

Uso de CFD Simcenter FloTHERM XT para el modelado de un Sistema de refrigeración termo-solar para la conservación de frutas y vegetales

Use of CFD Simcenter FloTHERM XT for the modeling of a thermo-solar cooling system for the preservation of fruits and vegetables

Magallanes Luna David ¹ Vega Gómez Carlos Jesahel ¹ Camas Nafate Mónica ¹ Covarrubias Ochoa Hiram ¹
Castillo-Téllez Beatriz ²

¹Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, Av. Nuevo Periférico #555. CP 45425, Tonalá, Jalisco, México david.magallanesl@gmail.com, carlos.vega@cutonala.udg.mx, monica.camas9831@academicos.udg.mx, hiram.covarrubias@academicos.udg.mx

²Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara, Carretera Federal No. 23, Km. 191, C.P. 46200, Colotlán, Jalisco, México beatriz.castillo@academicos.udg.mx

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2020

Fecha de aceptación: 26 de abril de 2021

Resumen. El siguiente trabajo presenta una alternativa para el aprovechamiento del recurso solar para la conservación de frutas y verduras para los productores de dichos productos, a partir del diseño de un refrigerador termo solar por absorción utilizando el software de simulación CFD Simcenter FloTHERM XT, con el cual se modelaron y simularon los diferentes componentes del refrigerador, el uso de este software permite evaluar el desempeño del diseño y corregir en software los posibles fallos antes de pasar a la etapa de prototipo. Una de las aportaciones de este trabajo radica en que si bien la herramienta de CFD es diseñada para el uso de enfriamiento de componentes electrónicos también puede ser utilizada para el diseño de componentes termo solares.

Palabras clave: Refrigeración termo-solar, Modelado computacional, CFD FloTherm XT.

Abstract: The following work presents an alternative for the use of the solar resource for the conservation of fruits and vegetables for the producers of said products, from the design of a solar thermal absorption refrigerator using the CFD Simcenter FloTHERM XT simulation software, with which The different components of the refrigerator were modeled and simulated, the use of this software allows evaluating the performance of the design and correcting possible faults in the software before moving on to the prototype stage. One of the contributions of this work is that although the CFD tool is designed for the use of cooling electronic components, it can also be used for the design of solar thermal components.

Keywords: Thermo-solar cooling, Computational modeling, CFD FloTherm XT.

1 Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2012) establece que "las pérdidas de alimentos conllevan el desperdicio de recursos utilizados en la producción, como tierra, agua, energía e insumos. Producir comida que no se consumirá supone emisiones innecesarias de CO₂, además de pérdidas en el valor añadido en los alimentos" (p. v). La misma FAO sugiere que alrededor de un tercio de los alimentos destinados a consumo humano en el mundo (equivalente a 1,300 millones de toneladas al año), se pierden o se desperdician. Dichas pérdidas pueden ocurrir en cualquier punto de la Cadena de Suministro de Alimentos (CSA).

La CSA distingue 5 puntos donde puede ocurrir la pérdida de los alimentos (FAO,2012) siendo la Producción Agrícola, Manejo poscosecha y almacenamiento, Procesamiento, Distribución y por último el Consumo. Cuando la disminución de la masa de alimentos ocurre en las etapas de distribución y consumo, a dicha disminución se le conoce como desperdicio de alimentos (FAO, 2012).

2 México

A partir de la participación de México en la elaboración de la “Agenda 2030 y de los Objetivos del desarrollo sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe”, publicada en el mes de mayo de 2016 por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en la meta 13 del documento se estipula que se debe “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles” (ONU & CONEVAL, 2016 p. 31) y como una meta específica, en el apartado 13.2, la agenda enuncia como objetivo: “De aquí a 2030, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha” (ONU & CONEVAL, 2016 p. 31).

En el año 2015 la FAO menciona que más del 37% de los alimentos producidos en México se desperdician, estos datos son con información de Genaro Aguilar del Instituto Politécnico Nacional y son los siguientes:

- Guayaba, con el 57,73 %
- Leche de vaca, con el 57,14 %
- Mango, con el 54,54 %
- Pescados y sardinas con el 54,07 %
- Aguacate con el 53,97 %
- Plátano verde y tabasco, con el 53,76 %
- Nopal con el 53,26 %
- Arroz con el 46,87 %
- Pepino con el 45,46 %

En estos datos se aprecia que en el caso de las frutas y verduras son de los productos que más se desperdician. La misma investigación menciona posibles soluciones como son:

- Capacitar y supervisar el manejo de productos.
- Incorporar equipos y sistemas especializados.
- Estandarizar flotas de transporte en base a las necesidades de producto.
- Mejorar y ampliar la infraestructura.
- Mejorar la gestión en el manejo de insumos, productos e inventarios.
- Realizar una verificación constante de la calidad del producto.
- Mejorar los materiales y práctica de empaque y embalaje.
- Mejorar la exhibición del producto y conservación del producto.
- Integrar nuevas estrategias de comercialización.

Por tanto, la refrigeración es una de las soluciones más importantes y si a ella le agregamos el valor del uso de la energía solar permite la mejora en la incorporación de equipos y sistemas especializados. La producción agrícola se da en las zonas rurales las cuales por sus condiciones geográficas conllevan difícil acceso a la electricidad o bien el acceso terrestre, situación que limita su capacidad de producción, sin embargo, la ubicación geográfica de México le permite tener una gran capacidad de captación de radiación solar a nivel global, por lo que esa energía está disponible para su aprovechamiento. En la figura 1 se muestra el mapa de radiación solar global.

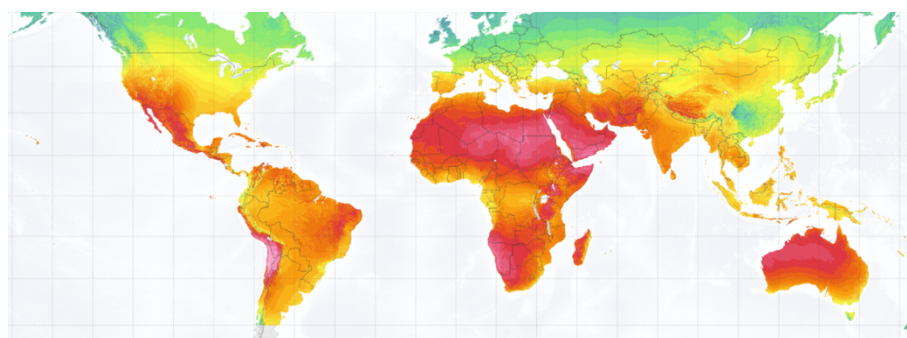


Fig.1. Mapa de radiación solar global. (Tomada de Global Solar Atlas 2.0)

Si los países en vías de desarrollo adoptan el mismo nivel en equipos de refrigeración de los países desarrollados pueden dejar de desperdiciar un cuarto de los alimentos que ya desperdician según el Institution of Mechanical Engineers (2014). Para ello se debe tomar en cuenta la cadena de frío, que es la cadena continua de ambientes con temperaturas frías controladas desde la cosecha al punto de venta.

3 Descripción general del software “FloTHERM XT”

FloTHERM es un software de simulación desarrollado por la empresa Mentor Graphics Corporation (MGC), que a su vez pertenece SIEMENS. Como MGC (2017) menciona, FloTHERM XT es parte de la familia de productos FloTHERM, que son herramientas de simulación térmica orientadas a equipo electrónico y cuentan con más de 25 años de experiencia.

El software FloTHERM XT se desarrolló sobre la misma base que FloTHERM, que utiliza modelos térmicos compactos para electrónicos, pero usando la tecnología de mallado y de “solver” de FloEFD (el simulador de CFD genérico de Mentor Graphics). La diferencia con FloTHERM es que FloTHERM XT está orientado al ambiente de diseño CAD (Computer Assisted Design), ya que corre sobre la herramienta de CAD SolidWorks. Esta característica le confiere un potencial enorme para integrar el diseño mecánico al diseño térmico y de fluidos. El mote de “Simcenter” fue agregado cuando MGC fue adquirido por SIEMENS.

La orientación hacia equipo electrónico permite usar modelos térmicos compactos para la simulación de componentes electrónicos sin la necesidad de modelar explícitamente, lo que hace que la simulación sea más rápida, pero la base de simulación térmica y de fluidos permite el uso del software para aplicaciones diferentes al manejo térmico en equipo electrónico.

4 Metodología

Para el presente trabajo se inició con una búsqueda de información y recolección de datos, todo ello referente a la problemática en la producción y conservación de las frutas y verduras, así como las condiciones de radiación solar en México y en caso particular la Zona Metropolitana de Guadalajara. Posteriormente se definió el ciclo de refrigeración a utilizar para alcanzar las temperaturas de almacenamiento de los productos agrícolas analizados. El elegido fue un ciclo por absorción, usando la mezcla Amoniaco – Agua. Para conocer las características térmicas de los distintos elementos del refrigerador termo-solar por absorción Amoniaco - Agua (cámara fría con el evaporador, regenerador, absorbedor, generador, condensador y rectificador), se eligió el producto agrícola con la demanda térmica mayor. Posteriormente, para cada elemento del refrigerador, se calculó el calor removido (o agregado) al sistema para después modelarlo y simularlo en el software de CFD Simcenter FloTHERM XT. Finalmente se compararon los resultados de la simulación contra los del cálculo y contra el requerimiento de cada elemento. El uso del software CFD Simcenter FloTHERM XT fue parte esencial del proyecto, ya que para la construcción e implementación de un sistema como el que se desarrolló el costo es muy alto, por ello el uso del simulador para este proyecto es fundamental, para finalizar con el mismo software se modelaron los sistemas identificando su funcionamiento y posibles fallas para su posterior solución.

5 Resultados

La ciudad de Guadalajara fue seleccionada por ser el centro de distribución del occidente del país a través del mercado de abastos, en donde a partir de un trabajo de campo y con datos del Grupo Consultor de mercados agrícolas se seleccionaron los siguientes productos para el cálculo de su carga térmica: frambuesa, fresa, zarzamora, jitomate variedad *uva*, zanahoria variedad *baby*, chile serrano y mango Ataúlfo. Después de un análisis térmico, se definió al mango Ataúlfo como el producto agrícola con la mayor carga térmica y, por tanto, el producto crítico que se usó como base para las simulaciones de los elementos del refrigerador termo-solar por absorción. Para los cálculos de la carga térmica de los diferentes productos se tomaron las ecuaciones del American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE, 2014).

Las propiedades del fluido de trabajo (amoniaco-agua) que se utilizaron en cálculos y simulaciones se tomaron de las siguientes fuentes:

- Las propiedades termodinámicas de Ibrahim & Klein (1993).

- La conductividad térmica para la fase líquida de Cuenca et al. (2013).
- La viscosidad de la fase líquida de Conde (2004).

Una vez que se definió el producto, se procedió a modelar y simular la cámara fría con el evaporador para conocer el flujo de calor máximo que demandaría el sistema. El producto identificado con la mayor demanda térmica de los considerados para este análisis fue el mango. Como durante el proceso de enfriamiento las temperaturas del producto cambian con el tiempo, la simulación que se hizo fue en estado transitorio. Para este elemento, y dado que los modelos para fenómenos transitorios solo están disponibles para geometrías simples, no fue posible hacer un cálculo del flujo de calor máximo a remover, por lo que se usó directamente el valor que arrojó la simulación para calcular y modelar el resto de los elementos. En la figura 2 se muestra la gráfica de flujo de calor contra tiempo que se obtuvo de la simulación.

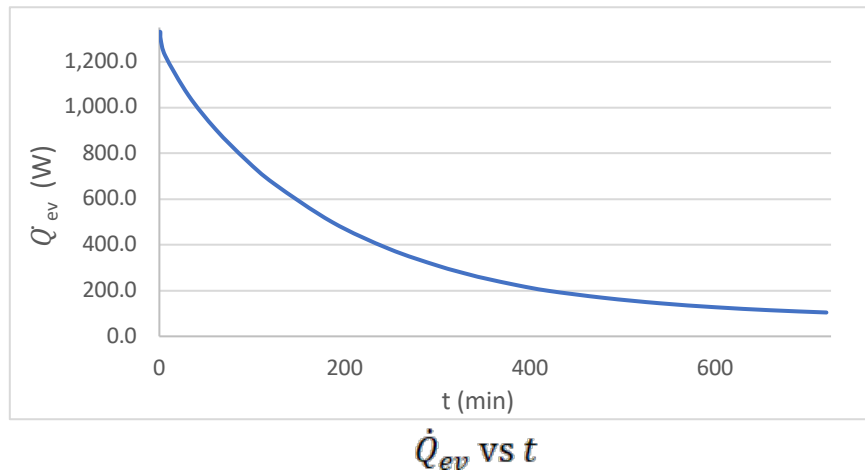


Fig. 2. Flujo de calor del evaporador contra tiempo

El flujo de calor máximo es de 1,331 W (al inicio). A este valor se le agregó un 10% como factor de seguridad. Por lo tanto, el flujo de calor considerado para los cálculos y simulaciones posteriores fue 1,464 W.

El modelo usado para la simulación se muestra en la figura 3:

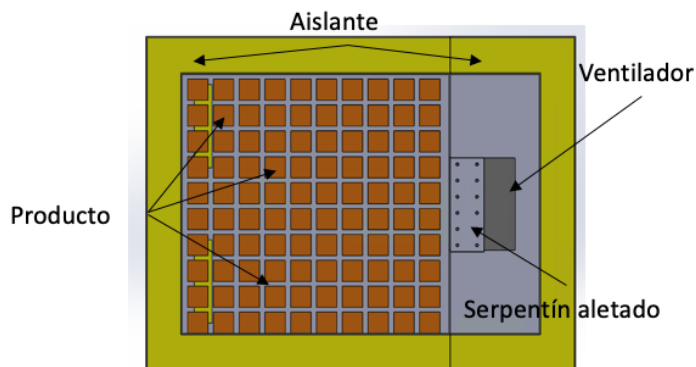


Fig. 3. Sección transversal de cámara fría y evaporador

En la figura 4 se muestran las temperaturas dentro de la cámara fría en diferentes tiempos. Cabe señalar que las temperaturas y el flujo de calor del producto después de 12 horas de enfriamiento son ligeramente mayores a las de estado estable, por lo que se definió que 12 horas son suficientes para llevar el producto desde temperatura ambiente hasta temperatura de almacenamiento.

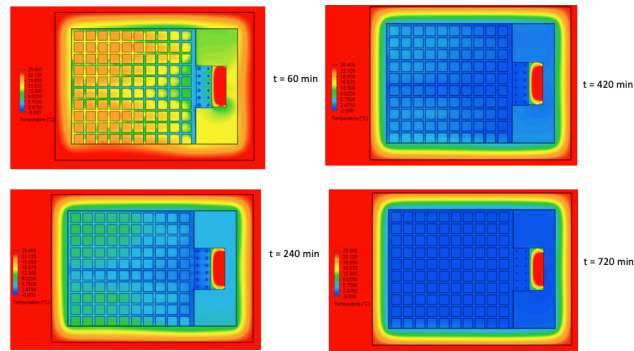


Fig. 4. Distribución de temperatura dentro de la cámara fría en diferentes tiempos

El segundo elemento que se diseñó fue el regenerador. El análisis de este elemento fue en estado estable, y los resultados de la simulación contra lo calculado se muestran en la tabla 1:

Tabla 1
Flujo de calor del regenerador, cálculo contra simulación

	Simulación	Cálculo
\dot{Q}_s (W)	2,421.0	2,741.6
Diferencia (%)	13%	

El valor calculado es 13% mayor al resultado de la simulación. Esto significa que el cálculo sobreestima la capacidad de este elemento. La comparación entre el valor de la simulación y el valor requerido se muestra en la tabla 2:

Tabla 2
Regenerador: requerimientos contra resultados de la simulación

	Requerido	Simulado
\dot{Q}_s (W)	2,431	2,421
Diferencia (%)	0.4%	

La tabla muestra que la diferencia es menor al 1%, por lo que se concluye que el regenerador cumple su función. La figura 4 muestra la distribución de temperatura del regenerador.

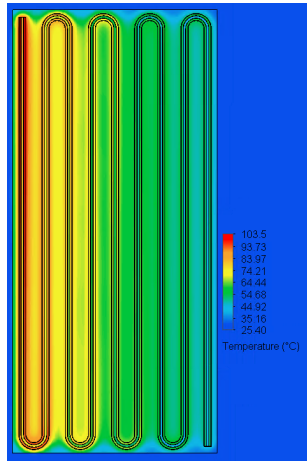


Fig. 4. Distribución de temperatura del regenerador

El tercer elemento que se diseñó fue el absorbedor. Se hizo también un análisis en estado estable, y la comparación entre el cálculo y la simulación se presentan en la tabla 3:

Tabla 3
Flujo de calor del absorbedor, cálculo contra simulación

	Simulación	Cálculo
\dot{Q}_{abs} (W)	-2,565	-2,310
Diferencia (%)	10%	

El valor calculado es 10% menor al resultado de la simulación. Esto significa que el cálculo subestima la capacidad de este elemento. La comparación entre el valor de la simulación y el valor requerido se muestra en la tabla 4:

Tabla 4
Absorbedor: requerimientos contra resultados de la simulación

	Requerido	Simulado
\dot{Q}_{abs} (W)	-2,540	-2,656
Diferencia (%)	0.4%	

Al igual que en el regenerador, la diferencia es menor al 1%, por lo que se concluye que el elemento cumple con su función. El modelo usado para la simulación se muestra en la figura 5.

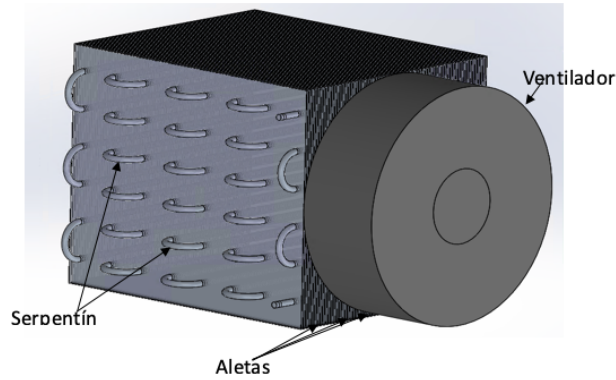


Fig. 5. Modelo para la simulación del absorbedor

Las figuras 6 y 7 muestran la distribución de la temperatura de la aleta central y del aire entre aletas, respectivamente.

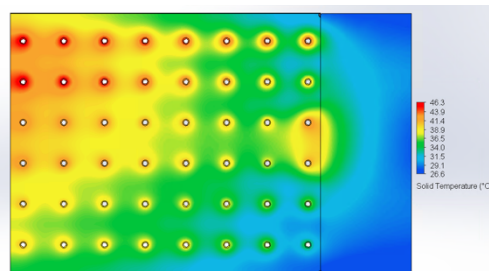


Fig. 6. Distribución de temperatura de aleta central del absorbedor.

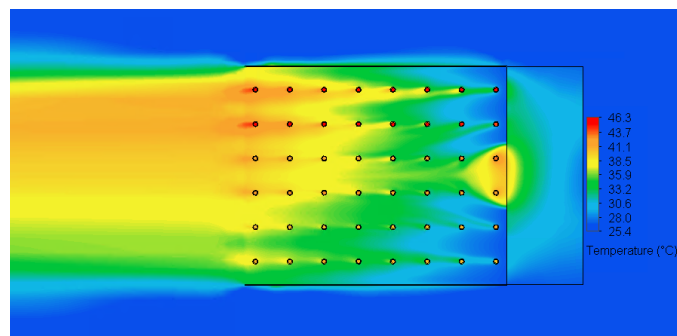


Fig. 7. Distribución de temperatura del aire al centro de las aletas del absorbedor.

El cuarto elemento que se diseñó fue el generador. Fue también un análisis en estado estable, y la comparación entre el cálculo y la simulación se presentan en la tabla 5:

Tabla 5
Flujo de calor del generador, cálculo contra simulación

	Simulación	Cálculo
\dot{Q}_g (W)	2,871	4,046
Diferencia (%)	41%	

El valor calculado es 41% menor al resultado de la simulación. Esto significa que el cálculo sobreestima de manera notable la capacidad de este elemento. La comparación entre el valor de la simulación y el valor requerido se muestra en la tabla 6:

Tabla 6
Generador: requerimientos contra resultados de la simulación

	Requerido	Simulado
\dot{Q}_g (W)	2,878	2,871
Diferencia (%)	0.3%	

Al igual que en los elementos anteriores, la diferencia es menor al 1%, por lo que se concluye que el elemento cumple con su función. El modelo usado para la simulación se muestra en la figura 8.

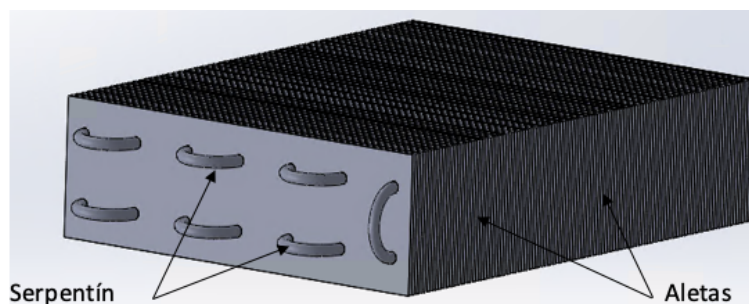


Fig. 8. Modelo para la simulación del generador.

Las figuras 9 y 10 muestran la distribución de la temperatura de la aleta central y del aceite entre aletas, respectivamente.

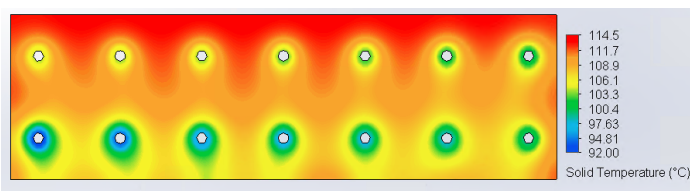


Fig. 9. Distribución de temperatura de aleta central del generador.

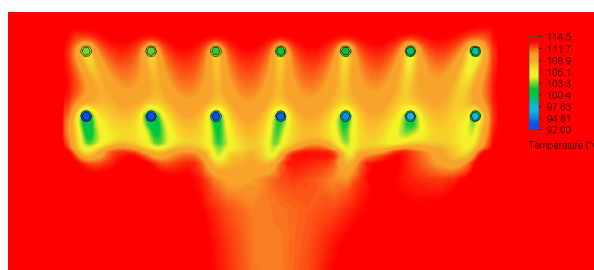


Fig. 10. Distribución de temperatura del aceite al centro de las aletas del generador

El quinto y el sexto elemento se diseñaron dentro de un solo dispositivo que remueve el calor de ambos. El análisis fue en estado estable. La comparación entre el cálculo y la simulación se presentan en la tabla 7:

Tabla 7
Flujo de calor del rectificador y del condensador, cálculo contra simulación

	Simulación	Cálculo
$\dot{Q}_c + \dot{Q}_r$ (W)	-1,788.0	-1,685.0
Diferencia (%)		6.1%

El valor calculado es 6.1% mayor al resultado de la simulación. Esto significa que el cálculo subestima la capacidad del dispositivo de remover el calor requerido por el rectificador y el condensador. La comparación entre el valor de la simulación y el valor requerido se muestra en la tabla 8:

Tabla 8
Rectificador y condensador: requerimientos contra resultados de la simulación

	Requerido	Simulado
$\dot{Q}_c + \dot{Q}_r$ (W)	1,821.0	1,788.0
Diferencia (%)		1.8%

La diferencia es menor al 2%, por lo que se concluye que el dispositivo cumple con la función de remover el calor requerido por el condensador y el rectificador. El modelo usado para la simulación se muestra en la figura 11.

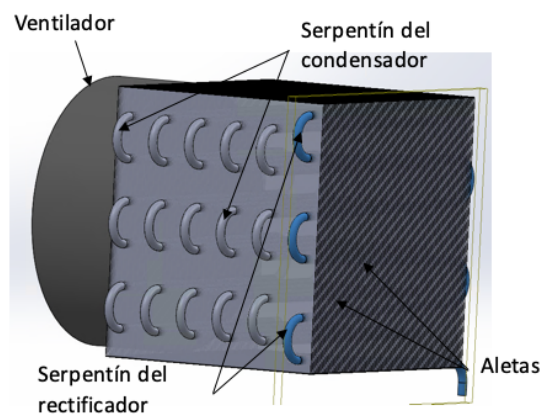


Fig. 11. Modelo para la simulación del rectificador y del condensador.

Las figuras 12 y 13 muestran la distribución de la temperatura de la aleta central y del aire entre aletas, respectivamente.

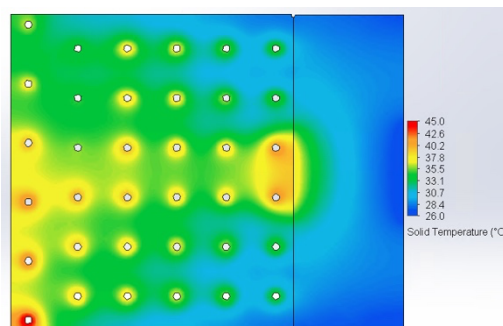


Fig. 12. Distribución de temperatura de aleta central del rectificador y condensador.

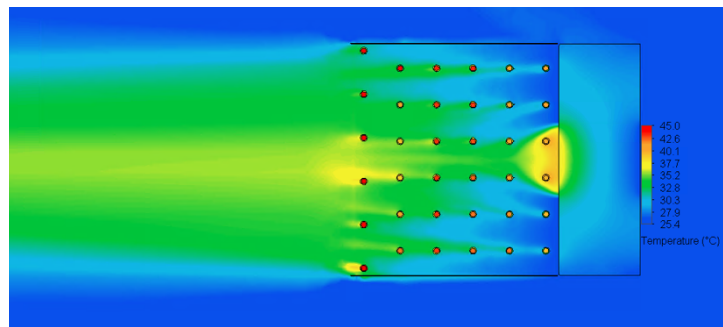


Fig. 13. Distribución de temperatura del aire al centro de las aletas del rectificador y condensador.

Por último, se presenta en la figura 14 el sistema de forma integral donde se identifican cada uno de sus elementos que componen el sistema de refrigeración.

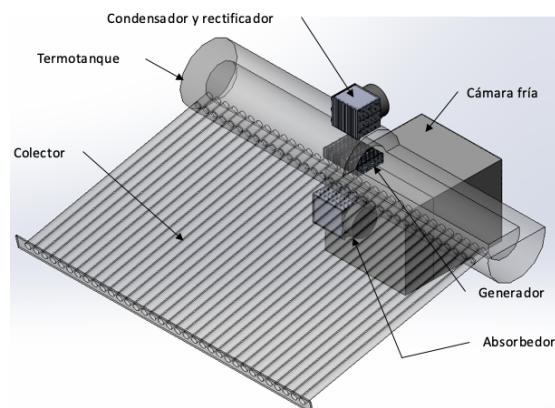


Fig. 14, Integración del sistema

En esta figura se aprecia que el tamaño del colector solar el cual es más grande que todos los sistemas que integran el refrigerador, sin embargo, esta es una imagen ilustrativa pues el colector y el termo tanque puede estar en un espacio diferente y no necesariamente en esta disposición, pues el colector debe encontrarse en un lugar donde capte la mayor radiación como una azotea, por tanto, el diseño del dispositivo aquí presentado es para proyectos de investigación en su caso.

6 Conclusión y trabajo a futuro

El uso de herramientas de simulación no sustituye en su totalidad los modelos analíticos para el cálculo, pero son herramientas que facilitan y agilizan el proceso, siendo importantes en el momento de identificar errores significativos, como es el caso del generador el cual contaba con un error del 40% y con la herramienta informática fue detectado en el momento adecuado. Cabe señalar que la herramienta de software tiene limitaciones, como la imposibilidad de modelar el fenómeno de contacto de dos fluidos distintos o también llamado de superficie libre, así como el fenómeno de cambio de fase. Sin embargo, se demuestra que una herramienta diseñada para la simulación del enfriamiento de componentes electrónicos puede utilizarse para el desarrollo de otras aplicaciones. Dentro del trabajo a futuro de la presente investigación se tiene la optimización de algunos componentes y después de ello se contempla construir el primer prototipo físico una vez que se cuente con el recurso presupuestal para ello.

Agradecimientos.

Se agradece a la empresa Continental Automotive de Guadalajara por su apoyo en el uso del software para este trabajo que forma parte de la tesis “Diseño y modelado de un sistema de refrigeración termo-solar, con el uso de Simcenter FloTHERM XT, para la conservación de frutas y vegetales” del programa de posgrado de Maestría en Ingeniería en Agua y Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara.

Referencias

- ASHRAE. (2013) *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. Atlanta, USA: ASHRAE
- ASHRAE. (2014) *ASHRAE Handbook: Refrigeration*. Atlanta, USA: ASHRAE
- CENGEL, Yunus A. (2007) *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. (3ª ed.). Ciudad de México, México: McGraw-Hill.
- CENGEL, Yunus A. & BOLES, Michael A. (2012) *Termodinámica*. (7ª ed.). Ciudad de México, México: McGraw-Hill.
- CONDE M. (2004). *Thermophysical properties of {NH₃ + H₂O} solutions for the industrial design of absorption refrigeration equipment*. Zurich, Switzerland: Conde Engineering
- CONEVAL. (30 de agosto 2017) *Medición de la pobreza en México y en las Entidades Federativas 2016*. Recuperado de http://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Documents/Pobreza_16/Pobreza_2016_CONEVAL.pdf#search=%22pobreza%20alimentaria%22%202017
- COOLING SYSTEM KEEPS SPACE STATION SAFE, PRODUCTIVE, (11 de diciembre de 2013). En National Aeronautics and Space administration, NASA. Recuperado de <https://www.nasa.gov/content/cooling-system-keeps-space-station-safe-productive>
- CUENCA., et al. (2013). In *Int. Journal of Refrigeration, Vol. 36, (2013), pp. 998-1003*.
- FAO. (2015). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en América Latina y el Caribe.*, Boletín 2. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i4655s.pdf>
- FAO. (2012). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevenciones*. Roma, Italia: Dirección de Publicaciones, FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i2697s.pdf>
- GONZÁLEZ, A.; LOZA, L.; y GÓMEZ, J. (2010). *Características Climáticas Generales en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)*. Guadalajara, México: Universidad de Guadalajara. Recuperado de: <http://sincronia.cucsh.udg.mx/gonzalezsalazarspring2010.htm>
- GRUPO CONSULTOR DE MERCADOS AGRÍCOLAS. (2019). *Index agropecuario de México*. Ciudad de México, México: Grupo consultor de mercados agrícolas. Recuperado de: <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2020/01/Index-Agropecuario-2019.pdf>
- HEROLD, Keith E., et al. (2016) *Absorption chillers and heat pumps*. (2nd ed.). Boca Raton, USA: CRC Press.
- IBRAHIM, O.M. & KLEIN, S.A. (1993) Thermodynamic Properties of Ammonia-Water Mixtures. In *ASHRAE Trans.: Symposia, 21, 2, 1495 (1993)*.
- INGLEY, H.A. (1980) *Vegetable oils: Liquid coolants for solar heating and cooling applications*. Gainesville, USA: University of Florida.
- INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS (2014) *A tank of cold: cleantech leapfrog to more food secure world*. London, UK. Recovered from: <http://www.imeche.org/docs/default-source/reports/a-tank-of-cold-cleantech-leapfrog-to-a-more-food-secure-world.pdf?sfvrsn=0>
- KALOGIROU, Soteris A. (2014) *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. (2nd ed.). Waltham, USA: Academic Press.
- KIM, D.S. & INFANTE Ferreira, C.A. (2008). Solar refrigeration options: a state-of-art review. In *International journal of refrigeration, 31(1)*, 3-15. Recovered from <http://www.solaripedia.com/files/1111.pdf>
- LAZZARIN, R.M. (2013). Solar cooling: PV or thermal? A thermodynamic and economical analysis. In *International journal of refrigeration, 39(2014)*, 38-47.
- MENTOR GRAPHICS CORPORATION. (2017). *FloTHERM suite*. Wilsonville, USA: Mentor, a Siemens bussiness, Recovered from https://s3.amazonaws.com/s3.mentor.com/public_documents/datasheet/products/mechanical/products/flotherm.pdf

- ONU & CEPAL. (2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: Publicación de las Naciones Unidas. Recuperado de <http://www.sela.org/media/2262361/agenda-2030-y-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible.pdf>
- PRODUCCIÓN DE BERRIES EN MÉXICO, UN MERCADO CRECIENTE, (21 de junio de 2019). En *La voz del campo*. Recuperado de <https://lavozdelcampo.com.mx/produccion-de-berries-en-mexico-un-mercado-creciente/>
- WINKWORTH-SMITH, Charlie, et al. (2015). *The impact of reducing food loss in the global cold chain*. The University of Nottingham, UK. Recovered from http://naturalleader.com/wp-content/uploads/2016/04/UTC-Nottingham-Report_3-30_FINAL.pdf