

PROCESO DE DESTILACIÓN DE ALCOHOL DE CAÑA DE AZÚCAR, DESDE UNA PERSPECTIVA DE ECONOMÍA CIRCULAR

SUGARCANE ALCOHOL DISTILLATION PROCESS FROM A CIRCULAR ECONOMY PERSPECTIVE

Mares Gardea Arturo Ernesto¹; García Morales Jarniel²; Cervantes Bobadilla Marisol²; Medina Medina Ivetteh Virginia²

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i2.398>

¹Tecnológico Nacional de México/ I. T. de Gustavo A. Madero, maresarturoe@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8430-6628>,

²Tecnológico Nacional de México/ CENIDET, jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0001-7972-6389>,

²Tecnológico Nacional de México/ CENIDET, marisol.cb@cenidet.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3166-0584>,

²Tecnológico Nacional de México/ CENIDET, d24ce116@cenidet.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0006-8849-0519>.

Resumen – Hablar de la economía circular implica desvincular el crecimiento económico del consumo de recursos finitos, proteger el medio ambiente reduciendo la generación de residuos, la contaminación y las emisiones de CO₂, lo que a su vez impacta en que genera oportunidades de crecimiento económico y se fomenta el empleo. La economía circular fomenta la innovación, la optimización de recursos naturales, la eficiencia al interior de las organizaciones y la creación de nuevos modelos de negocio, lo que se traduce en beneficios económicos y sociales para todos agentes económicos: sociedad, empresas y consumidores.

La presente investigación se enfoca en la caracterización de los sistemas y/o variables asociadas al proceso de precalentamiento de agua de alimentación de caldera en una destiladora de alcohol de caña de azúcar desde una perspectiva de economía circular y el uso de colectores solares para eficientar el uso de los recursos. Asimismo, se identifican los nichos de oportunidad específicos dentro del proceso, relacionados con el consumo de energía calorífica y de agua. Para la reducción de estos indicadores se propone una estrategia de implementación de un sistema de colectores solares para calentar el agua de alimentar la caldera hasta 70°C, así como la recuperación, almacenamiento y recirculación del agua de condensado que actualmente se vierte en el desagüe y se desecha. El aprovechamiento del condensado de vapor sigue un enfoque circular y se traduce en una gestión más eficiente de los recursos naturales, una mayor eficiencia del sistema, menos combustible necesario para calentar el agua y un menor uso del agua de la red de suministro público, lo que conlleva a una reducción de costos, aunado a la optimización de los recursos renovables para mejorar los procesos industriales.

Palabras Clave: alcohol, colectores solares, energía térmica, economía circular.

Abstract -- Talking about the circular economy means decoupling economic growth from the consumption of finite resources, protecting the environment by reducing waste generation, pollution, and CO₂ emissions, which in turn generates opportunities for economic growth and promotes employment. The circular economy encourages innovation, the optimization of natural resources, efficiency within organizations, and the creation of new business models, which translates into economic and social benefits for all economic agents: society, businesses, and consumers.

This research focuses on the characterization of the systems and/or variables associated with the process of preheating boiler feed water in a sugarcane alcohol distillery from a circular economy perspective and the use of solar collectors to make resource use more efficient. It also identifies specific niches of opportunity within the process related to heat and water consumption. To reduce these indicators, it proposes a strategy for implementing a solar collector system to heat the boiler feed water to 70°C, as well as the recovery, storage, and recirculation of condensate water that is currently discharged into the drain and discarded. The use of steam condensate follows a circular approach and results in more efficient management of natural resources, greater system efficiency, less fuel needed to heat water, and less use of water from the public supply network, leading to cost reductions, coupled with the optimization of renewable resources to improve industrial processes.

Keywords – alcohol, solar panels, thermal energy, circular economy.

INTRODUCCIÓN

La industria de la producción de alcohol a partir de la caña de azúcar es una actividad de suma importancia para muchas regiones del mundo, sin embargo, enfrenta retos ambientales y económicos significativos, como la alta demanda de recursos, por ejemplo, el agua y la energía

[1], es por ello que, se destaca la importancia de considerar la economía circular y los sistemas térmicos solares para mejorar la sostenibilidad y eficiencia de las destiladoras de alcohol, especialmente para el precalentamiento de agua de alimentación de caldera.

En la actualidad, la escasez de recursos naturales, la generación de residuos y la inquietud por el cambio climático es cada vez mayor. En este contexto, las destiladoras constituyen industrias altamente contaminantes y consumidoras de recursos [1] que enfrentan desafíos críticos relacionados con la sostenibilidad y la gestión eficiente de recursos, como son el alto consumo de energía calorífica y de agua [2].

CÁLCULO DE AGUA DE ALIMENTACIÓN DE UNA CALDERA, VAPOR SATURADO Y CONDENSADO RECUPERADO

La presente investigación se realiza por el método mixto (Cuanti-Cuali) y un alcance correlacional; el estudio se enfoca en una destiladora de alcohol de caña de azúcar que se encuentra ubicada en Temimilcingo, Morelos, México; misma que opera mediante la combustión de leña como fuente principal de energía térmica que alimenta una caldera piro-tubular para la producción de vapor saturado. El vapor se distribuye a través de las diferentes etapas del proceso de producción, destacando la etapa del precalentamiento del agua de alimentación.

Cálculo del flujo de agua de alimentación y de vapor saturado.

El flujo volumétrico de un fluido puede determinarse teniendo en cuenta el área transversal de la tubería por donde circula y la velocidad del fluido. Para ello se emplean las siguientes fórmulas [3]:

$$Q = A \times V_p \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

Q: Flujo volumétrico (m^3/h)

A: Área transversal de la tubería (m^2)

V_p : Velocidad del fluido (m/s)

El área transversal de la tubería se calcula teniendo en cuenta el diámetro interior de la tubería expresado en metros:

$$A = \pi \left(\frac{d^2}{4} \right) \quad \text{Ec. (2)}$$

La velocidad del fluido se puede determinar en función de la presión en un intervalo de tiempo dado, mediante la relación lineal siguiente:

$$V_p = V_0 + k \times (P - P_0) \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

V_0 : Velocidad inicial a la P_0 (m/s)

k: Valor de ajuste del sistema

P: Presión (kg/cm^2)

P_0 : Presión inicial o promedio (kg/cm^2)

Teniendo en cuenta lo anterior y las características del sistema, se establece una metodología para calcular el flujo de agua de alimentación que es impulsado por una bomba centrífuga, cuyo régimen de trabajo es cíclico, o sea, que su arranque y parada está en función de la demanda de la caldera.

A continuación, se muestra dicha metodología:

1. Registrar parámetros (tiempos de activación y de parada de la bomba, presión manométrica de agua de alimentar, diámetro de la tubería).
2. Calcular el flujo para cada ciclo de activación de la bomba ($Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_n$).
3. Sumar los flujos de todos los ciclos:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad \text{Ec. (4)}$$

4. Calcular los ciclos de activación de la bomba por hora (C).
5. Calcular el flujo promedio por hora

$$Q = Q_{total} \times C \quad \text{Ec. (5)}$$

Para determinar el flujo volumétrico de vapor saturado generado se deben seguir algunos de los pasos de la metodología anterior:

1. Registrar parámetros (presión manométrica de vapor saturado a la salida de la caldera, diámetro de la tubería).
2. Calcular el flujo de vapor para cada registro de mediciones ($Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_n$).
3. Calcular flujo total de vapor.

Luego de establecer los métodos para calcular el flujo de agua de alimentación y de vapor saturado, se procede a analizar las perspectivas y consideraciones sobre la recuperación de energía calorífica.

En la práctica, la cantidad de energía y la proporción de energía calorífica utilizada en las destilerías varían dependiendo de la escala, productos, procesos utilizados y la eficiencia de las operaciones. Esta energía se encuentra presente en el agua precalentada que alimenta la caldera, en el proceso de combustión que ocurre en el horno de la caldera y acompaña al vapor generado, el cual es utilizado en el difusor y en el proceso de destilación.

El jugo de caña fermentado es calentado con vapor para separar y concentrar el alcohol [4]. En algunas de estas plantas se desechan las corrientes de aguas de enfriamiento de condensadores y fermentadores, las

vinazas, los condensados de vapor, gases calientes, que no son aprovechados y que contribuyen a disipar calor disminuyendo la eficiencia energética del sistema [5]. Capturar y utilizar estos flujos puede ser una fuente importante de ahorro de energía térmica [4].

Específicamente, la recuperación de condensado posibilita obtener ahorros de energía térmica, así como por concepto de suministro y tratamiento de agua. El condensado que no retorna al sistema de alimentación de caldera debe ser compensado por agua de reposición, la cual está fría y debe ser tratada. La recuperación de condensado reducirá el consumo de agua, productos químicos y combustible mediante la recuperación de agua y calor [4].

Estimación de la cantidad de condensado recuperado.

El vapor generado por la caldera, viaja a lo largo de las tuberías del sistema de distribución para llegar al proceso donde se utilizará el calor. En el transporte de vapor, se pierde calor por radiación a través de la pared del tubo y se condensa. Los sistemas de condensado están compuestos por un conjunto de tuberías de recolección de los drenajes de las trampas de vapor, las que descargan a un tanque de almacenamiento equipado con una bomba o un sistema de tuberías para transportar el condensado hasta el tanque de agua de alimentación de las calderas [6]. De acuerdo con el autor [7], se puede estimar la cantidad de condensado recuperado en un sistema, teniendo en cuenta el porcentaje de utilización de vapor de los equipos consumidores en la destiladora, diámetro y área transversal de las tuberías (Ver ecuación 2), flujo de agua de alimentación y de vapor saturado generado, temperatura y entalpía del condensado, entre otros parámetros. En [7] utiliza el análisis de balance de energía para determinar la cantidad total de condensados recuperados en el tanque de almacenamiento en un proceso de la industria alimenticia. También considera que el flujo másico de agua de alimentación es equivalente al flujo másico de vapor generado en sistemas energéticos estables. En un balance total de energía se toma en cuenta las transferencias de energía a través de los límites del sistema:

$$\sum m_{ent} \times h_{ent} = \sum m_{sal} \times h_{sal} \quad \text{Ec. (6)}$$

$\sum m_{ent}$: Sumatoria de flujo másico de entrada al sistema (kg/s)

h_{ent} : Entalpía del fluido de entrada (kJ/kg)

$\sum m_{sal}$: Sumatoria de Flujo másico de salida del sistema (kg/s)

h_{sal} : Entalpía del fluido de salida (kJ/kg)

Por otra parte, [7] y [8] proponen las siguientes fórmulas para el cálculo del caudal de vapor desde el caudal secundario en un intercambiador de calor.

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

Q_v : Flujo volumétrico (m^3/h)

Q_m : Flujo másico (kg/h)

ρ : Densidad del agua (kg/m^3)

$$W_s = \frac{Q \times C_p \times \Delta T}{h_{fg}} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

W_s : Caudal del vapor (kg/h)

Q : Flujo de agua de alimentación (kg/h)

ρ : Densidad del agua de alimentación (kg/m^3)

C_p : Calor específico del fluido ($\text{kJ}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$)

ΔT : Diferencia de temperatura ($^\circ\text{C}$)

h_{fg} : Entalpía de evaporación del vapor (kJ/kg)

Esta ecuación permite conocer la cantidad de vapor que se emplea actualmente en el precalentador para aumentar la temperatura del agua de alimentación de caldera y compararlo con las estimaciones realizadas sobre el uso del vapor, así como puede servir como base sólida para evaluar el ahorro de energía calorífica y el potencial de implementación de un sistema de energía solar térmica.

USO DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

La energía solar térmica es la conversión de la irradiación solar en calor. Entre los sistemas de energía renovable, la solar térmica se considera como la alternativa más económica. Típicamente, los sistemas utilizan colectores solares y concentradores para recoger la radiación solar, almacenarla y utilizarla para calentar aire o agua en plantas domésticas, comerciales o industriales [9]. Este tipo de energía renovable es capaz de sustituir o reducir el uso de combustibles fósiles [10]. El calentamiento de agua solar constituye la mayoría de las aplicaciones de la energía solar térmica, tanto en los sectores domésticos como industriales. Por lo general, los sistemas de energía solar térmica para el calentamiento de agua están compuestos por colectores solares y un espacio de almacenamiento [11].

El colector solar térmico es el dispositivo que transforma la radiación solar en la energía térmica que se transfiere a un fluido caloportador aumentando su temperatura. Es el principal componente del sistema de captación, el generador de calor de las instalaciones solares térmicas. Además de producir el calor de manera eficiente, el colector debe estar diseñado para soportar la continua exposición a condiciones exteriores (lluvia, nieve, granizo, polvo, etc.) y para resistir las temperaturas extremas, tanto altas como bajas, a las que puede estar sometido [12].

Los colectores de placa plana son adecuados para aplicaciones de baja temperatura (inferiores a $100 \text{ } ^\circ\text{C}$) y son populares por su ligereza, modularidad y bajo costo

[13], cuyo valor puede oscilar entre 5,500.00 MXN y 30,000.00 MXN [14]. En este contexto, sobresale que los CPP (Colector de Placa Plana) para calentamiento de agua constituyen la tecnología térmica solar más utilizada y recomendada a nivel mundial tanto en el sector doméstico como en el industrial.

La energía solar se transforma en energía térmica mediante un panel compuesto por una cubierta acristalada, que permite el paso de la radiación solar hasta incidir y ser absorbida por la superficie selectiva de una placa absorbente. En la figura 1 se observa un corte transversal de un CPP en donde se diferencia cada uno de sus componentes. La energía térmica después de ser interceptada en la placa se transfiere al interior de los tubos por donde circula el fluido caloportador, para finalmente pasar a un sistema de almacenamiento, o ser utilizado de manera directa [10].

Figura 1. Partes de un colector de placa plana.



Fuente: Carrión-Chamba et al. (2022).

Determinación de la cantidad de colectores solares y volumen de almacenamiento para destiladora de alcohol.

Para diseñar un sistema de precalentamiento de agua mediante energía solar se debe conocer cuál es la capacidad de agua por cada colector, la temperatura a la entrada del colector, la temperatura requerida por el proceso y la cantidad total de agua que se utilizará en un día [15]. La ubicación, el tipo de colector, el fluido de trabajo para determinar el volumen de almacenamiento necesario, el tamaño del sistema y el volumen de almacenamiento y la carga térmica son otros de los factores que deben considerarse [11]. En [16] propone una metodología para determinar la cantidad de colectores solares y el volumen del tanque de almacenamiento necesarios para el precalentamiento de agua de alimentación de una caldera pirotubular. Para ello se debe calcular:

1. Demanda energética:

Es la energía necesaria para elevar la temperatura de un volumen determinado de agua, desde una temperatura inicial T_i hasta una temperatura de consumo T_f . La siguiente ecuación es utilizada también por otros autores [7,17,15]

$$Q_{\text{dem}} = M \times C_p \times (T_f - T_i) \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

Q_{dem} : Demanda de calor o demanda energética (kJ/día)

M : Flujo de agua de alimentar (kg/día)

C_p : Capacidad calorífica del agua (4,18 kJ/kg °C)

T_f : Temperatura final o de salida del colector (°C).

T_i : Temperatura inicial o de entrada al colector (°C).

2. Área de captación

Es el área necesaria para captar la energía solar que pueda satisfacer la demanda energética. El área depende de la radiación global y de la eficiencia total del sistema de calentamiento de agua.

$$A_{\text{cap}} = \frac{Q_{\text{dem}}}{H_p \times \eta_g} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

A_{cap} : Área de captación (m^2).

H_p : Radiación promedio solar (Wh/m^2).

η_g : Eficiencia global diaria del sistema (%).

3. Número de colectores

La cantidad de colectores necesarios para satisfacer la demanda energética está determinada por la relación:

$$N_c = \frac{A_{\text{cap}} \times F_S}{A_c} \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:

N_c : Número de colectores.

F_S : Factor de seguridad o de proyección de demanda (1-1,5).

A_{cap} : Área de captación (m^2).

A_c : Área de un colector (m^2).

4. Volumen del depósito

Es la capacidad total del tanque de almacenamiento de agua caliente que forma parte del sistema térmico solar.

$$V_{\text{dep}} = 1.15 \times m \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

V_{dep} : Volumen del depósito (litros)

m : Masa del agua a calentar (kg)

De acuerdo a [18], la masa de agua a calentar se calcula en función de la demanda térmica (E) que el sistema es capaz de cubrir con la cantidad de colectores determinada. Por tanto:

$$E = N_c \times H_p \times A_c \times \eta_g \quad \text{Ec. (13)}$$

$$m = \frac{E}{C_p \times \Delta T} \quad \text{Ec. (14)}$$

Para el emplazamiento de los colectores, se debe considerar la optimización del área y los volúmenes de almacenamiento, buscando el menor costo posible [19]. La ubicación de cualquier equipo de captación de energía solar depende de escoger un lugar que se encuentre libre de sombras y equipos [15]. Deben orientarse de tal modo que se maximice la captación de la radiación solar. Se debe calcular la distancia mínima entre colectores para evitar que la sombra resultante del colector anterior interfiera con el funcionamiento óptimo de los colectores siguientes.

$$d = k \times h \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde:

d: Distancia mínima entre colectores (m)

k: Coeficiente que depende del ángulo de los colectores con respecto al plano horizontal.

h: Altura total del colector (m)

En el caso de que exista un obstáculo o muro que pueda generar sombras, la expresión para d se transforma teniendo en cuenta la altura (h) del obstáculo como sigue:

$$d = 1.732 \times h \quad \text{Ec. (16)}$$

Para la determinación del área total de emplazamiento del campo solar también se debe considerar primeramente el área de terreno disponible, las dimensiones del colector solar, las distancias mínimas entre colectores, el espacio de servidumbre alrededor del campo de colectores en azoteas o terrenos delimitados, así como el espaciado para conexión y mantenimiento, que se recomienda que sea como mínimo de 20 cm.

Herramientas metodológicas

Las destiladoras de alcohol producido a partir de caña de azúcar enfrentan desafíos significativos en términos ambientales y económicos, debido a la alta generación de subproductos y el alto consumo de energía calorífica y de agua, llegando a considerarse una de las industrias más contaminantes y consumidoras de recursos. La implementación de estrategias de economía circular y de tecnologías solares térmicas se encuentra en una etapa incipiente en este sector, a pesar de que se presentan como alternativas viables y prometedoras para mejorar la eficiencia energética y la gestión de recursos, así como los indicadores de operación y de consumo del proceso.

Las unidades de análisis son las calderas pirotubulares utilizadas en las destiladoras de alcohol de caña de azúcar o industrias similares para la generación de vapor saturado para sus procesos.

La destiladora objeto de estudio se encuentra ubicada en Temimilcingo, Morelos y se dedica a producir alcohol a partir de caña de azúcar. Cuenta con una caldera de biomasa ECOVIS 350HP del tipo pirotubular, la cual

utiliza bagazo y astilla como combustible para la generación de vapor saturado a 7 kg/cm^2 y 165°C . Este vapor pasa a un cabezal común y luego es distribuido hacia los procesos de difusión, destilación y precalentamiento de agua de alimentar en diferentes proporciones. Cabe señalar que la empresa es relativamente de reciente creación y no cuenta con un sistema metrológico robusto, pues la instrumentación instalada solo abarca los parámetros fundamentales para llevar a cabo la producción de alcohol, no se enfoca en el monitoreo del rendimiento de la caldera u otros equipos. Por tanto, se hizo necesario el uso de tablas de propiedades de vapor de agua, así como de metodologías para la estimación de algunos parámetros como son: el flujo de agua de alimentación y de vapor saturado generado y de recuperación de condensado.

Teniendo en cuenta el área transversal de la tubería por donde circula el agua que debe ingresar a la caldera, el registro de la presión y la velocidad del fluido, así como los parámetros de operación de la bomba centrífuga que succiona el agua, se procede a calcular el flujo de agua de alimentación mediante las ecuaciones 1 y 5, obteniéndose como resultado un flujo de $1.10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Por otra parte, se registró la presión manométrica de vapor saturado a la salida de la caldera en una jornada de trabajo y a partir del diámetro de la tubería se determinó (ecuación 4) que el flujo de vapor es de $1.07 \text{ m}^3/\text{h}$. La relación entre la cantidad de agua que ingresa a la caldera y el flujo de vapor que se genera indica que las pérdidas son mínimas, por lo que se dice que el sistema es estable. Si se considera una jornada laboral de 9.5 h según las condiciones de operación vigentes al momento de recabar los datos, se tiene un consumo de agua de alimentación de 10,450 litros/día y una generación y consumo de vapor de 10,165 litros/día.

Asimismo, en el análisis del uso del vapor por los diferentes equipos, se estima que el difusor, la torre de destilación y el precalentador consumen aproximadamente 2,927.52 litros, 5,204.48 litros y 2,022.83 litros de vapor diarios respectivamente, lo que representa el 28.8%, 51.3% y 19.9% del total de vapor producido por la caldera. Actualmente solo se recupera el condensado de vapor proveniente del precalentador, el cual se une al flujo de agua que se utiliza en el difusor para la extracción del jugo de caña.

Si se tiene en cuenta una recuperación de condensado de vapor efectiva del 85% por cada equipo [7] se puede estimar que la cantidad de condensado que se obtiene en la torre de destilación es de 4,423.8 litros/día, en el difusor es de 2,488.3 litros/día, en el precalentador es de 1,719.4 litros/día y en la caldera, producto de las purgas y pérdidas es de 242.25 litros/día (0.03%).

Para determinar el volumen de condensado que se puede recuperar, se deben tener en cuenta las condiciones adecuadas del sistema (accesorios, tanque de condensado,

instrumentos de medición) y proceder a aplicar la ecuación 6 de balance de energía en el tanque de condensado, para una temperatura de 80°C, como se muestra a continuación:

$$\sum m_{ent} \times h_{ent} = \sum m_{sal} \times h_{sal}$$

$$m_{dif} \times h_{cond} + m_{td} \times h_{cond} + m_{cald} \times h_{cond} = m_{cond} \times h_{cond}$$

$$m_{cond} = \frac{h_{cond}(m_{dif} + m_{td} + m_{cald})}{h_{cond}}$$

$$m_{cond} = \frac{0.734171 \text{ kWh/kg} (7,154.35 \text{ litros/día})}{0.734171 \text{ kWh/kg}}$$

$$m_{cond} = 7,154.35 \text{ litros/día.}$$

Se estarían aprovechando 7,154.35 litros diarios de agua caliente condensada que anteriormente se desechaban y que ahora puede ser recirculado y reincorporado al proceso, lo que representa un porcentaje de recuperación del 69%. Esto se traduce en una mejora en la eficiencia global de sistema, reducción del consumo de combustible para llevar el agua a su temperatura de ebullición y reducción del consumo de agua de la red de suministro, disminuyendo así los costos asociados. Para calcular el caudal de vapor necesario para elevar la temperatura de agua de alimentar caldera desde 28°C a 70°C en el precalentador se emplea la ecuación 7. Primeramente, se convierten las unidades de medida de flujo volumétrico a flujo másico, teniendo en cuenta la densidad del agua de alimentación. Se muestra como sigue:

$$Qm = Qv \times \rho$$

$$Qm = 1.10 \text{ m}^3/\text{h} \times 1,000 \text{ kg/m}^3$$

$$Qm = 1,100 \text{ kg/h}$$

Posteriormente se calcula el caudal de vapor se determina mediante la Ec. 8:

$$Ws = \frac{1,100 \text{ kg/h} \times 4.19 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times 42^\circ\text{C}}{2,762.79 \times 9.5 \text{ h/día}}$$

$$Ws = 7.37 \text{ kg/día}$$

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La energía solar es ampliamente utilizada para generar electricidad y calor, mediante paneles fotovoltaicos y sistemas térmicos solares respectivamente [21]. Se están realizando esfuerzos considerables para introducir gradualmente fuentes de energía renovables para satisfacer las necesidades energéticas futuras, las cuales juegan un papel esencial en la economía circular.

Por su parte, [22] diseña un sistema térmico solar para el precalentamiento del agua de alimentación de una caldera de 600 HP en la que considera necesaria la recolección de datos operacionales y de consumo de la caldera, así como la determinación del tipo de colector adecuado y del área de instalación de dicho sistema.

Según [23], un 60% del calor industrial total utilizado en México suele requerir una temperatura inferior a los 150°C, lo que determina el tipo de dispositivo solar a emplear, como son los de placa plana y los de tubos evacuados. Estas tecnologías se usan comúnmente para diversas aplicaciones, entre las que figura el precalentamiento de agua de alimentación de calderas, lo cual se corrobora en las investigaciones analizadas hasta el momento; es por ello que, la energía térmica en el proceso de destilación de alcohol en la industria juega un papel importante en la economía circular y, para estructurar la propuesta de mejora, se siguieron tres fases metodológicas: (i) caracterización del sistema actual, (ii) diseño del sistema solar térmico complementario, y (iii) propuesta de integración con recuperación de condensado.

La destiladora objeto de cuenta con una caldera de biomasa del tipo pirotubular, la cual utiliza bagazo y astilla como combustible para la generación de vapor saturado a 7 kg/cm² y 165°C. Este vapor pasa a un cabezal común y luego es distribuido hacia los procesos de difusión, destilación y precalentamiento de agua de alimentación en diferentes proporciones.

Se necesita un caudal másico de 7.37 kg/día de vapor que equivale a 2 m³ /día o 2,000 litros/día, coincidiendo con las estimaciones realizadas sobre el uso del vapor. Estos resultados pueden servir como base sólida para evaluar el ahorro de energía calorífica si en lugar de precalentar el agua de alimentación con vapor, se emplea un sistema de energía solar térmica para este fin. A continuación, se selecciona el colector solar adecuado, así como se realiza el dimensionamiento del sistema solar térmico.

La selección del colector solar idóneo para un sistema térmico solar en una industria es un paso significativo y debe ser bien enfocado, ya que es muy importante mantener y suministrar la temperatura requerida para el proceso. De igual manera, el espacio requerido para la instalación de estos sistemas es un factor esencial a considerar. Con base en la información recabada y al análisis de los datos recopilados, se determina que los colectores solares que mejor se adecúan para el precalentamiento de agua de alimentación de la caldera de la destiladora objeto de estudio, son los de placa plana, es por ello que se seleccionó un colector solar de placa plana comercial de uso industrial producido por la empresa mexicana Módulo Solar, del modelo MAXOL Hipertinox; para determinar la cantidad de estos colectores solares y el volumen del tanque de almacenamiento necesarios para el precalentamiento de 10,450 litros/día del agua de alimentación de la caldera se desarrolla la metodología propuesta por [16] y en la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos:

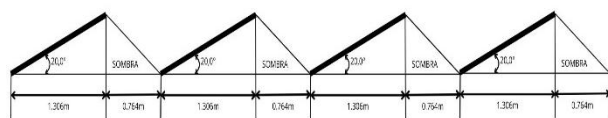
Tabla 1. Variables calculadas para el dimensionamiento de un sistema colector solar.

Variables calculadas	Símbolo	Resultados	Unidad de Medida	Observaciones
Demanda energética	Q_{dem}	1,834,602	kJ/día	Para aumentar la temperatura del agua de alimentación en 42°C.
Radiación promedio solar	H_p	6.018	kWh/m ² /día	Se promedia la radiación solar incidente en Temimilcingo, Morelos, en los meses de zafra (noviembre - mayo)
Área de captación	A_{cap}	121.49	m ²	Se tiene en cuenta la demanda energética, la radiación promedio solar y una eficiencia del colector solar de 69.7 %.
Número de colectores	N_c	61	Adimensional	Se tiene en cuenta un Factor de seguridad FS igual a 1, según el tipo de proceso.
Volumen del depósito	V_{dep}	12,067.55	litros	Volumen máximo para almacenar el agua caliente proveniente de los colectores.

Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos se necesitan 61 colectores solares de placa plana del tipo MAXOL Hipertinox para cubrir un área de captación de 121.49 m² para el precalentamiento de 10,450 litros diarios de agua hasta 70°C. De igual manera, se debe contar con un depósito o tanque de almacenamiento de capacidad máxima de 12,067.55 litros para contener todo el volumen de agua caliente. Para el emplazamiento del sistema se calcula la distancia mínima entre colectores para evitar que la sombra resultante del colector anterior interfiera con el funcionamiento óptimo de los colectores siguientes. Se tienen en cuenta el largo, ancho y altura de la base tijera y del colector solar seleccionado, así como el coeficiente $k=1$, de acuerdo con el ángulo de inclinación del colector recomendado por el fabricante (20°). A partir de la ecuación 15 se determina que la distancia mínima entre colectores debe ser de 0.764 m, como se muestra en la figura siguiente:

Figura 2. Distancia mínima entre colectores solares de placa plana.



Fuente. Elaboración propia.

Para el emplazamiento también se incluye un espaciado de 20 cm para el conexionado y mantenimiento y se tiene en cuenta que la distribución de los colectores no debe exceder de 10 por cada fila o columna del sistema. A partir de los datos anteriores se determina que se necesita un área total de 122.26 m² para la ubicación de los colectores.

Por otra parte, se sugiere que la localización del sistema de colectores solares sea lo más cercana posible a la planta de tratamiento químico del agua (PTQA), de donde se succiona el agua que pasará por el sistema de colectores para su precalentamiento, se almacenará en el

tanque acumulador y que luego ingresará al área de caldera.

CONCLUSIONES

La integración de las tecnologías de energía renovable de colectores solares se presenta como una alternativa viable y prometedora para mejorar los indicadores de operación y de consumo del proceso de precalentamiento de agua de alimentación, y de la destiladora en general.

Esta metodología permitirá reducir el consumo de energía calorífica de la caldera y de vapor para el precalentamiento convencional del agua. Por su parte, la recuperación y reutilización del vapor condensado promueve un enfoque de economía circular y de mejora en la gestión de recursos naturales en el proceso. La recuperación del 69% de los condensados que se generan se traduce en una mejora en la eficiencia global del sistema, reducción del consumo de combustible para llevar el agua a su temperatura de ebullición y reducción del consumo de agua de la red de suministro, disminuyendo así los costos asociados. La adopción de estas prácticas permite mejorar la reputación de la empresa, al demostrar su compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental.

Se estima continuar con la simulación del sistema propuesto haciendo uso de herramientas como MATLAB y TRNSYS las cuales son de gran utilidad para validar el impacto energético y económico de la investigación. Esta estrategia representa un paso firme hacia la transición energética y la modernización sustentable del sector.

Como parte de los trabajos futuros y línea de investigación, se considera pertinente instrumentar la planta para realizar mediciones en tiempo real de las variables clave (temperaturas, caudales, presiones y radiación) con el fin de evaluar de manera experimental los resultados obtenidos, así como, cuantificar el efecto de la intermitencia solar en el tiempo efectivo de calentamiento, evaluar el dimensionamiento de los colectores y aplicar análisis de incertidumbre y sensibilidad con un diseño experimental apropiado.

Una segunda línea de investigación se enfocará en profundizar la economía circular del proceso mediante la identificación y valorización de subproductos hoy considerados desecho, y en la evaluación de estrategias de control avanzado y optimización (p. ej., control predictivo y optimización multiobjetivo) para maximizar el aprovechamiento de la energía solar y otros subproductos que podrían reutilizarse con el objetivo de incrementar la eficiencia integral del sistema y reintegrar

de forma óptima estos subproductos en las etapas pertinentes, contribuyendo al cierre de ciclos de materiales y agua.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mikucka, W., & Zielińska, M. (2020). Distillery stillage: characteristics, treatment, and valorization. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 192, 770-793.
- [2] Ones, O. P., Yeney, L. G., de Cárdenas, L. Z., & Cabrera, Z. R. (2018). Análisis de la sección de destilación de una destilería de aguardiente de caña aplicando un simulador comercial. *Ciencia y Tecnología*, 11(2), 47-56.
- [3] Yauce Milian, A. B. (2015). Estudio técnico, económico y financiero de implementación de colectores planos solares para calentar el agua de alimentación de la caldera pirotubular Apin, reduciendo los costos de consumo de petróleo industrial N° 6 en la empresa Alicorp SAA-Trujillo.
- [4] Stuckrath, C., & Worrell, E. (2022). Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Distilleries United States Environmental Protection Agency An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers.
- [5] Ones, O. P., León, O. G., & de Cárdenas, L. Z. (2012). Modelación, simulación y análisis con fines energéticos de destilerías de etanol hidratado Editorial Universitaria.
- [6] Borroto, A., & Rubio, A. (2010). Combustión y generación de vapor. Editorial Universo Sur, 1-117.
- [7] Yauce Milian, A. B. (2015). Estudio técnico, económico y financiero de implementación de colectores planos solares para calentar el agua de alimentación de la caldera pirotubular Apin, reduciendo los costos de consumo de petróleo industrial N° 6 en la empresa Alicorp SAA-Trujillo.
- [8] Matteini, M. (2014). Manual de capacitación en Optimización de sistemas de vapor industrial (OSV). In: Vienna: Organización De Las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial.
- [9] Rodríguez, J. C. S. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Instituto Tecnológico de Canarias. <https://books.google.com.mx/books?id=6FEOkgAACA AJ>
- [10] Carrión-Chamba, W., Murillo-Torres, W., & Montero-Izquierdo, A. (2022). A review of the state-of-the-art of solar thermal collectors applied in the industry. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología* (27), 59-73.
- [11] Mekhilef, S. (2018). Circular economy and renewable energy through industrial applications. *Constructing a Green Circular Society*, 24, 121.
- [12] ASIT, A. S. I. I. T. (2021). Energía solar térmica en procesos industriales. *IndustriaAmbiente: gestión medioambiental y energética* (34), 56-60.
- [13] Gil, J. D., Topa, A., Álvarez, J., Torres, J., & Pérez, M. (2022). A review from design to control of solar systems for supplying heat in industrial process applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, 112461.
- [14] ModuloSolar. (2024). Catálogo de colectores solares de placa plana. Retrieved 10 de abril from <https://tienda.modulosolar.com/>
- [15] Quezada González, M. A. (2016). Propuesta para el empleo de energía solar como parte del precalentamiento de agua en las calderas del Hospital General San Juan de Dios Universidad de San Carlos de Guatemala].
- [16] Jiménez Borges, R., Madrigal Monzón, J. A., & Cabello Eras, J. J. (2019). Selección de un colector solar para aumentar la temperatura del agua de alimentación al generador de vapor de la Universidad de Cienfuegos. *Revista Universidad y Sociedad*, 7(2), 64-71.
- [17] Vega Melo, Y. J. (2017). Influencia del precalentamiento del agua de alimentación mediante energía solar en la eficiencia de una caldera pirotubular Universidad Industrial de Santander. Perú.
- [18] Vásquez, S. (2003). Diseño del sistema de calentamiento solar de agua.
- [19] Arcos Adame, J. G. (2018). Dimensionamiento de sistemas de precalentamiento de agua para calderas utilizando energía solar y almacenamiento térmico Cenidet. México
- [20] Puigventós, Francesc; Riera, Melcior; Delibes, Carla; Peñaranda, María; De la Fuente, Laura; Boronat, Assumpció. (2002). Estudios de adherencia a los fármacos antirretrovirales: una revisión sistemática. *Med Clin (Barc)*. Jun;119(4):130-7.
- [21] Dos Santos, M. R., de Brito, J. L. R., & Shibao, F. Y. (2022). Economía circular en la energía solar fotovoltaica. *COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional*, 19(1, jan/mar), 293-311.
- [22] Dardón Contreras, J. D. (2021). Diseño de investigación para el aumento de la eficiencia energética de una caldera a través del empleo de energía solar como parte del precalentamiento de agua en una industria jabonera. Universidad de San Carlos de Guatemala.

[23] CANAINCA. (2020). Calor solar para procesos industriales: Estudio de potencial en la industria de conservas alimenticias en México.

Tabla de Roles de Contribución

Rol	Autor(es)
Conceptualización	Arturo Ernesto Mares Gardea
Curación de datos	Marisol Cervantes Bobadilla
Metodología	Jarniel García Morales
Administración del proyecto	Arturo Ernesto Mares Gardea Ivetteh Virginia Medina Medina (contribución igual)
Recursos	Marisol Cervantes Bobadilla
Software	Jarniel García Morales
Supervisión	Arturo Ernesto Mares Gardea
Validación	Ivetteh Virginia Medina Medina
Visualización	Marisol Cervantes Bobadilla
Redacción	Arturo Ernesto Mares Gardea
Redacción	Jarniel García Morales



Esta obra está bajo
una licencia internacional
Creative Commons Atribución 4.0.