h)}^{\text{sin aislar}} + G_{(4h)}^{\text{sin aislar}} + G_{(8h)}^{\text{sin aislar}} \quad (25)$$

- Anual:

$$G_{(\text{año})}^{\text{sin aislar}} = G_{(\text{día})}^{\text{sin aislar}} \cdot 365 \quad (26)$$

### Propuesta de mejora para el sistema de tuberías por donde circula el refrigerante amoníaco

Como propuesta de mejora se propone aislar todas las tuberías por donde circula el refrigerante NH<sub>3</sub> con el aislante Armaflex (conductividad térmica  $k_{\text{aisl}} = 0,031$  kcal/h.m.°C). Se determinarán las ganancias de calor para cada tramo de tubería con el aislamiento propuesto, y se compararán sus resultados con aquellos obtenidos para las tuberías sin aislamiento. Se calculará además el espesor requerido del aislante y el % de reducción de pérdidas. Para la realización de los cálculos se empleó la hoja de cálculo Excel "Cálculo de las pérdidas de calor y el espesor óptimo del aislante", del autor Ing. Amaury Pérez Sánchez, basada en la metodología descrita en (Fonte et al., 1986).

#### Cálculo del gasto económico diario y anual debido a las ganancias de calor en las tuberías con aislamiento

- Ganancia de calor total del refrigerante que circula por las tuberías con aislamiento [ecuaciones (27 - 28)]:

$$Q_{\text{NH3(succión)}}^{\text{aislada}} = Q_{\text{succión}}^{\text{aislada}} \cdot \frac{1 \text{ kW}_{\text{frigorífico}}}{857,1 \text{ kcal/h}} \quad (27)$$

$$Q_{\text{NH3(líquido)}}^{\text{aislada}} = Q_{\text{líquido}}^{\text{aislada}} \cdot \frac{1 \text{ kW}_{\text{frigorífico}}}{857,1 \text{ kcal/h}} \quad (28)$$

$$Q_T^{\text{aislada}} = Q_{\text{NH3(succión)}}^{\text{aislada}} + Q_{\text{NH3(líquido)}}^{\text{aislada}} \quad (29)$$

- Cantidad de compresores necesarios:

$$N_{\text{compresores}} = \frac{Q_r^{\text{aislada}}}{P_{\text{real}}} \quad (30)$$

- Consumo de energía eléctrica por hora debido a las ganancias de calor en las tuberías con aislamiento:

$$E_{(h)}^{\text{aislada}} = P_{\text{nom}} \cdot N_{\text{compresores}} \quad (31)$$

- Consumo de energía eléctrica en un día (24 h/día) y en un año (365 días/año):

$$E_{(\text{día})}^{\text{aislada}} = E_{(h)}^{\text{aislada}} \cdot 24 \quad (32)$$

$$E_{(\text{año})}^{\text{aislada}} = E_{(\text{día})}^{\text{aislada}} \cdot 365 \quad (33)$$

- Consumo de energía eléctrica para los tres horarios de funcionamiento del sistema de refrigeración establecidos por la empresa:

$$E_{(12h)}^{\text{aislada}} = E_{(h)}^{\text{aislada}} \cdot 12 \quad (34)$$

$$E_{(4h)}^{\text{aislada}} = E_{(h)}^{\text{aislada}} \cdot 4 \quad (35)$$

$$E_{(8h)}^{\text{aislada}} = E_{(h)}^{\text{aislada}} \cdot 8 \quad (36)$$

- Costo económico obtenido para cada horario establecido debido a las ganancias de calor en las tuberías aisladas:

$$G_{(12h)}^{\text{aislada}} = E_{(12h)}^{\text{aislada}} \cdot T_{(12h)} \quad (37)$$

$$G_{(4h)}^{\text{aislada}} = E_{(4h)}^{\text{aislada}} \cdot T_{(4h)} \quad (38)$$

$$G_{(8h)}^{\text{aislada}} = E_{(8h)}^{\text{aislada}} \cdot T_{(8h)} \quad (39)$$

Gasto económico total diario y anual debido a las ganancias de calor en las tuberías aisladas:

- Diario:

$$G_{(24h)}^{\text{aislada}} = G_{(12h)}^{\text{aislada}} + G_{(4h)}^{\text{aislada}} + G_{(8h)}^{\text{aislada}} \quad (40)$$

- Anual:

$$G_{(\text{año})}^{\text{aislada}} = G_{(24h)}^{\text{aislada}} \cdot 365 \quad (41)$$

### **Cálculo del ahorro energético y económico a obtener debido al aislamiento de las tuberías por donde circula el refrigerante NH<sub>3</sub>**

El ahorro energético a alcanzar, tanto diario como anual, se determinará mediante las siguientes expresiones:

$$A_{(\text{día})}^{\text{energ}} = E_{(\text{día})}^{\text{sin aislar}} - E_{(\text{día})}^{\text{aislada}} \quad (42)$$

$$A_{(\text{año})}^{\text{energ}} = E_{(\text{año})}^{\text{sin aislar}} - E_{(\text{año})}^{\text{aislada}} \quad (43)$$

El ahorro económico a obtener, tanto diario como anual, se calculará a través de las siguientes ecuaciones:

$$A_{(\text{día})}^{\text{econ}} = G_{(\text{día})}^{\text{sin aislar}} - G_{(\text{día})}^{\text{aislada}} \quad (44)$$

$$A_{(\text{año})}^{\text{econ}} = G_{(\text{año})}^{\text{sin aislar}} - G_{(\text{año})}^{\text{aislada}} \quad (45)$$

### Cálculos económicos relacionados con la inversión del aislante propuesto

Costo total de adquisición del aislante:

$$C_{adq} = C_{aisl} \cdot L_{rub} \tag{46}$$

A este costo de adquisición del aislante se le debe agregar el costo de instalación, el cual se asume en un 2% del costo de adquisición (Peters & Timmerhaus, 1991). Luego, el costo de instalación del aislante será de:

$$C_{inst} = C_{adq} \cdot 0,02 \tag{47}$$

De esta manera, el costo total de inversión del aislante será:

$$C_{inv} = C_{adq} + C_{inst} \tag{48}$$

Período de recuperación de la inversión:

$$PRI = \frac{C_{inv}}{A_{econ}^{año}} \tag{49}$$

### Propuesta de mejora para las cámaras frigoríficas

Se propone incrementar el espesor del aislamiento interior de las cámaras frigoríficas desde 10 cm hasta 40 cm, empleando el aislante *Poliuretano*. Se determinarán las cargas frigoríficas de cada una de las cámaras tomando en cuenta esta variante de mejora, y se compararán sus resultados con aquellos alcanzados durante la operación normal de las mismas. También se determinarán los posibles ahorros económicos a obtener por este concepto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evaluación técnica del compresor

La siguiente tabla (Tabla 3) muestra los principales resultados obtenidos durante la evaluación técnica del compresor.

**Tabla 3.** Principales resultados obtenidos durante la evaluación técnica del compresor

Parámetro	Valor
Relación de incremento de presión $[\tau]$	6
Eficiencia volumétrica $[\eta_{vol}]$	0,70
Volumen teórico de amoníaco comprimido por el compresor $[V_{t(NH3)}]$	400,36 m <sup>3</sup> /h
Volumen real de amoníaco comprimido por el compresor $[V_{r(NH3)}]$	280,25 m <sup>3</sup> /h
Caudal másico de amoníaco trasegado por el compresor $(M_{(NH3)})$	686,89 kg/h
Potencia requerida por el compresor (reversible) $[P_{rev}]$	39,64 kW
Potencia requerida por el compresor (real) $[P_{real}]$	54,378 kW
Capacidad de refrigeración $[Q_0]$	209,31 kW
Eficiencia frigorífica teórica o de Carnot $[COP_t]$	6,43
Eficiencia frigorífica real del proceso $[COP_r]$	3,849
Eficiencia termodinámica $[\eta_t]$	59,86%

Los resultados obtenidos de tanto la eficiencia volumétrica (0,70), la eficiencia frigorífica real (3,849) como la eficiencia termodinámica (59,86 %) del compresor pueden considerarse de aceptables tomando en cuenta las condiciones actuales del establecimiento, indicando de esta manera un aprovechamiento adecuado del sistema de refrigeración (Balmer, 2011) (Fernández, 1994). En un estudio previo realizado en esta fábrica (González, 2012) se determinó también la eficiencia volumétrica, la eficiencia frigorífica teórica, la eficiencia frigorífica real y la eficiencia termodinámica del sistema de

refrigeración, obteniéndose valores de 0,69; 6,44; 3,852 y 59,92, respectivamente para cada uno de ellos, indicando de esta manera que estos parámetros han ido decreciendo en el tiempo, y, con ello, la eficiencia global del compresor.

**Ganancias de calor en las tuberías (sin y con aislamiento)**

La Tabla 4 expone los resultados alcanzados durante el cálculo las ganancias de calor en las tuberías por donde circula el refrigerante amoníaco, sin y con aislamiento, además de los valores del % de reducción de pérdidas y el espesor óptimo del aislante en dependencia del tramo considerado.

**Tabla 4.** Resultados alcanzados de ganancia de calor, espesor óptimo del aislante y porcentaje de reducción de pérdidas para los tramos de tubería por donde circula el refrigerante considerando o no aislamiento.

Tramo	Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)	Ganancias de calor sin aislante (kcal/h)	Ganancias de calor con aislante (kcal/h)	% Reducción de pérdidas	Espesor del aislante (mm)
<b>Tramos de succión</b>						
1	89,60	101,60	9 743,64	1 654,61	83,02	9,02
2	34,10	38,10	3 019,97	192,74	93,62	4,76
3	36,00	40,00	898,17	57,45	93,60	9,00
4	36,00	40,00	2 245,42	143,62	93,60	8,60
5	56,50	63,50	658,36	48,66	92,61	9,53
6	66,20	76,20	15 324,30	1 340,21	91,25	9,53
7	44,80	50,80	1 094,27	72,89	99,34	8,89
<b>Promedio</b>	<b>51,89</b>	<b>58,60</b>	<b>4 712,02</b>	<b>501,45</b>	<b>92,43</b>	<b>8,48</b>
<b>Total</b>	-	-	<b>32 984,13</b>	<b>3 510,18</b>	-	-
<b>Tramos de líquido</b>						
1	36,00	40,00	4 490,83	287,23	93,6	8,34
2	19,00	21,00	1 852,70	127,96	93,09	7,88
3	19,00	21,00	529,34	36,56	93,09	7,88
4	24,00	27,00	1 625,41	106,50	93,45	8,10
5	24,00	27,00	325,08	21,30	93,45	8,10
6	34,10	38,10	8 628,48	550,70	93,62	8,69
7	24,00	27,00	650,17	42,60	93,45	8,10
<b>Promedio</b>	<b>25,71</b>	<b>28,71</b>	<b>2 586,00</b>	<b>167,55</b>	<b>93,39</b>	<b>8,25</b>
<b>Total</b>	-	-	<b>18 102,01</b>	<b>1 172,85</b>	-	-

El tramo de tubería que mayor ganancia de calor posee, tanto en el tramo de succión como el tramo de líquido, es el número seis con 15 324,30 kcal/h y 8628,48 kcal/h, respectivamente. Constituye también el tramo que mayor espesor de aislante requiere, con 9,53 mm para el tramo de succión, y 8,69 mm para el tramo de líquido.

**Resultados obtenidos durante el cálculo del gasto económico debido a las ganancias de calor en las tuberías sin aislar y aisladas**

La siguiente tabla (Tabla 5) muestra un resumen de los resultados alcanzados durante la determinación del gasto económico obtenido debido a las ganancias de calor en las tuberías tanto sin aislar como aisladas.

**Tabla 5.** Resultados obtenidos con respecto al cálculo del gasto económico debido a las ganancias de calor en las tuberías sin aislar

Parámetro	Unidades	No. ecuación	Sin aislar	No. ecuación	Aislada
$Q_{NH3(succión)}$	kW	12	38,48	27	4,09
$Q_{NH3(líquido)}$	kW	13	21,12	28	1,37
$Q_T$	kW	14	59,60	29	5,46
$N_{compresores}$	-	15	1,10	30	0,1
$E_{(h)}$	kW/h	16	61,65	31	5,6
$E_{(día)}$	kW/día	17	1 479,6	32	134,4
$E_{(año)}$	kW/año	18	540 054	33	49 056
$E_{(12h)}$	kW	19	739,8	34	67,2
$E_{(4h)}$	kW	20	246,6	35	22,4
$E_{(8h)}$	kW	21	493,2	36	44,8
$G_{(12h)}$	\$	22	31,07	37	2,82
$G_{(4h)}$	\$	23	20,47	38	1,86
$G_{(8h)}$	\$	24	13,81	39	1,25
$G_{(día)}$	\$	25	65,35	40	5,93
$G_{(año)}$	\$	26	23 852,75	41	2 166,64

Al analizar los resultados mostrados en la Tabla 5 se concluye que el aislamiento de las tuberías permite reducir el gasto económico total anual desde \$ 23 852,75 hasta \$ 2 166,64, es decir, en un 90,9 %. Esto se debe a la reducción del consumo energético anual desde 540 054 kW hasta 49 056 kW producto al aislamiento de las tuberías con el aislante propuesto (Armaflex). Las siguientes tablas muestran los consumos de energía eléctrica y el gasto económico diario y anual a causa de las ganancias de calor del refrigerante NH<sub>3</sub> en las tuberías sin aislamiento (Tabla 6) y aisladas (Tabla 7), en dependencia de los horarios de funcionamiento de las cámaras frigoríficas implementados por la empresa cárnica.

**Tabla 6.** Consumo de energía y gastos económicos diarios y anuales debido a las ganancias de calor en las tuberías sin aislar

Horario	Horas de funcionamiento de las cámaras (h)	Consumo de energía diario (kW)	Consumo de energía anual (kW)	Gasto económico diario (\$)	Gasto económico anual (\$)
Día	12	739,8	270 027	31,07	11 341,13
Pico	4	246,6	90 009	20,47	7 470,75
Madrugada	8	493,2	180 018	13,81	5 040,50
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>1 479,6</b>	<b>540 054</b>	<b>65,35</b>	<b>23 852,38</b>

**Tabla 7.** Consumo de energía y gastos económicos, tanto diario como anual, debido a las ganancias de calor en las tuberías aisladas

Horario	Horas de funcionamiento de las cámaras (h)	Consumo de energía diario (kW)	Consumo de energía anual (kW)	Gasto económico diario (\$)	Gasto económico anual (\$)
Día	12	67,2	24 528	2,82	1 030,18
Pico	4	22,4	8 176	1,86	678,6
Madrugada	8	44,8	16 352	1,25	457,86
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>134,4</b>	<b>49056</b>	<b>5,93</b>	<b>2 166,64</b>

De acuerdo con lo expuesto en las Tablas 6 y 7, el aislamiento con el aislante Armaflex de las tuberías por donde circula el refrigerante permite reducir el gasto de energía diario desde 1 479,6 kW hasta 134,4 kW, es decir, disminuye en un 91% aproximadamente, obteniéndose un ahorro económico anual de \$ 21 685,74 por este concepto, resultado que se expone también en la Tabla 8.

**Ahorro energético y económico a obtener debido al aislamiento de las tuberías por donde circula el refrigerante NH<sub>3</sub>**

La Tabla 8 muestra los ahorros a obtener, tanto energéticos como económicos, debido al aislamiento de las tuberías por donde circula el refrigerante NH<sub>3</sub> con el aislante Armaflex.

**Tabla 8.** Ahorros energéticos y económicos a obtener al aislar las tuberías por donde circula el refrigerante NH<sub>3</sub> con el aislante Armaflex

Parámetro	No. ecuación	Unidades	Valor
$A_{(día)}^{energ}$	42	kW/día	1 345,2
$A_{(año)}^{energ}$	43	kW/año	490 998
$A_{(día)}^{econ}$	44	\$/día	59,42
$A_{(año)}^{econ}$	45	\$/año	21 685,74

### **Cálculos económicos relacionados la variante de mejora propuesta para las tuberías por donde circula el refrigerante**

Según la empresa ECME, el aislante Armaflex presenta un costo total de \$ 90,69 por metro, incluyendo el recubrimiento de aluminio. Luego, el levantamiento técnico realizado a las tuberías por donde circula el refrigerante amoníaco, tomando en cuenta tanto los tramos de succión como de líquido, arrojó una longitud total ( $L_{tub}$ ) de 1116 m, la cual debe ser aislada en su totalidad para alcanzar los ahorros energéticos y económicos determinados con anterioridad. De esta manera, el costo total de adquisición del aislante será de:

$$C_{adq} = C_{aisl} \cdot L_{tub} = 90,69 \frac{\$}{m} \cdot 1116m = \$ 101\,210,04 \quad (46)$$

El costo de instalación del aislante será de:

$$C_{inst} = C_{adq} \cdot 0,02 = \$101\,210,04 \cdot 0,02 = \$2\,024,20 \quad (47)$$

Seguidamente, el costo total de inversión del aislante es:

$$C_{inv} = C_{adq} + C_{inst} = \$101\,210,04 + \$2\,024,20 = \$103\,234,24 \quad (48)$$

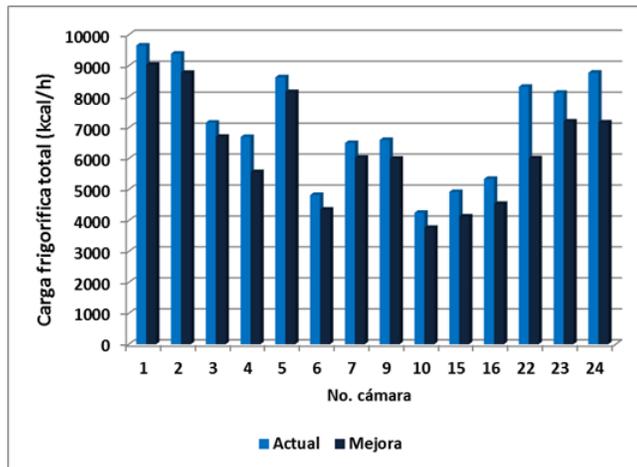
Finalmente, el período de recuperación de la inversión es:

$$PRI = \frac{C_{inv}}{A_{(año)}^{econ}} = \frac{103\,234,24}{21\,685,74} = 4,76 \text{ años} \quad (49)$$

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de las ecuaciones (46) hasta la (49), la ejecución de la inversión en el aislamiento de las tuberías requerirá un costo total de \$ 103 234,24, la cual se recuperaría en 4,76 años tomando en cuenta el ahorro económico anual calculado, el cual asciende a \$ 21 685,74.

### **Resultados de la carga frigorífica total en las cámaras de refrigeración tanto para las condiciones actuales de operación como para la variante de mejora**

La Figura 2 presenta los resultados obtenidos durante la estimación de la carga frigorífica total para cada una de las cámaras evaluadas, tanto en las condiciones de operación actuales como para la variante de mejora propuesta (incremento del espesor del aislante en las cámaras desde 10 cm hasta 40 cm), así como también el % de reducción de la carga frigorífica estimado producto a la implementación de la variante de mejora.



Según los resultados mostrados en la Figura 2, se obtuvo un % de reducción promedio de la carga frigorífica igual a 12,03%, siendo la cámara 22 la que presentó un mayor % de reducción con 27,81%, mientras que la cámara 5 fue la que menor valor tuvo de este parámetro, con 5,52%.

**Resultados técnico-económicos obtenidos para las cámaras frigoríficas, tanto en las condiciones actuales de operación como considerando de la implementación de la variante de mejora propuesta**

Haciendo uso de las ecuaciones (12-41), se obtienen los siguientes resultados técnico-económicos para las cámaras frigoríficas (Tablas 9, 10 y 11), tanto para las condiciones actuales de operación como la variante de mejora propuesta.

**Tabla 9.** Principales resultados técnicos obtenidos para las cámaras frigoríficas, considerando tanto las condiciones actuales de operación como la variante de mejora propuesta

Parámetro	Unidades	Condiciones actuales	Mejora
Cantidad de kW frigoríficos que absorbe el NH <sub>3</sub> en 1 hora	kW/h	115,69	101,9
Cantidad de compresores necesarios para absorber las pérdidas en las cámaras de refrigeración	-	2,12	1,87
Energía eléctrica a consumir por hora debido a las pérdidas en las cámaras de refrigeración	kW/h	118,85	104,83
Consumo de energía eléctrica en un día (24 h)	kW/día	2852,4	2515,92
Consumo de energía eléctrica en un año (365 días)	kW/año	1 041 126	918 310,8

Según se puede observar en la Tabla 9, las cámaras frigoríficas consumen anualmente 1 041 126 kW bajo las condiciones actuales de operación. Sin embargo, la implementación de la variante de mejora permite reducir este consumo hasta 918 310,8 kW/año, obteniéndose un ahorro total de 122 815,2 kW al año por este motivo.

**Tabla 10.** Consumo de energía y gastos económicos obtenidos, tanto diarios como anuales, para las cámaras frigoríficas operando bajo las condiciones actuales.

Horario	Horas de funcionamiento de las cámaras (h)	Consumo de energía diario (kW)	Consumo de energía anual (kW)	Gasto económico diario (\$)	Gasto económico anual (\$)
Día	12	1 426,2	520 563	59,9	21 863,65
Pico	4	475,4	173 521	39,46	14 402,9
Madrugada	8	950,8	347 042	26,62	9 717,18
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>2852,4</b>	<b>1 041 126</b>	<b>125,98</b>	<b>45 983,73</b>

**Tabla 11.** Consumo de energía y gastos económicos esperados, tanto diarios como anuales, para las cámaras frigoríficas al aplicar la variante de mejora propuesta.

Horario	Horas de funcionamiento de las cámaras (h)	Consumo de energía diario (kW)	Consumo de energía anual (kW)	Gasto económico diario (\$)	Gasto económico anual (\$)
Día	12	1 257,96	459 155,4	52,83	19 282,95
Pico	4	419,32	153 051,8	34,80	12 702
Madrugada	8	838,64	306 103,6	23,48	8 570,2
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>2515,92</b>	<b>918 310,8</b>	<b>111,11</b>	<b>40 555,15</b>

De acuerdo con los resultados mostrados en las Tabla 10 y 11, la implementación de la variante de mejora en las cámaras frigoríficas permitirá reducir el gasto económico anual desde \$ 45 983,73 hasta 40 555,15, para obtener así un ahorro económico total anual de \$ 5428,58. Este resultado se puede apreciar además en la Tabla 12.

**Ahorro energético y económico a obtener debido a la aplicación de la variante de mejora en las cámaras frigoríficas**

El empleo de las ecuaciones (42-45) permitió alcanzar los resultados mostrados en la Tabla 12 con respecto a los ahorros a obtener, tanto energéticos como económicos, debido a la aplicación de la variante de mejora en las cámaras frigoríficas.

**Tabla 12.** Ahorros energéticos y económicos a obtener al aplicar la variante de mejora en las cámaras frigoríficas.

Parámetro	No. ecuación	Unidades	Valor
$A_{(día)}^{energ}$	42	kW/día	336,48
$A_{(año)}^{energ}$	43	kW/año	122 815,2
$A_{(día)}^{econ}$	44	\$/día	14,87
$A_{(año)}^{econ}$	45	\$/año	5 428,58

**Cálculos económicos relativos a la aplicación de la variante de mejora en las cámaras frigoríficas**

De acuerdo con informaciones suministradas por la empresa ECME, el aislante poliuretano en placas presenta un costo total de \$ 99,6/m<sup>2</sup>. Una vez efectuado el levantamiento técnico en las cámaras frigoríficas, entre las cuales se incluyó determinar las dimensiones de cada cámara (largo/ancho/alto), se estableció que se deben aislar 4843,53 m<sup>2</sup> de área total en las cámaras frigoríficas para cumplir con la variante de mejora propuesta. Así, el costo total de adquisición del aislante será de:

$$C_{adq} = C_{aisl} \cdot A_{cam} = 99,6 \frac{\$}{m^2} \cdot 4\,843,53m^2 = \$ 482\,415,6 \tag{46}$$

En ese caso, el costo de instalación del aislante se toma como un 5% del costo de adquisición (Peters & Timmerhaus, 1991). Luego:

$$C_{inst} = C_{adq} \cdot 0,05 = \$ 482\,415,6 \cdot 0,05 = \$ 24\,120,78 \tag{47}$$

El costo total de inversión del aislante poliuretano será de:

$$C_{inv} = C_{adq} + C_{inst} = \$ 482\,415,6 + \$ 24\,120,78 = \$ 506\,536,38 \tag{48}$$

Se necesitará una inversión de \$ 506 536,38 para darle cumplimiento a la variante de mejora No. 2 (incrementar el espesor del aislamiento interior de todas las cámaras frigoríficas), lo cual permitiría un ahorro económico anual de \$ 5 428,58 por concepto de ahorro en el consumo de energía eléctrica. Esto posibilitaría, a criterio de la dirección de la empresa cárnica, un incremento en los volúmenes de ventas de los productos cárnicos, trayendo consigo mayores ganancias económicas y, con ello, una reducción del tiempo de recuperación de la inversión.

Se consumen un total de 4 332 kW diarios de energía frigorífica, desglosados en 1 479,6 kW (34,15 %) debido a las ganancias de calor en las tuberías por donde circula el refrigerante NH<sub>3</sub>, y 2 852,4 kW (65,85%) a causa del funcionamiento de las cámaras frigoríficas.

El estado tecnológico actual del sistema de refrigeración representa para la empresa cárnica un costo económico total anual de \$ 69 836,11 por concepto de consumo de energía eléctrica, tomando en cuenta la situación actual de las tuberías y las cámaras de refrigeración. Sin embargo, la aplicación de ambas variantes de mejoras propuestas permitirá reducir el gasto por este concepto en un 61,18%, lográndose un ahorro económico total de \$ 27 114,32 al año.

## CONCLUSIONES

1. El compresor presenta una eficiencia volumétrica de 0,70, una eficiencia frigorífica real de 3,849 y una eficiencia termodinámica de 59,86 %, las cuales pueden calificarse de adecuadas.
2. El consumo diario de energía frigorífica en las condiciones actuales es de 4 332 kW diarios, desglosados en 1479,6 kW debido a las ganancias de calor en las tuberías (34,15%), y 2852,4 kW a causa del funcionamiento de las cámaras frigoríficas (65,85%).
3. Con la propuesta de mejoras el consumo diario de energía frigorífica alcanza un valor de 2 650,32 kW, es decir se reduce en un 61,18%, lo que implica un ahorro económico de \$ 27 114,32 al año.
4. El costo de la inversión de la instalación del aislante Armaflex en las tuberías de refrigeración es de \$ 103 234,24.
5. El costo de inversión del aislante Poliuretano en las cámaras frigoríficas asciende a \$ 506 536,38.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, H. A., Torres, R., & Velázquez, A. R. (2011). Mejoramiento de la eficiencia electroenergética en la Empresa Nacional de Frigoríficos Enfrigo. Ciencias Holguín, XVII, 1-15.
- ASHRAE. (2017). ASHRAE Position Document on Ammonia as a Refrigerant (pp. 18). Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- Balmer, R. T. (2011). Modern Engineering Thermodynamics. Burlington, USA: Academic Press.
- Dopazo, J. A., & Seara, J. F. (2011). Experimental evaluation of a cascade refrigeration system prototype with CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> for freezing process applications. International Journal of Refrigeration, 34, 257-267. doi: doi:10.1016/j.ijrefrig.2010.07.010
- Fernández, E. (1994). Termodinámica Técnica. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela.
- Fonte, A., Nemirovich, P., & González, R. (1986). Cálculo de las pérdidas de calor y del espesor del aislante. Camagüey, Cuba: Universidad de Camagüey.
- González, Y. (2012). Estudio del comportamiento del sistema de refrigeración de las cámaras de conservación de la Empacadora "Raúl Cepero Bonilla". (Tesis de Diploma), Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Camagüey, Cuba.
- González, R., & González, R. (2006). Metodología para la evaluación de sistemas de refrigeración industrial. Scientia Et Technica, XII(30), 215-217.
- Isachenko, V., Osipova, V., & Sukomel, A. (1973). Transmisión de calor. Bilbao, España: Marcombo S.A.
- Mijeev, M. A., & Mijeeva, I. M. (1979). Fundamentos de termotransferencia. Moscú: Editorial Mir.
- Mumanachit, P., Reindl, D. T., & Nellis, G. F. (2012). Comparative analysis of low temperature industrial refrigeration systems. International Journal of Refrigeration, 35, 1208-1221. doi: doi:10.1016/j.ijrefrig.2012.02.009
- Nunes, J., Andrade, L. P., & Silva, P. D. (2011). Evaluación de la eficiencia energética en los sistemas de refrigeración de la industria cárnica. Paper presented at the 23º Congreso Internacional de Refrigeración, Praga, República Checa.
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1991). Plant design and economics for chemical engineers (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Pinazo, J. M. (1995). Cálculos en instalaciones frigoríficas. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Toledo, Y. S., Noa, E. G., Oca, D. M. d., & Rodríguez, C. G. (2014). Procedimiento general para la evaluación del proceso de remoción de calor en la elaboración de helados. Tecnología Química, 34(3), 296-306.

- Toledo, Y. S., Ybáñez, S. P., Noa, E. G., & Rodríguez, L. (2017). Evaluación energética de una planta de helados. *Revista de Ingeniería Energética*, XXXVIII(1), 42-53.
- Wang, S. K. (2001). *Handbook of air conditioning and refrigeration* (2da ed.). New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.