

Diseño y construcción de un prototipo de evaporador solar para deshidratación de lactosuero

Ricardo Musule Lagunes^{1*}, Jorge Arturo Del Ángel Ramos²

¹Instituto de Investigaciones Forestales, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

²Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

*musuleiq@gmail.com, rmusule@uv.mx

Resumen

Se diseñó y construyó un evaporador solar térmicamente autosuficiente. Nuestro objetivo fue desarrollar una unidad de evaporación innovadora alimentada por energía solar. Nuestro evaporador se diseñó para llevar a cabo la deshidratación del suero de leche, que es un subproducto de la fabricación del queso. En México, el lactosuero se vierte de manera indiscriminada como efluente en el sistema de alcantarillado y cuerpos de agua, lo que provoca contaminación del agua. Al mismo tiempo, los nutrientes que contiene (lactosa, proteínas y ácidos grasos) se desperdician cuando podrían tener otros usos, como transformarse en alimentos para humanos y animales. Nuestro prototipo es una alternativa que busca ser sostenible para la deshidratación y la producción de suero de leche concentrado. Además, nuestro evaporador solar podría ayudar a la industria quesera a cumplir la legislación medioambiental vigente. La utilidad de nuestro prototipo dependerá de su escalado industrial y de su mejora y adaptación a las necesidades particulares del lugar donde se vaya a utilizar.

Palabras clave: Deshidratación de lactosuero, Evaporador solar, Tratamiento de efluentes agroindustriales, Residuos de quesería.

Abstract

A thermally self-sufficient solar evaporator was designed. Our goal was to produce an innovative processing unit powered by solar energy. Our evaporator was designed to carry out the dehydration of whey, which is a by-product of cheese manufacturing. At present, whey is dumped into bodies of water indiscriminately causing pollution of water. Moreover, the nutrients contained in whey (lactose, proteins, and fatty acids) are wasted instead of transforming them into food for humans and animals. Our prototype is a sustainable alternative to dehydration and production of condensed whey. Additionally, our solar evaporator could help the cheese industry by helping it to fulfill the current environmental law. The usefulness of our prototype will depend on its industrial scaling, improvement and adaptation to the needs of the place where it will be used.

Key words: Whey dehydration, Solar evaporator, Agro-industrial effluent treatment, Cheese factory waste.

Introducción

El lactosuero es un residuo lácteo resultante de la producción de queso y es una de las sustancias más contaminantes de la industria alimentaria. Además, no procesar el lactosuero para utilizarlo como alimento supone un desperdicio considerable de nutrientes (Chegini y Taheri, 2013; Ozel Et al. 2022). Si el suero no se procesa, se desperdicia casi el cincuenta por ciento de los nutrientes de la leche. Así pues, es importante que los productores de queso encuentren formas de procesar el lactosuero para reducir la contaminación y conseguir una mayor recuperación del valor monetario de este residuo (Cunningham, 2000).

Millones de toneladas de suero de queso son producidas alrededor del mundo. Estados Unidos, Francia, Alemania e Italia son los principales productores mundiales de queso y suero de leche. La tasa de producción anual de suero es de unos 121 millones de toneladas al año (Petrucchioli et al. 2019; Ozel et al. 2022). En el año 2006, se estimó que un millón de toneladas de suero de leche fue producido en México y cerca 45% de todo este lactosuero fue vertido a los sistemas de alcantarillado, llegando a cuerpos de agua y al suelo (Valencia y Ramírez, 2009).

En el Estado de Veracruz, para el año 2016, la producción del lactosuero fue de aproximadamente 354,227 litros provenientes de leche de vaca (De la Cruz, 2018; Torres-Martínez y Romero-León, 2020). La problemática de contaminación del agua por vertido de lactosuero en el estado y particularmente en municipios alrededor de la ciudad de Xalapa ha sido previamente abordada en la literatura (Torres-Martínez y Romero-León, 2020; Flores-Mendoza Et al. 2020). En contraste, el 90% del lactosuero generado en Estados Unidos en 2001 (más de 500 mil toneladas) se utilizó para producir ingredientes para alimentos de consumo humano. La mayor parte de estos alimentos se exportó a países donde aún no se procesa el lactosuero, lo que generó plusvalías

por el procesamiento del lactosuero para Estados Unidos (Cancino et al. 2006).

El valor nutritivo del lactosuero depende de su composición y principalmente de su contenido en materia seca. El alto contenido de agua en el lactosuero sin procesar representa una desventaja importante, ya que sus costos de transporte pueden hacer que su procesamiento sea poco práctico (Khetni, 2018). Además, el alto contenido de agua en el lactosuero limita su consumo (Abaigar, 2003). Los métodos más utilizados para concentrar el lactosuero son el uso de membranas filtrantes (microfiltración y ultrafiltración) y la evaporación al vacío (Serpa et al. 2005), siendo este último de interés en el presente trabajo de investigación.

Los evaporadores que se utilizan actualmente requieren suministros de energía convencionales (incluidos combustibles y electricidad) para funcionar. También requieren de sitios con condiciones especiales, sistemas de control y una ubicación física fija. Todo ello implica costos de inversión y mantenimiento cuando se pone en marcha la tecnología de evaporación convencional para la concentración del lactosuero (Geankipilis, 2007; McCabe y Smith, 2007; Perry y Green, 2008).

La tecnología de evaporación solar para el tratamiento de efluentes industriales ha sido ampliamente estudiada alrededor del mundo (Nadal-Bach et al. 2021; Pandey et al. 2021). Sin embargo, son escasos los reportes de desarrollo de tecnología para la evaporación solar de suero de leche. Entre los pocos trabajos que destacan novedosos procedimientos se encuentra el informe de Souza et al. (2008) en Brasil, utilizando un proceso de microfiltración. Los procesos de ultrafiltración y evaporación al vacío para la concentración de proteína de suero de leche por Serpa et al. (2005) y una actual tecnología alternativa para la concentración de este subproducto, es un proceso de concentración por congelación (Cochachin-Carrera et al.

2023). Por otra parte, investigaciones acerca del aprovechamiento de la energía solar en la industria de la leche se han incrementado, destacándose el diseño de un sistema solar térmico en España por Quijera et al. (2010), y los reportes de los sistemas de integración de tecnología que usan energía solar en los procesos de la industria láctea (Pirasteh et al. 2014; Masera et al. 2023).

Con relación al uso del lactosuero a nivel nacional, destacan las investigaciones reportadas por Gómez Alcántara et al. (2009), quienes trataron de encontrar una solución técnica al lactosuero en el estado de Hidalgo, México, y realizaron algunas investigaciones sobre el diagnóstico y tratamiento del residuo. En la actualidad, se ha reportado el uso potencial del lactosuero para el desarrollo de biorrefinerías a base de microalgas para la generación de múltiples productos de alto valor agregado (Najar-Almanzor et al. 2023).

El objetivo de este trabajo fue diseñar un prototipo de evaporador solar térmicamente autosuficiente para concentrar lactosuero de la producción de queso en Xalapa, Veracruz, México. A partir de lo señalado, debemos

preguntarnos ¿Es posible diseñar y construir un evaporador solar térmicamente autosuficiente, con la finalidad de deshidratar el lactosuero para obtener una concentración final del 15%?

Metodología

Se instaló un prototipo de evaporador solar térmicamente autosuficiente en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana, región Xalapa, México, en las siguientes coordenadas: 19° 30' 43" norte, 96° 54' 14" oeste. Los cuatro pasos de diseño fueron los siguientes: 1) Descripción del prototipo, 2) obtención de datos de la radiación solar en Xalapa, Veracruz, México, 3) mediciones y cálculos de diseño y 4) diseño y construcción del prototipo.

Descripción del prototipo

La Figura 1 muestra el evaporador solar diseñado, que se compone de seis elementos principales: (1) Colector solar plano, (2) serpentín de intercambio de calor, (3) tanque de evaporación, (4) bomba de vacío, (5) bomba de circulación y (6) contenedor de concentrado.

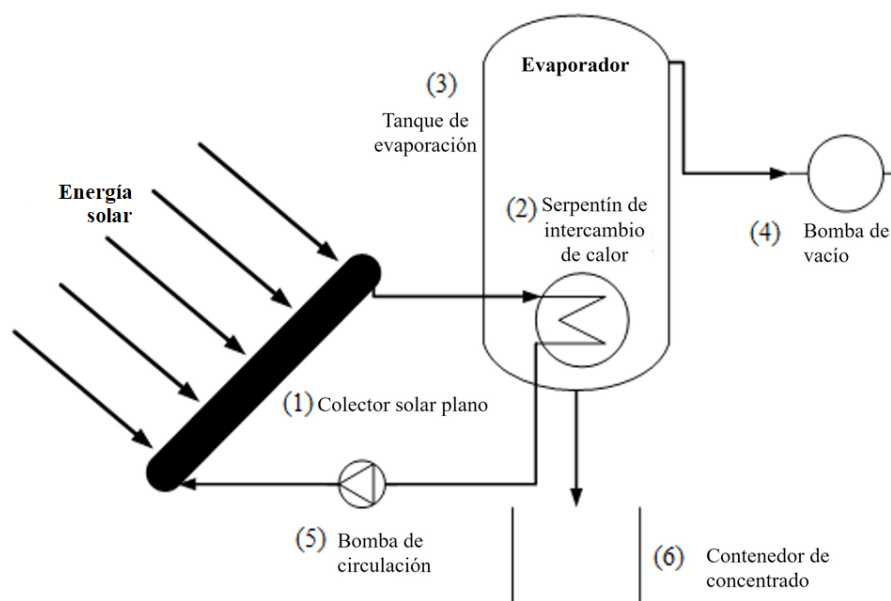


Figura 1. Elementos del prototipo de evaporador solar.

(1) Colector solar plano. El sistema de calentamiento se utiliza para aprovechar la energía de la radiación solar que se emplea como energía térmica para hacer que la sustancia a evaporar alcance su temperatura de saturación e inicie el proceso de evaporación.

(2) Serpentín de intercambio de calor. El objetivo principal del serpentín de intercambio de calor es transferir calor al suero mediante contacto indirecto, es decir, el fluido caloportador (agua) llena el serpentín, que transfiere su energía térmica al suero para que pueda tener lugar el proceso de evaporación.

(3) Tanque de evaporación. El tanque de evaporación sirve para contener tanto el suero a evaporar como el serpentín de intercambio de calor. El cuerpo del tanque es un recipiente hermético que permite el funcionamiento a presión de vacío.

(4) Bomba de vacío. Esta bomba sirve para eliminar las moléculas de gas del tanque de evaporación y proporcionar un funcionamiento a presión de vacío.

(5) Bomba de circulación. La función principal de este elemento es contribuir a la transferencia de calor por convección forzada. Se colocó entre el colector solar plano y el serpentín de intercambio de calor.

(6) Contenedor de concentrado. La función principal de este tanque era contener y almacenar el suero concentrado tras el proceso de evaporación.

Obtención de datos de la radiación solar en Xalapa, Veracruz, México

Se utilizaron datos meteorológicos históricos de la estación 0030228 en Xalapa, Veracruz, México, proporcionados por Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de 1971 a 2011 (SMN, 2011).

Para establecer el recurso solar en Xalapa se utilizaron los siguientes parámetros: irradiación, número de días nublados y temperatura media. Además, se consultaron los datos de NASA Surface Meteorology and Solar Energy Locate RetScreen Data de la National Aeronautics and Space Administration (NASA); se ingresaron las coordenadas del lugar de estudio para obtener los datos de energía solar típicos de la zona (NASA, 2010). Los datos del SMN y de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy Locate RetScreen Data fueron analizados en una hoja de cálculo de Excel para estimar el recurso solar y el potencial típico de energía solar en Xalapa, Veracruz por mes y por estación del año.

Mediciones y cálculos de diseño

Los cálculos de diseño del prototipo consistieron en la aplicación y adaptación de métodos y ecuaciones matemáticas para apoyar el dimensionamiento y la predicción del funcionamiento del prototipo. Como parte de las consideraciones de diseño, se realizaron mediciones y análisis fisicoquímicos del lactosuero que se produce en la región. Los análisis y mediciones se realizaron bajo condiciones atmosféricas en Xalapa, Veracruz. Los parámetros medidos fueron: densidad absoluta, pH (parámetro considerado de interés debido a su relación con el fenómeno de corrosión en equipos industriales de procesamiento) y punto de ebullición.

Para la medición de la densidad absoluta de la muestra de lactosuero se utilizó un hidrómetro regular para líquidos pesados, para la medición del pH se utilizó un potenciómetro Lutron modelo pH-207 (precisión de 0.01 pH). Para delimitar el punto de ebullición se utilizó una placa calefactora Barnstead Thermolyne modelo 1900. Sobre esta placa calefactora se colocó un vaso de precipitados de vidrio con un volumen de 250 ml, donde se midió un volumen de 250 ml de suero de leche. El punto de ebullición se determinó utilizando un termómetro de mercurio

Branan con capacidad de 150°C. Las mediciones experimentales se realizaron por triplicado.

Diseño y construcción del prototipo

Para completar los cálculos de dimensionamiento del prototipo de evaporador solar se determinaron cuatro apartados principales:

I) El volumen de agua a evaporar. Se calculó la concentración de masa drenada, la densidad y la masa de la solución (Chang, 2007). En primer lugar, se calculó la concentración de masa drenada, para lo cual fue necesario delimitar el soluto y la solución de suero en gramos utilizando el método de secado (AOACEU, 1990). De la misma manera se calculó la densidad de la solución. Para el cálculo del soluto de la solución se aplicó por triplicado el siguiente procedimiento:

1. En una balanza analítica marca Adventurer modelo AR2140 se pesó un vaso de precipitado de 50 ml vacío.

2. Se adicionaron 40 ml de muestra de lactosuero al vaso de precipitado y se volvió a pesar; se restaron los gramos del peso del vaso y se obtuvo la masa de la solución de lactosuero.

3. Se sometió a calentamiento el vaso de precipitado conteniendo la solución para evaporar toda el agua de la muestra de lactosuero, con una parrilla de calentamiento marca Barnstead Thermolyne modelo 1900. Se controló la evaporación en todo momento para que no ocurriera pérdida de muestra.

4. Una vez que la muestra quedó completamente seca, se procedió a dejar enfriar el vaso de precipitado y se pesó nuevamente en la balanza analítica con lo que se obtuvo la masa en gramos del soluto.

5. Se calculó la concentración de masa de la muestra y la densidad de la muestra.

6. Conociendo de antemano la concentración a la que se desea llegar (15% de masa seca), se calculó la masa de la solución a dicha concentración.

7. Se colocó el vaso de precipitado con el soluto seco en la balanza y se fue adicionando agua destilada hasta llegar al peso deseado (paso 6).

8. Se observó el volumen que correspondió al peso del paso 6 y se calculó nuevamente la densidad.

Se realizó el cálculo del volumen a evaporar de agua a una concentración final del 15% de masa seca y un volumen inicial (carga de alimentación) de 10 litros.

II) Con una bomba de vacío se calculó la presión de vacío (Cengel, 2009). En cuanto a los cálculos en este parámetro, fue necesario definir la temperatura de operación del proceso de evaporación (40°C), temperatura recomendada para no degradar los nutrientes del lactosuero (Requena y Gómez, 2004). Después se investigó la presión absoluta (presión manométrica) proporcional a dicha temperatura y por último se realizó el cálculo de la presión de vacío, conociendo de antemano la presión atmosférica de Xalapa (0.84 KPa), utilizando las variables termodinámicas del lactosuero como las del agua debido a su elevada dilución.

III) Sistema de calefacción por colector solar plano. Se efectuaron cálculos de la eficiencia del colector, calor sensible (Perales, 2007), calor de evaporación y calor latente (Cengel, 2009). El objetivo primordial fue determinar el área superficial de captación del colector solar plano necesaria para la demanda de energía térmica en la ubicación de operación. Se utilizaron los datos de irradiancia promedio del Surface Meteorology and Solar Energy para Xalapa, así como la eficiencia más cercana de los captadores solares planos, es decir, 50% de eficiencia (Perales, 2007). Se calculó el calor de evaporación que correspondió a la demanda de energía térmica

del proceso de evaporación con las condiciones de operación esperadas en el prototipo, nuevamente se consideraron los parámetros termodinámicos del lactosuero equivalentes a los del agua. El calor latente fue determinado y se multiplicó por el volumen de agua a evaporar calculado en el apartado I. Igualmente, el calor sensible fue calculado y el flujo volumétrico correspondió a la carga de alimentación por día elevando la temperatura de la carga de 14°C a 40°C.

IV) Cálculos del intercambiador de calor. Diámetro de tubería (Perales, 2007), número de Reynolds, Nusselt (circulación forzada), coeficiente de transferencia de calor por convección, primera ley de la termodinámica aplicada en una tubería (Manrique, 1984). Los cálculos consistieron en determinar el diámetro y la longitud del tubo que conformó al serpentín. En primer lugar, fue calculado el diámetro de la tubería utilizando una constante para la tubería de cobre de 2.2 y un caudal típico para colectores solares planos de 0.132 m³/h (Perales, 2007).

Posteriormente, se calculó el número de Reynolds, utilizando propiedades del agua a la temperatura de operación que fueron las siguientes: densidad = 994.59 Kg/m³, calor específico = 4.1784 x 10³ J/kg.K, viscosidad cinemática = 0.658 x 10⁻⁶ m²/s y un flujo másico de 10 kg/min. Con el Número de Reynolds se determinó el tipo de flujo y se calculó el Número de Nusselt y un Número de Prandtl = 4.34. Con los números de Reynolds y el de Nusselt se calculó el coeficiente de transferencia de calor conociendo la conductividad térmica del agua = 0.628 W/mK. Por último, se determinó la longitud de la tubería aplicando la primera Ley de la Termodinámica al tubo y mediante los datos encontrados en los pasos anteriores.

Utilizando los datos de los pasos anteriores, se realizó la construcción del prototipo, la cual consistió en la selección y adquisición de los equipos y materiales que posteriormente sirvieron para el ensamblaje del prototipo y su conformación. Adicionalmente, las tuberías del sistema de calefacción al tanque evaporador se aislaron con espuma de polietileno para minimizar pérdidas de calor.

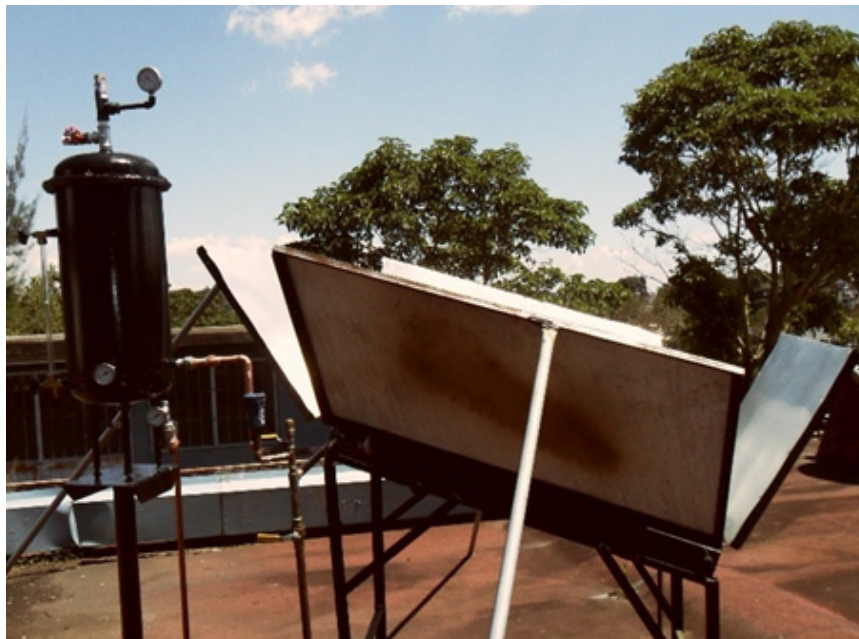


Figura 2. Prototipo de evaporador solar. (Fotografía de Ricardo Musule, 2010, archivo particular).

Resultados

Características y descripción del prototipo

En la Figura 2 se muestra el prototipo evaporador solar que se diseñó e instaló en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana región Xalapa:

Las especificaciones por elemento son las siguientes:

- *Captador solar plano:* Se instaló un colector solar plano de dimensiones 1.2 x 0.75 m, constituido por vidrio templado y tuberías aletadas pintadas de color negro. Adicionalmente, cuenta con reflectores autoajustables para el mejor aprovechamiento de la radiación solar difusa de la zona. El líquido de calefacción empleado fue agua.
- *Intercambiador de calor:* Dentro del cuerpo del evaporador se implementó un serpentín de tubería de cobre (aproximadamente 1/2" de diámetro) por el que circuló el líquido de calefacción proveniente del captador solar.
- *Cuerpo del evaporador:* Se adaptó un tanque de material férreo con un volumen aproximado de 40 litros, donde se instalaron las respectivas válvulas de alimentación y descarga, los instrumentos de medición (termómetro, vacuómetro y control de nivel) y el intercambiador de calor en forma de serpentín en su interior, se bridó con ocho tornillos y se utilizó empaque para poder cerrar herméticamente y al final se pintó de color negro.
- *Bomba de vacío:* Se utilizó una bomba de vacío de ½ HP marca AVALY modelo VA-50N para generar la presión de operación dentro del cuerpo del evaporador.
- *Bomba de circulación:* Se instaló una bomba de circulación de ¾" y 1/25 HP marca Grundfos modelo UP15-10SU7P/TLC en las tuberías del sistema de calefacción para favorecer el intercambio de calor.
- *Contenedor del concentrado:* Se adquirió un recipiente plástico de 10 litros para depositar el concentrado al término del proceso de evaporación.

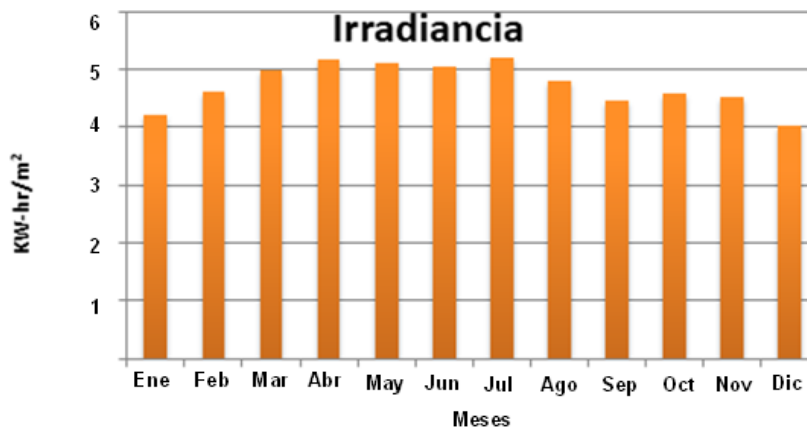


Figura 3. Comportamiento mensual de la irradiancia en Xalapa. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de 1971 a 2011 (SMN, 2011).

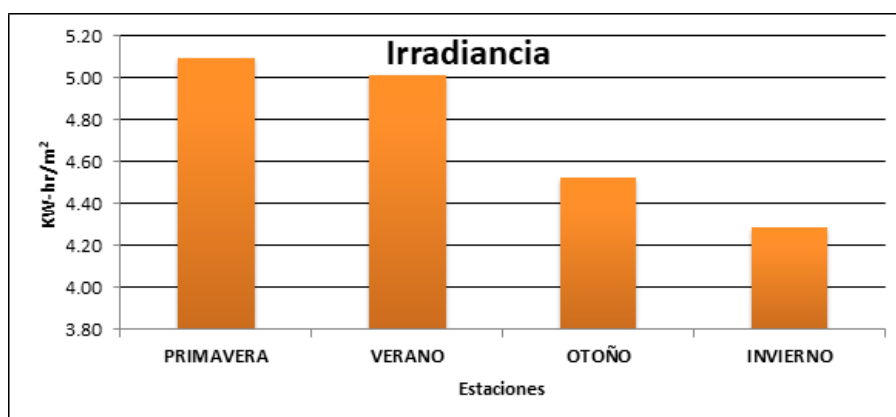


Figura 4. Comportamiento estacional de la irradiancia en Xalapa. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de 1971 a 2011 (SMN, 2011).

Estimación del recurso solar de Xalapa

En la Figura 3 se muestra el comportamiento mensual de la irradiancia en Xalapa.

Similarmente, se muestra el comportamiento estacional de la irradiancia en Xalapa (Figura 4).

Realización de mediciones y cálculos para el diseño

En la Tabla 1, se muestran los resultados de las mediciones y análisis fisicoquímicos realizados a

la muestra de lactosuero producido en la región.

Cálculos de diseño por apartados

Volumen de agua a evaporar. En la Tabla 2, se muestran los resultados del método de pérdida de peso por secado utilizado para determinar la concentración de masa seca del lactosuero producido en la región.

Por último, la Tabla 3 resume los resultados de los cálculos de diseño para el prototipo evaporador solar.

Tabla 1. Mediciones y análisis fisicoquímicos

Parámetro	Instrumento de medición	Valor	Unidad
Densidad absoluta	Densímetro	1.02	g/ml
pH	Tiras reactivas	4 a 5	-
	Potenciómetro	4.4	-
Punto de ebullición	Termómetro de Hg	96	°C

Tabla 2. Determinación de la concentración de masa seca del lactosuero y otros parámetros

Concepto	Valor	Unidad
Densidad lactosuero diluido	0.97	g/ml
Concentración en masa seca	8.50	%
Densidad del lactosuero concentrado (15% MS)	1.09	g/ml
Volumen de agua a evaporar	5.00	l
Equivalencia de Kg de agua a evaporar	4.25	Kg

Tabla 3. Resultados de cálculos de diseño para el prototipo evaporador solar

Concepto	Valor	Unidad
Presión de operación (vacío)	78.20	kPa
Calor sensible	0.30	Kwh/carga
Calor latente	2.84	Kwh/carga
Calor de evaporador	3.14	Kwh/carga
Área de captación	1.56	m ²
Diámetro de tubería	1.15	cm
Reynolds	21623.37	-
Nusselt	121.52	-
Coeficiente de transferencia de calor	5087.80	w/m ² k
Longitud de tubería (intercambiador de calor)	1.510	m

Discusión

Con base en el apartado anterior, se logró el diseño y la construcción de un prototipo de evaporador solar, basado en el procesamiento de lactosuero. Sin embargo, analizando los datos del recurso solar (Figuras 3 y 4), se puede observar que el recurso solar decrece claramente en las estaciones de otoño e invierno y, considerando también que las temperaturas ambientales también disminuyen, se puede esperar un comportamiento discontinuo de la fuente energética, lo que puede impedir la factibilidad de un autoabastecimiento térmico.

La ciudad de Xalapa, Veracruz se caracteriza por presentar frecuentemente fenómenos climatológicos de lluvia y de nubosidad, al encontrarse ubicada su zona urbana asociada a un ecosistema del tipo mesófilo de montaña. Por lo tanto, es de vital relevancia considerar que se requerirá de una fuente térmica adicional al recurso solar, lo que podría permitir obtener el calor de proceso en los puntos en el que el recurso solar sea escaso e intermitente, por ejemplo, en días nublados, con lluvias o incluso en los periodos nocturnos.

Conclusiones

Se ha diseñado un evaporador solar para la deshidratación de lactosuero con el fin de facilitar su manipulación (transporte) bajo las condiciones de la ciudad de Xalapa. El prototipo de evaporador busca promover el aprovechamiento del lactosuero para evitar y reducir su gestión como residuo y los impactos negativos al ambiente por contaminación del agua.

Con base en lo encontrado en el presente trabajo, se considera necesario la realización de futuras investigaciones que se enfoquen en el estudio de la operación del prototipo a lo largo del tiempo y que analicen las características de los productos obtenidos del proceso de evaporación.

Adicionalmente, se considera pertinente el desarrollo de futuras versiones del prototipo, por ejemplo, incluir un sistema de suministro paralelo de energía térmica a la fuente solar (donde esta podría convertirse en un sistema auxiliar), lo que podría asegurar la continuidad del proceso de evaporación a lo largo del tiempo (día y noche y en días con nubosidad y lluvia).

Con base en lo analizado durante este trabajo se concluye que, si el evaporador solar se utiliza en la ciudad de Xalapa, Veracruz, México, se tiene que considerar el uso de otro sistema energético como suministro primario de energía (combustibles o electricidad), el cual podría ser una fuente de energía convencional, alternativa o renovable. En resumen, se recomienda la transformación del prototipo a uno del tipo híbrido.

Agradecimientos

A la Red de Eficiencia Térmica Industrial RIETI-CYTED por la oportunidad de intercambiar experiencias sobre energías renovables y aprender de los conocimientos obtenidos en investigaciones realizadas por las instituciones participantes. Ricardo Musule Lagunes agradece como colaborador del proyecto CONAHCYT-PRONACES 319333 relacionado con la aplicación de ecotecnologías. Agradecemos profundamente las revisiones detalladas y las valiosas sugerencias proporcionadas por los dos árbitros y la valiosa retroalimentación del Dr. Gómez Arias, su contribución ha favorecido enormemente al manuscrito.

Referencias

- Abaigar, A. (2003). El lactosuero en la alimentación del ganado porcino. GANADERO, Navarra, España.
- AOACEU. (1990). Official methods of analysis - supplements: Changes in Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemist, Association of Official Analytical Chemists. Chicago.
- Cancino, B., Espina V., y Orellana, C. (2006). Whey concentration using microfiltration and ultrafiltration. *Desalination*, 557-558.
- Cengel, Y. (2009). Termodinámica. 6 a ed. McGrawHill. México.
- Chang, R. (2007). Química. 8 a ed. McGrawHill. México.
- Chegini, G., & Taheri, M. (2013). Whey powder: process technology and physical properties: a review. *Middle-East journal of scientific Research*, 13(10), 1377-1387. [https://idosi.org/mejsr/mejsr13\(10\)13/14.pdf](https://idosi.org/mejsr/mejsr13(10)13/14.pdf)
- Cochachin-Carrera, B., Moreno-Cuevas, J., y Carvajal-Mena, N. (2023). Effects of concentration by block freezing and vacuum evaporation on the physicochemical properties and digestibility of whey. *CyTA-Journal of Food*, 21(1), 313-320.
- Cunningham, A. E. (2000). Optimización de rendimientos de quesería. OEA, Saltillo, Coahuila, México.
- De la Cruz, D.Á. (2018). Potencial de aprovechamiento del suero de queso en México. *Agroproductividad*, 11 (7), 101-106.
- Flores-Mendoza, A. P., Hernández-García, H., Cocotle-Ronzón, Y., & Hernandez-Martinez, E. (2020). Methanogenesis of raw cheese whey: pH and substrate-inoculum ratio evaluation at mesophyll temperature range. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(7), 1946-1952. <https://doi.org/10.1002/jctb.6391>
- Geankoplis. (2007). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 4 a ed. CECSA, México.
- Gómez Alcántara, A., Cervantes Escoto, F., Altamirano Cárdenas, J. R., & Garza López, J. M. (2009). Alternativas a la problemática ocasionada por lactosueros en el Valle de Tulancingo, Hidalgo. Universidad Autónoma de Chapingo, México.

- Khetni, M. (2018). Design, construction and evaluation of a vacuum evaporation system for the concentration of aqueous whey protein solutions (Disertación doctoral, Stellenbosch: Stellenbosch University).
- Masera, K., Tannous, H., Stojceska, V., y Tassou, S. (2023). An investigation of the recent advances of the integration of solar thermal energy systems to the dairy processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 172, 113028.
- Manrique, J. (1984). *Energía Solar Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas*. HARLA, México.
- McCabe, W., y Smith, J. (2007). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. 7ª ed. McGrawHill. México.
- Nadal-Bach, J., Bruno, J. C., Farnos, J., y Rovira, M. (2021). Solar stills and evaporators for the treatment of agro-industrial liquid wastes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110825.
- Najar-Almanzor, C. E., Velasco-Iglesias, K. D., Nunez-Ramos, R., Uribe-Velázquez, T., Solis-Bañuelos, M., Fuentes-Carrasco, O. J., ... y Carrillo-Nieves, D. (2023). Microalgae-assisted green bioremediation of food-processing wastewater: A sustainable approach toward a circular economy concept. *Journal of Environmental Management*, 345, 118774.
- NASA. (2010). Surface meteorology and Solar Energy website, revisado en mayo 14 del 2010 de <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>.
- Ozel, B., McClements, D. J., Arikian, C., Kaner, O., y Oztop, M. H. (2022). Challenges in dried whey powder production: Quality problems. *Food Research International*, 160, 111682. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111682>
- Pandey, A. K., Kumar, R. R., Kalidasan, B., Laghari, I. A., Samykano, M., Kothari, R., ... y Tyagi, V. V. (2021). Utilization of solar energy for wastewater treatment: Challenges and progressive research trends. *Journal of Environmental Management*, 297, 113300.
- Perales, T. (2007). *Guía del instalador de energías renovables*. LIMUSA, México.
- Perry, R., & Green, D. (2008). *Manual del Ingeniero Químico*. Volumen II. McGrawHill, Madrid, España.
- Petruccioli, M., Raviv, M., Di Silvestro, R., y Dinelli, G. (2019). Agriculture and agro industrial wastes, by-products, and wastewaters: Origin, characteristics, and potential in bio-based compounds production. In: M. Moo-Young (Ed.), *Comprehensive Biotechnology* (3rd ed., pp. 477–490). Elsevier.
- Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S. M. A., y Rahim, N. A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 133-148.
- Quijera J. A., Gonzalez M., y Labidi J. (2010). Integration of a solar thermal system in a dairy process. *Renewable Energy* 36, 1843-1853.
- Requena, A. J., y Gómez O. J.J. (2004). Sistema de control del proceso de evaporación a vacío. *Tec. Alim.* 01-06.
- Serpa L., Rauber F. F., Cichoski A. J., y Di Luccio M. (2005). Assessment of ultrafiltration and vacuum evaporation on whey protein concentration. *EMPROMER*. 01-09.
- SMN. (2011). SMN website, revisado en mayo 19 del 201 <http://smn.cna.gob.mx>.

Souza, R. R., Gimenes, M. L., Costa, S. C., & Müller, C. M. (2008). Eliminación de grasas del suero del queso para obtener proteínas y lactosa. *Inf. Tec.* 19, 41-50. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642008000200006>

Torres-Martínez, Q., y Romero-León, K. (2020). Alternativas tecnológicas para uso del lactosuero: valorización económica de residuos. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 30(55). <https://doi.org/10.24836/es.v30i55.908>

Valencia E., y Ramírez M. (2009). La industria de la leche y la contaminación del agua. *Elem*, 73, 27-31. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=29411996004>

Manuscrito recibido: 29 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 14 de octubre de 2024

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 2024