



Title: Design of a simulator for the energy evaluation of cold rooms

Authors: VALLE-HERNANDEZ, Julio, DE SANTIAGO-HERRERA, Maria Guadalupe, MANZANO-MUÑOZ, Meily Yoselin and ROMÁN-AGUILAR, Raúl

Editorial label ECORFAN: 607-8695
BCIERMMI Control Number: 2022-01
BCIERMMI Classification (2022): 261022-0001

Pages: 18
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.
143 – 50 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.
Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings		
Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua



Introducción

Actualmente, los simuladores se utilizan en diferentes áreas, en el diseño y operación de sistemas, en los procesos industriales, en modelos económicos, entre otros.

En este trabajo se presenta el diseño de un simulador que permite evaluar las condiciones de operación de una cámara frigorífica, el simulador pretende ser una herramienta para determinar la factibilidad de implementar una cámara en función del producto a almacenar y la región geográfica en la que se instalará.

El sistema de refrigeración modelado emplea un ciclo de compresión simple. Se selecciona como fluido refrigerante al propano (R-290), por ser un refrigerante natural con una buena eficiencia energética (Gas Servei. s.f.).



Metodología

La metodología a desarrollar en el presente trabajo se basa en los siguientes puntos:

•Diseño de la cámara frigorífica

Cálculo de las cargas térmicas.

Modelado de la cámara

Análisis del ciclo de refrigeración

Integración de la cámara con el ciclo de refrigeración

Evaluación del simulador



1. Diseño de la cámara frigorífica

Dimensiones de la cámara

El dimensionamiento propuesto para la cámara frigorífica se muestra en la tabla 1, teniendo un área de transferencia de calor de 40.9 m^2 y un volumen de 23.6 m^3 .

Cámara frigorífica	
Alto (m)	3.50
Largo (m)	2.70
Ancho(m)	2.50
Ancho del Pasillo (m)	0.90
Ancho del área de Almacenamiento (m)	0.90
Puerta	
Alto (m)	2.50
Largo (m)	0.90

Tabla 1. Dimensiones del Frigorífico. Fuente: Elaboración propia

Materiales de Construcción

En la tabla 2 se muestran los materiales de construcción para cámara frigorífica.

Material de paredes	Conductividad térmica ($\frac{W}{m^{\circ}K}$)	Espesor (m)
Poliuretano	0.028	0.075
Ladrillo	0.87	0.16
Mortero	1.40	0.04
Material de la puerta		
Poliuretano	0.028	0.02
Aluminio	205	0.05

Tabla 2 Materiales de Construcción. Fuente: Elaboración propia



Sistema de Refrigeración

El sistema de refrigeración utiliza un ciclo de refrigeración por compresión simple, utilizando un hidrocarburo (HC) como refrigerante. Se propone utilizar el propano R-290. En la tabla 3 se muestran las propiedades físicas y en la tabla 4 las propiedades de inflamabilidad del refrigerante. |

Refrigerante R-290 (Propano)		
Límite inferior de inflamabilidad		Temperatura de autoignición (°C)
En volumen (%)	En peso ($\frac{Kg}{m^3}$)	
2.10	0.038	460

Tabla 3 Propiedades físicas. Fuente: (Gas Servei. s.f.).

Peso molecular	Temperatura de ebullición (°C)	Temperatura crítica (°C)	Presión crítica (bar)	Calor latente ($\frac{KJ}{Kg}$)
44.1	-42	96.7	42.48	342

Tabla 4 Propiedades de Inflamabilidad. Fuente: (Gas Servei. s.f.).



2. Cálculo de las cargas térmicas.

En el diseño del simulador se consideran las siguientes cargas térmicas:

- Carga térmica debido a la refrigeración del producto:

$$Q_P = \frac{m_p * c_{p_p} * \Delta T}{t} \quad (1)$$

- Carga térmica debido a las pérdidas por transmisión en paredes:

$$Q_{T1} = U_1 * A_1 * \Delta T \quad (2)$$

Coeficiente global en las paredes:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{h_2}} \quad (3)$$

- Carga térmica debido a las pérdidas por transmisión en la puerta:

$$Q_{T2} = U_2 * A_2 * \Delta T \quad (4)$$

Coeficiente global en la puerta:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{1}{h_2}} \quad (5)$$

- Cálculo de carga sensible de personas:

$$Q_e = N_e * Q_{s_e} \quad (6)$$

- Carga térmica producido por lámparas:

$$Q_l = N_l * P \quad (7)$$



- Carga térmica por infiltración de aire exterior:

$$Q_I = Q_1 + Q_2 \quad (8)$$

El calor infiltrado debido a renovaciones técnicas de aire:

$$Q_1 = m * \Delta h \quad (9)$$

$$m = V * \rho * n \quad (10)$$

El calor infiltrado debido a las renovaciones equivalentes del aire:

$$Q_2 = m * \Delta h \quad (11)$$

$$m = V * \rho * \theta \quad (12)$$
$$V = \frac{a * H}{4} \sqrt{0.072} * H * \Delta T$$

- Carga térmica total.

En un área por acondicionar, la carga térmica total resulta de la suma de las cargas térmicas involucradas en el proceso de refrigeración.

$$Q_L = Q_e + Q_l + Q_p + Q_{T,1} + Q_{T,2} + Q_I \quad (13)$$



3. Modelado de la cámara

El modelado de la cámara permite predecir el comportamiento de la temperatura del aire en el interior del recinto, sin considerar el sistema de refrigeración, y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{U_1 * A_1 + U_2 * A_2}{m_a * Cp_a} (T_e - T_i) \quad (14)$$

Otras consideraciones importantes para determinar la temperatura en el interior de la cámara, se determinan con las ecuaciones (6) y (7).

Adicionalmente a estas cargas, se debe considerar el calor del producto, el cual se puede estimar a partir de la ecuación:

$$Q_P = h * A * \Delta T \quad (15)$$

El cambio de la temperatura del producto que ingresa a la cámara, se obtiene como:

$$\frac{dT_P}{dt} = \frac{Q_P}{m_P * Cp_P} \quad (16)$$

La temperatura de todo el producto dentro de la cámara, producto que entra más producto que se tiene almacenado, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$T = \left(\frac{P_t - P_e}{P_t} * T_c \right) + \left(\frac{P_e}{P_t} * T_P \right) \quad (17)$$



4. Análisis del ciclo de refrigeración

El análisis del ciclo de refrigeración permite conocer el comportamiento del sistema, considerando un ciclo de compresión de vapor que emplea como refrigerante el R-290 (Webbook. s.f.).

Los estados termodinámicos del ciclo de refrigeración se muestran en la figura 1, los cuales son:

- Estado 1, vapor saturado a la temperatura de refrigeración.
- Estado 2, vapor sobrecalentado con entropía constante respecto al estado 1.
- Estado 3, líquido saturado a temperatura mayor a la del ambiente.
- Estado 4, mezcla con entalpia constante respecto al estado 3.

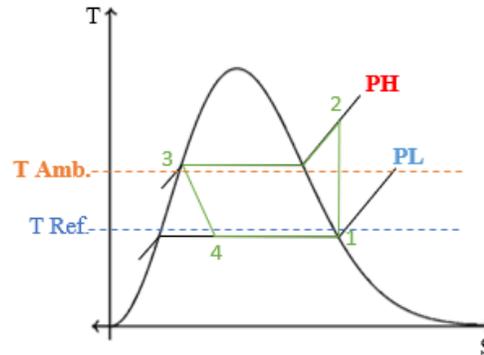


Figura 1. Diagrama del ciclo de refrigeración por compresión simple. Fuente: *Elaboración propia*



Para el análisis del ciclo de refrigeración se requieren parámetros como el flujo del refrigerante, el calor desechado en el condensador, el trabajo del compresor y el Coeficiente de Desempeño (COP).

- El flujo másico a partir de las cargas térmicas se obtiene como:

$$m_R = \frac{Q_L}{h_1 - h_4} \quad (18)$$

- El calor desechado en el proceso de condensación, se obtiene como:

$$Q_H = m_R (h_2 - h_3) \quad (19)$$

- El trabajo que requiere el compresor para aumentar la presión del fluido refrigerante, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$W = m_R (h_2 - h_1) \quad (20)$$

- Si los estados termodinámicos se encuentran dentro de la región de mezcla en el diagrama T-S se debe determinar la calidad X, la cual varía de 0 a 1. El cálculo de la calidad se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$X = \frac{h_g}{h_f + h_g} \quad (21)$$

Y la entalpía en estado mezcla (h_m), se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

$$h_m = X (h_g - h_f) + h_f \quad (22)$$

- El coeficiente de desempeño (COP) para un sistema de refrigeración convencional, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$COP = \frac{Q_L}{W} \quad (23)$$



Para determinar el consumo eléctrico del sistema frigorífico se debe considerar:

- La eficiencia del compresor
 - Para este análisis se considera una eficiencia del 85%, con una operación de 14 horas/día.

La energía eléctrica consumida a lo largo del día por el compresor, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$EE_c = \frac{w * N}{\eta_c} \quad (24)$$



5. Integración de la cámara con el ciclo de refrigeración

La estructura del diseño del simulador se muestra en la figura 2.

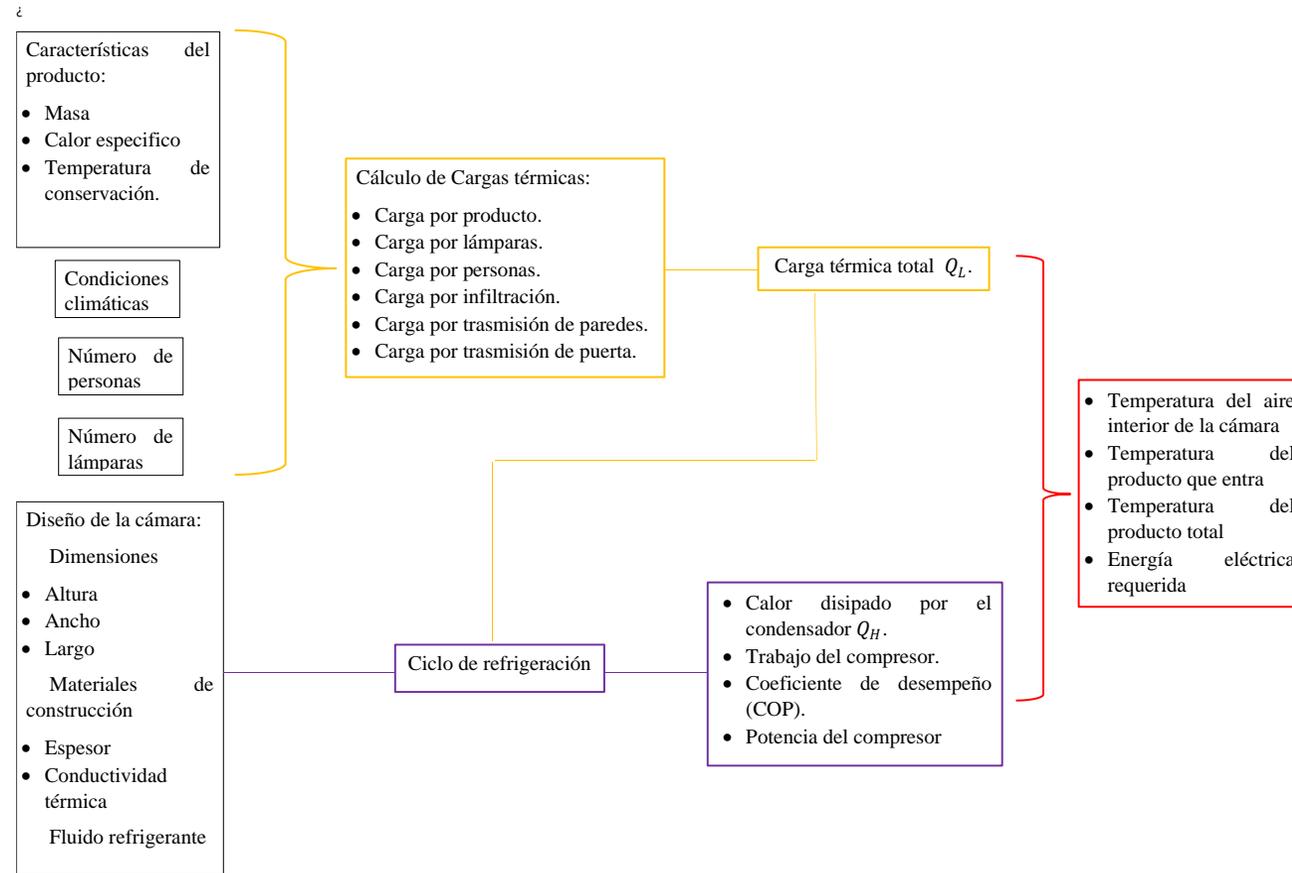


Figura 2. Implementación del simulador. Fuente: Elaboración propia



6. Evaluación del simulador

**Conservación de
carne Avícola**

- Temperatura de conservación en un rango de -1°C a 4°C
- Calor específico de $3.31\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$
- Vida de anaquel de entre 8 y 10 días.

**Tamaño de la
cámara**

- Capacidad máxima de 500 carcasas.

**Ubicado en el
municipio de Apan
Hidalgo**

- Presión atmosférica de 101.325 kPa
- Temperatura máxima de 35°C y mínima de 3°C .



Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita anteriormente son los siguientes:

Simulación de cargas térmicas

En la gráfica 1, se muestra el comportamiento de las cargas térmicas por separado.

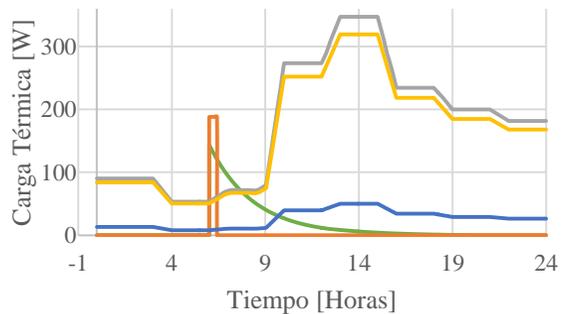


Gráfico 1. Cargas Térmicas. Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 2 se muestra el comportamiento de las cargas térmicas totales a lo largo de un día promedio.

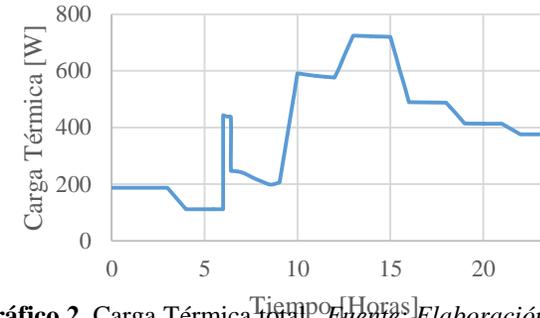
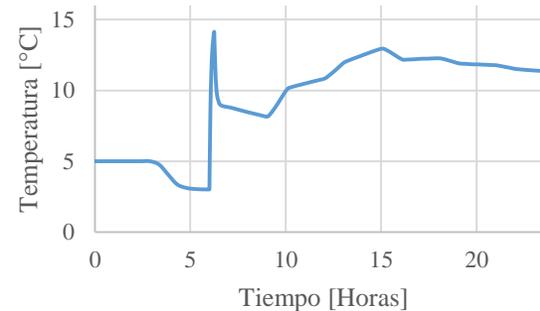


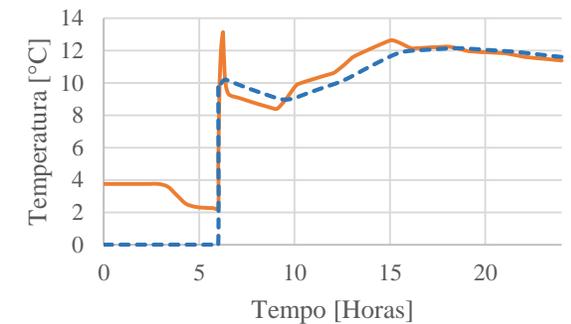
Gráfico 2. Carga Térmica total. Fuente: Elaboración propia

Comportamiento de la temperatura al interior de la cámara

En las gráficas 3a y 3b se muestra el comportamiento de la temperatura del aire y del producto al interior de la cámara sin refrigeración.



Gráfica 3a. Temperatura del aire en la cámara.
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3b. Temperatura del producto.
Fuente: Elaboración propia.

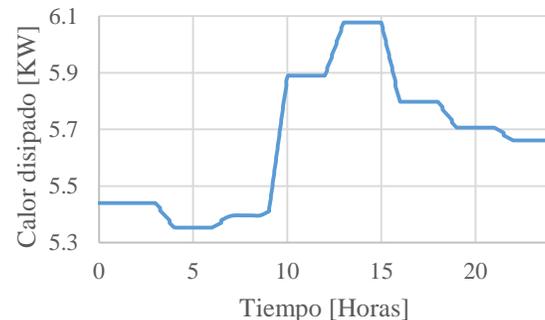


Simulación del ciclo de refrigeración

- Temperatura de conservación del producto 0°C
- Flujo masico de refrigerante de $0.0065 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$
- Coeficiente de desempeño (COP) de 5.39.

Simulación del calor en el condensador

En la gráfica 4, se muestra el calor disipado por el proceso de condensación Q_H .



Gráfica 4. Calor disipado por el proceso de condensación.
Fuente: Elaboración propia

Simulación del trabajo del compresor

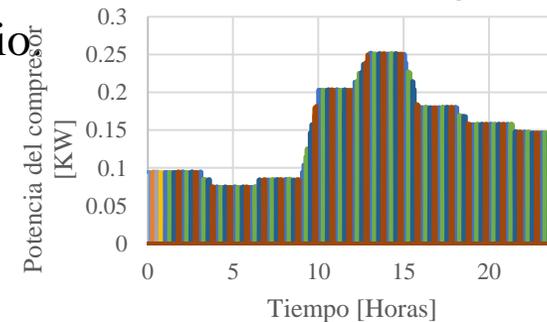
En la gráfica 5 se presenta el trabajo del compresor a lo largo de un día promedio.



Gráfica 5. Trabajo del compresor. *Fuente: Elaboración propia*

Simulación de los ciclos de refrigeración

En la gráfica 6, se muestra el comportamiento de los ciclos del sistema de refrigeración en un día promedio.



Gráfica 6. Ciclados a lo largo del día. *Fuente: Elaboración propia*

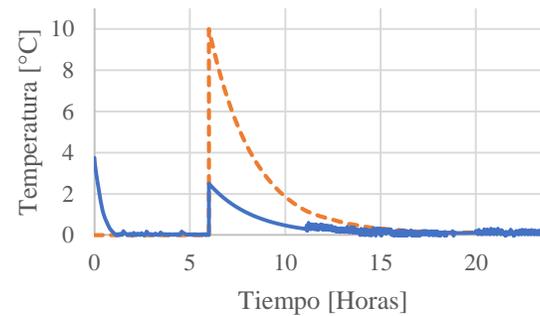


Simulación del producto refrigerado

En la gráfica 7 se muestra el comportamiento de la temperatura de la carne que ingresa a la cámara,

La línea punteada muestra el comportamiento de la temperatura del producto que entra a la cámara

La línea continua muestra el comportamiento de la temperatura del total de carne dentro del recinto



Grafica 7. Temperatura del Producto dentro de la cámara. *Fuente: Elaboración propia*



Conclusiones

El simulador cumple las expectativas de evaluar el desempeño de cámaras frigoríficas a partir de sus condiciones de operación a lo largo del día. Aunque para este trabajo se consideró un día promedio del mes de febrero el simulador permite evaluar cualquier día del año, generando como resultados el comportamiento de las variables de interés; la carga térmica, la temperatura del producto, el calor desechado, el trabajo del compresor, el tiempo de operación y el coeficiente de desempeño.

Dado que el diseño del simulador maneja entradas variables, tales como, las propiedades de materiales de construcción de la cámara, las dimensiones de la misma, y las características climáticas de la región de instalación, permitiendo cambiar el tipo y cantidad de producto, el número de personas que ingresaran a la cámara y la iluminación de esta. Con lo anterior se pueden evaluar diversos tipos de cámaras, lo que hace que su uso sea sumamente flexible.



La evaluación del funcionamiento del simulador se realizó para el caso de estudio que describe el diseño de una cámara frigorífica para la conservación de pollo instalada en el municipio de Apan, Hidalgo. En esta evaluación se comprobó que el comportamiento de la temperatura de conservación arrojada por el simulador está dentro del rango de operación de una cámara real, por lo que puede decirse que el diseño de la cámara propuesta es viable desde el punto de vista termodinámico.

En cuanto al consumo de energía, considerando un compresor hermético recíprocante con una eficiencia del 85% y un tiempo de operación de 14.4 horas/día, se obtuvo una potencia máxima de 448.1 W y un consumo de energía promedio de 3614 Whr/día, lo que indica que el diseño de la cámara también es factible desde el punto de vista energético.



Referencias

- I. Gas Servei. (s.f.). FICHA TÉCNICA R_290 (propano). <https://gas-servei.com/shop/docs/ficha-tecnica-r-290-gas-servei.pdf>. (6 de abril del 2022).
- II. Nikbakhti, R., Wang, X., Hussein, A. K., & Iranmanesh, A. (2020). Absorption cooling systems. Review of various techniques for energy performance enhancement. Extraído de: <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2020.01.036>
- III. Sánchez. M. & Pineda. I. (2001) INGENIERÍA DEL FRÍO: TEORÍA Y PRACTICA. 1ra Edición. Madrid España. Mundi-Prensa Libros, S.A. *CAPÍTULO 11. BALANCE TÉRMICO EN LA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA*, (págs. 416-433).
- IV. Webbook. s.f. Libro del Web de Química del NIST. DOI: <https://doi.org/10.18434/T4D303>. (20 de febrero del 2022).
- V. Cengel, Yunus A. AFSHIN J. (2012). Transferencia de calor y masa. 4ta Edición. Libro impreso.
- VI. Cengel, & Boles, M. (2001). Termodinámica. 7ma Edición. En Y. A. Cengel, Libro impreso.



ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/booklets)