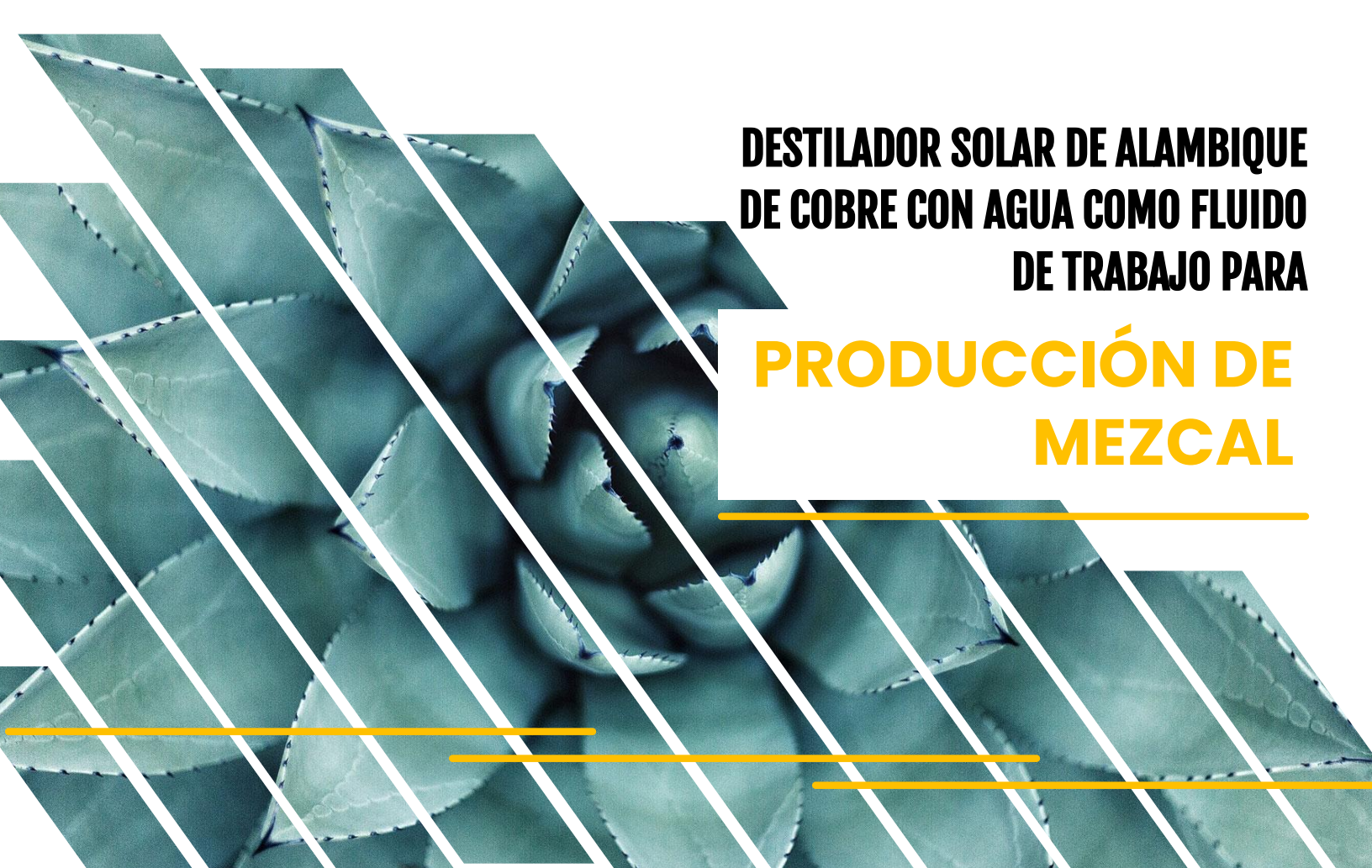




DESTILADOR SOLAR DE ALAMBIQUE DE COBRE CON AGUA COMO FLUIDO DE TRABAJO PARA PRODUCCIÓN DE MEZCAL

Ascencio San Pedro David Eduardo*, Berra Ruiz Gonzalo*, Rincón Mejía Eduardo A.*, Lentz Herrera Álvaro*

* Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería, UNAM, ascenciodavid@hotmail.com

**Ingeniero Mecatrónico, Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca, berraruizgo@live.com.mx

***Programa de Energía, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, San Lorenzo 290, Ciudad de México, 03100, México, rinconsolar@hotmail.com

** Programa de Energía, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, San Lorenzo 290, Ciudad de México, 03100, México, allentz7018@gmail.com

RESUMEN

El proceso de destilación de mezcal en México, data del siglo XVIII [1] y hasta la fecha se siguen empleando fuentes no renovables de energía para su producción. Por lo cual en este trabajo se expone el diseño de un destilador solar para que por medio de agua calentada a través de concentradores solares parabólicos (CPC's) y haciéndola pasar por una espiral de cobre satisfaga los requerimientos de potencia y temperatura para un proceso óptimo de destilación y evitar con esto el uso de fuentes no renovables de energía y un compuesto no deseado en la elaboración del mezcal, tal como las puntas las cuales se obtienen cuando el calentamiento rebasa la temperatura de 90° C (esta temperatura se obtiene cuando el proceso se realiza de manera artesanal y no hay un control de la misma) Como resultado a través de ecuaciones, gráficas y simulaciones realizadas por medio del software SolidWorks, se obtuvo que con este tipo de cambio es posible dejar atrás un proceso que lleva aproximadamente III siglos sin modificación.

INTRODUCCIÓN

El mezcal tiene origen en la palabra náhuatl "mexcalli" que significa maguey cocido, entre 2016 a 2018 aumentó su producción [2], las distintas clases del mezcal dependen del maguey y del clima siendo de denominación de origen, ocho estados del país los cuales son: Oaxaca, Zacatecas, Durango, Guanajuato, Guerrero, San Luis Potosí, Tamaulipas y Michoacán [3].

Es una bebida destilada de mostos fermentados, procedentes de piñas de maguey cocidas y maceradas; su proceso principalmente consta de cinco etapas, las cuales son: jimado, cocción, molienda, fermentación y destilación. Una de las etapas importantes donde se da toda una serie de sucesos termodinámicos, de transferencia de calor y de intercambios de fluidos es en la etapa de destilación, por lo que el ahorro de energía es de particular importancia en esta etapa.

La destilación del mezcal consiste en calentar un alambique de cobre y elevar la temperatura de 80 a 90 [°C], después de ahí se separa la mezcla de alcohol y se lleva hasta un condensador a dónde ocurre un intercambio de calor con agua, obteniendo el mezcal destilado.

Sin embargo, *en el proceso del calentamiento del alambique se desperdicia demasiada energía proveniente de leños de diferentes tipos de vegetación o gas natural*, y debido a que la mezcla inicial (piñas de maguey cocidas y fermentadas con agua) se empieza a calentar y después a sobrecalentar (proceso no controlado) se producen las llamadas “puntas” y “colas”, respectivamente, las cuales pueden tener un efecto perjudicial a la salud.

Por lo cual es **importante cambiar el sistema de calentamiento del alambique de cobre y sustituirlo por agua caliente** para que se tenga la opción que esta sea calentada a través de Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC's) con tubos evacuados, estos últimos tienen una vida útil de aproximadamente 20 años y requieren solamente de limpieza para su correcto funcionamiento.

Descripción del sistema en el proceso artesanal de elaboración de mezcal

En el proceso de elaboración de mezcal, se utiliza un alambique de cobre el cual contiene el mosto fermentando (Agua y piña de maguey cocida y macerada) a temperatura ambiente, después en la parte inferior de este, se empieza a calentar por medio de gas o leños provenientes de árboles de cada región en donde se elabora.

Posteriormente la mezcla pasa hacia un capitel y cuello para finalmente condensarla, en un condensador de cobre enfriado por agua, obteniendo el mezcal destilado, como se muestra en la **figura 1**.



Figura 1. Componentes de la destilación solar de mezcal en la planta de mezcal Bravero, Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca.

Diseño del alambique con espiral de cobre con agua en el interior

La propuesta de cambio consiste en hacer pasar agua caliente a 88°C, al interior de una espiral de cobre la cual está en contacto con el alambique para que se satisfaga el calentamiento del mezcal. El prototipo completo se muestra en la **figura 2**, en donde el alambique con la espiral de cobre se muestra a la derecha, en la **figura 3**, se muestra un acercamiento a la espiral de cobre con el alambique y en la **figura 4** se muestra el alambique de cobre con la espiral y capitel en vista explosionada.



Figura 2. Prototipo de destilador de alambique fabricado en cobre, incluida la modificación de la espiral de cobre alrededor del alambique

Las medidas del alambique se tomaron de las medidas reales de la planta de Mezcal Bravero, ubicada en Miahuatlán de Porfirio Díaz en Oaxaca, el cual tiene una forma cilíndrica con un Diámetro externo de 0.6743 [m] y una altura de 0.840 [m].

El diámetro externo de la espiral de cobre es de 0.0667[m], el diámetro interno de 0.0642 [m], la longitud de 0.3530[m], con un numero de pasos (vueltas) de seis.

Diseño de los concentradores parabólicos compuestos (CPC's)

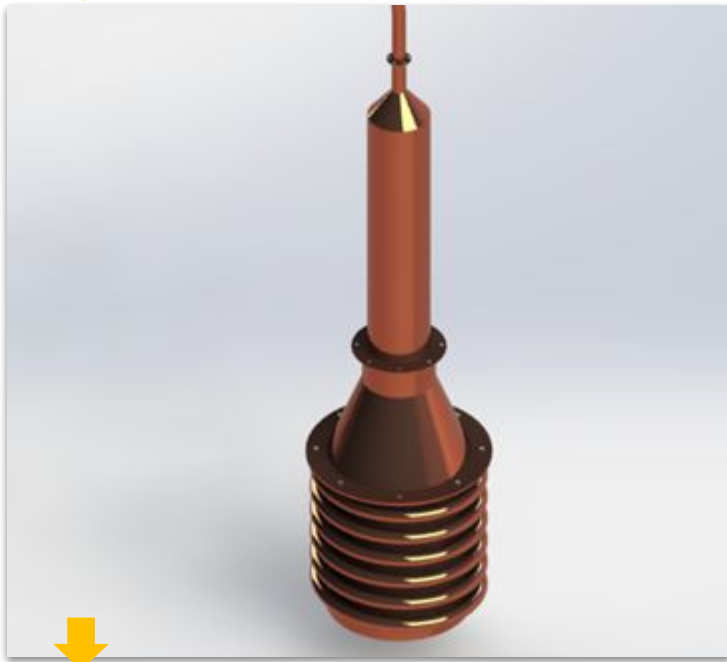


Figura 3. Alambique con la espiral de cobre en el exterior.

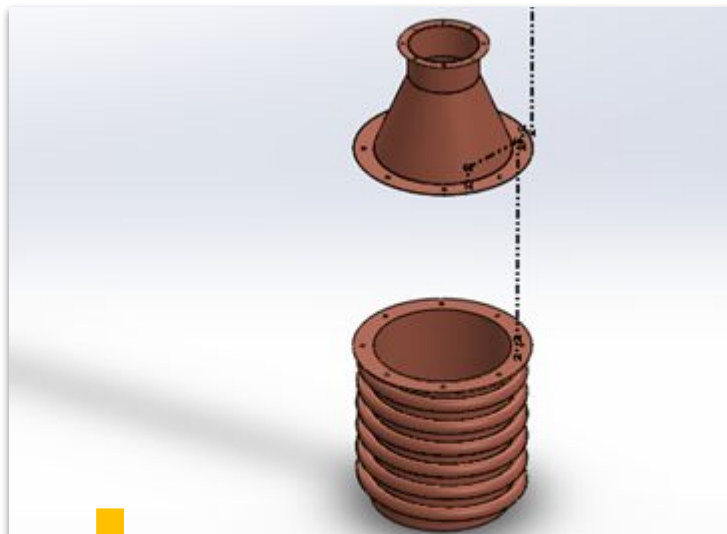


Figura 4. Vista explosionada del alambique con la espiral en el exterior y tapa.

El agua debe de ser calentada desde una temperatura ambiente de 18.1857°C , la cual corresponde al promedio de temperatura ambiente del año 2020 [4] en la azotea de la Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca (latitud de 16.8201 y una longitud de -96.7993).

Hasta una temperatura de , por lo cual, para no utilizar fuentes no renovables de energía para tal fin, se propone utilizar los CPC's,

los cuales surgieron en los años 70 [5] para conseguir concentración solar mediante dispositivos estáticos [6], ya que consiguen concentrar sobre el receptor (tubo evacuado) toda aquella radiación que llega dentro del denominado "ángulo de aceptación" del colector.

Para ahorrar material y reducir los costos en la fabricación de estos, se utilizó el criterio de Rincón [7], como se muestra en la **figura 5**, en donde la parte amarilla es el tubo evacuado, la parte roja es la involuta y la parte azul las parábolas macrofocales y en la **figura 6** se muestra el CPC en 3D con el tubo evacuado

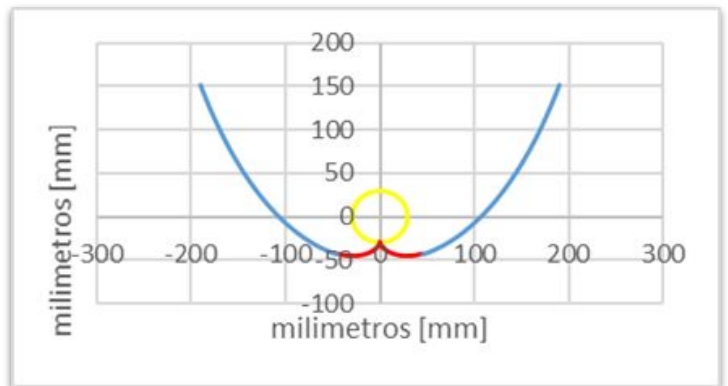


Figura 5. Diseño CPC por medio de Microsoft Excel tomando el criterio de Rincón.

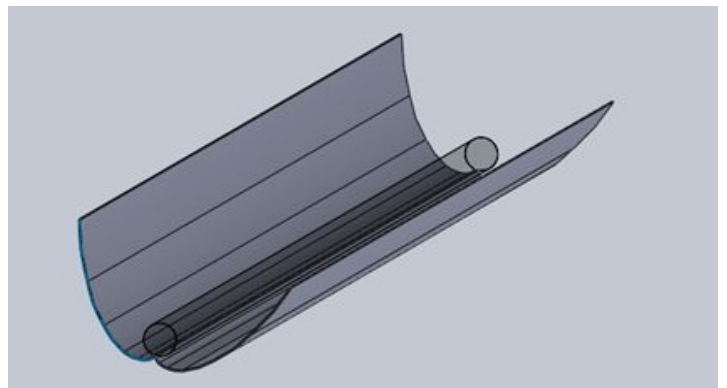


Figura 6. Diseño del CPC con el tubo evacuado

Después de varias ecuaciones contenida en la literatura [8] y [9] y conociendo los datos de la irradiación [4], en la ubicación antes mencionada, los CPC's y tubos, ambos con una longitud de 1.8 metros, necesarios para elevar la temperatura son 67 y las horas que pueden estar trabajando los CPC's sin necesidad de cambiar la orientación de estos (estando fijos sobre la azotea) son de 11:03 a 12:57 horas, con una radiación promedio durante el año 2020 de $501.7774 \text{ [W/m}^2\text{]}$

Diseño del ciclo

El ciclo completo, como se muestra en la figura 6 consta de los siguientes pasos:

1. Elevar la temperatura desde 18.1857°C , hasta 88°C , por medio de los CPC's.
2. Poner una válvula check (para que no haya retorno de agua), a la salida del arreglo de los CPC's y llevar el agua caliente a un termotanque (almacenamiento de agua caliente)
3. A la salida del termotanque poner una válvula de regulación de temperatura para que deje pasar el agua solo si está a 88°C
4. A la salida de la espiral de cobre poner una bomba de agua caliente de $0.16[\text{HP}]$ para llevar esta hacia el termotanque a una temperatura de 87.93°C .

Temperatura de salida de la espiral de cobre y potencia calorífica transferida al alambique

Se propusieron diferentes valores de flujo másico del agua a la entrada de la espiral de cobre, para conocer la temperatura de salida de la espiral de cobre, mediante la siguiente fórmula:

$$T_{m,o} = T_s - \left[\exp(-PLh/mC_p) \right] [T_s - T_{m,i}]$$

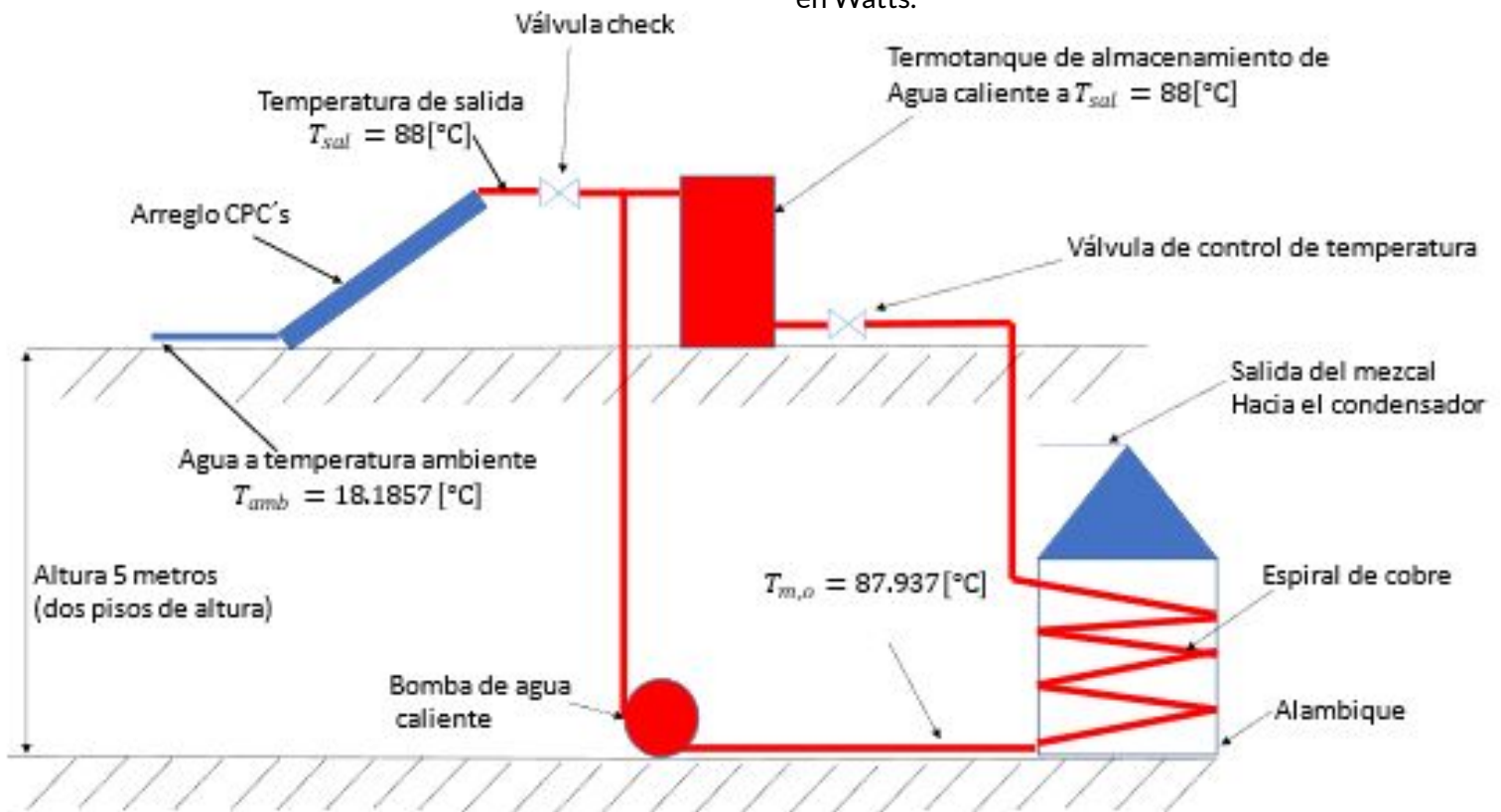
En donde $T_{m,o}$ es la temperatura de salida en K, T_s es la temperatura superficial de la espiral de cobre en K, P es el perímetro del alambique de cobre en metros, L es la longitud de la espiral de cobre en metros, h es el coeficiente de convección dentro de la espiral de cobre en $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ es el flujo másico en $\frac{\text{Kg}}{\text{s}}$, C_p es el calor específico en $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ y $T_{m,i}$ es la temperatura de entrada a la espiral de cobre

La potencia transferida al alambique de cobre se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$Q = mC_p(T_{m,o} - T_s)$$

En donde Q es la potencia transferida al alambique en Watts.

➡ Figura 6. Ciclo completo de la propuesta.



Análisis de resultados

En la figura 7 se muestra el flujo másico de la espiral de cobre y la temperatura de salida de esta, en donde se observa que en un rango de $0 \text{ a } 0.13 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ disminuye la temperatura y de $0.13 \text{ a } 2.575 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ esta empieza a aumentar y en la figura 8 se muestra el flujo másico en la espiral de cobre y la potencia transferida al alambique en donde se observa que a mayor flujo másico aumenta la potencia, en donde a un flujo másico de $2.575 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$, la potencia calorífica transferida es de 681.92 [W] .

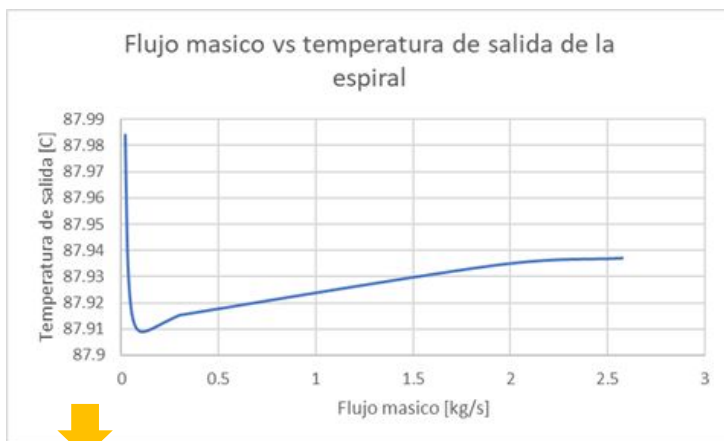


Figura 7. Flujo másico vs. temperatura de salida de la espiral de cobre.

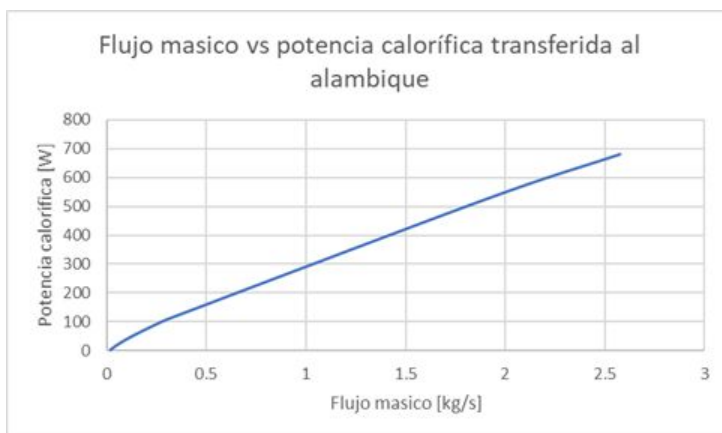


Figura 8. Flujo másico vs. potencia calorífica transferida al alambique.

Simulación realizada en Solidworks

Se realizó una simulación por medio de SolidWorks, en donde se muestra la distribución de temperaturas en Kelvins en la espiral de cobre y en el alambique, como se muestra en las figuras 9, 10 y 11, la primera muestra una vista isométrica, la segunda una vista superior (vista desde arriba hacia abajo) y la tercera una vista lateral, los valores que se eligieron para la simulación fue un flujo másico de $2.575 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ en donde a este valor la potencia transferida es de 681.92 [W]

La temperatura interior en el alambique se mantiene en un rango de 85.75°C a 84.55°C lo cual garantiza un proceso de destilación óptimo, y la temperatura mayor y menor en los dispositivos es de 86.15°C y 83.35°C , respectivamente.

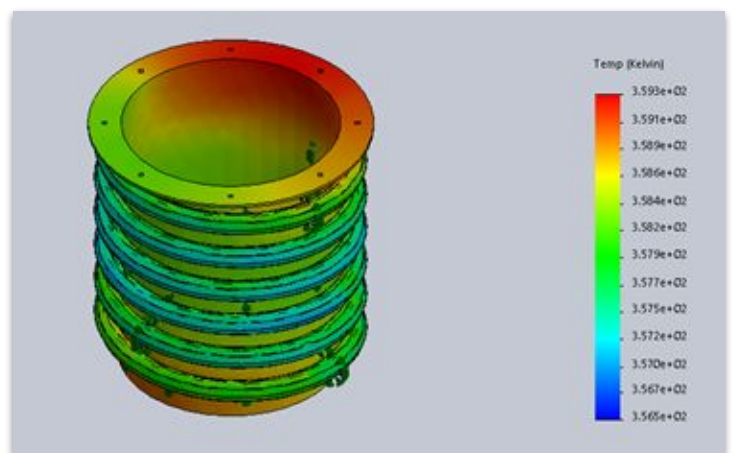


Figura 9. Distribución de temperaturas en Kelvins en la espiral y alambique de cobre, vista isométrica.

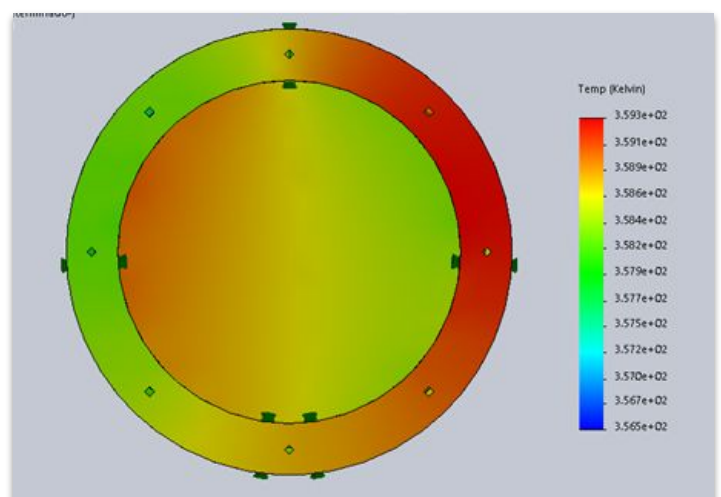


Figura 11. Distribución de temperaturas en Kelvins en la espiral y alambique de cobre, vista superior

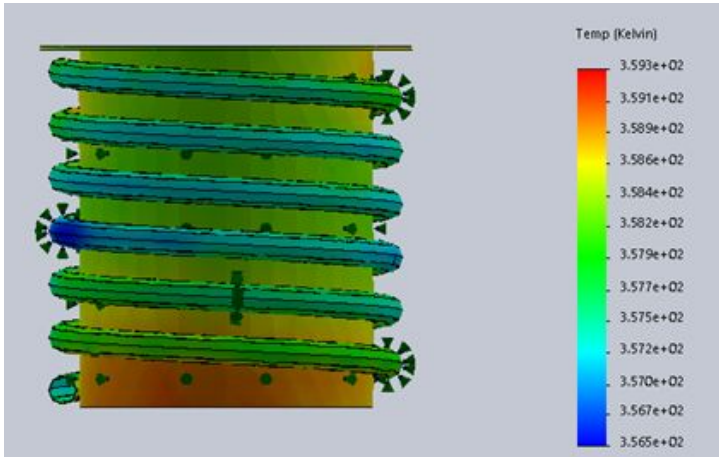


Figura 12. Distribución de temperaturas en Kelvins en la espiral y alambique de cobre, vista lateral.

Conclusiones

Se debe de poner aislante en la parte inferior del alambique para garantizar la adecuada distribución de temperaturas.

El flujo másico de agua a la entrada de la espiral debe de tener un valor de 2.575 [kg/s] para transferir una potencia calorífica al alambique de $Q=681. \text{ [W]}$

y con esto evitar poner otra bomba a la salida del tanque de almacenamiento por lo cual la altura recomendada es de 5 metros (dos pisos de altura convencionales en una construcción arquitectónica) debido a las condiciones de altura del alambique.

La propuesta garantiza la eliminación de las colas durante el proceso de destilación las cuales tienen efectos perjudiciales a la salud.

Los componentes tienen una vida útil de 20 años, es decir se puede estar destilando el producto sin necesidad de consumir fuentes no renovables de energía y a un mantenimiento que solo implica limpieza convencional en los componentes.

Finalmente se sugiere que se realice una prueba a escala diferente para conocer de manera física los requerimientos de los termotanques necesarios para garantizar la temperatura y que se pueda destilar el producto las 24 [h] al día, así mismo un sistema de control automatizado.

Bibliografía

- [1] México desconocido, 2021, disponible en <https://www.mexicodesconocido.com.mx/mezcales.html> (consultado el 23 de marzo de 2022)
- [2] CEDRSSA. (marzo 2019). Reporte la producción y el comercio de cerveza, tequila, y mezcal en México. http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/42producci%C3%B3n_comercio_mezcal_tequila_cerveza.pdf (consultado el 23 de marzo de 2022)
- [3] Gobierno de México. (s.f.). Se amplía zona de denominación de origen del mezcal. <https://www.gob.mx/se/articulos/se-amplia-zona-de-denominacion-de-origen-del-mezcal> (consultado el 23 de marzo de 2022)
- [4] NASA. Prediction of Worlwide Resources. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (consulta do el 23 de marzo de 2022)
- [5] Welford W.T., Winston R. "The optics of Non-Imagin Concentrators Light and Solar Energy", Academic Press (1978).
- [6] Collares-Pereira, M. "The relevance of No-Imaging optics for solar energy: a review". Revista de Engenharia Tecnica, IST, No.. (1995).
- [7] E. Rincon, M. Duran y A. Lentz. (2009). New solar air heater based on non-imaging optics for high temperature applications. Proceedings of the ASME 2009 3rd International Conference of Energy Sustainability ES2009, 1-6.
- [8] Jhon A. Duffie, William A. Beckman (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. New Jersey: Jhon Wiley. Jhon A. Duffie, William A. Beckman (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. New Jersey: Jhon Wiley.
- [9] Soteris A. Kalogiru (2009), Solar Energy Enginnering Processes and Systems. UK: Elsevier.