

Prototipo del Sistema Termosolar para Procesos de Cocción de Alimentos.

H. de Luna Velásquez¹, J.Fdo. Aguirre Sámano¹, L.A. Sánchez Olmos², M. Sánchez Cárdenas²
hector.dlv@gmail.com fernando.aguirre@upa.edu.mx

¹Universidad Politécnica de Aguascalientes, Calle Paseo San Gerardo No. 207. Fracc. San Gerardo. C.P. 20342.
Aguascalientes, Ags. Tel: (449) 442-14-00

ABSTRACT

Este proyecto está orientado al diseño de un prototipo para procesos de cocción de alimentos por medio de un concentrador cilíndrico parabólico, que por la geometría del mismo nos permite alcanzar hasta 400 °C. El principio básico del prototipo es usar el concentrador solar para poder calentar un aceite térmico, una bomba especial se encargará de circular el aceite por todo el sistema, una vez calentado el aceite se transporta por tubería aislada hasta el acumulador (principalmente para almacenar energía calorífica), el acumulador transportará el aceite previamente caliente hasta una plancha especial que en su interior el aceite calentará la misma a la temperatura necesaria para lograr procesos de cocción de alimentos y una vez que el aceite pierda calor la bomba lo circula de nuevo al concentrador solar para ser calentado. El concentrador solar se implementa un seguidor solar electrónico, se implementarán sensores en puntos clave y todo se controlará por un sistema de control que será alimentado por un sistema fotovoltaico tipo isla. Logrando así, cero emisiones de gases efecto invernadero a la atmosfera al ser implementado el sistema termosolar.

1. Introducción

En la situación actual la implementación de tecnologías sustentables muestran un desarrollo para la sustitución de procesos convencionales que son fuente de contaminación directa o indirecta en el planeta, muestra la viabilidad de desarrollar proyectos encaminados a nuevas aplicaciones donde se marque la permanencia a través de el ahorro económico, energético y su relación favorable con el medio ambiente

Es así que la capacidad de aprovechamiento energético y el alto rendimiento para procesos de media temperatura de los colectores cilíndricos parabólicos hace posible el manejo de esta tecnología para el abastecimiento de energía térmica a una plancha utilizada para la cocción de alimentos, sustituyendo el tradicional sistema de gas LP.

En el contexto de la dimensión actual, es más recurrente la implementación y sustitución de dispositivos que sean sustentables en aplicaciones o procesos que provocan efectos dañinos al medio ambiente. La necesidad de contribuir a la reducción de contaminantes es una oportunidad para reducir gastos de operación y propiciar un ahorro considerable.

Los concentradores solares son un tipo de intercambiadores de calor que transforman la energía de radiación solar en energía calorífica (es su principal objetivo). Este calor generado es transferido a un fluido (Normalmente agua o aceite) bajo el principio de convección interna forzada¹, donde dependiendo de la velocidad del fluido es la energía transferida. En los concentradores solares, este calor se concentra principalmente en tubería con alto índice de conducción de calor (Cobre, aluminio o algún tipo de aleación) para así mismo al calentarse este fluido puede realizar cualquier proceso que requiera calor. Cabe mencionar que la energía solar colectada puede almacenarse en un tanque de almacenamiento y que se puede utilizar posteriormente durante la noche y días nublados.

El colector cilíndrico parabólico se encuentra en la clasificación de media temperatura porque alcanza temperaturas de hasta 400° C gracias a su forma parabólico que concentran los rayos incidentes al espejo en el punto focal donde se encuentra el tubo absorbedor. Por el tubo absorbedor pasará el fluido para recoger ese calor concentrado.

El colector puede ser orientado de dos formas: este-oeste, de tal modo que sigue al Sol de norte a sur o bien el otro modo de orientación es norte-sur donde el colector presenta la latitud del lugar y sigue al Sol de este a oeste. El primer modo de seguimiento requiere un menor ajuste durante el día y la abertura siempre está frente al Sol a mediodía pero el rendimiento del colector durante la mañana y la tarde es ve reducido significativamente debido a los ángulos de incidencia pronunciados. El segundo modo de seguimiento tiene su mayor pérdida al medio día solar.

Por lo anterior, se realizan estudios evaluando diferentes parámetros como los que se muestran a continuación:

- Orientación del concentrador: El estudio de orientación del concentrador nos sirve para saber la eficiencia del concentrador solar y determinar cuál es la mejor posición en el lugar que se establezca.

¹ Convección Interna Forzada. Es una manera de transferencia de calor por convección que sufre un fluido cuando se encuentra dentro de una estructura que transporta fluidos (Tubería principalmente). En donde el fluido adquiere el calor dependiendo la velocidad de circulación.

- Eficiencia térmicas: La eficiencia térmica es el estudio que se tiene que tomar en cuenta la temperatura mínima y máxima que logra el sistema, tomando en cuenta las pérdidas térmicas por el concentrador, sistema hidráulico y plancha.
- Eficiencia del sistema: La eficiencia del sistema se toman en cuenta todas las mediciones que se tomaron en un rango de tiempo, ya que los parámetros como radiación solar varían un poco.

2. Sección Experimental

La experimentación al concentrador solar hasta ahora se ha llevado a cabo por medio de la medición de radiación solar y calculando teóricamente cuál es la temperatura que alcanza el fluido al pasar por el concentrador. El estudio de medición de radiación solar se realiza con instrumentación especial para poder comparar los resultados obtenidos experimentalmente.

2.1 Radiación medida en el estado de Aguascalientes

El dosímetro es de gran utilidad en la medición de radiación solar, ya que los valores varían la localización donde se integra cualquier proyecto termosolar. Con base a la radiación captada en un área determinada podemos conocer cuál es la temperatura que logrará el cuerpo que es irradiado por los rayos solares.

El análisis se llevó a cabo en las horas de mayor radiación solar que se determina que es a las 12:00 PM. A esa hora se obtuvo un valor de $1,200 \text{ W/m}^2$. Un valor muy elevado en comparación de países que tienen un alto desarrollo tecnológico en sistemas solares que su máxima radiación solar es de hasta $1,100 \text{ W/m}^2$, por lo que es muy viable utilizar sistemas solares en el estado gracias a sus altos niveles de radiación.

Con el valor de radiación se logra el diseño de un sistema solar, donde dependiendo la temperatura que se diseña alcanzar es la longitud del concentrador cilíndrico parabólico. Para los concentradores solares cilíndricos parabólicos la temperatura máximo es de $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y su longitud en general son amplias en las plantas termosolares.

2.2 Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico.

El concentrador solar es un sistema que colecta los rayos del sol en una determinada área para su máxima aprovechamiento y conversión de radiación solar a energía calorífica. En el sistema termosolar empleamos el concentrador solar para transferir la energía calorífica a un fluido (aceite térmico) y lograr aprovechar la energía en el sistema de cocción.

El diseño del sistema termosolar se realizó mediante el programa *Solid Works 2011*. Donde se dimensionó a las medidas establecidas para su presente contribución, en la siguiente ilustración se muestra el diseño del concentrador.

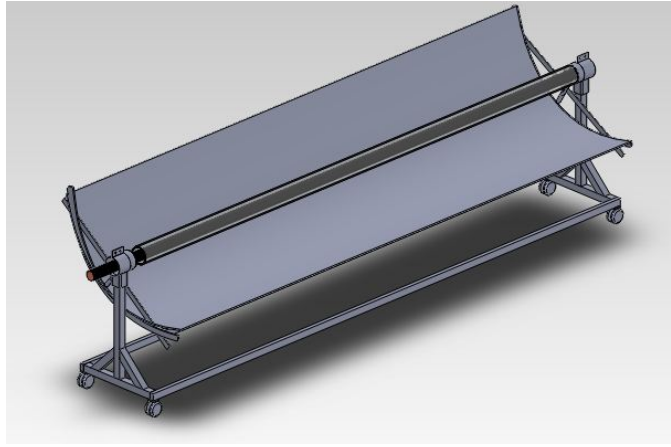


Ilustración 1 Diseño del concentrador solar cilíndrico parabólico.

Ya que el prototipo se realizó a una dimensión a escala cuenta con las siguientes medidas en metros:

- Longitud (L): 4 m.
- Amplitud de la parábola: 1.2 m
- Distancia del punto focal: 0.35 m
- Área de concentración: 4.8 m^2

Aplicando y despejando la ecuación 24 podemos calcular la temperatura de salida del fluido dependiendo la temperatura de entrada:

$$A_s = \pi DL = \frac{\dot{m} \cdot C_p (T_{m,o} - T_{m,i})}{q''_s}$$

Despejamos la temperatura de salida ($T_{m,o}$):

$$T_{m,o} = \frac{\pi DL \cdot q''_s}{\dot{m} \cdot C_p} + T_{m,i}$$

2.3 Análisis térmico del concentrador.

El concentrador solar su principal fuente de energía es la radiación solar, donde teniendo a qué hora hay mayor intensidad de radiación solar se realizan las mediciones de temperatura en la parte exterior del tubo concentrador y en la parte interior del fluido térmico, obteniendo datos para comparar y saber las pérdidas térmicas por convección natural en el exterior y convección forzada interna por donde circula el fluido. Para una mayor eficiencia en la captación solar se requieren materiales específicos para la absorción del mismo.

2.4 Tubo Receptor

La tubería en la cual se realiza la absorción de la radiación es tubo rígido de cobre de tipo K con medida nominal de 2". La tubería rígida de cobre se fabrica bajo la Norma ASTM B88. Se usa en instalaciones de Gas Combustible y Medicinal, tomas Domiciliarias de Agua Potable, además de uso Industrial donde las presiones y temperaturas de trabajo son severas.

Tubería tipo K

Medida nominal	Diámetro Exterior	Grueso de la pared.
2"	2.125"	0.072"
51 mm	53.975 mm	1.829

El estudio del sistema solar requiere la eficiencia térmica del concentrador solar, donde se intercambian los diámetros del tubo receptor en 2", 1" y $\frac{3}{4}$ " de tubería de cobre tipo K.

2.5 Fluido térmico.

Uno de los aspectos parámetros más importantes del colector es saber cuánto fluido másico necesitamos calentar, ya que es una de las variables que altera considerablemente el diseño del colector.

El fluido utilizado para la transferencia de energía a la plancha es el aceite mineral *Therminol XP* donde se tienen las siguientes especificaciones que se toma en cuenta para su propio calentamiento:

Especificaciones.	<i>Therminol XP</i>
Transferencia de calor en fase líquida.	-20 °C - 315 °C
Calor específico. (KJ/ Kg · K)	-50 °C - 1.53
	100 °C - 2.09
	200 °C - 2.45
	315 °C - 3.00

2.6 Cálculo teórico de temperatura de salida del concentrador

Dado que un colector solar Cilindro – Parabólico obtiene un flujo de calor uniforme sobre el tubo absorbedor podemos aplicar la siguiente ecuación de flujo de calor superficial constante. Como se muestra en la siguiente ilustración ocurre el calentamiento del fluido:

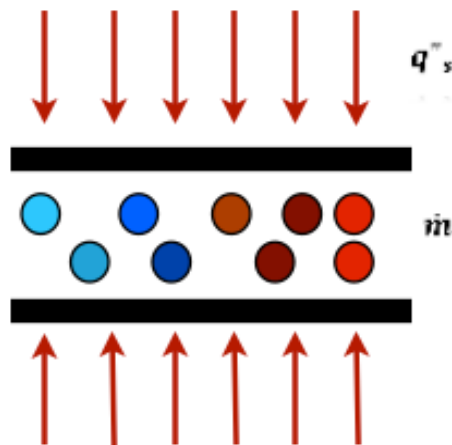


Ilustración 2 Calentamiento del Aceite

La variable que intercambiaremos para analizar el calentamiento del fluido es el diámetro de la tubería, ya que se utiliza de tres dimensiones distintas: 2", 1.5" y 1". Con el objetivo de determinar la mejor opción en éste sistema. Al variar éstos valores, obtenemos diferente temperatura de salida al circular el aceite por el concentrador cilíndrico parabólico donde de acuerdo a la fórmula para obtener $T_{m,o}$ podemos determinar la temperatura que se logra al entrar y salir el aceite.

Cuando se arranca el sistema, teóricamente el aceite se encuentra a temperatura ambiente a 25 °C aproximadamente, donde el CP varía dependiendo la temperatura y se tiene que tomar en cuenta para calcular cómo va a variar su temperatura al incrementar o disminuir su temperatura.

La bomba circulará el aceite a velocidades muy bajas buscando que se caliente el aceite lo más posible, ya que el aceite tendrá que circular varias vueltas en el sistema para que logre la temperatura que se requiere.

En la siguiente tabla se muestran los valores que se toman en cuenta para determinar la longitud del colector.

Variables	Valor
Flujo másico	0.05 kg/s
Diámetro de la tubería	2"; 1.5"; 1"
Transferencia de calor por toda la longitud del tubo.	6,000 w/m ²
Temperatura entrada	25 °C
Cp. a 30° C	2.878 KJ/ Kg · K

Tabla 1 Variables para el cálculo de Temperatura de salida

Por medio de la siguiente ecuación se determina la temperatura de salida que se logra:

$$T_{m,o} = \frac{\pi DL * q''_s}{\dot{m} \cdot C_p} + T_{m,i}$$

Al sustituir los valores se obtiene que en la primer circulación (cuando arranca el sistema) se obtiene la siguiente gráfica a diferentes dimensiones de tubo de cobre (2", 1.5" y 1"):

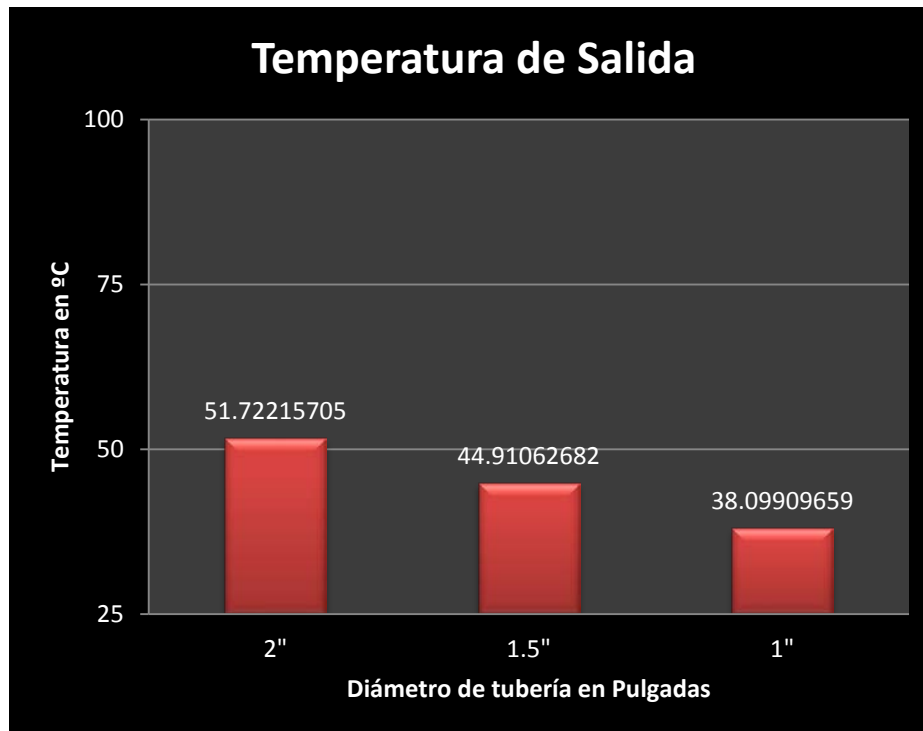


Tabla 2 Donde 1 es la tubería de 2", 2 es la tubería de 1.5" y el número 3 es la tubería de 1"

Cuando se utiliza tubería de 2" en el concentrador, teóricamente se obtiene un aumento de temperatura de 27 °C al salir del concentrador solar.

2.7 Pruebas de temperatura del concentrador cilíndrico parabólico.

El concentrador solar cilíndrico parabólico de acuerdo a su construcción se realizan pruebas con el tubo rígido de cobre tipo K de 2", ya que en los cálculos se obtiene que se calienta más el fluido que los demás diámetros de tubo. Con ayuda de los soportes se monta el tubo donde su punto focal es a 35 cm como se muestra en la ilustración 10.

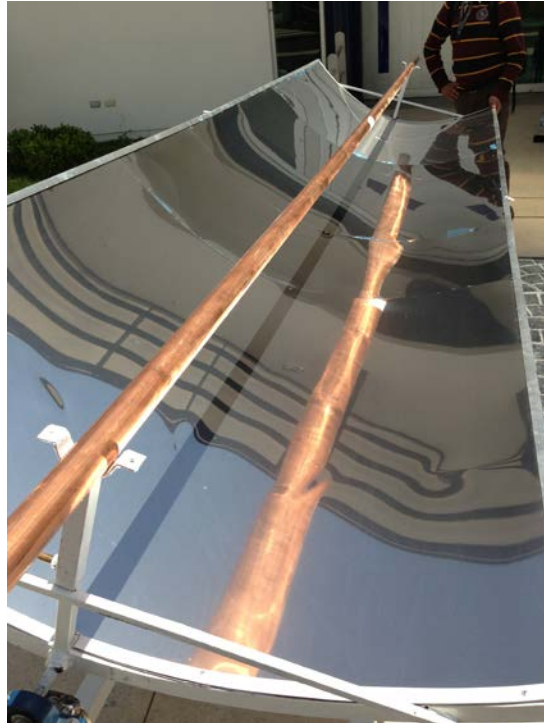


Ilustración 3 Calentamiento del tubo por el concentrador solar

Donde se logró una temperatura de 100 °C en un tiempo de 10 minutos ubicando el concentrador manualmente que se encuentre perpendicularmente al sol, como se muestra en la ilustración 10 la sombra que está por debajo del tubo de cobre es cuando está ubicado correctamente. En los anexos se muestran ilustraciones de las pruebas realizadas al concentrador solar con el tubo de 2".

2.8 Plancha Termosolar

La plancha termosolar es un sistema que utiliza un fluido caloportador, obtenido del colector solar para calentar la plancha a una temperatura necesaria y lograr la cocción de alimentos. La plancha está conformada por canales internos en forma de espiral. Tiene una entrada de fluido de $\frac{3}{4}$ " y salida de $\frac{3}{4}$ ". Está construida con acero inoxidable grado alimenticio.

En la ilustración 4 se muestra el interior de la plancha ya que su construcción se sellará como si fuera un recipiente y no se podrá abrir. Al diseñarla con estos canales en el interior permite que el calor se transfiera a la superficie de la plancha de manera uniforme y se tenga mayor área de contacto entre el aceite y la superficie de la plancha.

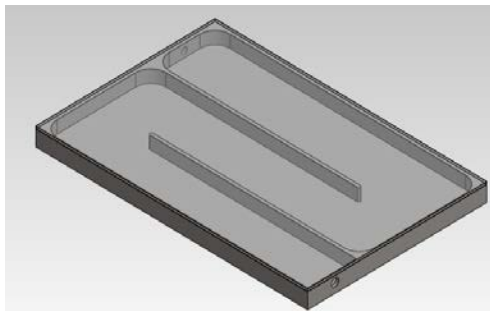


Ilustración 4 Ilustración de la plancha en el interior.

3. Resultados y discusión

Hasta este momento solo se han realizado pruebas al concentrador solar, por lo que falta evaluar el comportamiento del aceite térmico al ser calentado y la transferencia de calor de la plancha.

La temperatura en el tubo puede aumentar si se adaptan algunos parámetros como una superficie de pintura negro mate (Ya que el color negro tiene una absorbancia del 95%) para que se pueda absorber más energía solar.

Otro parámetro importante es cubrir el tubo absorbedor con un tubo de vidrio para evitar pérdidas de calor, al evitar pérdidas de calor el fluido puede lograr temperaturas más elevadas con pérdidas de calor muy poco significativas.

Se recomienda ampliamente el tubo SCHOTT SOLAR PTR 70 ya que es un tubo que se utiliza en las plantas termosolares, el tubo está diseñado para los concentradores termosolares cilíndricos parabólicos. El tubo cuenta con dos tubos concéntricos de diferentes diámetros, el de menor diámetro es un material de metal (cobre) que tiene una capa de pintura especial anti-corrosiva que ayuda a evitar la reflexión cuando la luz es emitida al tubo; el tubo de mayor diámetro está formado por un tubo de vidrio especial anti-reflexivo para evitar pérdidas ópticas cuando los rayos solares se concentran en el mismo. Entre los tubos concéntricos se encuentra un vacío para evitar la disipación de calor, esto para evitar la transferencia de calor por otro medio que no sea al fluido donde se encuentra circulando por el tubo de menor diámetro; otra aplicación que es importante al poner el tubo al vacío es que como se manejan altas temperaturas, el metal se encuentra expuesto a la oxidación y corrosión por estar a altas temperaturas y encontrarse en medio ambiente en presencia de oxígenos, entonces al encontrarse al vacío no se encuentra en presencia de oxígeno y no habrá oxidación. El tubo en general tiene una absorbancia de 95% y pérdidas térmicas y ópticas del 5%, lo que aumenta considerablemente la eficiencia del concentrador cilíndrico parabólico y podemos alcanzar la temperatura que deseamos más fácilmente que si no tenemos el tubo SCHOTT SOLAR.

El motor que se debe de utilizar debe ser especial con una potencia muy baja para que sólo circule el aceite térmico, recordando que el aceite térmico es menos denso que el agua y su densidad es muy baja por lo que se vería alterada una bomba normal que circula agua. Como es un sistema pequeño se recomienda utilizar un arreglo fotovoltaico que alimente la Bomba, éste sistema no requiere bomba ya que el concentrador solar solo sirve cuando hay sol, entonces no se necesita tener almacenada energía por parte de los paneles solares. El contacto con los proveedores debe ser por vía electrónica y vía teléfono para una comunicación más amplia y poder localizar la bomba que se requiere en el sistema termo solar.

Dentro del sistema hidráulico se recomienda tener tubos flexibles que transporten el aceite térmico de la bomba al concentrador, del concentrador al acumulador, del acumulador a la plancha y de la plancha a la bomba. Como es un sistema de investigación y los concentradores solares cilíndrico parabólicos tienen que estar en un lugar fijo, los tubos flexibles ayudan a trasladar, mover, orientar y manipular más fácilmente todo el sistema a comparación que si utilizáramos tubería rígida. Esta tubería rígida sólo se debe de usar cuando el sistema sea estático y ya sea aplicado en un lugar específico después de un estudio que avale la viabilidad y se instale.

4. Conclusiones

Todos los sistemas termosolares son sistemas que pueden aprovechar la energía del sol para una vasta cantidad de procesos, ya que es la fuente principal de energía para estos sistemas.

Los concentradores solares dependiendo su tipo pueden realizar trabajos a muy altas o bajas temperaturas dependiendo las necesidades que se quieran lograr. Actualmente se utilizan en su mayoría para el calentamiento de agua sanitaria para uso en residencial, por lo que ya tiene un avance muy amplio para los colectores planos.

La medición de la radiación solar es muy importante ya que es diferente en todos lados, aunque se tome un estándar en un lugar determinado como un estado que sea de $1,000 \text{ W/m}^2$ en un lugar determinado puede ser mayor o menor la radiación incidente, debido a que estiman la radiación en un área determinado calculando la radiación en un espacio fijo y por medio de la media aritmética estiman la radiación solar global al año o en un mes determinado.

La medición de radiación solar se debe realizar individualmente en el área donde se va a realizar el proyecto por un tiempo determinado y comparar con los resultados teóricos. Estas comparaciones son para determinar la eficiencia del sistema y poder detectar las pérdidas ópticas, geométricas y térmicas, donde las pérdidas térmicas son las más comunes en sistemas termosolares.

Los concentradores cilíndrico parabólico deben estar ubicados de norte – sur o este – oeste dependiendo el diseño del proyecto, pero siempre se tiene que tomar en cuenta un sistema que lo ubique siempre perpendicularmente a la posición del sol ya que el punto focal es altamente modificado por un centímetros de error y podríamos obtener pérdidas considerables de energía porque no se calentaría el fluido adecuadamente porque no alcanzaría la temperatura de operación requerida. El fluido que se calienta en el concentrador cilíndrico parabólico es uniforme, ya que en el tubo donde se concentra la radiación solar recibe la misma radiación en toda la longitud del tubo y el calentamiento del tubo es uniforme, por lo que dependiendo la velocidad que tiene el fluido dentro del tubo es la temperatura que va a lograr. Podemos concluir por el principio de intercambiadores de calor que en este tipo de concentradores a mayor velocidad menor temperatura lograda y a menor velocidad menor temperatura alcanzada. Por medio de éste principio podemos seleccionar la bomba, el flujo másico que requerimos, la temperatura que queremos alcanzar , entre otros parámetros.

Como radiación en el tubo absorbedor está en función a la captación de radiación, podemos diseñar la abertura de la parábola con el principio de que a mayor apertura mayor área de captación pero la distancia del punto focal es más distante. Podemos determinar la longitud del concentrador con el área de radiación que se recibe, porque a mayor captación menor longitud requerida para calentar el fluido.

Una alternativa que se encontró al no poder conseguir el tubo SCHOTT SOLAR como tubo receptor (El mejor en el mercado para sistemas termosolares cilíndrico parabólico) fue colocar un tubo de cobre tipo K

(Debido a sus especificaciones mencionadas), al seleccionar éste tipo de tubo receptor se anticipaba que habría pérdidas térmicas ya que se encuentra expuesto al ambiente y existe intercambio de calor por convección natural y radiación con el medio ambiente, lo que baja considerablemente la eficiencia del sistema y no podemos lograr la temperatura que se necesita para nuestro proceso.

Al ser un sistema pequeño que no requiere de maquinaria y estructuras grandes, es muy viable considerar la alimentación con sistemas fotovoltaicos ya que no se necesitan arreglos muy complejos y costosos, con esto nuestro sistema sería autosustentable y la única inversión es el mantenimiento al sistema para evitar pérdidas al recibir radiación solar.

El sistema como casi todo tipo de energía renovable es costoso al principio pero como ser un sistema del sector industrial las ganancias se recuperan rápidamente y obtendríamos ganancias por un plazo de tiempo muy amplio, antes de que se realizaran modificaciones como el cambio de batería en el sistema fotovoltaico (si llega a utilizar batería), el cambio del módulo fotovoltaico (después de los 30 años de uso o más), cambio de aceite térmico (A los 25 años de uso) y el cambio de lámina reflectora debido a estar expuesta al medio ambiente y sufrir oxidación y/o se vuelva opaco.

5. Agradecimientos

Al M.A. Juan Fernando Aguirre Sámano, por su apoyo, atención y basto compromiso a lo largo del proyecto

Al M.C. Luis Antonio Sánchez Olmos, por su dedicación, compromiso y atención al realizar el diseño del proyecto

6. Referencias

[1] Manual Solar Measuring Device. MacSolar.

[2] Dosímetro de radiación solar. <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-radiacion/dosimetro-de-radiacion-macsolar.htm>

[3] Radiación solar. <http://www.sol-arq.com/index.php/factores-ambientales/radiacion>

[4] Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice Hall.

[5] Ingeniería de la Energía Solar. Rafael Almanza Salgado, Felipe Muños Gutiérrez. Colegio nacional. Pág. 418

[6] Energía Solar Térmica. Miguel Ángel Sánchez Maza. Editorial LIMUSA. Pág. 230

[7] Tesis Doctoral: Sistema de Generación Eléctrica mediante calderas de vapor energizadas por la radiación solar concentrada. Javier Muñoz Antón.

[8] Análisis y propuestas de sistemas solares de alta energía que emplean agua como fluido calorífero. María José Montes Pita, Ingeniera Industrial. Departamento Energética y fluido mecánica.