

Modelo matemático de un sistema intercambiador de calor para un pasteurizador solar

Alejandro Téllez Ramírez*. Luis Armando Moreno Coria. **
Gerardo Mino Aguilar***

* Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Puebla, México. (e-mail: alex17tellez@gmail.com).

**Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Puebla, México. (e-mail: armando.morenoc@correo.buap.mx)

*** Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Puebla, México, (e-mail: Gerardo.mino@buap.com.mx)}

Abstract: Milk is very important for a healthy lifestyle. It's a rich source of several essential nutrients, including protein, calcium, phosphorus, vitamin A and vitamin D. Milk production in Mexico continues its steady growth as it works to supply its processing sectors but it's not enough to satisfy the growing demand. In this article it shows the design, model and analyze the thermal system for an autonomous solar tracker with two degrees of freedom. The thermal system is composed by a Fresnel lens, a solar laboratory and a stainless-steel plate. It was developed a mathematical model for optical analysis and other for thermal analysis in the stainless-steel plate.

Keywords: Fresnel lens, optical analysis, milk pasteurization, thermal analysis, solar energy.

1. INTRODUCCION

La producción de leche en México es muy importante desde el punto de vista económico, social y ambiental. La seguridad alimentaria, la vida rural y el manejo del medio ambiente están estrechamente interrelacionados en la producción agropecuaria. La producción y el procesamiento de la leche proporcionan empleo, no solo a las personas que trabajan en las granjas de leche o en las plantas industriales de leche, sino también a todas las comunidades, al sector conformado por pequeños y medianos productores.

En las últimas décadas, la producción de leche en México ha ido en ascenso, pero los índices alcanzados no han sido suficientes para satisfacer la creciente demanda (por el aumento de población) de un producto prioritario para la nutrición ("Programa Nacional Pecuario" 2012). Factores que han convertido al país en uno de los principales importadores de leche a nivel internacional.

La diversidad de condiciones y formas de producir leche en este país refleja una situación contrastante. En una misma zona se encuentran productores que cuentan con desarrollo tecnológico avanzado (genético, biotecnológico, cómputo y amplio desarrollo de mercados), en coexistencia con numerosas unidades de producción familiar de marginales recursos. Quienes se han visto en la obligación de abandonar la producción, señalando el ascenso del precio de insumos, combustibles y a la falta de gestión comercial como los

factores claves que afectan al sector lácteo, todo en conjunto con la poca competitividad comercial que ofrece la leche sin pasteurizar.

Situación que ha repercutido en el sector ganadero del Estado de Puebla, el cual se ha visto perjudicado con un descenso del 30% de lo que aportaba una década atrás.

En el marco de esta situación, la FCE (Facultad de Ciencias de la Electrónica) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla propone el desarrollo de un prototipo de pasteurizador solar. El objetivo principal consiste en desarrollar un prototipo de bajo costo capaz de desplazar la concentración vertical de la producción hacia productores o grupos de productores integrados, que cuentan con ciertos recursos que les permiten participar con un valor agregado superior en la cadena de producción que un pequeño sector menos favorecidos económicamente. Y efectivamente, incorporar pequeños sectores ganaderos que a consecuencia de los altos gastos que implican el procesamiento de la leche, paulatinamente se han ido desvinculado de esta actividad productiva.

2. ANTECEDENTES

La pasteurización es el método de calentar un líquido por debajo del punto de ebullición para terminar los microorganismos. Fue establecido por Louis Pasteur en 1864 para ampliar las cualidades de conservación del vino. Desde

entonces, se ha utilizado en diferentes productos, inclusive se ha visto relacionado con la energía solar (Ochoa, Arévalo, and Andrade 2016).

Kirsten y Tom llevaron a cabo el diseño, desarrollo y análisis del sistema de control empleado para el sistema de pasteurización solar a través de paneles solares en la ciudad de Tanzania. El análisis del sistema de pasteurización se ha basado en varias demandas que varían el suministro de energía, el bajo costo, la baja complejidad y la sencilla interfaz de usuario. Tomaron demanda alrededor de 1000 litros de leche por día con aproximadamente 5 horas de sol, alcanzando en promedio una pasteurización que ronda los 200 litros por hora (Nielsen and Pedersen 2001).

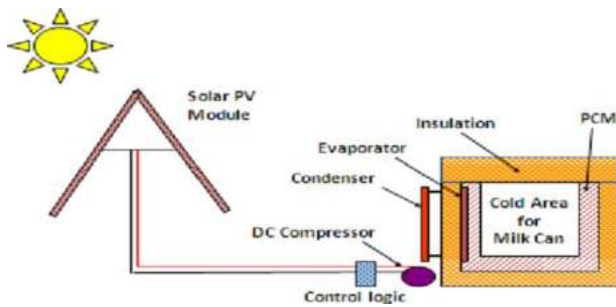


Fig. 1. Diagrama del proceso de pasteurización basado en un panel solar. (Panchal, Patel, and Chaudhary 2018)

Judith Franco desarrolló un concentrador solar de bajo costo (sin seguimiento solar) para pasteurizar la leche de cabra en la producción de queso (figura 2). Usaron un concentrador solar de tipo Fresnel con una distancia focal de 55 cm, después de una serie de pruebas, encontraron que el concentrador de bajo costo del tipo Fresnel logró la pasteurización de 101 litros de leche en aproximadamente 1 hora de trabajo y con un tiempo de recuperación de energía de aproximadamente ocho años (Franco et al. 2004).

Francis Obuoro diseñó y evaluó el desempeño de una pasteurizadora de leche solar de placa plana para áreas pastorales áridas en Kenia. Se elaboró un pasteurizador de leche solar que consiste en un colector de placa plana y una tina de acero inoxidable para una capacidad de 80 litros.

En el 2013 se realizó el análisis de rendimiento de un sistema pasteurizador de leche solar con la ayuda de un colector de placa plana. La principal preocupación era dedicar un diseño innovador de pasteurizador solar para los productores de lácteos individuales que no tienen la disponibilidad de electricidad y gas. Prepararon el innovador diseño, y lo probaron durante tres meses. Encontraron que el sistema alcanzó la temperatura de

pasteurización de 3 a 19 minutos, dependiendo de la radiación solar y la temperatura deseada (Wayua, Okoth, and Wangoh 2013).



Fig. 2. Concentrador de tipo Fresnel de bajo costo para el proceso de pasteurización solar (Panchal, Patel, and Chaudhary 2018)

A partir de la revisión bibliográfica se optó por crear un prototipo experimental de pasteurización de leche usando energía solar concentrada con una lente de Fresnel mediante la implementación de sistemas de seguimiento, medición y control para contribuir a la mejora de la competitividad del sector lácteo.

En publicaciones anteriores, se presentó el sistema autónomo de seguimiento solar. Posee dos grados de libertad, capaz de realizar un seguimiento solar más preciso. Este tipo de seguidor está en capacidad de realizar un seguimiento total del Sol, tanto en altura como en azimut. Su principio de funcionamiento está basado en la programación astronómica.

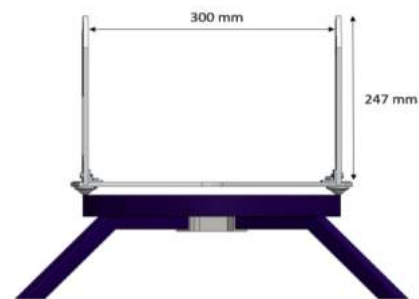


Fig. 3. Estructura del seguidor solar con dos grados de libertad (Fuente: Elaboración propia)

A partir de un algoritmo implementado en la Raspberry Pi, el sistema es capaz de determinar en qué punto debería estar el Sol a cada hora y complementado con un control proporcional es posible orientar el sistema para una mejor aceptación de los rayos solares, que al margen del error deben incidir en un ángulo de 90 grados sobre la superficie concentradora de energía. Este método presenta una total independencia de las condiciones climáticas o la ubicación geográfica en la que se encuentre, dado que se

auxilia de un GPS (Global Positioning System) y de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier instante. Todo esto esperando que se alcance los índices de temperaturas correctos para tratar la leche por el método de ultra pasteurización UHT (Ultra High Temperature). Proceso que consiste en aplicar una esterilización de los alimentos, la leche debe procesarse a una temperatura de 135- 149°C durante un lapso de 2 a 8 segundos y en envase aséptico.

3. OBJETIVO

En este trabajo, se desarrolla el diseño, modelado y análisis de resultados del sistema térmico implementado. Para la construcción del sistema térmico, se decidió elaborar un laboratorio solar con el fin de evitar las pérdidas que se pudieran suscitar por el intercambio directo de energías con el medio ambiente.

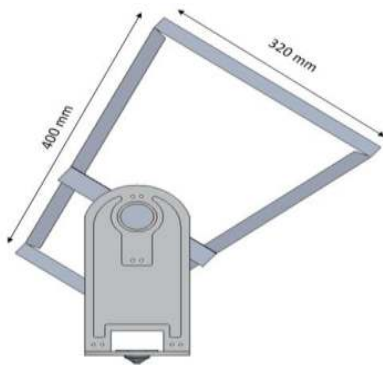


Fig. 4. Estructura del laboratorio solar (Elaboración propia)

En la parte superior se prevé colocar una lente de Fresnel de 300 mm x 300 mm que permite llevar la radiación solar hacia un punto focal específico en la parte opuesta del trapecoide. Lugar, donde se ubicará una placa construida de acero inoxidable para obtener la radiación solar concentrada. Esta, absorberá el flujo de calor generado y se lo transmitirá a la leche que debe fluir por su interior para alcanzar los índices de pasteurización.

4. ANÁLISIS TÉRMICO

El sistema termodinámico para lograr la pasteurización a partir de las energías renovables se basa en el calentamiento del fluido que atraviesa una zona de captación, obteniendo el fluido a una temperatura mayor. Los elementos fundamentales del sistema lo constituyen la lente de Fresnel y la placa de acero inoxidable se encargan del incremento de la temperatura.

En esta sección se describe el balance de energía que se

da en las diferentes regiones del sistema termodinámico a partir de los mecanismos de transferencia de calor: radiación, conducción y convección. El análisis se inicia desde el exterior, determinando a una temperatura ambiente y a una temperatura de concentración la temperatura del fluido de acuerdo con la geometría y pérdidas de calor dadas en el sistema. La figura muestra el diagrama de balance de energía unidimensional en el sistema, en el cual se identifican las siguientes superficies:

- 1: Temperatura ambiente
- 2: Aire
- 3: Lente de Fresnel
- 4: Laboratorio Solar
- 5: Placa intercambiadora de calor
- 6: Límite entre la placa y el fluido
- 7: Fluido de trabajo

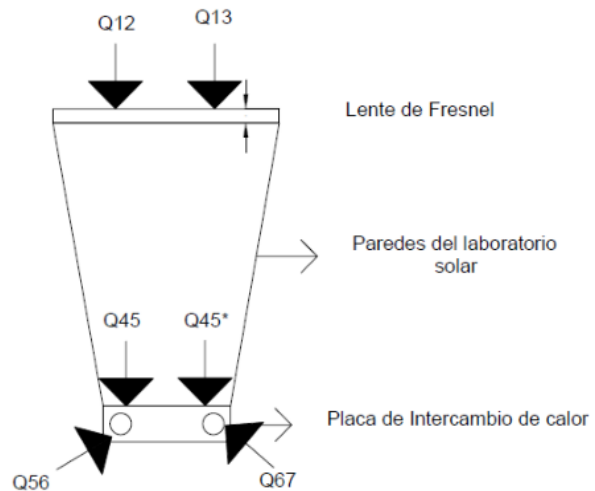


Fig.5. Diagrama del balance de energía unidimensional (Elaboración propia)

A partir del diagrama de la figura 5 se puede determinar la siguiente red de resistencias, mostrada en la figura 6

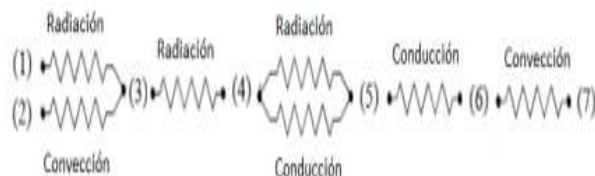


Fig.6. Modelo térmico de resistencias

5. MODELO OPTICO DE LA LENTE DE FRESNEL

Q23 transferencia de calor por convección entre la superficie de la lente de Fresnel y el aire circundante. Dadas las características del área de prueba, se desprecia los aportes energéticos de este mecanismo de transferencia dado que se requiere evaluar el sistema en condiciones críticas para analizar si experimentalmente se alcanza los valores deseados. Estableciéndose Q13, mecanismo de transferencia de calor por radiación como la principal fuente de energía del sistema óptico.

El sistema óptico está compuesto por una lente de Fresnel. La diferencia principal de este tipo de concentrador frente al resto de tecnologías de concentración radica en el principio físico de la radiación solar: Así, las lentes Fresnel refractan la luz, en lugar de utilizar espejos para reflejarla hacia un punto común donde se coloca el receptor (Montes et al. 2014).

El material de construcción convencional de la lente Fresnel es vidrio de alta transmisividad ($\tau \approx 92-93\%$), con bajo contenido en hierro, similar al utilizado en las cubiertas cilíndricas de los tubos absorbentes de los colectores cilindro-parabólicos. Sin embargo, estos resultan muy pesados y más difícil de maniobrar. El uso de plásticos y siliconas transparentes está sustituyendo los vidrios convencionales, como medida para reducir el peso de la lente y lograr una efectividad similar en el rendimiento de transferencia de calor. Estos pueden estar constituidos por plásticos transparentes, principalmente acrílico (PMMA, $\tau \approx 92\%$) material elegido para el desarrollo del prototipo. La elección depende fundamentalmente del rango de longitudes de onda de operación, siendo el acrílico el tipo de plástico de mayor transmitancia en el rango visible y en ultravioleta (Friedman Ramírez 2017).

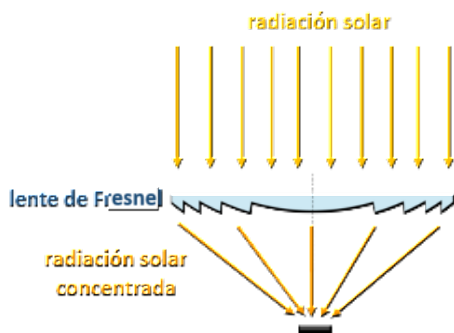


Fig. 7. Funcionamiento de la lente de Fresnel. (Recuperado de: <http://gmdsol.com/en-que-consiste-la-concentracion-fotovoltaica-cpv/>)

En el esquema de la figura 7 se muestra un funcionamiento básico de estos colectores. Se interpone físicamente una lente Fresnel entre la radiación incidente y el receptor. Cuando la radiación alcanza la lente Fresnel, la lente la refracta según la ley de Snell, Posteriormente los rayos atraviesan la lente hasta llegar a la otra superficie (Xie et al. 2011).

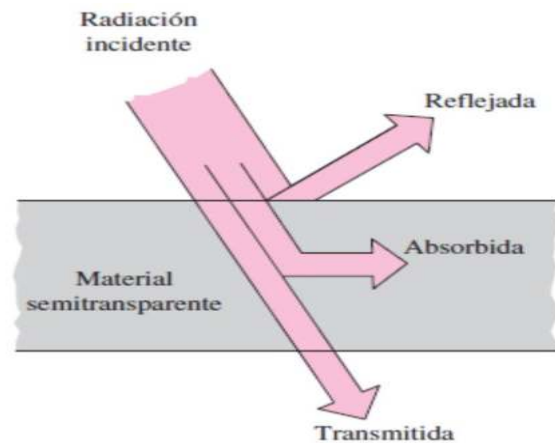


Fig.8. Efectos de la radiación cuando alcanza una superficie. (Cufiño Guerrero)

La radiación solar interactúa con objetos según tres componentes: la radiación absorbida, reflejada y transmitida. La magnitud de estas componentes depende de las características intrínsecas del cuerpo definidas como la reflexividad, la absorbancia (o absorbencia) A y la transmitancia T . Estos valores son diferentes para cada longitud de onda de radiación y pueden depender de otras condiciones en las que se encuentra el material como son su temperatura o estado físico.

El flujo energético en un concentrador depende entonces de propiedades del material y de la razón de concentración, con el valor teórico siendo

$$I_f = T * I_d * R_c \quad (1)$$

Con I_f siendo la radiación incidente en el foco, T la transmitancia del lente e I_d la radiación directa en la ubicación del prototipo. Esta ecuación es diferente dependiendo de las características del sistema de concentración, con sistemas de reflexión reemplazando la transmitancia por la reflexividad. La radiación directa se puede obtener teóricamente de la fecha del año y las

coordenadas del lugar, pero se deben considerar las pérdidas atmosféricas que requieren una estación meteorológica para determinarla.

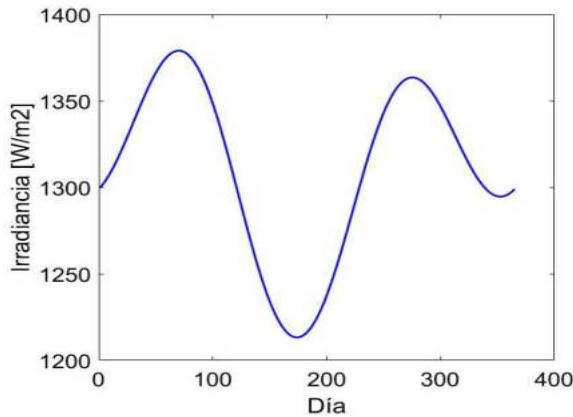


Fig.

7. Fig.9. Irradiancia en la superficie terrestre (Elaboración propia)

La eficiencia en el receptor se define según la razón entre la energía incidente y la energía utilizable. Esto también se puede expresar en función de las pérdidas del sistema, resultando en

$$:\eta_T = 1 - \frac{P}{I_f \cdot A_a} \quad (2)$$

las pérdidas totales en el receptor debido a conducción, convección y radiación y A_a el área de absorción. Al no tener un sistema para realizar trabajo, toda la energía se disipa como pérdidas, lo que permite alcanzar la máxima temperatura posible. Las pérdidas dependen de las características del receptor, particularmente su área expuesta y emisividad, y de la temperatura alcanzada. Una vez finalizada la construcción del equipo se pueden realizar simulaciones con valores apropiados para determinar la temperatura de eficiencia cero donde las pérdidas son máximas y se llega a la temperatura de estancamiento térmico.

La energía radiada varía con la temperatura en el receptor a la cuarta potencia de la siguiente forma

$$P_{rad} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_r + 273)^4 \quad (3)$$

Con A [m^2] siendo el área del receptor a la temperatura T_r [$^{\circ}C$] elevada. La temperatura se desplaza 273 para obtener su valor en Kelvin pues la constante de Boltzmann σ es $5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$.

Finalmente, ϵ es la emisividad del receptor, un valor entre 0 y 1 que depende del material utilizado. Las pérdidas por convección dependen también de la temperatura ambiente T_a [$^{\circ}C$] y la velocidad del viento V [m/s].

$$P_c = A \cdot (1.45 \cdot (T_r - T_a) \cdot 0.333 + 4.22 \cdot V^{0.805}) \cdot (T_r - T_a) \quad (4)$$

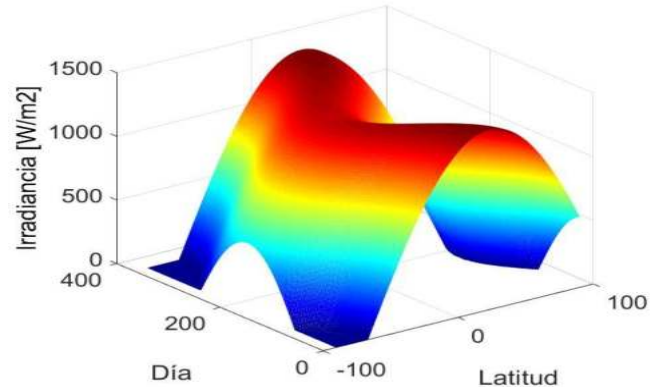


Fig. 10. Irradiancia en diferentes latitudes (Elaboración propia)

Para llegar a una temperatura mayor entonces es necesario disminuir las pérdidas. Las pérdidas por radiación se reducen al disminuir la superficie expuesta su emisividad. Las pérdidas por convección también dependen del área, además del viento que circula sobre el receptor.

6. MODELO DE LA PLACA DE CONCENTRACION SOLAR

El estudio del comportamiento de sistemas es muy importante para el desarrollo de proyectos en el desarrollo de prototipos. El modelo de sistemas se define como “la relación de las variables de un sistema a partir de la observación”. Para ello se utilizaron leyes fundamentales de termodinámica, como la ley de conservación de energía, ley de conservación de la masa, teoría y aplicaciones de un intercambiador de calor.

Los mecanismos a través de los cuales se transmite calor son: conducción, convección y radiación. Balance de energía en la placa de concentración

En primer lugar, se considera la transferencia de calor unidimensional dado que el espesor de la placa de concentración solar es mucho menor que sus dimensiones de ancho y largo. Adicionalmente, se plantearon varias hipótesis que permitieron y facilitaron el estudio del sistema. Estas hipótesis que están basadas en el comportamiento físico y dinámico del sistema son:

- Los cambios de la energía cinética y potencial son despreciables.
- El proceso está a presión constante.
- El flujo másico de entrada y de salida se consideran constantes.

- La capacidad calorífica del fluido se aproxima a un valor intermedio.
- La masa y el volumen del fluido son constantes.
- Durante todo el proceso, el fluido caliente y frío no presentan cambio de fase.

Tabla 1. Parámetros del modelado

Parámetro	Símbolos
Temperatura en el laboratorio de Fresnel	$T_i(t)$
Temperatura en la placa de acero inoxidable	$T(t)$
Temperatura de la leche	$T_L(t)$
Temperatura ambiente	$T_0(t)$
Área superficial de la placa de acero inoxidable	A_{s1}
Área superficial de contacto entre la placa y el fluido a tratar	A_{s2}
Coefficiente de transferencia de conducción entre la placa y el laboratorio de Fresnel	K_{56}
Coefficiente de la transferencia de convección entre la placa y el laboratorio de Fresnel	h_{67}
Masa de la placa de acero inoxidable	m_1
Masa de la leche	m_2
Capacidad calorífica de la placa de acero inoxidable	c_{p1}
Capacidad calorífica del fluido de entrada a la placa	c_{pL}
Capacidad calorífica del fluido en el interior de la placa	c_{pL2}

En correspondencia con el análisis del balance energético en la figura 5, se muestra que el calor que se transmite en el laboratorio solar Q45 y Q45* respectivamente por conducción y radiación es equivalente al calor generado por

el sistema óptico. Dado que se trabaja en un sistema unidimensional, se desprecian las pérdidas por radiación. Además, el intercambio de energía se realiza en el laboratorio solar, anulando de esta forma las pérdidas por convección. Es por ello que la energía entregada a la placa de intercambio de calor se acerca a la generada por la lente de Fresnel.

En el análisis en estado transitorio, se identificó que la placa de acero inoxidable aporta energía por convección y recibe por conducción al fluido en tratamiento. Se consideró a la placa de intercambio de calor como un compuesto que absorbe la temperatura de forma uniforme y bajo esos fundamentos se estableció que:

$$Q_{567} = K_{56} A_{s1} (T_i(t) - T(t)) \quad (5)$$

El calor que recibe la placa del laboratorio solar.

En cambio, se considera que la placa entrega calor al fluido en tratamiento a partir de:

$$Q_{67} = H_{67} A_{s2} (T(t) - T_L(t)) \quad (6)$$

Como resultado de la ley de balance de energía y considerando que el trabajo realizado es cero, el calor intercambiado en la placa de acero inoxidable se describe por la siguiente ecuación.

$$K_{56} A_{s1} [T_i(t) - T(t)] - h_{67} A_{s2} [T(t) - T_L(t)] = m_1 c_{p1} [T(t) - T_i(t)] \quad (7)$$

En cambio, para el balance másico y energético en el control del fluido y a partir de las ecuaciones descritas, se definió la dinámica por:

$$G_1 c_{pL} [T_{in}(t) - T_L(t)] = m_2 c_{pL2} \frac{\Delta T_L(t)}{\Delta t} - h_{67} A_{s2} [T(t) - T_L(t)] \quad (8)$$

Con el desarrollo de las ecuaciones, se detectaron 2 perturbaciones para el desarrollo del control de la temperatura de la leche. en correspondencia con el desarrollo del diagrama de bloques para controlar la temperatura de la leche del pasteurizador solar.

7. CONCLUSIONES

La placa intercambiadora de calor se sometió a simulaciones bajo las condiciones de estado estacionario, en condiciones termo físicas del campus universitario de la BUAP. Como resultado de las simulaciones desarrollada en SolidWorks se alcanzaron resultados positivos para implementar la pasteurización de la leche. A partir de esta técnica desarrollada, se prevé como muestra la figura 10 que el área focal de la lente de Fresnel entregue temperaturas que oscilaran en un rango de 500 -580°C a la superficie superior de la placa de acero inoxidable.

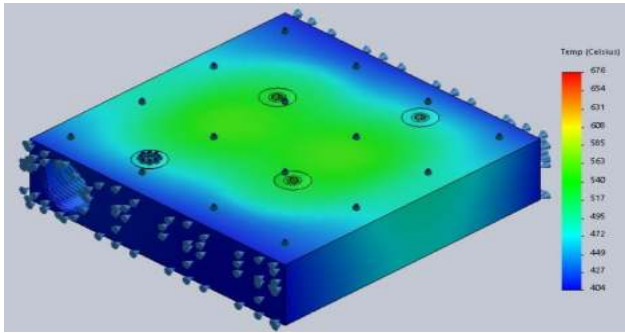


Fig. 10. Distribución de calor en la superficie superior de la placa de acero inoxidable (Elaboración propia)

Luego, a partir de las dinámicas descritas de transferencia de energía en el intercambiador de calor, y bajo las consideraciones adoptadas en simulaciones, la leche alcanzará temperaturas entre 135-195 °C. Condiciones críticas seleccionadas para garantizar que en mejores condiciones se alcanzarán los valores deseados para la pasteurización sin ningún tipo de inconvenientes. Es por ello que se prepara para la fabricación el prototipo diseñado.

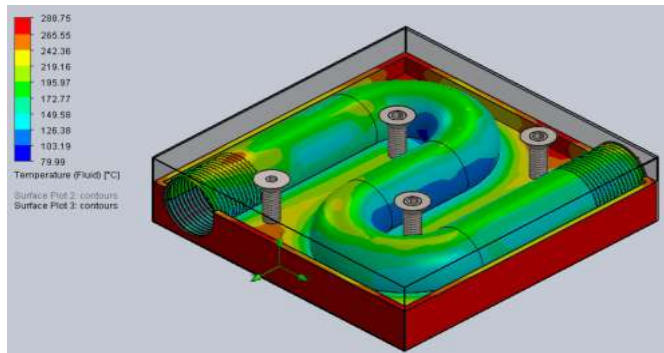


Fig. 11. Simulación en SolidWorks de la distribución de calor en el interior de la placa. (Elaboración propia)

Se propone realizar la validación del modelado matemático del sistema térmico a partir de su implementación experimental y una vez identificado el comportamiento real de la planta proceder a proponer una técnica de control.

REFERENCIAS

- Cufiño Guerrero, Laura Liliana. 'Concentradores solares y control adaptativo. Comparación entre el modelo parabólico lineal y el modelo Fresnel'.
- Franco, Judith, Ricardo Caso, Carlos Fernandez, Verónica Javi, and Luis Saravia. 2004. 'Aplicación de un concentrador tipo Fresnel para pasteurizar leche de cabra', *tuberculosis*, 57: 62.5.
- Friedman Ramírez, Daniel Iván. 2017. 'Sistema de concentración solar Fresnel para aplicaciones solares a escala comunitaria: Evaluación de prototipo'.

- Montes, María J, Carlo Rubbia, Rubén Abbas, and José M Martínez-Val. 2014. 'A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power', *Energy*, 73: 192-203.
- Nielsen, Kirsten Mølgaard, and Tom Søndergaard Pedersen. 2001. *Solar panel based milk pasteurization* (Aalborg University, Department of Control Engineering).
- Ochoa, Gloria Alejandra Holguín, Martha Isabel Vélez Arévalo, and Luis Fernando Villacis Andrade. 2016. 'La educación actual: una mirada desde la fermentación', *Tecné Episteme y Didaxis TED*.
- Panchal, Hitesh, Jay Patel, and Sudhir Chaudhary. 2018. 'A Comprehensive Review of Solar Milk Pasteurization System', *Journal of Solar Energy Engineering*, 140: 010801.
- "Programa Nacional Pecuario." In. 2012. Secretaría de Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Wayua, Francis Obuoro, Michael W Okoth, and John Wangoh. 2013. 'Design and performance assessment of a flat-plate solar milk pasteurizer for arid pastoral areas of kenya', *Journal of Food Processing and Preservation*, 37: 120-25.
- Xie, WT, YJ Dai, RZ Wang, and K Sumathy. 2011. 'Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 2588-606.