

Diseño de un sistema de refrigeración para el almacenamiento de carne utilizando energía solar

VALLE-HERNÁNDEZ, Julio†*, ORTÍZ-TREJO, Adriana, ROMÁN-AGUILAR, Raúl y MORALES-ORTEGA, Edgar Alejandro

*Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo Escuela Superior de Apan
Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo*

Recibido 19 de Julio, 2017; Aceptado 6 de Septiembre, 2017

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de refrigeración para el almacenamiento de carne utilizando energía solar fotovoltaica. En el manejo de la carne de res existe un complejo proceso para alcanzar la óptima calidad, para ello es necesario manipular la carne durante distintas fases a diferentes temperaturas que van desde los 30°C hasta los -16°C por distintos intervalos de tiempo, estos procesos de refrigeración consumen gran cantidad de energía eléctrica. Una alternativa para la producción de esta energía es la implementación de sistemas fotovoltaicos, ya que utiliza una fuente renovable. El objetivo del presente trabajo es demostrar como el uso de energía solar fotovoltaica aplicada a procesos de refrigeración permite tener un ahorro en el costo de energía y un beneficio al medio ambiente. El trabajo consiste en el diseño de un sistema frigorífico para el almacenamiento de carne de res, el cuál se realiza a partir del análisis de las cargas térmicas asociadas al proceso manteniendo los parámetros biológicos óptimos. Una vez diseñado el sistema frigorífico se realizó el dimensionamiento fotovoltaico interconectado a la red eléctrica que permite satisfacer la demanda energética del proceso reduciendo los costos asociados al consumo de electricidad.

Inocuidad, acortamiento, frigoríficas, fotovoltaico

Citación: VALLE-HERNÁNDEZ, Julio, ORTÍZ-TREJO, Adriana, ROMÁN-AGUILAR, Raúl y MORALES-ORTEGA, Edgar Alejandro. Diseño de un sistema de refrigeración para el almacenamiento de carne utilizando energía solar. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-3:42-54

Abstract

This work presents the design of a refrigeration system for the storage of meat using photovoltaic solar energy. The management of beef is a complex process to reach the optimum quality, for it is necessary to manipulate the meat during different phases at different temperatures ranging from 30 ° C to -16 ° C for different time intervals, these cooling processes consume a lot of electrical energy. An alternative for the production of this energy is the implementation of photovoltaic systems, since it uses a renewable source. The objective of the present work is to demonstrate how the use of photovoltaic solar energy applied to cooling processes allows to have a saving in the cost of energy and a benefit to the environment. The work consists in the design of a refrigeration system for the storage of beef, which is carried out from the analysis of the thermal loads associated to the process maintaining the optimal biological parameters. Once the refrigeration system was designed, photovoltaic sizing interconnected to the grid was made, which allows the energy demand of the process to be met by reducing the costs associated with electricity consumption.

Safety, shortening, refrigeration, photovoltaic

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: julio_valle@uaeh.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Alrededor del 90% de los alimentos que son consumidos en países desarrollados y un 55% en Latino América, han pasado por un proceso de refrigeración para asegurar inocuidad y prolongar su vida útil.

En la mayoría de los casos la carne de res no es consumida recién sacrificado el animal, ya que ésta necesita estar en refrigeración (0-5°C) por un lapso de tiempo después del sacrificio para que el producto adquiera las características organolépticas óptimas para su consumo (García M. , 2014).

La carne de res experimenta un proceso de conversión del músculo, el cual se divide en tres fases: la fase pre-rigor que ocurre inmediatamente después del sacrificio del animal, en esta fase la llegada de oxígeno y nutrientes a las células se interrumpe de forma inmediata debido al corte de la circulación sanguínea; como consecuencia de este proceso se produce un descenso del pH del músculo de 5,4 - 5,6 y una serie de cambios bioquímicos y estructurales, todos estos cambios dan lugar a una tensión y rigidez de la carne por la acción de sistemas enzimáticos que conduce a la instauración del “rigor-mortis”, siendo esta la segunda fase, donde las reservas energéticas del músculo se agotan y se alcanza la rigidez máxima, con lo cual cambia de un pH de 7 hasta niveles de 5.4-5.6; y por último la fase post-rigor, periodo de maduración endógenos (García M. , 2014).

Si la canal es enfriada por debajo de 10°C antes de la instauración del rigor mortis entonces se obtiene carne dura. Este es denominado como acortamiento por frío (Carrión, 2006).

Es importante considerar que las canales deben ser enfriadas para poder conservarlas por largos periodos de tiempo debido a que la carne además de ser altamente susceptible a deterioro, también puede constituir un vehículo para la propagación de enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs).

Para mantener la carne almacenada en su estado óptimo ésta debe someterse a procesos de refrigeración que consumen gran cantidad de energía. El consumo de electricidad en instalaciones frigoríficas y la eficiencia en su empleo depende de diversos factores, unos propios del proceso y otros vinculados con la forma de operación del sistema y elección técnica del equipamiento.

Los sistemas de compresión de vapor es la forma de refrigeración más usada en las cámaras de enfriamiento, debido a su eficiencia y manejo de temperaturas. Este tipo de sistemas requiere gran cantidad de energía eléctrica para realizar el trabajo de compresión, cuando la carga térmica a refrigerar es relativamente grande, esto propicia un costo económico y ambiental elevado.

Una alternativa para la producción de energía eléctrica son los sistemas fotovoltaicos, ya que se utilizan fuentes renovables, lo que contribuye a desarrollar un planeta limpio y sostenible.

El uso de sistemas fotovoltaicos para generación de electricidad es una práctica cada vez más común en el ámbito internacional. Durante los últimos 30 años el desarrollo tecnológico en este campo ha permitido una reducción de 95 % en el costo de los módulos fotovoltaicos comerciales, a la par de un incremento cercano al 200% en su eficiencia (García J. M., 2013).

El objetivo del presente trabajo es demostrar como el uso de energía solar fotovoltaica aplicada a procesos de refrigeración permite tener un ahorro en el costo de energía y un beneficio al medio ambiente. El trabajo consiste en el diseño de un sistema frigorífico para el almacenamiento de carne de res, el cuál será alimentado por un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica. Para el diseño del sistema frigorífico se consideraron las cargas térmicas asociadas al proceso manteniendo los parámetros biológicos óptimos y se realizó el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico que permite satisfacer la demanda energética y reducir los costos asociados al consumo de electricidad.

El potencial de la energía fotovoltaica radica en que los sistemas pueden instalarse en casi cualquier lugar y las instalaciones pueden ser de cualquier tamaño, lo anterior aunado a que en México se está implementando una legislación que permite el autoconsumo energético, generando ahorros económicos.

Metodología

Para determinar la ubicación de las cámaras frigoríficas se tuvieron en cuenta factores como la producción ganadera y la radiación solar en México, la temperatura ambiente, presión atmosférica y la velocidad del viento.

El diseño requiere una serie de tres cámaras para garantizar que el producto sea de calidad. En cada una se contemplan las temperaturas y humedad que se deben seguir en las fases de la carne. La primera cámara realiza el pre-enfriamiento, la segunda cámara realiza el proceso de congelación y la última cámara se destina al almacenamiento del producto final, estas utilizan un sistema de refrigeración por compresión.

El dimensionamiento se realizó de acuerdo a la cantidad de canales de res a almacenar y el flujo de canales en el rastro, y siguiendo normativas de higiene y distribución para rastros.

Para calcular el calor que debe extraer el sistema de refrigeración en cada una de las cámaras se consideraron cargas térmicas de la carne a refrigerar, personas que se encontrarán trabajando en la cámara, radiación solar, luces, motores e infiltraciones del ambiente, así como un aislamiento que sea conveniente en costos y que tenga una transferencia de calor mínima.

A partir de las cargas térmicas se obtiene el trabajo de los compresores, considerando su eficiencia eléctrica y esta será la energía eléctrica requerida en el dimensionamiento fotovoltaico. En el dimensionamiento fotovoltaico se consideran los siguientes parámetros: eficiencia energética del panel, la potencia nominal y el tipo de panel, así como el recurso solar de la región.

Finalmente se realizó su evaluación energética observándose una reducción significativa de los costos de operación.

Ubicación geográfica de la instalación frigorífica

Conocer el sitio en donde se planea la construcción de la cámara frigorífica es sumamente importante, ya que este influye directamente en la carga térmica y, en la temperatura de condensación a utilizar.

En este proyecto se diseñó el sistema de refrigeración de carne para el municipio de Lagos de Moreno, Jalisco.

El estado de Jalisco es el segundo en producción de canales de res a nivel nacional, en razón de las 200 mil toneladas de carne de res en canal que se producen anualmente, únicamente superado por el estado de Veracruz. Esta cantidad representa una movilización y sacrificio de aproximadamente 280 mil cabezas (JALISCO, 2012). Por tal motivo la conservación de carne de res es de suma importancia en el estado, del cual el municipio de Lagos de Moreno, es el principal productor con aproximadamente 11,791.66 toneladas de carne de res en canal, anualmente, de acuerdo al INEGI.

El Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables (CEMAER) estima que en Jalisco se recibe un radiación global media diaria de entre 5.2-5.3 kWh/m², que es mayor a la radiación global media de Veracruz de 4.8 kWh/m² (CEMAER, 2016), lo cual señala a Jalisco como un estado atractivo para el diseño de cámaras frigoríficas de óptima calidad, como para la utilización de energía solar fotovoltaica.

Descripción del proceso

La carga térmica es la cantidad de calor que debe ser extraído durante una unidad de tiempo, para compensar la cantidad de energía térmica que entra o se desarrolla en su interior. La temperatura de la cámara de pre enfriamiento debe de ser de 1 a 0° C, con una velocidad de aire de 0.25 a 3.0 m/s, debido a cuestiones económicas, la velocidad más utilizada es de 2 m/s, la humedad relativa debe variar entre 90% y 95%, en este proyecto se utilizará una humedad relativa en las cámaras de 95% para evitar la deshumidificación de la carne.

Dentro de las primeras 48 horas después del sacrificio, la canal debe alcanzar una temperatura interior de 7°C, y una temperatura en la superficie de aproximadamente 0°C para evitar la proliferación de microorganismos, respetar el tiempo señalado es de suma importancia para evitar el acortamiento por frío que ocurre al enfriar a menos de 10°C la canal previo al rigor mortis, es aquí donde la fase de pre enfriamiento termina (Protection, A.A, 2012).

Para la cámara de congelación es necesario disminuir la temperatura e incrementar la velocidad del flujo del aire que circula por la cámara, la temperatura del aire debe ser de -18 a -25°C y la velocidad de flujo de 3 m/s, con una humedad relativa de 95% para evitar el acortamiento por frío, en esta etapa se necesita una velocidad del flujo de aire rápida, para evitar la formación de cristales dentro de la carne, y que estos deterioren la calidad del producto final. En estas condiciones las mitades de canales se congelarán en un periodo de 16 a 20 horas (Protection, A.A, 2012).

La cámara de almacenamiento usualmente tiene temperaturas que están en el rango de -20 a -22°C para periodos de preservación de 6 meses o más, y la humedad relativa recomendada para esta fase es de entre 95 y 98%, para prevenir la deshidratación de la carne (Carrión, 2006).

Propiedades termodinámicas de la carne de res	
Calor específico abajo del punto de congelación	1.68 KJ/kgK
Calor específico arriba del punto de congelación	3.08 KJ/kgK
Calor latente	224 KJ/Kg
Contenido de agua	67%
Punto más alto de congelación	-2°C

Tabla 1 Propiedades termodinámicas de la carne de res

Fuente: (Cengel, 2001)

Diseño del sistema frigorífico

A partir del proceso descrito anteriormente y de las condiciones de operación de cada cámara se diseñó un sistema de refrigeración en el cual se llevan a cabo procesos de pre-enfriamiento, congelación y almacenamiento de la carne.

En la Tabla 2 se presentan las características de diseño de cada una de las cámaras de refrigeración:

Canal de res		Flujo de aire			Tiempo estimado de abatimiento	
Temperatura		Capacidad	Temperatura	Velocidad		Humedad
Inicial	Final					
Cámara de pre enfriamiento (alto: 4.7 m, largo: 7m, ancho:6 m)						
30 °C	0 a 7°C	25 canales	0°C	2 m/s	95%	24 horas
Cámara de congelamiento (alto: 4.7 m, largo: 7m, ancho:6 m)						
0°C	-16 a -20°C	25 canales	-20°C	3 m/s	95%	16-20 horas
Cámara de almacenamiento (alto: 4.7 m, largo: 7m, ancho:6 m)						
-16 °C	-18°C a -22°C	25 canales	-22°C	2m/s	95%	10 horas

Tabla 2 Condiciones de diseño

Fuente: *Elaboración propia*

El aislamiento es un parámetro sumamente importante, debido a las infiltraciones que pueda sufrir la cámara frigorífica, entre mejor sea el aislamiento, mejor será el coeficiente de desempeño. Para determinar el aislamiento de las cámaras, se evaluaron las especificaciones de espesor, conductividad térmica y costos de los aislantes más comunes.

En la tabla 3 se muestran las especificaciones de espesor de el aislante, de acuerdo a las temperaturas deseadas en la cámara.

Temperatura de almacenamiento °C	Espesor deseable del aislamiento en m	
	Poliestireno	Uretano
-45 a -32	8	6
-32 a -18	6	4
-18 a -4	4	4
-4 a 5	4	3-4

Tabla 3 Estándares generales para el espesor del aislamiento en cuartos de almacenamiento

Fuente: *(Frigus Bohn, 2014)*

El poder aislante de un material, se mide por medio de la evaluación de su conductividad térmica (factor “k”). Este valor nos indica la cantidad de calor que deja pasar una muestra de determinado material durante un cierto tiempo, existiendo un diferencial de temperatura entre una cara y la otra. Por lo tanto, entre más bajo sea el valor del factor “k”, mejor será la capacidad aislante del material.

El Poliuretano rígido tiene una factor “k” de 0.0245 W/mk. Es el más bajo entre los aislantes comerciales. Significa que es el material que menos calor deja pasar, comparado con cualquiera otro. Por tal motivo es el aislante seleccionado para las cámaras.

En la tabla 4 se muestran los materiales óptimos para la construcción de las cámaras frigoríficas de acuerdo a la temperatura necesitada en cada una.

Material	Espesor (m)	K (W/mK)
Ladrillo	0.1397	0.144
Poliuretano	0.0762	0.0245
Poliuretano	0.1016	0.0245
Loza de cemento	5.5	0.72
Piso de cemento	5.5	0.72

Tabla 4 Materiales de construcción

Fuente: *Elaboración propia*

Análisis energético del sistema

El análisis energético del sistema se divide en tres partes, el cálculo de las cargas térmicas, ciclo de refrigeración y el suministro energético.

Cargas térmicas

En general el sistema gana calor por las siguientes cargas térmicas:

- 1) Carga térmica generada por transmisión a través de paredes.

Este concepto se calcula por la expresión general:

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T \quad (1)$$

Donde: Q = calor total de transmisión a través de las paredes, A= área de exposición, U= coeficiente global de transferencia de calor, ΔT = diferencia de temperaturas.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{f_1} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{1}{f_2}} \quad (2)$$

$$f = 1.6 + 0.3v \quad (\text{para paredes lisas}) \quad (3)$$

$$f = 2.0 + 0.4v \quad (\text{para paredes medianamente rugosas}) \quad (4)$$

$$f = 2.1 + 0.5v \quad (\text{para paredes muy rugosas}) \quad (5)$$

Donde: v = velocidad del aire en millas/hora, f= factor de la película de aire, e=espesor del material, k=factor “k” del material.

En el caso del cálculo para el suelo, la temperatura exterior no será la misma, por lo tanto se deberá calcular de la siguiente forma:

$$T_{suelo} = \frac{(T_{ext} - T_{int})}{2} \quad (6)$$

Dónde: T_{suelo} = Temperatura del suelo; T_{ext} = Temperatura del exterior de la cámara frigorífica; T_{int} = Temperatura del interior de la cámara frigorífica.

Carga térmica por alumbrado y equipo

En los sistemas de refrigeración existen equipos eléctricos de alumbrado que ceden energía al medio en el momento de operar. Todos los sistemas de iluminación, ya sea incandescentes o fluorescentes básicamente, transforman la energía eléctrica que reciben para su operación, en calor; el cual desprende en su totalidad y se disipa en el interior del espacio que se desea refrigerar.

$$Q_{\text{alumbrado}} = (\# \text{lámparas} \cdot \text{watts}) \quad (7)$$

El cálculo de la carga térmica por motores se calcula mediante:

$$Q = P \cdot n(746) \quad (8)$$

Dónde: P = potencia del motor en HP; 746 es el factor de conversión de HP a Watts; n=número de motores

Carga térmica generada por producto

$$Q_{sensible} = m \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (9)$$

Dónde: $Q_{sensible}$ = Calor extraído donde no existe un cambio de fase; m= masa del producto; Cp= calor específico arriba o debajo del punto de congelación (Tabla 1); ΔT = diferencia de temperatura.

$$Q_{latente} = m \cdot HL \quad (10)$$

Dónde: $Q_{latente}$ = Calor que se necesita extraer para el cambio de fase (Tabla 1); HL = Entalpía de cambio de fase.

De acuerdo a la información del Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM, 2017), en la región de Jalisco el peso promedio de una canal de carne de res de corral es de 300 kg.

Carga térmica generada por infiltración

El concepto de infiltración representa una transmisión de calor originada por la entrada de aire exterior (a la temperatura del medio ambiente) al interior del espacio refrigerado. Esta carga térmica es ocasionada en el momento de la apertura de las puertas, ventanas u otro medio que influya en la comunicación con el exterior.

El procedimiento de cálculo para este punto se basa en considerar que el aire del espacio se cambiara un determinado número de veces por hora, a esto se le llama “numero de intercambios de aire” (CA) y se maneja en un intervalo de una hora (Tabla 5).

El número de cambios está en función directa del volumen total del espacio refrigerado.

Se calcula el volumen de aire infiltrado a la cámara:

$$V_{infiltrado} = V_{cámara} \cdot \frac{CA}{h} \cdot \text{factor de uso} \quad (11)$$

$V_{cámara}$ = Volumen interno de la cámara, restando espesores de materiales de construcción.

Factor de uso= 2 o 0.6, uso pesado o uso prologado, respectivamente.

	Volumen interno m ³	Cambios de aire en 24 h.
Cámara de pre enfriamiento	161.23	5.18
Cámara de congelamiento y almacenamiento	154.9	5.31

Tabla 5 Cambios de aire promedio en 24 h para cuartos de almacenamiento debido a la apertura de puertas e infiltración

Fuente: (Frigus Bohn, 2014)

$$Q_{aire interior} = \frac{V_{infiltrado}}{v_{interior} \cdot H_{Tinterior}} \quad (12)$$

Dónde: $Q_{aire interior}$ = calor del interior de la cámara; $V_{infiltrado}$ = volumen de aire que se infiltra en la cámara; $v_{interior}$ = volumen específico en el interior de la cámara a la temperatura interior; $H_{Tinterior}$ = entalpía en el interior de la cámara a la temperatura interior.

Se utiliza la misma ecuación, sustituyendo los valores del volumen específico y entalpía, ahora a temperatura del exterior, de este modo se obtiene $Q_{exterior}$. Y la carga por infiltraciones está dada por:

$$Q_{\text{infiltrado}} = Q_{\text{exterior}} - Q_{\text{interior}} \quad (13)$$

Carga térmica generada por ocupantes

Si existe personal trabajando en el área de las cámaras frigoríficas, disipa calor a un porcentaje que depende de la temperatura de la cámara.

Temperatura del refrigerador °C	Calor Equivalente por persona W/24 h.
0	6527.278
-16	8918.64
-18	9014.45

Tabla 6 Calor equivalente de ocupación

Fuente: (Frigus Bohn, 2014)

El calor total cedido por la ocupación de personas en el espacio refrigerado se calcula:

$$Q_{\text{personas}} = \frac{q_{\text{personas}} \cdot \# \text{ personas}}{24h} \quad (14)$$

Dónde: q_{personas} =calor cedido por persona (Tabla 6).

Carga térmica generada por radiación solar

Al incidir rayos solares sobre una superficie se origina un calentamiento, lo cual implica el paso del calor al interior del espacio refrigerado. El efecto solar está relacionado con la rugosidad de la superficie en que incide, ángulo de incidencia e intensidad de los rayos solares, constante proporcional del color de la superficie.

Tipo de superficie	Pared Este	Pared Sur	Pared Oeste	Techo
Superficies de color en tono medio	6	4	6	15

Tabla 7 Tolerancia por Efecto Solar

Fuente: (Frigus Bohn, 2014)

La carga térmica por radiación se calcula como:

$$Q_{\text{sun}} = A \cdot U \cdot \Delta T' \quad (15)$$

Dónde: Q_{sun} = calor por el efecto solar; A = área de cada pared; U= coeficiente global de transferencia de calor.

$$\Delta T' = (T_{\text{exterior}} + T_{\text{corrección}}) - T_{\text{cámara}} \quad (16)$$

Dónde: T_{exterior} = temperatura ambiente; $T_{\text{corrección}}$ = temperatura de tolerancia por el efecto solar (Tabla 7); $T_{\text{cámara}}$ = temperatura de diseño.

La carga térmica total será la suma de todas las cargas térmicas. Se utilizaron las cargas térmicas máximas de las tres cámaras, estos valores utilizaron para el cálculo del consumo energético.

Ciclos de refrigeración

El refrigerante que se utilizó fue R-407C, que es un refrigerante perteneciente a la gama de los Hidrofluorocarburos, tiene un GWP de 1774 (acrónimo del inglés Global Warming Potencial-GWP) que es una medida del potencial de calentamiento global; en comparación con el R-404A (GWP 3922) que es el gas más usado para la refrigeración estacionaria.

El consumo energético se obtiene a partir del trabajo a realizar por el compresor en los sistemas de refrigeración convencionales a partir del flujo másico y las entalpías del refrigerante a la entrada y salida del compresor.

El flujo másico y el trabajo del compresor se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\dot{m} = \frac{Q_H}{(h_{in \text{ comp}} - h_{in \text{ evap}})} \quad (17)$$

$$W_{comp} = \dot{m}(h_{in \text{ comp}} - h_{out \text{ comp}}) \quad (18)$$

Donde: Q_H = carga térmica total, $h_{in \text{ comp}}$ = entalpía a la entrada del compresor, $h_{in \text{ evap}}$ =entalpía a la entrada del evaporador, $h_{out \text{ comp}}$ = entalpía a la salida del compresor, \dot{m} = flujo másico de refrigerante. Las entalpías se tomaron de los valores registrados en la ficha técnica del refrigerante realizada por DuPont (DuPont, 2004).

En la Tabla 8 se aprecian los valores máximos del trabajo del compresor y cargas térmicas de las tres cámaras, así como la potencia eléctrica teniendo en cuenta la eficiencia eléctrica del compresor.

	Cámara de pre enfriamiento	Cámara de congelación	Cámara de almacenamiento
Carga térmica	16.912 kW	36.097 kW	4.418 kW
Trabajo del compresor	3.773 kW	14.148 kW	1.783 kW
Potencia eléctrica	4.336 kW	16.262 kW	2.049 kW
Energía eléctrica	78.048 kWh	292.71 kWh	36.88 kWh
COP	3.91	2.22	2.15

Tabla 8 Trabajo del compresor y carga térmica máximos

Fuente: *Elaboración propia*

Para determinar el consumo eléctrico de la instalación frigorífica se debe tener en cuenta la eficiencia isoentrópica del compresor, que esta se encuentra generalmente entre 80% - 90%. En este caso se consideró una eficiencia isoentrópica de 87%, ya que se consideró un compresor tipo scroll que son los compresores más eficientes y silenciosos.

Un compresor trabaja generalmente para instalaciones de cámaras frigoríficas de 18 a 20 horas (Sánchez & de las Infantas, 2009), para este caso se considerarán 18 horas de trabajo, ya que la cámara tiene infiltraciones externas mínimas. Se calculó el Coeficiente de Operación (COP) del sistema, esto es la relación entre la carga térmica total del sistema (kW), y la potencia (kW) que se suministra al compresor, el cual está dado por:

$$COP = \frac{Q_{total}}{W_{comp}} \quad (19)$$

Donde: Q_{total} = Carga térmica total del sistema, W_{comp} = Trabajo del compresor.

Resultados del diseño y análisis energético

Carga térmica

Se realizaron los cálculos para las temperaturas mínimas y máximas mensuales registradas por la NASA en los últimos 22 años, y se tomaron los valores máximos de cada cámara para calcular el consumo energético máximo de cada una de las cámaras.

En el gráfico 1 se puede observar que en el mes de mayo se obtienen los valores máximos de carga térmica a refrigerar para las tres cámaras, estos son los valores que se utilizaron para calcular el trabajo del compresor.

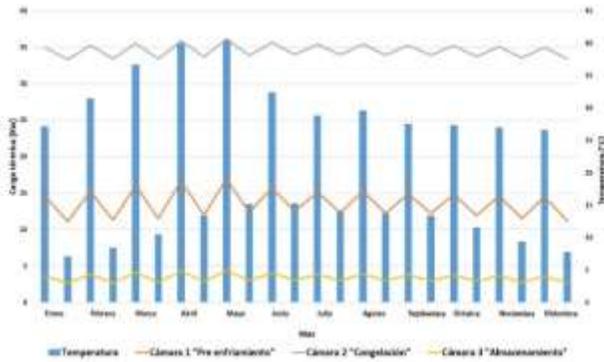


Gráfico 1 Carga térmica total durante el año

Fuente: Elaboración propia

Diseño del Sistema fotovoltaico

Para este proyecto se seleccionaron paneles solares los cuales tienen las características que se detallan en la tabla 9, para realizar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se tomaron en cuenta los datos obtenidos por la NASA (NASA, 2017) para el valor del promedio anual de radiación directa normal para el municipio de Lagos de Moreno, que es de 6.6 kWh/m² al día. Se tomó en cuenta una radiación de 1.0 kW/m² al día en la superficie terrestre, y con estos datos se calculó el recurso solar de la región (RS).

Tipo	Policristalino
Potencia máxima	335 W
Tolerancia potencia	-5 W/+7.2 W
Eficiencia	17.26%
Cof. Temp. Max.	-0.31%/°C
Área del panel	1.62 m ²

Tabla 9 Características técnicas del panel

Fuente: (Suner solar energy, 2017)

De este modo tenemos que:

$$RS = (6.6 \text{ kWh/m}^2) / (1.0 \text{ kW/m}^2) = 6.6 \text{ horas.}$$

Para obtener la energía obtenida por panel se multiplica la potencia del panel por el RS. Y de este modo el número de paneles será igual a la energía eléctrica necesaria entre la energía obtenida por panel.

En la Tabla 10 se muestran los requerimientos de paneles fotovoltaicos para alimentar las cámaras frigoríficas suponiendo que todas funcionan con el sistema convencional de refrigeración, tomando en cuenta la potencia necesitada en el compresor, así como las características de los paneles.

	Energía eléctrica necesaria	Energía por panel	Número de paneles	Superficie de instalación
Cámara de pre enfriamiento	78.048 kWh	2.211 KWh	35	56.7 m ²
Cámara de congelación	292.71 kWh	2.211 KWh	132	213.84 m ²
Cámara de almacenamiento	36.88 kWh	2.211 KWh	16	25.92 m ²

Tabla 10 Dimensionamiento fotovoltaico

Fuente: Elaboración propia

Energía suministrada y requerida por las cámaras

Para el caso de la cámara de pre enfriamiento, la energía suministrada y requerida a la cámara, se puede observar en el gráfico 2.



Gráfico 2 Energía requerida y suministrada a la cámara de pre enfriamiento

Fuente: Elaboración propia

La energía que suministra el sistema fotovoltaico, línea azul, satisface completamente la demanda del sistema frigorífico para el preenfriamiento de la carne, línea marrón, durante los meses de Noviembre-Mayo, con un excedente de energía que se inyectará a la red eléctrica para compensar la energía faltante en los meses de Junio-Octubre.

En el gráfico 3 se muestra el comportamiento de la energía proporcionada por los paneles fotovoltaicos, comparada con la energía necesaria en el compresor del sistema de congelación. Al igual que para el caso del preenfriamiento la energía eléctrica producida por el sistema fotovoltaico presenta un excedente en los meses de Noviembre-Mayo, esta energía será suministrada a la red eléctrica, mediante un contrato de interconexión, para contrarrestar los gastos de energía en los meses de Junio-Octubre donde se requerirá del suministro de la red eléctrica.

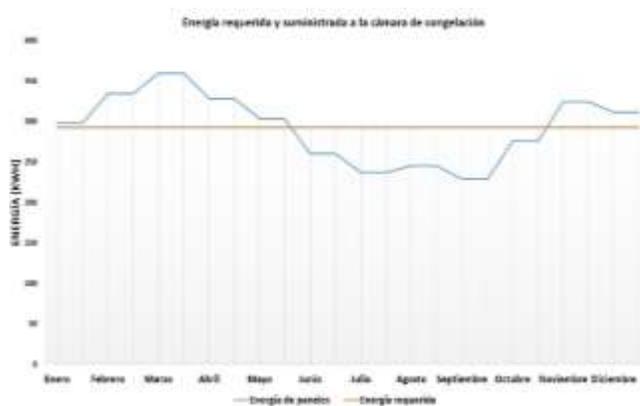


Gráfico 3 Energía requerida y suministrada a la cámara de congelación

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el gráfico 4, en la cámara de almacenamiento las necesidades energéticas del compresor son menores que en las anteriores, debido a que las cargas térmicas del producto son mínimas, sin embargo el comportamiento de la energía suministrada por los paneles solares es muy similar al de la cámara de congelación, ya que obedece a las mismas variables.

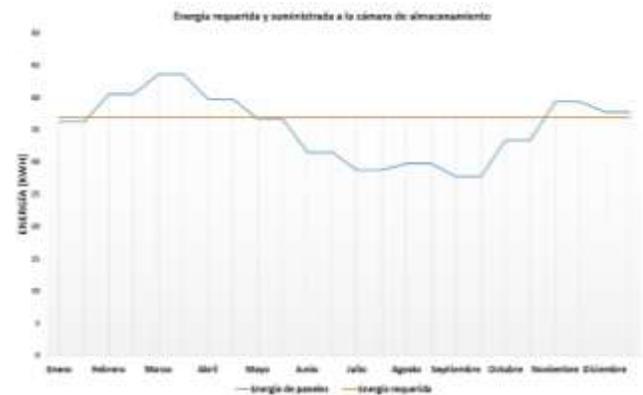


Gráfico 4 Energía requerida y suministrada a la cámara de almacenamiento

Evaluación económica

México tiene pensado que para el 2024 el 35% de la electricidad producida provenga de fuentes limpias, para lograr esto, el gobierno federal tiene en mente invertir 160 millones de dólares. El gobierno federal otorga créditos con el fin de apoyar las instalaciones fotovoltaicas. En México el watt instalado cuesta alrededor de 2 dólares (\$35 MXN). (CCEEA, 2016)

Tomando en cuenta la suma de los watts a instalar para las tres cámaras, la inversión inicial sería de \$2,145,675 MXN.

La demanda total de energía del sistema es de 23.088 kW, siendo la suma de la potencia eléctrica necesaria en cada cámara, en base a esto y de acuerdo a los lineamientos que se estipulan se seleccionó la “Tarifa 2” de CFE (Comisión Federal de Electricidad), este sistema cuenta con las características indicadas para el análisis financiero en base a dicha tarifa. La “Tarifa 2” se aplicará a todos los servicios que destinen la energía en baja tensión a cualquier uso, con demanda hasta de 25 kilowatts, excepto a los servicios para los cuales se fija específicamente su tarifa. (Comisión Federal de Electricidad, 2017)

Considerando un consumo constante de 407.638 kWh al día, y con los datos obtenidos de CFE del costo de este consumo de 2012 a 2016, se obtuvo un valor de \$ 2,507,713.46 MXN a pagar por consumo eléctrico durante 5 años, monto similar al costo de inversión que se tendría en la implementación del sistema fotovoltaico propuesto. Dado que los paneles solares generalmente tienen un garantía de mínimo de 20 años, el costo por el consumo eléctrico en este tiempo, considerando las tarifas actuales aplicables, se estima de aproximadamente de 10 millones de pesos, como se puede observar este costo es aproximadamente 4 veces mayor que la inversión propuesta para un sistema interconectado a la red de paneles solares. Lo cual representa un gran ahorro monetario así como un beneficio ecológico.

Conclusiones

En este trabajo se pueden visualizar las ventajas de la implementación de sistemas de refrigeración alternativos a cámaras frigoríficas, aunque estos sistemas se encuentren limitados por las condiciones de trabajo, es importante analizarlos y considerarlos.

En los resultados se puede observar que en algunos meses del año la energía provista por el sistema de colectores solares no es suficiente a la requerida por las cámaras frigoríficas, sin embargo es importante considerar que las cargas térmicas se calcularon para los casos en que éstas son las máximas posibles, por ello aunque existen diferencias en la energía suministrada y requerida se puede considerar el diseño como aceptable.

Del mismo modo se considera una interconexión a la red eléctrica, el cual puede ofrecer un respaldo cuando la energía provista por los paneles solares no sea suficiente para abastecer las necesidades de enfriamiento de las cámaras.

Se prevé un ahorro de costos de electricidad con el sistema de paneles solares interconectados a la red, debido a que se utiliza energía solar la cuál es de las energías más baratas y amigables con el medio ambiente.

El sistema frigorífico que se presenta en este trabajo es un diseño en desarrollo, y por consiguiente está sujeto a mejoras en cada una de sus etapas, que permitan su factibilidad. En análisis financiero se realizó en base a la “Tarifa 2”, la cuál presenta algunas desventajas económicas para el sistema, una alternativa sería manejarlo con la “Tarifa 3”, sin embargo el sistema fotovoltaico sigue siendo una opción viable económicamente.

El contar con un diseño eficiente y confiable del sistema impactaría positivamente en el uso de la energía solar como fuente generadora de frío, reduciendo los costos asociados al suministro de energía eléctrica y cuidando el ambiente.

Referencias

- Carrión, A. (2006). *Efecto del periodo de espera, previo a la refrigeración de la carne de res, sobre sus características postmortem*. Honduras.
- CCEEA. (2016). *Los precios por kilowatt instalado de paneles solares en comercios y residencias continúan bajando*. México.
- CEMAER. (2016). *“Energía Solar en México”*. México.
- Cengel, Y. &. (2001). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill.
- Comisión Federal de Electricidad. (02 de 07 de 2017). *Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica*. Obtenido de Comisión Federal de Electricidad: http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp
- DuPont. (2004). *Thermodinamic Properties of DuPont Suva 407c Refrigerant*. USA.
- Frigus Bohn. (2014). *Manual de Ingeniería*. México.
- García, J. M. (2013). *Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico conectado a la red para el INVI. D.F.* México.
- García, M. (2014). Efecto del tiempo de la maduración sobre la calidad organoléptica de la carne de vacuno. *Tecnología Agroalimentaria*, 45-52.
- JALISCO, U. G. (2012). *Producción*. Jalisco, México.
- NASA. (2017). *Surface meteorology and Solar Energy*. Obtenido de <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>
- Protection, A.A. (2012). *Manual on meat cold store operation and management*. USA.
- Sánchez, T., & de las Infantas, P. (2009). *Ingeniería del frío: teoría y práctica*. España: A.Madrid Vicente.
- SNIIM. (2017). *Precios de Bovinos: Carne en canal*. Obtenido de <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/>
- Suner solar energy. (2017). *Sunerg*. Obtenido de <http://www.sunergsolar.com/it/index.php>