

OPTIMIZACION DE UN SISTEMA SOLAR TÉRMICO INTEGRADO A UN PROCESO DE PASTEURIZACIÓN HTST DE FLUIDOS ALIMENTICIOS

Arturo Alatrística Corrales – aalatrística@ulasalle.edu.pe
Universidad La Salle de Arequipa, Departamento de Ingeniería
José Cari Apaza – jcaria770@gmail.com
Universidad Nacional San Agustín, Departamento de Ingeniería
Antonio García Velásquez – agarcía@eltaller.org.pe
El Taller Asociación de Promoción y Desarrollo
Erick Paul Márquez Rivero – erickmarriv@gmail.com
Universidad Nacional San Agustín, Departamento de Ingeniería
Lizbeth Hilari Luque – lizzy.hilari@gmail.com
Universidad Nacional San Agustín, Departamento de Ingeniería

Resumen. El presente trabajo busca aportar conocimiento sobre el diseño de sistemas térmicos solares integrados a procesos térmicos industriales. La pasteurización HTST (alta temperatura corto tiempo) demanda calentar fluidos alimenticios a temperaturas entre 72 y 85 °C. Entre fines del año 2017 y 2018, se desarrolló un proyecto de validación tecnológica que busca optimizar el costo de inversión y operación de un sistema de pasteurización inicialmente diseñado para operar bajo las condiciones de pequeños centros agro industriales lácteos. El prototipo inicial, aunque capaz de alcanzar parámetros de integración óptimos, requería optimizar tanto el costo de inversión como el de operación. Para esto se mejoró el diseño realizando simulaciones considerando hasta 8 variantes de tecnologías de captación solar y de transferencia térmica. Así mismo el sistema consideró un sistema de recuperación de calor entre producto caliente y frío. Los resultados muestran un diseño optimizado que ofrece la posibilidad de alcanzar una eficiencia solar térmica global de 50% que confiere una ventaja competitiva respecto a tecnologías tradicionales basadas en generación de vapor. Esto implica una importante oportunidad de inversión tecnológica para productores pequeños y medianos, que podrán beneficiarse de una tecnología que cumple los requisitos de operación, a un costo menor por la utilización de recurso solar. Agradecimientos especiales al programa Innóvate Perú y la empresa Nuestra Inversiones Gastronómicas por el financiamiento del proyecto.

Palabras-clave: Energía Solar Térmica, Pasteurización HTST, Simulación, Optimización

Abstract: The present work pursues to develop knowledge about the design of thermal solar systems integrated to thermal industrial processes. HTST pasteurization (high temperature short time) requires a flow of liquid food at temperatures between 72 and 85 °C. Between the end of 2017 and 2018, a validation project was carried out with the aim of optimizing investment costs and operation costs of the pasteurization system. The initial prototype, although, reached optimal integration parameters, needed an optimization process. An optimization process of the design was performed by carrying out simulations of up to 8 variants of solar capture and thermal transfer technologies. At the same time, a heat recovery system between hot and cold product was included for improving energy efficiency. The results show an optimized design that offers the possibility of achieving a global solar thermal efficiency of 50% that confirms to competitive advantage over traditional technologies based on steam generation. This implies an important investment opportunity for small and medium-sized businesses, which benefits from a technology that meets the operating requirements, and a lower cost due to the use of solar resources. Special thanks to Innóvate Peru program and Nuestra Inversiones Gastronomicas for the financing of the project.

Keywords: Solar Thermal Energy, HTST Pasteurization, Simulation, Optimization.

1. INTRODUCCIÓN

Unos de los procesos más utilizados por la industria de alimentos, es la pasteurización de fluidos que consiste realizar un tratamiento térmico a una determinada temperatura durante un determinado tiempo. El estado del arte de este proceso, presenta el uso de diseños "dominantes", que constan de la integración de equipos bien definidos tales como intercambiador de placas, válvula de tres pasos, válvula mezcladora de vapor-agua, y un sistema de control de temperatura. Estos sistemas, utilizan vapor como medio de transmisión de energía térmica. El vapor es un medio versátil y de gran capacidad, ajustable a diferentes regímenes de operación y capaz de soportar regímenes de producción continuos.

El fuerte componente tecnológico, relacionado a los sistemas de regulación y control, así como la necesidad de montar sistemas auxiliares de vapor y aire comprimido, hacen de esta tecnología de alto costo de inversión. Sin embargo, en el Perú, tal como ocurre en otros países, existen cientos de lecherías y otros centros de transformación de fluidos alimenticios (sobre todo microempresas rurales), que tienen un régimen de operación tipo batch, y/o procesos de volúmenes medianos o pequeños. En estos casos, la fuerte inversión de capital en sistemas de pasteurización representa una barrera para el desarrollo de los procesos HTST. (High temperatura Short Time, 72°C por 15 segundos de retención). En su defecto, una proporción de establecimientos realiza una pasteurización LTLT (low temperatura long time, 65°C por 30 minutos de retención). Este último proceso impacta de manera negativa en la calidad de los productos, y en su productividad (ya que implica grandes tiempos de proceso, y por tanto sobre costos de mano de obra). Por esta misma razón, cientos de lecherías rurales diseminadas en el país, procesan quesos frescos sin ningún tipo de tratamiento térmico.

Por otro lado, a la hora de analizar la posibilidad de integración de energía solar térmica en los diseños dominantes de pasteurización HTST, se encuentra una incongruencia técnica. Esta radica en que estas tecnologías utilizan vapor como medio de transmisión energética, el cual debe ser producido a potencias térmicas muy por encima de la disponible cuando se usa energía solar. La integración de energía solar a un proceso de pasteurización de alimentos, requiere de cambios en el diseño del sistema, que permitan transferir calor a menor potencia, almacenar energía no permanente como la solar, brindar estabilidad en la provisión de calor y eficiencia en el intercambio de calor.

Entre abril de 2013 y agosto de 2014, la ONG "El Taller" ubicada en Arequipa-Perú, con el apoyo del Ministerio de Relaciones Exteriores de Finlandia, el Programa Regional Andino de Cooperación para la Energía y el Medio Ambiente (EEP) y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura desarrolló un proyecto para desarrollar localmente una tecnología robusta, comparativamente económica y con altos estándares de proceso, que pudiera integrar la energía solar en más del 50%. La tecnología se implementó en dos plantas lecheras rurales ubicadas en la provincia de Castilla, a 3600 m.s.n.m., en la sierra alta de Arequipa.

El prototipo inicial está basado en un intercambiador de calor de diseño propio, capaz de ser integrado a un sistema de almacenamiento y provisión constante de agua caliente de proceso (no vapor), el cual es calentado con energía solar. Este demostrativo logró parámetros de operación óptimos en cuanto a alcanzar y mantener temperaturas de pasteurización requeridas, así como un aporte importante del recurso solar para cubrir la demanda energética.

Pese a esto, se cuantificó una brecha importante en cuanto a la eficiencia energética del sistema que podría limitar su adopción por productores y empresarios. El presente trabajo muestra los resultados de un trabajo de optimización del diseño del sistema, que busca minimizar los costos de inversión y costos operacionales.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

Mitigar los efectos devastadores del cambio climático implica la necesidad de descarbonizar la economía global en unas pocas décadas, y así conducir a tecnologías de energía renovable no convencional a escala industrial (ERNC).

La energía solar es una fuente de energía renovable por excelencia. Las tecnologías solares térmicas se han utilizado para generar un sistema de generación de vapor para la producción de electricidad (Byrne et al, 2010). Sin embargo, una de las aplicaciones más prometedoras está relacionada con la generación de calor de proceso para procesos industriales (IEA, 2010). De hecho, varios sectores industriales, cuyos procesos requieren temperaturas entre 60 ° C y 260 ° C, han sido identificados como muy prometedores según el Programa de Calefacción y Refrigeración Solar, promovido por la Unión Europea (Brunner et al., 2008). Estos sectores son la alimentación, química, plásticos, textiles y materiales. Según Kalogirou (2001), los procesos industriales más importantes que utilizan calor a estos niveles de temperatura son la esterilización, la pasteurización, el secado, la hidrólisis, la destilación, la evaporación, el lavado, la limpieza y la polimerización.

Para desarrollar aplicaciones de energía solar para procesos industriales, se sabe que solo son factibles cuando existe un índice adecuado de luz solar directa, especialmente cuando se trata de energía solar concentrada. Según Aringhoff et al. (2005), para la instalación de aplicaciones solares térmicas, es necesario recibir al menos 2,000 kWh de radiación solar por metro cuadrado-año, mientras que las mejores áreas pueden recibir más de 2,800 kWh / m².year. (Byrne et al 2010).

En todo el mundo, hay áreas rurales con poco acceso a la energía, pero con un importante recurso solar. La energía solar se convierte en un recurso interesante para el desarrollo rural. En Perú, hay aproximadamente 2,000 plantas de procesamiento de productos lácteos rurales, que realizan procesos productivos sin tener en cuenta los estándares mínimos de inocuidad requeridos por las regulaciones nacionales de salud pública, incluyendo principalmente la ausencia de procesos de pasteurización o tratamiento térmico para la producción de queso. Debido a eso, muchas plantas no pueden obtener certificados sanitarios, ni obtener acceso a canales comerciales formales. (Aubron &

Cochet, 2009)

El propósito de la pasteurización es eliminar cualquier generador de enfermedades que pueda contener la materia prima. En este caso, los microorganismos contenidos en la leche. El proceso también busca una reducción significativa del recuento total de bacterias para mejorar la capacidad de conservación de los alimentos.

La pasteurización destruye la lipasa y otras enzimas en la leche natural. Durante muchos años, las temperaturas y los tiempos de pasteurización empleados apuntaron a asegurar la destrucción de *M. tuberculosis*. Dos son los métodos de pasteurización aceptados hoy. El primero, el método por lotes LTLT (Tiempo largo de baja temperatura), donde la leche se calienta hasta que alcanza una temperatura mínima de 62.7 ° C y se mantiene durante un mínimo de 30 minutos. El segundo, el método HTST de alta temperatura-corto tiempo en el que la leche se calienta hasta que alcanza una temperatura mínima de 72 ° C y se mantiene durante un mínimo de 15 segundos. (Potter, 1978)

En la pasteurización HTST, la leche cruda almacenada en un tanque de almacenamiento se bombea a través de un intercambiador de calor y se calienta hasta que alcanza la temperatura requerida. La clave del proceso es asegurar que cada partícula de leche esté a 72 ° C durante un mínimo de 15 segundos. Esto se logra bombeando la leche caliente a través de un tubo de retención con una longitud y un diámetro tal que permite que cada partícula permanezca al menos 15 segundos en el camino. Al final del tubo hay un aparato sensorial que mide la temperatura con precisión y una válvula. Si en este punto, se obtiene un poco de leche con una temperatura más baja que la requerida, una válvula de desvío de flujo detendría el flujo y lo enviaría de vuelta a través del intercambiador de calor para que se recaliente. (Potter, 1978)

Por lo tanto, este sistema requiere elementos de control electrónico que funcionan con válvulas de control, que requieren el uso de aire comprimido. Además, para el control de la temperatura de pasteurización, se necesitan sistemas de calefacción de alta potencia basados en la producción de vapor. El vapor se inyecta en el sistema modulando las válvulas. (Saravacos, G., y Kostaropoulos 2002).

Se utilizan diversos tipos de intercambiadores de calor en la industria de procesamiento de alimentos, diseñados de acuerdo con los diferentes requisitos de calentamiento, enfriamiento, esterilización, cocción, etc. En los pasteurizadores de leche, los intercambiadores de calor de placas se han utilizado ampliamente. El intercambiador de calor de tubos también se ha utilizado para muchas aplicaciones de procesamiento de alimentos.

La utilización de energía solar para los procesos de pasteurización es un tema de actualidad. Por ejemplo, Panchal et al. (2018) estudió el trabajo de varios investigadores sobre el sistema de pasteurización de leche solar debido a la importancia de reducir el impacto ambiental de estos procesos. Su investigación cubre aspectos requeridos para la pasteurización solar como el colector, el sistema de Intercambio de calor y sistema de calentamiento solar de agua. Estos autores sugieren que el colector de tubos evacuados o heat pipe, es el colector que mejor desempeño tienen en cuanto a eficiencia térmica de las instalaciones.

3 ANTECEDENTES

A continuación, se describe el sistema “base” sobre el cual se realizará el trabajo de optimización

3.1 Principio de funcionamiento del sistema base de pasteurización solar

La energía térmica solar es captada a través de 6 colectores solares tipo placa plana de 2 m² de superficie, el calor captado es transportado a través de un fluido caloportador que es una mezcla de agua y glicol etílico al 30%, impulsado por una bomba a razón de 3 – 5 litros por minuto; dicho calor es transferido y almacenado en un tanque térmico a través de un intercambiador de calor tipo serpentín; en el tanque térmico, el agua contenida eleva su temperatura hasta un valor cercano a los 85 oC; sin embargo la eficiencia de los colectores solares tipo placa plana son poco eficientes a altas temperaturas, por ello es necesario el auxilio de un sistema calefactor constituido por resistencias eléctricas que se encargan de garantizar que la temperatura del agua del tanque térmico llega a la temperatura de 85 oC, El sub sistema de captación y almacenamiento de energía térmica es controlado automáticamente por una unidad de control diferencial que apaga el sistema cuando se ha logrado la temperatura requerida en el tanque.

Una vez que se cuenta con la cantidad de energía necesaria para el proceso almacenada en el termo tanque a la temperatura establecida de 85 oC, se pone en marcha el subsistema de pasteurización manteniendo constantes los flujos pre determinados para lograr una temperatura de pasteurización mínima de 72 oC, en sistema opera establemente sin fluctuaciones en las temperaturas de entrada y salida, garantizando la eficacia del proceso en eliminación de la carga microbiológica de la leche.

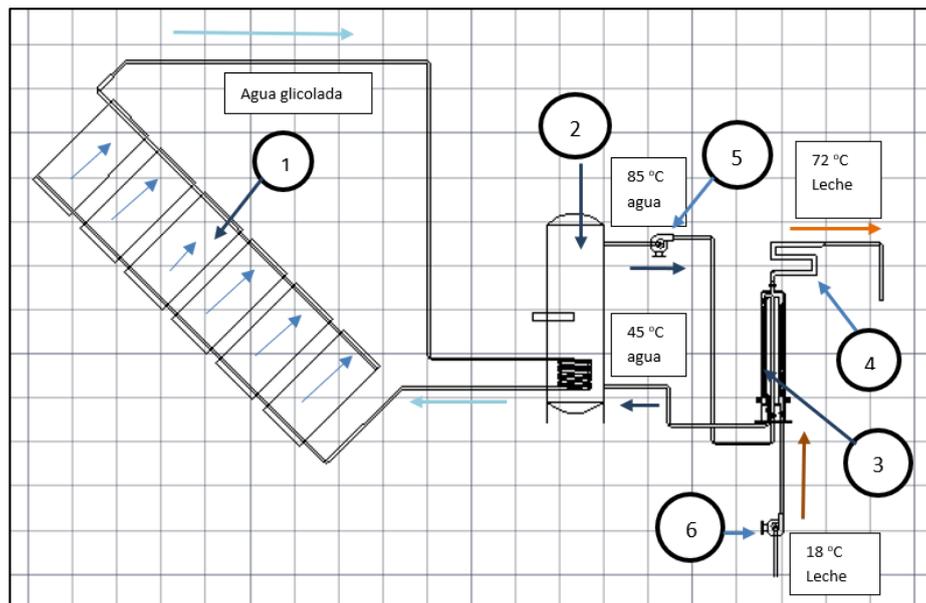


Figura 1- Principio de funcionamiento del sistema base de pasteurización solar

32 Eficiencia térmica del sistema base de pasteurización solar

Para obtener un sistema de pasteurización de 300 litros de leche, de bajo costo y capaz de ser alimentado por energía solar, se tomaron algunas consideraciones de diseño. El diseño consideró el uso de un sistema de colectores de placa plana de 10.86 m²; un sistema de almacenamiento de energía compuesto por un tanque de agua a presión de 750 litros; y un sistema de proceso, compuesto principalmente por un intercambiador de calor de tubo de flujo a contracorriente (capaz de ser fabricado en el mercado local) de 0.82 m² de área y capacidad de calor de 1564.64 w / m²K. El intercambiador de calor tenía un diseño especial para limpiarse y desinfectarse fácilmente. Se utilizó una solución de propilenglicol como fluido de transferencia de calor de los colectores para evitar el colapso de los tubos de cobre por congelación interna.

La demanda diaria de energía para el sistema de pasteurización se calculó en 26 kWh / día. 19.9 kwh / día corresponde a los requisitos térmicos de la pasteurización, 6.5 kwh / día para la pérdida de calor a través del tanque y 0.65 kwh / día para la pérdida de calor a través de las paredes de las tuberías.

Para la evaluación técnica del sistema, se realizó un análisis de los parámetros del proceso. En esta etapa inicial se encontró que era posible alcanzar una temperatura de pasteurización de 72 ° C, cuando el agua en el tanque de almacenamiento alcanzó al menos 85 ° C. El intercambio de calor tuvo lugar con un flujo de leche de 5 litros / minuto y una Agua caliente por caudal de agua de 5,5 litros / min.

La contribución solar al sistema se calculó en un 70%. La eficiencia energética global del sistema se calculó en un 29%. (Alatrística, 2015)

4 METODOLOGÍA

Para la optimización de la eficiencia energética del sistema, se realizaron cálculos de balance de energía introduciendo un sistema de recuperación o regeneración de energía térmica. Los cálculos fueron corroborados por simulaciones efectuadas en el software TRANSYS.

Para la optimización del sistema de captación solar térmica y transferencia de calor, se utilizó el software POLYSUN. Para esto se tomó como variables dependientes u objetivo, la energía total absorbida por el sistema solar, así como la energía requerida por el sistema backup para satisfacer la demanda térmica del sistema. En el primer caso se requiere maximizar la energía térmica solar, y en el segundo, minimizar el uso de energía de la fuente back up. (gas propano en este caso)

Como variables independientes se evaluaron distintas configuraciones propuestas considerando:

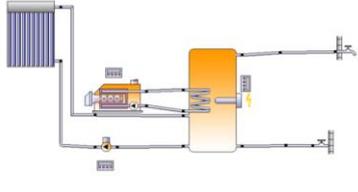
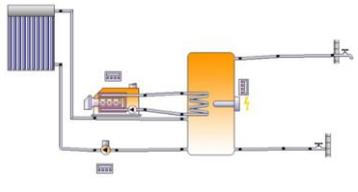
- Fluido caloportador (Agua glicolada al 33 % o agua pura)
- Tipos de panel (Panel placa plana optima o Panel Heat Pipe)

- Mecanismo de transferencia de calor (a través de serpentín o de manera indirecta)

En la siguiente tabla se especifican las configuraciones evaluadas en las simulaciones.

Tabla 1. Descripción de las variantes de simulación, según la configuración de variables independientes utilizadas

OPCION	TIPO DE INTER-CAMBIO	FLUIDO CALOPORTADOR	TIPO DE PANEL	
Opción 1	Serpentín	Agua	Placa plana	<p>Colector placa plana con agua Número colectores: 2,78 Superficie total: 5,56 m² Orientación (θ=90°, φ=0°), α=90°, 180° Inclinación (β=0°, γ=0°), ω=90°, 45°</p> <p>Caldentador 50 kW Potencia: 50 kW</p> <p>Depósito: tanque modificado</p> <p>Temperatura: 85 °C Volumen medio de tanque: 2.000 lts</p>
Opción 2	Serpentín	Agua Glicolada	Placa plana	<p>Colector placa plana Número colectores: 2,78 Superficie total: 5,56 m² Orientación (θ=90°, φ=0°), α=90°, 180° Inclinación (β=0°, γ=0°), ω=90°, 45°</p> <p>Caldentador 50 kW Potencia: 50 kW</p> <p>Depósito: tanque modificado</p> <p>Temperatura: 85 °C Volumen medio de tanque: 2.000 lts</p>
Opción 3	Serpentín	Agua	Heat pipe	<p>Colector HEAT PIPE CON AGUA Número colectores: 2,87 Superficie total: 6,5 m² Orientación (θ=90°, φ=0°), α=90°, 180° Inclinación (β=0°, γ=0°), ω=90°, 45°</p> <p>Caldentador 50 kW Potencia: 50 kW</p> <p>Depósito: tanque modificado</p> <p>Temperatura: 85 °C Volumen medio de tanque: 2.11 lts</p>
Opción 4	Serpentín	Agua Glicolada	Heat pipe	<p>Colector Heat Pipe 2.2 3071-20 Número colectores: 2,87 Superficie total: 6,5 m² Orientación (θ=90°, φ=0°), α=90°, 180° Inclinación (β=0°, γ=0°), ω=90°, 45°</p> <p>Caldentador 50 kW Potencia: 50 kW</p> <p>Depósito: tanque modificado</p> <p>Temperatura: 85 °C Volumen medio de tanque: 2.11 lts</p>
Opción 5	Directo	Agua	Placa plana	<p>Colector placa plana con agua Número colectores: 2,78 Superficie total: 5,56 m² Orientación (θ=90°, φ=0°), α=90°, 180° Inclinación (β=0°, γ=0°), ω=90°, 45°</p> <p>Caldentador 50 kW Potencia: 50 kW</p> <p>Depósito: tanque modificado 2</p> <p>Temperatura: 85 °C Volumen medio de tanque: 2.000 lts</p>
Opción 6	Directo	Agua Glicolada	Placa plana	<p>Colector placa plana Número colectores: 2,78 Superficie total: 5,56 m² Orientación (θ=90°, φ=0°), α=90°, 180° Inclinación (β=0°, γ=0°), ω=90°, 45°</p> <p>Caldentador 50 kW Potencia: 50 kW</p> <p>Depósito: tanque modificado 2</p> <p>Temperatura: 85 °C Volumen medio de tanque: 2.193,3 lts</p>

Opción 7	Directo	Agua	Heat pipe	
Opcion 8	Directo	Agua Glicolada	Heat pipe	

Para las simulaciones se utilizaron las siguientes asunciones

- Se consideró como ubicación la ciudad de Arequipa, se tomó datos meteorológicos en función a la ubicación geográfica.
- Se usaron equipos existentes en el mercado
- EL cálculo se basó para una operación de 8 horas con una dosificación de 350 litros/hora a 95 C. desde las 9 am a 4 pm.
- El sistema consta de:
 - Un tanque de 900 litros de acero esmaltado.
 - Una caldera de gas de 50 kW.
 - Paneles solares con fabricación óptima. 10 m² de superficie aprox.
 - Los fluidos utilizados son agua y una mezcla glicol-agua de 33%.
 - Las formas de intercambio de calor son; a través de un serpentín y de contacto directo (en este último tipo solo usa como fluido caloportador el agua).
- Para el análisis de calor de aportación se debe dividir entre 365 y 8 horas para obtener el valor de kwh hora aportados por el sistema
- Se usaron los mismos parámetros y condiciones para todas las simulaciones realizadas en el software Polysun

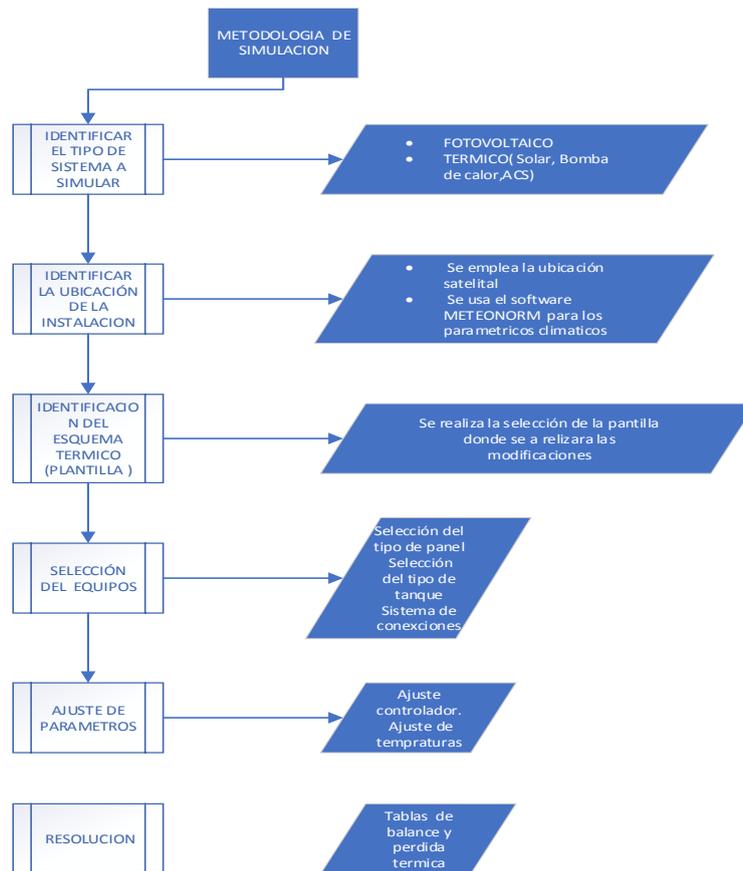


Figura 2- Metodología empleada para la optimización del diseño en base a simulación computacional

En la figura se describen los pasos metodológicos para la simulación del sistema considerando las variantes propuestas. Al final, se obtiene una tabla de balance térmico que permite cuantificar las pérdidas térmicas a fin de determinar el mejor diseño.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Mejoras en la eficiencia energética del sistema

Para mejorar la eficiencia energética del sistema de pasteurización alternativo equipado con intercambiadores de calor tipo serpentín en espacio tubular anular, se propone la incorporación de una fase de regeneración de calor que estaría conformado por un block de dos intercambiadores de calor, tal como se ilustra en la figura N° 5 en la que se presenta de forma gráfica la solución tecnológica recomendada para incrementar la eficiencia energética del sistema; en la figura N° 6 se ilustra con más detalle dicha solución; como ya se indicó, el block de dos intercambiadores de calor tipo serpentín en espacio tubular anular incluidos en el sistema, operaran en circuito cerrado (intercambiadores I-2 y I-3) el concepto de la solución tecnológica es el siguiente: el líquido alimenticio que sale del tubo de retención, se hace pasar a través del intercambiador I-3, por el espacio entre los tubos concéntricos por exterior del serpentín; por el interior del serpentín, se hace circular agua a la temperatura de 30o, la misma que se calienta hasta la temperatura de 60oC, extrayendo el calor contenido en el líquido alimenticio pasteurizado, dicho liquido alimenticio se enfría simultáneamente hasta 40oC, el agua que sale del intercambiador I-3 se hace circular por el intercambiador I-2 en el que se realiza el precalentamiento del líquido alimenticio crudo que circula en contra corriente por exterior del serpentín, calentándose hasta la temperatura de 50o; el líquido alimenticio a esa temperatura se hace circular por el intercambiador de calentamiento I-1 en contra corriente y por el exterior del serpentín para elevar su temperatura hasta 72 oC, temperatura a la cual se eliminan los microorganismos patógenos presentes en él; dicho calentamiento se logra mediante el traspaso de calor desde el agua que circula por el interior del serpentín en contracorriente a una temperatura inicial de 85oC, enfriándose a la salida hasta la temperatura de 62oC, a diferencia del sistema originalmente desarrollado en el que el agua de salida del intercambiador de calentamiento es de 45oC.

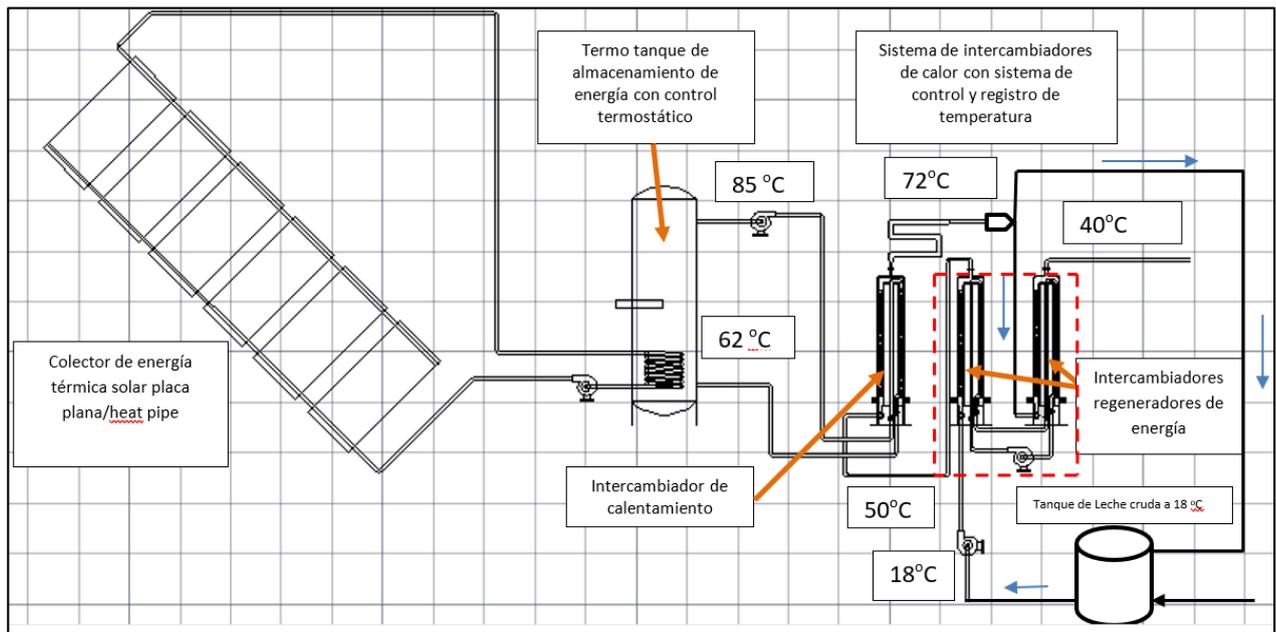


Figura 3- Principio de funcionamiento del sistema “optimizado” de pasteurización solar

Por lo anterior, se obtiene que el producto a ser pasteurizado ya no ingresaría al sistema con una temperatura de 18°C sino con una temperatura de 50 °C. Si consideramos que la temperatura de pasteurización es 72°C, se obtiene que el sistema de recuperación o regeneración de energía hace al proceso un 40.7% más eficiente con respecto al sistema inicial. Esto logra un significativo ahorro de energía y un incremento notable en la eficiencia energética del sistema.

52 Mejoras en el sistema de captación solar y transferencia de calor

Como se muestra en la descripción metodológica, se han realizado diversas simulaciones considerando variantes respecto al Fluido caloportador, Tipos de panel y Mecanismo de transferencia de calor. Los resultados son mostrados en las siguientes tablas.

Tabla 2. Descripción de las variables dependientes calculadas en las simulaciones

Variable dependiente	Descripción
Qsol KWH	Energía aprovechada por el sistema solar
E aux KWH	Calor suministrado por el backup (caldera de gas)
E par KWH	Energía suministrada para accionamiento de maquinas electricas (bomba, controladores)
Q use water KWH	Calor neto aprovechado en el calentamiento
Q loss KWH	Perdida de calor a los exteriores y accesorios
Qint	Perdida de calor interna (Condensación, evaporación)
Energía solar del sistema	Qsol KWH + E aux KWH + E par KWH

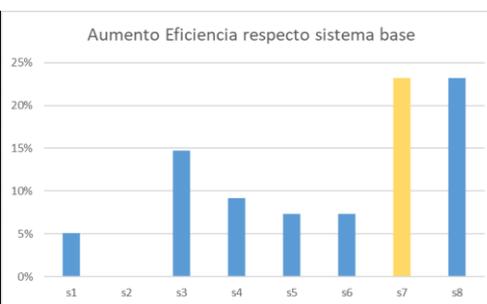
Tabla 3. Resultados de variables dependientes

BASE DE CALCULO ANUAL								
VARIANTES	SERPENTIN				DIRECTO			
	PLACA PLANA		HEAT PIPE		PLACA PLANA		HEAT PIPE	
	AGUA	AGUA GLICOLADA	AGUA	AGUA GLICOLADA	AGUA	AGUA GLICOLADA	AGUA	AGUA GLICOLADA
Variante de simulación	1	2	3	4	5	6	7	8
Qsol KWH	12057	12038	12871	12810	12801	12801	13195	13195
E aux KWH	37376	39381	33580	35755	36500	36500	30258	30258
E par KWH	16	16	18	17	17	17	18	18
Q use water KWH	39074	40605	36795	38194	38692	38692	38410	38410
Q loss KWH	398	397	423	406	399	399	399	399
Qint	9731	10434	9252	9983	10228	10228	4658	4658
Energia total del sistema	49449	51435	46469	48582	49318	49318	43471	43471

La tabla muestra los resultados de 8 variantes de simulación. Las celdas de color gris, muestran los resultados de la variante 2, la cual refiere a la configuración del sistema inicial o base: agua glicolada como fluido caloportador, con colector de placas planas y utilización de serpentín para realizar el intercambio térmico. Las celdas de color anaranjado, muestran los resultados de la variante 7, que en adelante se llamará diseño configuración óptima. Este consta de agua como fluido caloportador, con colector heat pipe, y con un sistema de intercambio directo sin intercambiador de serpentín de por medio.

Tabla 4. Calor suministrado por backup para cada variante y aumento de eficiencia térmica

Variante de simulación	E aux KWH	base	Aumento Eficiencia respecto sistema base
1	37376	39381	5%
2	39381	39381	0%
3	33580	39381	15%
4	35755	39381	9%
5	36500	39381	7%
6	36500	39381	7%
7	30258	39381	23%
8	30258	39381	23%



Tomando como referencia al calor suministrado por el backup (caldera de gas) para satisfacer la demanda energética del sistema, puede notarse que la variante 2 (sistema base) necesita un aporte backup de 39381 kWh para satisfacer la demanda energética, mientras que la variante 7 solo necesita 30258 kWh. Por tanto puede decirse que la variante 7 es 23% mas eficiente que la variante 2. Nótese también que no existe diferencia significativa entre los tratamientos 7 y 8. Sin embargo se toma el diseño 7 por su menor complejidad.

Finalmente se obtiene un aumento de eficiencia del 63%, siendo un 40% obtenido por mejoras en el proceso (sistema de regeneración de energía térmica) y un 23 % obtenido por mejoras en la configuración del sistema de captación y transferencia de calor. Las mejoras permiten entonces incrementar la eficiencia térmica total del sistema de 29% (Alatrasta, 2015) a un valor aproximado de 50% (tal como se aprecia en la figura). Esto permitiría disponer de 101 606.00 kJ por día de energía térmica, con lo que se podría prescindir de un sistema de back-up para proporcionar la energía necesaria para pasteurizar 300 litros de leche por día.

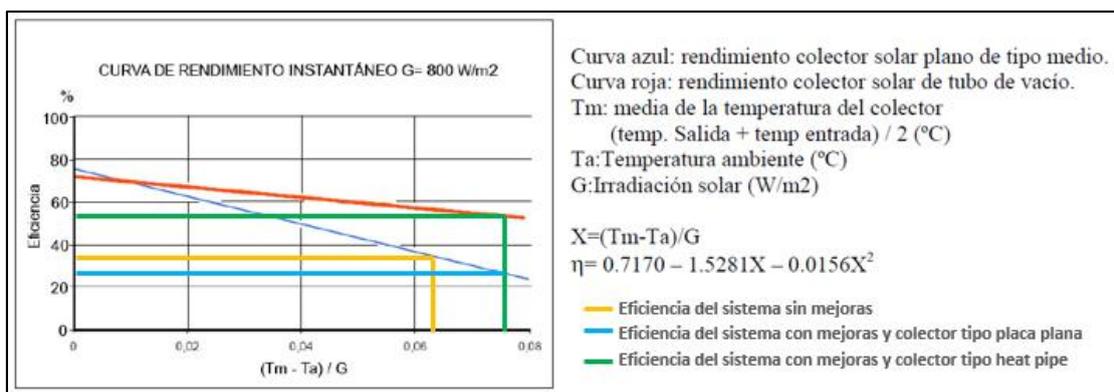


Figura 4: Curvas de rendimiento de los colectores de placa plana y de tubos al vacío

6 CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra el resultado de un proceso de optimización del diseño de un sistema de pasteurización HTST de fluidos alimenticios que utiliza energía solar térmica como recurso energético renovable.

Las mejoras propuestas consistieron en: (1) Una mejora en la eficiencia energética del sistema, a partir de un sistema de recuperación o regeneración de calor entre el producto frío y caliente (2) Una mejora en la disposición de: el tipo de colector solar a usar, el tipo de fluido caloportador y el sistema de intercambio de calor.

Las mejoras fueron simuladas utilizando software tales como TRANSYS para simulación del proceso, así como POLYSUN para simulación de los aportes solares.

Los resultados muestran que las mejoras logran incrementar un 63% la eficiencia térmica con respecto al diseño base, lo que permite alcanzar una eficiencia térmica solar global de 50%. Esto representa la posibilidad que un sistema de pasteurización de 300 litros, pueda incluso abastecerse en un 100% utilizando energía solar, si el proceso es batch y diario.

Las mejoras en el diseño también permiten reducir ligeramente los costos de inversión por la simplificación del sistema.

Estas mejoras, permiten optimizar el diseño original, buscando maximizar la posibilidad de una rápida adopción por parte de pequeños empresarios del sector productivo de alimentos.

Agradecimientos

Al programa Innovate Perú y la empresa Nuestra Inversiones Gastronómicas por el financiamiento del presente proyecto.

REFERENCIAS

- Alatrística, A., 2015. Solar Energy as a key resource for technological change and rural development: An alternative pasteurization process for rural dairy plants. Sustainable development conference. Conference Proceedings- Bangkok Thailand.
- Aubron, C., & Cochet, H., 2009. Producción lechera en los Andes Peruanos: ¿Integración al mercado interno o marginación económica?, Anuario americanista europeo, N° 6-7, 2008-2009 p. 217-238
- Baer, D., Gordon, M., Zarmi, Y. 1985. Design and Optimization of Solar Steam Systems for Constant Load Applications. Applied Solar Calculations Unit, Blaustein Institute for Desert Research. Ben-Gurion University of the Negev, Sede Boqer Campus. Israel 84990 Solar Energy Vol. 35, No. 2, p. 137-151, 1985
- Baghernejad, A., Yaghoubi, M. 2010. Exergy Analysis of an Integrated Solar Combined Cycle System. Renewable Energy, Vol. 35, No. 10, p. 2157-2164.
- Bouma, A., Durham, C., Meunier-Goddik, L. 2014. Start-up and Operating Costs for Artisan Cheese Companies. Journal of Dairy Science. 97, p. 3964-3972.
- Byrne, J., Kurdgelashvili, L., Mathai, M., Kumar, A., Yu, J., Zhang, X., Tian, J., Rickerson, W. 2010. World Solar Energy Review: Technology, Markets and Policies. Center for Energy and Environmental Policy. The World Bank.
- Dirección General de Competitividad Agraria, 2009. Tecnología de leche: El Conglomerado Quesero de Bambamarca. Ministerio de Agricultura – Perú.
- IEA, 2010. Technology Roadmap: Concentrating Solar Energy. International Energy Agency. Disponible en: http://www.iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdf
- IEA, 2010. Technology Roadmap: Concentrating Solar Energy. International Energy Agency. Disponible en: http://www.iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdf
- IEA, 2010. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy. International Energy Agency. Disponible en: http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf
- ITDG – Agromarketing, 2006. Análisis Subsectorial, Quesos Madurados Tipo Suizo Distrito de Tongod y Catilluc Cajamarca.
- Kalogirou, S., 2002. The Potential of Solar Industrial Process Heat Applications. Applied Energy, 76, p. 337 – 361.
- Kulkarni, G., Kedare, S., Bandyopadhyay, S., 2008. Design of Solar Thermal Systems Utilizing Pressurized Hot Water Storage for Industrial Applications. Solar Energy 82, p. 686 – 699.
- NREL, 2011. National Renewable Energy Laboratories, USA. See: Solar Advisor Model: <https://www.nrel.gov/analysis/sam/>
- Murphy, P., 2013. Annual Report IEA Solar Heating & Cooling Programme. Extracted from: www.iea-shc.org

- Panchal, H., Patel, J., Chaudhary, S. 2018. A Comprehensive Review of Solar Milk Pasteurization System. *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol 140.
- Pietzcker, R., Manger, S., Bauer, N., Luderer, G., Bruckner, T., 2011. The Role of Concentrating Solar Power and Photovoltaics for Climate Protection. Potsdam Institute of Climate Impact Research (PIK)
- Potter, N., 1978. *La Ciencia de los Alimentos*. EDUTEX SA, Mexico.
- Price, S., and Margolis, R., 2010. 2008 Solar technologies market report. U.S. Department of Energy.
- REN21. 2009. *Renewables Global Status Report: 2009 Update* (Paris: REN21 Secretariat). Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Richter, C., Teske, S., & Short, R. 2009. *Concentrating Solar Power: Outlook 2009 – Why Renewable Energy is Hot*. Amsterdam: Greenpeace International, Tabemas, Spain: 146 SolarPACES and Brussels: ESTELLA. Retrieved April 19, 2010 from http://www.estelasolar.eu/fileadmin/ESTELAdocs/documents/Greenpeace_Concentrating_Solar_Power_2009.pdf
- Romero, H. 2008. *Irradiancia Solar en Territorios de la República de Chile. Proyecto CHI/00/G32 “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”*. Disponible en: <http://www.freewebs.com/infoenergia/RegistroSolarimetrico.pdf>
- Saravacos, G., y Kostaropoulos, A., 2002. *Handbook of Food Processing Equipment*. Kluwer Academic/ Plenum Publishers.
- Schilling, M., Esmundo, M. 2009. *Technology S-curves in renewable energy alternatives: Analysis and implications for industry and government*. *Energy Policy*, January 2009.
- Senamhi, 2003. *Atlas de Energía Solar del Perú*. Disponible en: http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/80bib_arch.pdf
- Shane, S., 2008. *Handbook of Technology and Innovation Management*. John Wiley and Sons Editors.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K. 2010. *Investigation of Selected Solar Process Heat Applications Regarding Their Technical Requirements for System Integration*. Kassel University, Institute of Thermal Engineering, Kassel (Germany) www.solar.uni-kassel.de, solar@uni-kassel.de
- Sloan, T., Alatriza, A., 2010. *Dilemas Estratégicos Para el Surgimiento de Una Industria Solar en Latinoamérica: Un Enfoque Desde Chile*. Congreso Latinoamericano de Energía Solar, Cusco 2010.
- Suurs, R., 2009. *Motors of sustainable innovation: towards a theory on the dynamics of technological innovation systems*. PhD thesis, Utrecht University.
- Tora, E. 2008. *Optimal Design and Integration of Solar Systems and Fossil Fuels for Process Cogeneration*. Master of Science Thesis, Texas A&M University.
- Tripsas, M. 1997. *Unraveling the process of creative destruction: complementary assets and incumbent survival in the typesetter industry*. *Strategic Management Journal*, 18, 119–42.
- USA EPA [Environmental Protection Agency]210, 2010. *Clean Energy*. Available at: <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-and-you/affect/coal.html> [Accessed 31 July, 2010].
- Vajen, K., Lauterbach, C., Schmitt, B. 2012. *Solar heat for industrial processes –Potential, technologies and applications*. Kassel University, Institute of Thermal Engineering, Kassel (Germany). *Proceedings of the “International Conference on Solar energy for MENA region (INCOSOL)”*. Amman, Jordan, 22-23October 2012. Paper Number: 28
- Wolff, G., Gallego, B., Tisdale, R., & Hopwood, D. (2008). *CSP Concentrates the Mind*. *Renewable Energy Focus*, January/February, 42-47.