

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Innovación Sustentable en Absorción y Transporte de
Calor por Concentración Solar Fresnel**

TRABAJO ESCRITO

Que para obtener el GRADO de
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD

Presenta:

Daniel Andrés Rincón García

Director de Tesis:

Dr. Luis Velazquez Contreras

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

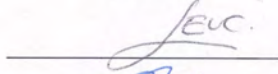

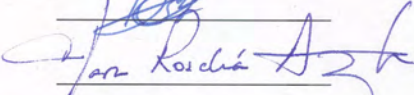
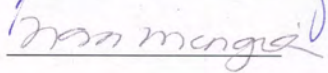
Universidad de Sonora
División de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial
Posgrado en Sustentabilidad
Maestría en Sustentabilidad
Especialidad en Desarrollo Sustentable

Hermosillo, Sonora a 02 de Febrero del 2016

Dra. Nora Elba Munguía Vega
Coordinadora de Programa
Maestría en Sustentabilidad
Presente.-

Por este conducto, hago de su conocimiento que estoy de acuerdo que se realice el examen de posgrado del alumno (a) Daniel Andrés Rincón García con Expediente 214190031, el cual será el día 02 de Febrero del 2016 en el aula 102, Edificio 5-R a las 11:00 horas.

Relación de Jurados:

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE:	Dr. Luis E. Velazquez Contreras	
SECRETARIO:	Dr. Javier Esquer Peralta	
VOCAL:	Dra. Clara R. Álvarez Chávez	
SUPLENTE:	Dra. Nora E. Munguía Vega	

ATENTAMENTE

MIEMBROS DEL JURADO

RESUMEN

Las condiciones climáticas de la región desértica sonorenses permiten el desarrollo de proyectos de explotación solar con capacidad de contribuir al futuro energético del país, donde las energías renovables juegan un rol de suma importancia. Utilizando los conceptos de energía solar térmica, se desarrolló un sistema de absorción, transporte y descarga de calor como fuente principal de energía en un baño sauna, operando en un deportivo sustentable de la ciudad de Hermosillo, Sonora. La etapa primaria de absorción de energía, tiene como base un termoconcentrador Fresnel que utiliza espejos posicionados en forma cóncava, que mediante seguimiento electrónico de la posición solar, permite redirigir la mayor cantidad posible de energía solar incidente sobre un área determinada, y concentrarla en un área menor que de manera estratégica dirige el flujo energético con el uso de un fluido de transporte. El fluido seleccionado para la función de transporte y transferencia es agua, dados los requerimientos de temperatura y las capacidades del equipo de transporte. La etapa de descarga se define dentro del baño sauna, en forma de un intercambiador de calor con geometría de serpentín. Todo el sistema de transporte se encuentra aislado de escape de la energía absorbida, a manera de garantizar la eficiencia del sistema en cumplir su función de aprovechamiento energético. La eficiencia y eficacia del sistema se evaluaron con base en la capacidad de cumplir la función principal de cubrir los requerimientos energéticos del baño sauna, así como la medida de aprovechamiento de la energía disponible obteniendo resultados positivos.

ABSTRACT

Climatic conditions for the sonoran desert region allow the development of solar exploitation projects aiming towards contributing to the country's energy future, where renewable energies play the utmost important role. Making use of the concepts for thermal solar energy, a system for the absorption, transport and discharge of heat as the main energy source for a sauna bath operating within a sustainable sporting facility in the city of Hermosillo, Sonora was developed. The first stage for energy absorption is based on a Fresnel thermal concentrator using mirrors set in a concave shape, where electronic solar tracking ensures redirecting as much solar radiation as possible from a certain area, and concentrate it on a much smaller one where a transport fluid strategically positioned will redirect the absorbed heat flow. The selected heat transfer fluid for the transport and transference operations is water, given the capacity specifications on the pumping system and temperature requirements. The discharge stage is defined on the inside of the sauna bath as a coil shaped heat exchanger. The whole transport system is isolated from energy flows as to avoid losing absorbed energy, thus supporting the efficiency goals for the system's energy utilization. Both the efficiency and efficacy for the system were assessed based on its fulfilling capacity for the sauna bath energy requirements, as well as proper utilization for available energy. In the end, results were satisfactory when it comes to efficiency and efficacy in the project.

AGRADECIMIENTOS

Estoy personalmente agradecido con mi familia por apoyarme siempre y en todo momento. Mi madre y hermana a quienes debo tanto, y a quienes no dejan que motivarme a seguir mis sueños. Mi personita especial que está conmigo en las buenas y malas y con ello me hace crecer. Mis amigos y compañeros de quienes no dejo de aprender nunca. Mi tutor por tenderme oportunidades y demás profesores por ser la base sobre la que este trabajo toma fuerza.

Por cada oportunidad de crecimiento aprovechada, y todas las personas que influenciaron su ocurrencia. Gracias.

ÍNDICE

Índice de Contenido.

<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
<u>I. Introducción</u>	1
<u>II. Objetivo General</u>	2
<u>III. Objetivos Específicos</u>	2
<u>IV. Análisis Literario</u>	3
<u>4.1 Energía</u>	3
<u>4.2 Fundamentos Termodinámicos</u>	5
<u>4.3 Nanofluidos</u>	6
<u>4.4 Transporte Eficiente de Energía</u>	8
<u>4.5 Tecnología Aplicada en Sistemas Solares</u>	10
<u>V. Metodología</u>	12
<u>5.1 Tipo de Estudio</u>	12
<u>5.2 Diseño Metodológico</u>	12
<u>5.3 Alcance</u>	13
<u>5.4 Preguntas de Investigación</u>	13
<u>5.5 Objeto de Estudio</u>	14
<u>5.6 Herramientas de Diseño y Manejo de Datos</u>	14
<u>VI. Resultados</u>	16
<u>6.1 Análisis del Estado de la Técnica</u>	16
<u>6.2 Diseño Conceptual</u>	21
<u>6.3 Resultados de Experimentación</u>	33
<u>VII. Discusión</u>	48
<u>VIII. Conclusiones</u>	51
<u>IX. Recomendaciones</u>	53
<u>X. Referencias</u>	54

Índice de Tablas

<u>Tabla</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	Dimensionamiento de espejos reflectores	24
2	Registros de temperatura medida en tubo de aluminio	34
3	Flujo energético neto simulado para el tubo de aluminio	37
4	Temperaturas registradas en el tubo completo de aluminio	38
5	Tasa de cambio para temperatura medida en tubo y flujo neto de energía calculado	40
6	Registros de temperatura medida en tubo absorbedor	41
7	Temperaturas medidas en la entrada del intercambiador de calor	46
8	Resumen de costos asociados a la construcción del sistema	49

Índice de Figuras

<u>Figura</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	Sistema cerrado funcionando en basea circulación natural	8
2.1	Linear Fresnel Solar Arrays	16
2.2	Fresnel Mirror and Method for the Production Thereof	17
2.3	Solar Power Harvester	18
2.4	Concentrating Solar Energy Collector	18
2.5	Concentrating Solar Energy Collector	19
2.6	Electric Sauna Heater	20
2.7	Heat Exchanger pipe coil with support means	20
3	Diseño de Termoconcentrador	22
4	Acomodo angular de espejos reflectores	23
5	Dimensionamiento de espejos individuales	25
6	Diseño de absorbedor	27
7	Tubería de transporte	29
8	Intercambiador de calor preliminar	30
9	Intercambiador de calor terminado	31

10	Proyección de las funciones $C(t)$ y $E(t)$ como representaciones del calentamiento y enfriamiento del tramo de tubo, respectivamente	35
11	Proyección de la función $E_n(t)$ como función mixta de entrada y salida de calor al sistema	35
12	Proyección de las temperaturas registradas para el tubo completo de aluminio en una cabina semisellada	39
13	Proyección de la función $C(t)$ como regresión cuadrática aproximando la función real de aumento en la temperatura con respecto al tiempo	41
14	Proyección de la función $E(t)$, entrada de energía con el paso del tiempo	42
15	Puntos de medición de temperatura en tubería	44
16	Proyección de temperaturas esperadas en intercambiador de calor	47

Índice de Anexos

<u>Anexo</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	Evidencia Fotográfica de Construcción Final	58
2	Manual de Operaciones	62

I. INTRODUCCIÓN

La región desértica del estado de Sonora se caracteriza por tener cantidades superiores al promedio de radiación solar con respecto al resto del planeta. El desarrollo de proyectos de aprovechamiento energético que hagan uso de estas condiciones ofrece ser una solución definitiva al estado de carencia energética que se presenta globalmente; esta situación requiere de una intervención significativa en la manera en que producimos energía.

Muchas metodologías son capaces de aprovechar de algún modo el potencial energético del sol, con el propósito de producir energía eléctrica que de algún modo se integre a la red de energía interconectada. Diferentes son también las capacidades que cada metodología ofrece para realizar este proceso de integración o aprovechamiento de la energía disponible. Adaptando la forma energética que se requiere para una cierta actividad a la forma más afín en que se puede manejar la disponibilidad de recursos es precisamente lo que puede permitir tener procesos que con mayor eficiencia hacen uso de los recursos. Combinando el concepto de un dispositivo que hace aprovechamiento local directo de la energía disponible con el de utilizar la energía en la forma en que se presenta, es la base del entendido de explotación de recurso solar que se pretende en el presente proyecto.

En una primera parte se definen los objetivos que se pretenden lograr con el desarrollo del proyecto. Así, cada uno de las metas establecidas indica cierto grado de avance en cuanto a un objetivo principal. También, a medida de mantener el proyecto dentro del marco de la tecnología involucrada mas reciente y pertinente, se realiza una investigación literaria, con fuentes de información de años recientes que definen el estado del arte para los conceptos que se desarrollan a lo largo del proyecto.

En una segunda parte se detalla la metodología a seguir en el trabajo, en donde se describen todos los procedimientos en cuanto a la obtención de resultados. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos de las diferentes fases de experimentación, así como un detalle de los procedimientos que fueron necesarios para su obtención.

Por último, se muestra una sección de análisis de los resultados obtenidos, así como todas las implicaciones que estos tienen en el marco del análisis de literatura en el medio científico, las conclusiones derivadas de ellos en lo particular para este proyecto, así como recomendaciones futuras de la posible dirección que esta línea de investigación puede tomar, y los detalles específicos con capacidad de ser refinados en este proyecto.

II. OBJETIVO GENERAL

Contribuir al desarrollo del campo de energías renovables a través de innovación tecnológica en la concentración y transporte del calor colectado por un concentrador solar linear Fresnel a utilizarse en la operación de una sauna en un complejo deportivo sustentable.

III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Llevar a cabo un análisis literario del estado del arte en cuanto a tecnología de concentración solar térmica, así como técnicas de eficiencia termodinámica en sistemas de energía renovable.
- Proponer los elementos del sistema de reflexión y absorción de un concentrador solar linear Fresnel para obtener el mayor rendimiento termodinámico posible.
- Implementar mejoras en el sistema termoconcentrador para incrementar su desempeño.
- Diseñar un dispositivo de transporte del calor absorbido que permita el máximo aprovechamiento y disposición de la energía recolectada por el concentrador solar.
- Validar la eficacia y eficiencia del sistema termoconcentrador y el dispositivo de transporte de calor en permitir cumplir la función de operación de la sauna.

IV. ANÁLISIS LITERARIO

4.1 Energía

Nuevas tecnologías se han implementado en años recientes, que pretenden satisfacer directamente las necesidades energéticas de los edificios de manera descentralizada y local (Cuthbert, et al., 2013); los altos consumos que son requeridos en la disposición de calor como medio de acondicionamiento para actividades específicas (Knight y Dunn, 2005), sean de confort para viviendas y negocios o de servicios como en secadores industriales y saunas, ofrecen la posibilidad de realizar fuertes impactos positivos cuando se emplean nuevos métodos de cumplimiento en funcionalidad. Asimismo, más allá de buscar proveer el servicio de manera responsable, las soluciones deben estar acompañadas de transporte y manejo energético eficiente que sea capaz de sobrellevar la naturaleza ineficiente de los procesos termodinámicos convencionales que rigen la capacidad de servicio final (Viskanta, 2013).

Sumado a lo anterior, se tiene una creciente demanda energética que de manera global es en gran medida responsable de agravar las condiciones de desigualdad social y crisis económica (WEC, 2013), donde la capacidad de cubrir el suministro para la mayoría de la población depende de un constante insumo de recursos de origen fósil (Patel, 1999). La utilización de este tipo de recursos, que de por sí es ineficiente, se traduce en generación de CO₂ (Dióxido de Carbono) y otros contaminantes atmosféricos con fuertes repercusiones ambientales como el cambio climático (Andres, et al., 2011).

El manejo apropiado, aunado al aprovechamiento y desarrollo de nuevas formas de producción de energía que permitan reducir esta dependencia que se tiene para con los recursos no renovables se ha vuelto una necesidad global (EIA, 2013). Esta disminución en el uso de recursos convencionales requiere de la búsqueda de alternativas que ofrezcan la misma capacidad de soportar la actividad humana, y a la vez permitan un acercamiento a la sociedad sustentable que debemos tener como fin común (UNEP, 2013).

Según Bojic (2010), la mejor manera de contrarrestar los efectos negativos del uso actual excesivo de combustibles fósiles, es mediante el uso de las llamadas energías renovables, pues se entiende que estas provienen de recursos naturales como el viento, las mareas oceánicas, y el sol (Smil, 2014) que se reabastecen en períodos cortos de tiempo y no disminuyen en cantidad (Golove, et al., 2010). Encontrar maneras de aprovechar al máximo

la disponibilidad de estos recursos renovables, puede garantizar la total dependencia de energía limpia y sin repercusiones (Delucchi y Jacobson, 2013).

Particularmente, la energía solar que se puede coleccionar en solo una porción del territorio global tiene la capacidad de satisfacer las necesidades energéticas del total de la población, de aprovecharse adecuada y eficientemente (Liu, et al., 2009). El hecho de que casi en su totalidad las energías renovables tienen eventualmente su origen en el sol, así como la amplia disponibilidad y versatilidad en el manejo de esta fuente le confieren un interés especial (Ismail, 2011).

Dentro del campo de producción de energía en base a captación solar existen diferentes métodos, como el uso de celdas fotovoltaicas que realizan una conversión directa de la radiación incidente en eléctrica, o aquellos que aprovechan la concentración térmica en base a reflexión por espejos (Muhammad-Sukki, et al., 2010) (Parker, et al., 2013). El primero ofrece ventajas como emisiones nulas de CO₂, larga vida útil y alta tasa de reciclabilidad (Mundo-Hernandez, et al., 2014); sin embargo, tiene como principales desventajas su costo relativamente alto, especialmente en comparación con otros medios (Dinçer, 2011), así como su baja eficiencia de conversión que disminuye a la par con su vida útil cuando la temperatura de trabajo es elevada como en el caso de regiones áridas (Hoble, 2013), si no se implementa un apropiado sistema de enfriamiento (Cuce, et al., 2011).

Por otro lado, los concentradores solares con base en técnicas de reflexión tienen amplio uso en plantas de generación de electricidad a gran escala, dada su capacidad inherente de trabajo con altas temperaturas y libertad en disposición de la energía térmica acumulada (Chatterjee, et al., 2011). Aun así, las eficiencias obtenidas con estos sistemas se ven afectadas por constantes pérdidas de energía que no se aprovecha en el sistema, sea por radiación inversa o convección entre el medio absorbente y sus alrededores (Sahoo, 2013).

Una consecuencia irrevocable de la transformación de energía es la ineficiencia, donde se presenta que la energía utilizable posterior a este proceso no es el total de la que entra al sistema, dado que una parte se libera como algún otro tipo de energía que no es aprovechado (Moran y Shapiro, 2004). El modo de uso posterior a la concentración de calor dependerá del propósito del sistema, sea que la energía absorbida por el medio se utilice para la producción de energía eléctrica como en muchas de las plantas solares existentes, o se trate del aprovechamiento de la energía térmica de manera directa (Pierce, 2010).

De cualquier modo, las pérdidas energéticas que sean responsabilidad de su manejo, se pueden minimizar utilizando las medidas adecuadas de aislamiento y eficiencia térmica (Hart, 2011), así como trabajar en una ubicación que ofrezca niveles de incidencia solar elevados para compensar las deficiencias en la conversión (Genwa y Sagar, 2013). Nixon (2013) demostró la viabilidad en el aprovechamiento de la energía incidente de un tipo de concentrador solar en relación a su costo operacional y de construcción, con un arreglo parabólico de espejos Fresnel orientados hacia un punto focal donde se coloca un medio absorbente de energía; mientras Budea (2014) encontró experimentalmente que el aprovechamiento de la energía térmica de manera directa, ofrece valores de eficiencia de hasta 50% de la energía solar incidente, que la conversión a otros modos energéticos no presenta.

4.2 Fundamentos Termodinámicos

De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, un fluido tiene la capacidad de ganar temperatura si su energía interna aumenta; La relación entre la energía interna de un fluido y su temperatura está dada por la magnitud y frecuencia de las colisiones que a escala microscópica se dan entre sus moléculas, donde el contenido interno de trabajo es lo que en escala macroscópica se manifiesta como calor y temperatura (Potter y Somerton, 1993).

Con el fin de aumentar la absorción de calor del sistema, se requiere un recubrimiento de muy baja emisividad sobre el absorbedor que permita un flujo casi unidireccional de la energía incidente en forma de radiación (Wirz, et al., 2014). También se ha encontrado que es importante proteger el sistema receptor contra el flujo convectivo natural con alguna placa transparente, que permita la entrada de radiación solar pero bloquee la salida de calor por medio de aire circundante (Manikumar y Arasu, 2014).

La forma convencional de la cavidad de absorción es trapezoidal, para permitir un flujo de irradiación óptimo hacia el medio absorbente, donde las dimensiones juegan un papel importante en el flujo interno de calor y por consiguiente, las pérdidas (Pye, et al., 2003). Singh, et al. (2010) encontraron que la geometría del receptor es también un factor a considerar, donde existe hasta un 8% de incremento en la eficiencia de absorción de energía cuando se utiliza tubería cilíndrica, en comparación con un absorbedor rectangular.

Un elemento intermedio, con capacidad de absorber gran cantidad de calor y liberarlo después a conveniencia es el que tendrá la función principal de absorber el calor

concentrado (Mussard y Nydal, 2013). Este medio de transporte temporal se conoce como fluido de transferencia de calor, y su función en el sistema de concentración solar es atrapar el calor incidente, con fines de transporte y transferencia hacia otro medio de interés (Flamant, et al., 2014).

En los sistemas de concentración solar convencionales, lo más común es la utilización de aceites sintéticos como fluido de transporte de energía dada su alta capacidad calorífica y relativamente baja viscosidad que permite su operación a través de sistemas de tubería convencionales (S.T., 2010). Recientemente, por cuestiones de eficiencia y durabilidad, así como seguridad de operación, el sector de producción energética solar ha buscado nuevos fluidos de transporte de calor que no se degraden con el uso ni tengan limitaciones termodinámicas de temperatura de trabajo (López-González, et al., 2013).

4.3 Nanofluidos

Javadi, et al. (2013) ejemplifican cómo existen modos de incrementar la transferencia de calor con fluidos mediante la adición de nanopartículas que por su tamaño no sedimentan en el mismo. Dicha combinación permite aumentar la conducción térmica interna del fluido, y por lo tanto mejorar su capacidad de transferencia hacia un medio circundante (Hosny, 2004), siempre y cuando su capacidad calorífica sea lo suficientemente alta para evitar un cambio de fase (Sokhansefat, et al., 2014).

Este concepto se conoce como nanofluido gracias al trabajo de Lee, et al. (1999), y es utilizado para mejorar la propiedad de conducción térmica que caracteriza a un fluido de transferencia de calor, con nuevos valores que tienen la capacidad de aumentar la eficiencia global de un sistema de transporte de calor (Ghazvini, et al., 2012). Las nanopartículas se suspenden en el fluido base por medios de sonicación dada su capacidad de romper enlaces de aglomeración y favorecer su dispersión, en comparación con otros métodos de mezclado como la agitación magnética (Gangadevi, Senthilraja e Imam, 2013).

La adición en agua pura de partículas de Alúmina (Al_2O_3), Óxido de Cobre (CuO), Dióxido de Silicio (SiO_2) y Óxido de Zinc (ZnO) con tamaños variantes entre 20 y 50 nm en cantidades de 1 a 4%, demostró aumentos en la transferencia térmica de entre 367 a 411% (Hussein, et al., 2014). Cuando se utilizan concentraciones bajas de nanopartículas, la relación de aumento en la conductividad térmica de un nanofluido parece mantenerse

relativamente estable y linear para aumentos de la temperatura de trabajo (Jiang, et al., 2014).

Agregar nanopartículas en fluidos tiene la característica de aumentar, además de sus propiedades térmicas, las caídas de presión de un sistema de transporte convencional a través de tuberías (Razi, Akhavan-Behabadi y Saeedinia, 2011). Resulta lógico que se debe compensar la caída de presión por efecto de la fricción de las partículas sólidas contra la tubería con potencia de bombeo, pero se han encontrado combinaciones del radio de concentración de sólido disuelto contra el tamaño de las partículas, que ofrecen resultados de caída de presión bajos con aumentos de conductividad térmica considerablemente útiles (Celen, et al., 2014).

De cualquier modo, la viscosidad del fluido juega un papel muy importante en el sistema de transporte dado el aumento en la caída de presión que tiene la capacidad de ocasionar (Malauskas, Pedišius y Zygmantas, 2014). Regularmente se observa que para fracciones de partículas en mezcla muy pequeñas el comportamiento en la viscosidad relativa no se ve afectado, pero tiende a disminuir cuando la temperatura aumenta conforme la fracción volumétrica de partículas crece (Nwosu, Meyer y Sharifpur, 2014); Por ejemplo, Chen y Xie (2009) encontraron que la viscosidad sigue una relación muy similar para un nanofluido con fracciones disueltas pequeñas de nanotubos de carbono en aceite de silicón, que para el fluido en condiciones puras donde disminuye conforme la temperatura aumenta.

Se ha encontrado que los nanofluidos con bases no acuosas con sus características no polares tienen la tendencia de prevenir conglomeración de las nanopartículas para periodos extendidos de reposo de hasta 8 meses, mostrando su capacidad de trabajar en condiciones similares a las de un fluido de transferencia de calor comercial convencional (Hordy, et al., 2014); esto dependiendo de la naturaleza del sólido disperso, y su comportamiento hidrofóbico o hidrofílico con respecto al fluido base (Karami, et al., 2014).

Rashin y Hemalatha (2013a; 2013b) demuestran cómo se puede trabajar con un aceite en base de coco de origen natural, formando nanofluidos con partículas de ZnO y CuO con resultados equiparables a los de otras mezclas partiendo de material con características biodegradables y naturaleza sustentable.

A pesar de conocerse los beneficios que generalmente traen consigo, la descripción analítica del funcionamiento microscópico de los cambios en las propiedades del fluido, y

por consiguiente la previsión del comportamiento a esperar al añadir nanopartículas siguen sin estar definidos de manera general (Ryzhkov y Minakov, 2014). Sólo para casos muy particulares, se han obtenido ecuaciones por regresión, que de manera empírica son capaces de predecir el comportamiento de variables como la conductividad térmica y la caída de presión de un sistema (Teng, et al., 2011).

4.4 Transporte Eficiente de Energía

La optimización en el transporte para el calor absorbido por un colector solar resulta de evidente interés cuando consideramos la ineficiencia termodinámica en estos sistemas de generación de energía (Skouri, et al., 2013). Los sistemas basados en circulación natural (CN) tienen la ventaja de aprovechar al máximo el calor proveniente de un concentrador solar mediante la adaptabilidad de flujos, tanto del fluido de transporte como del calor a transportar, para alcanzar condiciones óptimas de trabajo (Chehade, et al., 2013); en ellos, como se muestra en la Figura 1, el fluido de transporte se mueve por efectos de cambios de densidad dado un aumento de temperatura y acción de la gravedad consecuente (Wang, Chuang y Ferng, 2013).

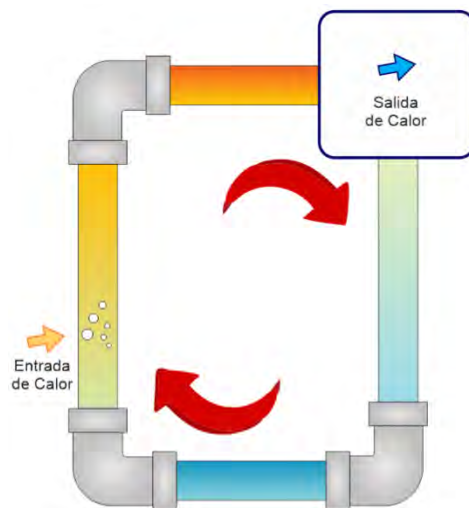


Figura 1. Sistema cerrado funcionando en base a circulación natural

Fuente: Elaboración propia

La implementación de un sistema de transporte basado en CN ofrece simplicidad de construcción y operación, pero crea una dependencia con la posición de trabajo que preferentemente será vertical, dado que el funcionamiento del diseño como tal dependerá de la acción de la gravedad (Nithyanandam y Pitchumani, 2013). Aún así, Dobriansky

(2011) describe diferentes metodologías experimentales que han demostrado operación de transporte de calor en el sentido opuesto al que lo hace un sistema de CN convencional, con una visión particularmente interesante en aplicaciones de concentración térmica solar donde la dirección de interés en el transporte es generalmente contraria a la gravedad.

Nasrin, Alim y Chamkha (2012) encontraron a través de un análisis numérico del comportamiento de un nanofluido de agua/ Al_2O_3 como medio de transferencia de calor en una cavidad rectangular mediante CN, que la eficiencia de transferencia resultaba mayor para la mezcla que para el fluido base puro. Sin embargo, otros autores han encontrado numéricamente que la utilización de nanofluidos no aumenta la transferencia de calor, e incluso puede disminuirla bajo determinados escenarios (Moraveji y Hejzian, 2013; Pakravan y Yaghoubi, 2013).

De las investigaciones analíticas realizadas, se esperaría que diversos factores como el tipo y grado de concentración del nanofluido, y la geometría axial de los tubos de transporte sean quienes definan la eficiencia de transporte de los ciclos de CN (Huminić y Huminić, 2013). El trabajo experimental de Buschmann y Franzke (2014) muestra la importancia de encontrar una concentración adecuada de nanopartículas con el propósito de evitar problemas de estratificación sobre las paredes de mayor contacto y transferencia de calor al nanofluido, por acción de la generación de microburbujas de vapor que se puedan dar como consecuencia de los cambios de fase forzados sobre las primeras capas del fluido con la entrada de calor.

Adicionalmente, el radio de llenado, el ángulo de inclinación y la temperatura de operación afectan en la misma o similar medida la operación por CN con nanofluidos que para aquellos sistemas funcionando con fluidos puros (Buschmann, 2013); pero se ha encontrado que el mecanismo de transferencia de calor tiene la capacidad de pasar de convectivo, principio básico de los sistemas de CN, a conductivo conforme aumenta el valor del número de Rayleigh (Soleimani, et al., 2012), como consecuencia del incremento en el número de nanopartículas suspendidas sólidas (Saidi y Karimi, 2014).

Turgut y Doganay (2013) construyeron un mini-ciclo de CN y compararon su funcionamiento cuando se usa agua deionizada contra un nanofluido de agua/ Al_2O_3 , con resultados de efectividad favoreciendo el uso de la mezcla; en contraste, Misale, Devia y Garibaldi (2012) observaron que no había diferencia considerable en el aumento de la eficiencia térmica de un mini-CCN cuando se utilizan nanofluidos, en comparación con el fluido base puro, a

excepción del caso particular de 75° donde la inclinación del sistema se acerca a un plano horizontal.

La descripción y evaluación del comportamiento de un fluido operante en un sistema de transporte de calor en base a CN fue estudiado por Basu, Battacharyya y Das (2013), quienes encontraron un conjunto de ecuaciones gobernantes que son capaces de predecir las condiciones de flujo sin importar la forma geométrica del ciclo completo.

4.5 Tecnología Aplicada en Sistemas Solares

Existen diversos ejemplos en la literatura que detallan la utilización de nanofluidos para aumentar el aprovechamiento de calor en sistemas de absorción solar (Luo, et al., 2014). Mayormente, la utilización de este componente añadido al sistema es no solo para crear una mayor transferencia de calor del fluido de trabajo, sino para brindarle propiedades ópticas que le permitan atrapar la radiación solar incidente (Khullar y Tyagi, 2011; Ladjevardi, et al., 2013; Sajid, et al., 2014).

Parvin, Nasrin y Alim (2014) describen una relación entre aumento de entropía como medida de eficiencia termodinámica y mejora de capacidades térmicas de un nanofluido de base agua con partículas de CuO, a utilizarse en un concentrador solar de incidencia directa con resultados que indican la viabilidad de la propuesta.

Un campo de muy reciente exploración son los llamados líquidos iónicos, que en conjunto con el concepto de Nanofluido tienen capacidad de operar como fluidos de transferencia de calor de alta eficiencia (Zhang, et al., 2014); su estabilidad y retención de propiedades con la absorción de calor brindan al concepto de nanofluido-líquido iónico amplio potencial para su utilización en sistemas de absorción de energía solar, una vez que se analicen los factores económicos y ambientales involucrados, así como de funcionamiento de manera experimental mediante investigación adicional (Titan, Morshed y Khan, 2013).

Por otro lado, Faizal, et al. (2013) detallan cómo la utilización de nanofluidos para modificar las propiedades de absorción térmica de un concentrador solar de radiación directa, tiene repercusiones ambientales y económicas positivas, dada la capacidad de reducción de materiales y aumento de eficiencia energética. Más allá de consideraciones en tamaños piloto, Taylor, et al. (2011) presentaron un análisis del potencial económico de la utilización de un nanofluido de grafito-aceite, para la operación de una planta concentradora de torre

central de gran escala, con un aumento aproximado de 5% de la eficiencia, que se traduciría en \$3.5 M.D.D.

Se ha encontrado que particularmente para la mezcla de nanotubos de carbono-etilenglicol se pueden eliminar los resultados indeseables como aumento de viscosidad, debido a la adición de nanopartículas, y aun así mejorar las características de transferencia de calor, si se trabaja con fracciones disueltas y temperaturas en el nanofluido altas (Meng, et al., 2012).

De manera general, se puede decir que con base a algunos de los resultados obtenidos numéricamente, la expectativa en la utilización del concepto de nanofluidos como propuesta para aumentar la transferencia de calor de un sistema es positiva. Sin embargo, aún es necesario aumentar la cantidad de casos de estudio donde se documente que experimentalmente se puede replicar lo que se observa en resultados analíticos.

Utilizar los conceptos de circulación natural y nanofluidos de la mano para mejorar el transporte de calor, puede ofrecer resultados que permitan desarrollar sistemas de captura de energía solar que trabajen más eficientemente, y aprovechen al máximo el recurso disponible. La baja eficiencia de los sistemas actuales (Mahian, et al., 2013), define el gran potencial que existe para mejorar la tecnología que utilizamos como mecanismo de obtención de energía renovable.

La disposición del calor que se pueda capturar directamente a través de la radiación solar disponible implica una reducción considerable de consumo de recursos energéticos convencionales, minimizando además las pérdidas que son responsabilidad de la conversión energética. La metodología a utilizar en el presente trabajo supone que utilizar los conceptos analizados en la literatura de manera conjunta, es una excelente forma de propiciar resultados que dirijan un avance en el campo particular de la energía solar en base a captura y conversión de calor.

V. METODOLOGÍA

5.1 Tipo de estudio

El estudio se ha clasificado de tipo cuantitativo, pues las preguntas de investigación se responden con base en elementos cuantificables que se evalúan mediante experimentación directa.

5.2 Diseño metodológico

El proyecto es de tipo experimental, y consiste en absorber la luz solar incidente sobre un dispositivo de área definida, que a su vez la concentra mediante reflexión de espejos en un área menor con el fin de aprovechar la energía que en esta se contiene. La absorción de esta energía tiene como principal propósito calentar un fluido de transporte que la dirige hacia su aplicación principal de calentar el aire que fluye en una cámara de volumen reducido que opera como estufa de una sauna. El desarrollo del proyecto se divide en una serie de etapas definidas, detalladas a continuación y que en conjunto comprenden el proceso de investigación.

- **Cálculo y Dimensionamiento.** En base a los requerimientos del sistema para completar la función que se haya determinado como principal, se obtiene información que servirá como base en la toma de decisiones de diseño.
- **Diseño.** Partiendo de las necesidades y limitantes que se puedan tener en el proyecto, en esta etapa se plantean modelos y dimensiones que comprenderán el piloto de pruebas, para llevar a cabo el objetivo final.
- **Modelación y Simulación.** Con el objetivo de no depender de la construcción física de un prototipo, se planea poner a prueba el modelo propuesto previamente con base en simular condiciones esperadas mediante el uso de software dedicado.
- **Experimentación.** Una vez comprobado mediante simulación que las condiciones del modelo son factibles, se procede con la construcción del prototipo propuesto con el fin de comparar la expectativa numérico-analítica contra los resultados bajo condiciones reales.
- **Recopilación de Datos.** De la fase de experimentación se obtiene un conjunto de resultados, que se deben organizar así como interpretar.

- **Evaluación.** En esta última fase, se utiliza la interpretación de los resultados para definir si las preguntas de investigación planteadas se cumplen o no, y en qué grado de apego a lo esperado de ser positivas.

Dado que el objetivo de la experimentación es determinar la capacidad del sistema de producir calor, así como la medida en que la energía disponible se puede aprovechar con el propósito específico de calentar el interior del sauna, se desarrollaron diversas pruebas experimentales que determinan la eficiencia y eficacia del dispositivo diseñado.

De manera individual, se evaluó el comportamiento del flujo de calor conforme se encontraba en los diferentes elementos del sistema. En el contexto global de lo que se espera como resultado de la actividad del sauna, se midió la temperatura en la entrada y salida del elemento de intercambio de calor, como medida del potencial que esta misma representa en la descarga del calor absorbido en el concentrador. Dicha evaluación del sistema se presenta más adelante en la sección de resultados.

5.3 Alcance

Los elementos de trabajo que incluye esta investigación están delimitados por la operación de la sauna que forma parte del deportivo sustentable “PichySport” en la ciudad de Hermosillo, en sus etapas de obtención y transporte del calor a utilizar. El proyecto tiene su desarrollo entre los meses de Septiembre de 2014 y Noviembre de 2015.

5.4 Preguntas de Investigación

El estudio se centra en responder a la sencilla cuestión de cumplir el objetivo principal de la sauna, en base a energía obtenida de manera limpia que es además aprovechada eficientemente, para demostrar la viabilidad de utilizar el modelo propuesto como único sistema de provisión energético.

Por este motivo se plantea la siguiente pregunta de investigación inicial:

P1: “¿Tiene el sistema de concentración y transporte de energía solar la capacidad de cubrir por completo las necesidades energéticas del sauna, de manera eficiente y sin depender de entradas adicionales?”

Por otra parte, también se busca que el sistema opere bajo un régimen de sustentabilidad, que no solo implica el ahorro de energía que de otro modo provendría de una fuente contaminante y su sustitución por una fuente limpia, sino también la utilización de materiales y demás elementos componentes provenientes de fuentes con responsabilidad social y ambiental consideradas. Por ello, se propone la siguiente pregunta de investigación adicional:

P2: “Si la construcción del sistema de concentración y transporte de energía solar se realiza con responsabilidad social y ambiental, con una selección sustentable de materiales y demás componentes, ¿Es aún así capaz de cumplir su objetivo?”

La consideración de ambos cuestionamientos mencionados, logra cumplir el objetivo principal de la investigación por completo.

5.5 Objeto de Estudio

El estudio tiene como objetos de enfoque principales dos componentes. En conjunto, estos componentes son capaces de primero absorber el calor a utilizarse en la operación de la sauna, y posteriormente llevarlo a su destino para que se cumpla su función.

De manera específica, el primer objeto de investigación es un termocentrador lineal tipo Fresnel, detallado en la sección 6.2, que tiene como función concentrar la luz solar incidente sobre un área particular, hacia un área menor para poder aprovechar el aumento de energía térmica que esta actividad representa.

El segundo objeto de estudio es un dispositivo de transporte de calor que permite que el calor absorbido por el elemento primario sea llevado de la manera más eficiente posible hacia su destino final donde se le dará uso, y a su vez tenga la capacidad de liberarlo para permitir: a) que este calor depositado sobre el cuarto sauna aumente y así regule la temperatura al interior; b) que más calor sea absorbido por el fluido una vez enfriado y recirculado a través del sistema primario.

5.6 Herramientas de Diseño y Manejo de Datos

Para el diseño de los elementos que componen el sistema se hace uso de un conjunto de herramientas computacionales fundamentales:

- Como asistente de diseño estético, y dimensionamiento de elementos se utiliza el software Corel Draw® X5.
- Como asistente en el dimensionamiento y cálculos base de funcionamiento para los componentes, el software GeoGebra 5 de fuente libre.
- También, como herramienta de diseño en 3D, se utiliza el software SketchUp® 2015 de Trimble.
- Para el desarrollo de cálculos y manejo de datos experimentales a analizar como resultados, la hoja de cálculo Excel de la suite de Microsoft Office®.
- Para realizar cálculos de Análisis Computacional de Dinámica de Fluidos (CFD), se usa la herramienta SU2 de fuente libre.
- Como asistente en el dimensionamiento y diseño general de caídas de presión en tuberías, se utiliza la herramienta PFCalc de fuente libre.

Por otro lado, como parte del desarrollo experimental se hizo uso de equipo especializado para la medición de la temperatura de operación en diferentes puntos definidos en el experimento. Por fines de precisión y facilidad en la operación del mismo, se optó por un termómetro infrarrojo digital con apuntador laser marca OEM, modelo 25245.

VI. RESULTADOS

6.1 Análisis del Estado de la Técnica

Existe un registro no muy abundante en las bases de datos de patentes consultadas de dispositivos con fines prácticos similares a los que esta investigación procura. Sin embargo, cabe denotar que no existe un dispositivo que cumpla al cien por ciento con las características buscadas, ni mucho menos con el objetivo de cumplir el mismo fin.

A continuación se presenta una recopilación de dispositivos registrados en patentes ante la Oficina de Patentes y Marcas Registradas de los Estados Unidos (USPTO, 2016) que contienen elementos que sirven en gran medida como base de diseño conceptual para el dispositivo de generación y transporte de calor en desarrollo.

6.1.1 Arreglo Solar Linear Fresnel

En la patente **US 8,807,128 B2** se denota un dispositivo convencional de captura de calor utilizado en plantas de producción de energía a gran escala. En este tipo de dispositivo, se cuenta con un arreglo lineal de espejos en la parte inferior que tienen la función de reflejar la luz solar incidente hacia un sistema absorbedor colocado en la parte superior del dispositivo, y así concentrar el calor sobre un fluido de transferencia que viaja por la misma

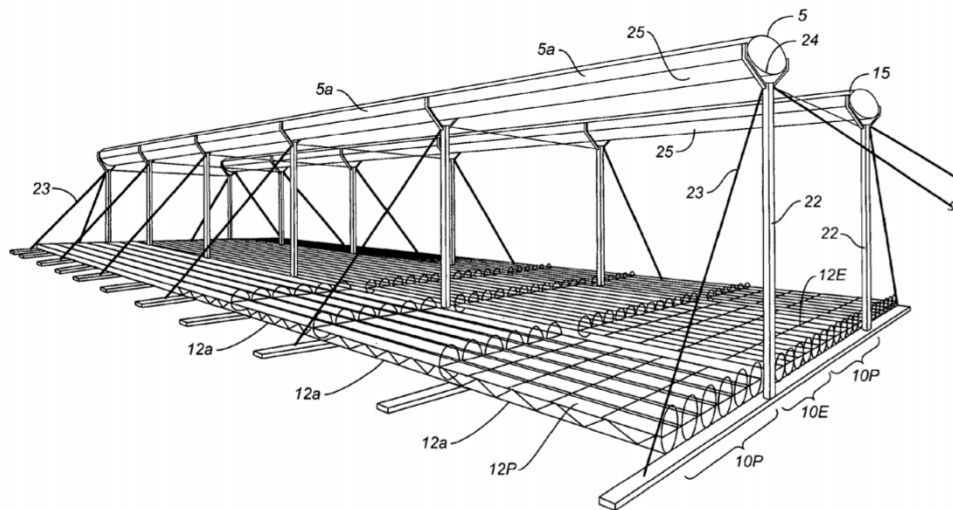


Figura 2.1 Mills et al., Linear Fresnel Solar Arrays.
United States Patent Office; 2014. Patent No. US 8,807,128 B2.

tubería. La ventaja de un dispositivo como el mostrado, es que tiene la capacidad de alcanzar niveles muy elevados de absorción y con un transporte altamente eficiente. Estas

son precisamente las razones por las que los sistemas a gran escala basados en tecnología de reflexión lineal utilizan conceptos similares; sin embargo, estos sistemas pueden fácilmente incrementar los costos de instalación y mantenimiento dado que se necesitan grandes extensiones de terreno para su colocación, además de una considerable inversión en la ingeniería de operación puesto que el diseño obliga a depender de sistemas

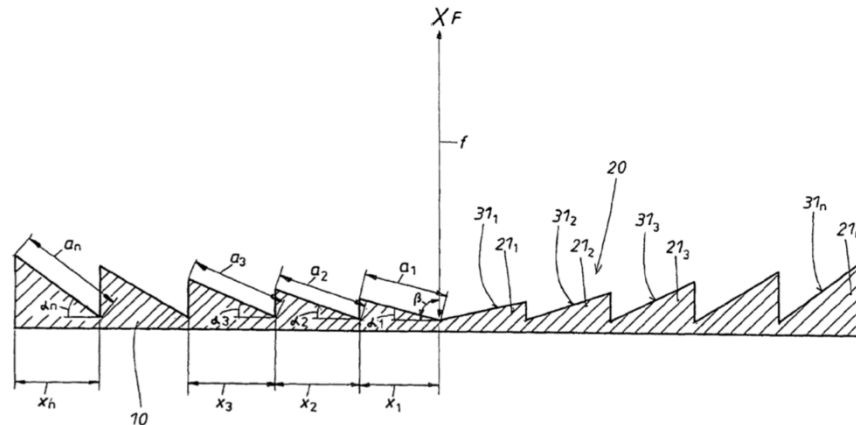


Figura 2.2 Ricks et al., Fresnel Mirror and Method for the Production Thereof.
United States Patent Office; 2012. Patent No. US 8,292,442 B2.

automatizados de seguimiento que operan individualmente cada espejo.

La patente **US 8,292,442 B2** muestra un concepto de arreglo para los espejos que estuviesen colocados en la parte inferior de un sistema concentrador. En él se puede observar las distancias a considerar de y entre los espejos individuales, así como la organización angular para obtener una óptima concentración hacia un punto focal colocado en la parte inferior que funge como absorbedor.

En la patente **US 8,766,091 B2** aparece un dispositivo de concentración solar con espejos lineales que redirigen la luz solar incidente hacia un punto focal superior. Este sistema tiene un arreglo fijo que se espera tenga la capacidad de soportar rangos amplios de absorción sin necesidad de realizar ningún tipo de seguimiento solar.

La patente **US 8,669,462 B2** muestra un dispositivo que utiliza el concepto de concentración solar lineal en base a espejos, y lo suma a la consideración del cambio en la ruta solar estacional. Así, el arreglo fijo de espejos se mantiene mientras la estructura principal es capaz de realizar ajustes a lo largo del año, para posicionar los espejos de la manera que mejor aproveche la ruta de incidencia solar diaria.

Cabe denotar que para este modelo en particular, se hace la consideración de que a lo largo del día el rango completo de cambios angulares en la orientación de la incidencia solar paralela al eje longitudinal de los espejos se cubre con un arreglo único, y este es capaz de redirigir en al menos la mayor parte la luz solar incidente hacia el absorbedor.

Por último, en la patente **US 8,686,279 B2** se muestra un dispositivo de captura de calor que funciona en base a un arreglo fijo de espejos sobre una estructura móvil, con el objetivo de reflejar la luz solar incidente a lo largo del día y a través de las estaciones del año mediante seguimiento solar. Este sistema está diseñado con la idea primaria de concentrar

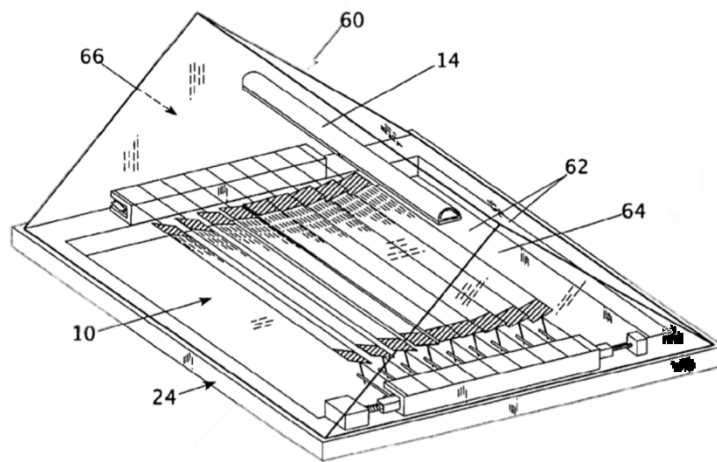


Figura 2.3 Edwards et al., Solar Power Harvester.
United States Patent Office; 2014. Patent No. US 8,766,091 B2.

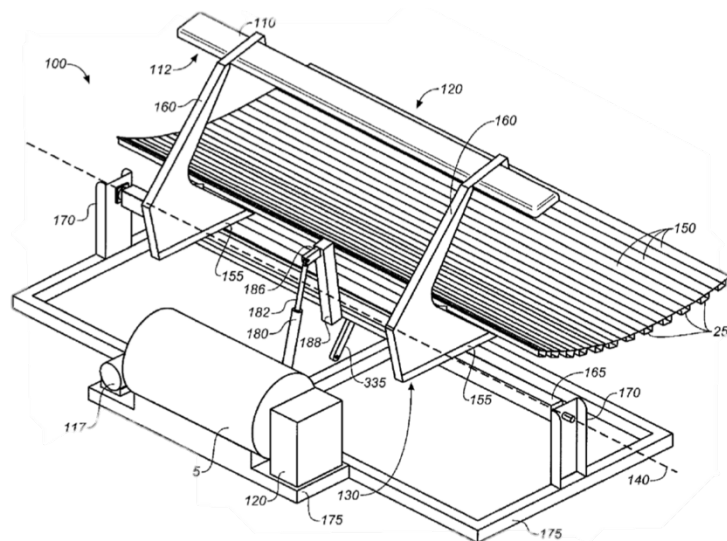


Figura 2.4 Almgoy et al., Concentrating Solar Energy Collector.
United States Patent Office; 2014. Patent No. US 8,669,462 B2.

la luz y aprovecharla mediante una conversión fotovoltaica, por lo que las medidas longitudinales y angulares mostradas en la figura pueden ser diferentes para el caso de un sistema que aprovecha el calor a través de un fluido de transferencia de calor.

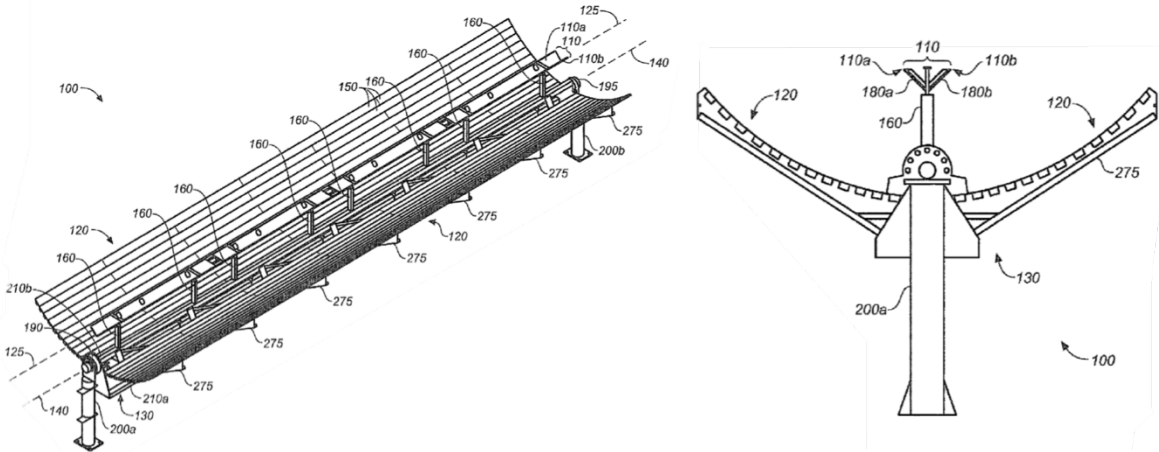


Figura 2.5 Almogly et al., Concentrating Solar Energy Collector.
United States Patent Office; 2014. Patent No. US 8,686,279 B2.

6.1.2 Sistema de Transporte y Transferencia de Calor

La patente **US4959527 A**, muestra un dispositivo de transferencia de calor especialmente diseñado para un cuarto sauna. El diseño incluye un mecanismo de transferencia de calor hacia las piedras que hacen la función de absorber y liberar el mismo al ambiente interno del sauna. Este diseño de transferencia puede ser base de otro modelo donde la entrada de calor sea un serpentín calentado, y no una resistencia produciendo su propio calor.

Por otra parte, la patente **US3346043 A** muestra un diseño de intercambiador tubular clásico, que utiliza tuberías superpuestas con el fin de liberar calor a un fluido circundante.

Este esquema representa una metodología de transferencia de calor clásica, donde al interior de la tubería se tiene un fluido de transferencia de calor, que constantemente libera o absorbe energía del medio.

La combinación de los dos previos diseños puede ser utilizada como base para la creación de un esquema de transferencia tradicional, que se integra al concepto clave de entrada de calor cuando se trata de un baño sauna.

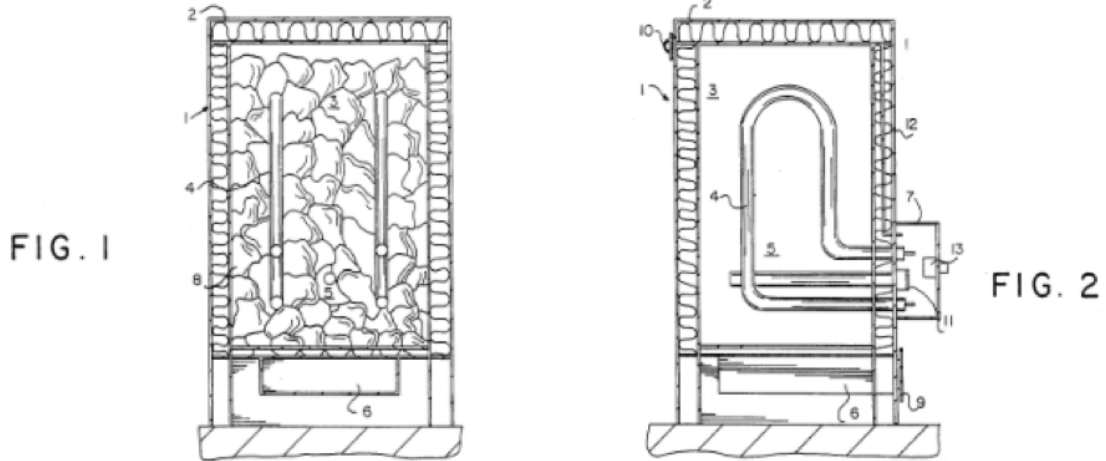


Figura 2.6 Kivimaa y Perala, Electric Sauna Heater.
 United States Patent Office; 1990. Patent No. US4959527 A.

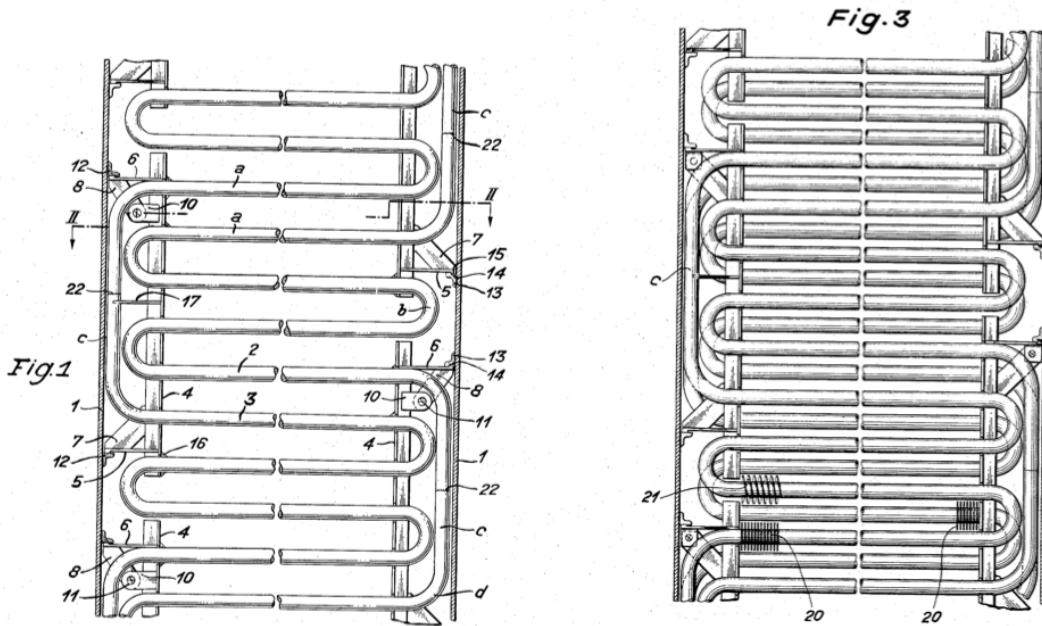


Figura 2.7 Thurnauer, Heat exchanger pipe coil with support means.
 United States Patent Office; 1967. Patent No. US3346043 A.

6.2 Diseño Conceptual

El diseño de este proyecto es de carácter experimental. La implementación de tanto los elementos de concentración de energía solar, así como el sistema de transporte y aprovechamiento de la misma parten de este diseño, y son del orden aplicado con el objetivo principal de obtener resultados directos que indiquen una resolución positiva a las preguntas de investigación planteadas.

La innovación cumple también con una característica única de diseño, puesto que toda la literatura presenta un esquema de FLSC donde cada espejo en el dispositivo tiene un sistema motriz individual, que es independiente del movimiento de la estructura principal para aquellos casos que la involucren. De cualquier modo, el sistema diseñado tiene como principal diferenciador la capacidad de mantener una posición angular por cada espejo que no varía con respecto a la estructura, y es más bien esta última la que tiene la función de realizar el seguimiento solar.

Este enfoque de diseño le distingue de los demás prototipos observados en la literatura y resultantes de la búsqueda de patentes. No existe un dispositivo que utilice las características de un FLSC a pequeña escala, con esta combinación de implementación y aplicación en el mercado.

6.2.1 Termocentrador Solar Lineal Fresnel

Con el fin de alcanzar diversos fines prácticos que confieren valor al proyecto como objeto de aprovechamiento en futuros proyectos de absorción solar térmica, se consideran elementos de diseño que tienen relevancia en todo el espectro de escalas. Desde un proyecto particular y aislado a pequeña escala, hasta un proyecto de absorción a gran escala que pudiera representar una considerable fuente de energía.

El termocentrador solar tiene la responsabilidad de concentrar la energía que irradiada por el sol se encuentra distribuida en una porción espacial dispersa, en un área menor donde se pueda aprovechar de manera más eficiente. De los diversos formatos que se conocen en que se puede lograr dicho objetivo, utilizar la tecnología de reflexión Fresnel en base a espejos lineales ofrece ventajas de facilidad de construcción, así como costos reducidos por instalación y por mantenimiento o reposición. Además, es lo suficientemente

flexible como para ser escalado de cualquier modo, sin que los cambios en costo sean un compromiso para los cambios de eficiencia en absorción.

Con el objetivo en mente de lograr la absorción térmica solar bajo estos principios de flexibilidad en escalamiento, la figura 3 presenta el diseño de un sistema de absorción en base a la tecnología Fresnel, en donde cada uno de los elementos del sistema a construirse representan la mejor relación de costo/eficiencia. La justificación detrás del diseño adoptado se presenta en los siguientes puntos; los diversos elementos del sistema completo en su etapa de construcción final se muestran en el Anexo 1.



Figura 3. Diseño de Termoconcentrador.
Fuente: Elaboración propia

6.2.1.1 Estructura de Termoconcentrador

La base de la estructura se toma como un medio móvil, que tendrá la capacidad de moverse por completo para realizar un seguimiento solar, que garantice la mayor incidencia solar en todo momento del día. De modo que la estructura sea lo suficientemente fuerte y liviana para realizar su función, se opta por un cuadro de aluminio de 2 pulgadas como base de dimensiones 1.6m x 1.6m, sobre el cual estará montado tanto el arreglo de espejos individuales lineales como el absorbedor en la parte superior.

Para permitir la movilidad necesaria en la estructura principal, se cuenta con un eje central sobre el cual se realiza el giro con ayuda de un motor de pistón que empuja la estructura

en base a un controlador. Esto como resultado de una comparación en base a sensores de incidencia de luz montados sobre la misma estructura.

En la parte inferior que no será móvil, se utiliza una estructura fuerte de cuadro de acero con 1 ½ pulgadas de espesor, que a su vez tendrá agarre directo con la superficie sobre la cual se colocará el concentrador. Esta estructura deberá tener la fuerza necesaria para soportar el peso de la estructura móvil, que a su vez contiene tanto el arreglo de espejos como el absorbedor en la parte superior.

6.2.1.2 Espejos reflectivos

El termoconcentrador Fresnel tiene una estructura fija que a su vez carga una porción móvil con seguimiento electrónico solar, por lo que el acomodo interno de espejos no tiene necesidad de cambiar conforme se modifican las condiciones solares (a lo largo del día, con la posición referente a la hora). Es decir, un arreglo inicial de espejos, donde las condiciones solares se suponen directas, debe ser más que suficiente para cubrir todas las posiciones que se puedan esperar del sol durante el día, para cualquier trayectoria a como cambie durante el año. En la figura 4 se muestra un diagrama sencillo de como se calculan los ángulos particulares de cada espejo en relación a su distancia horizontal contra el eje central donde se tiene el punto focal.

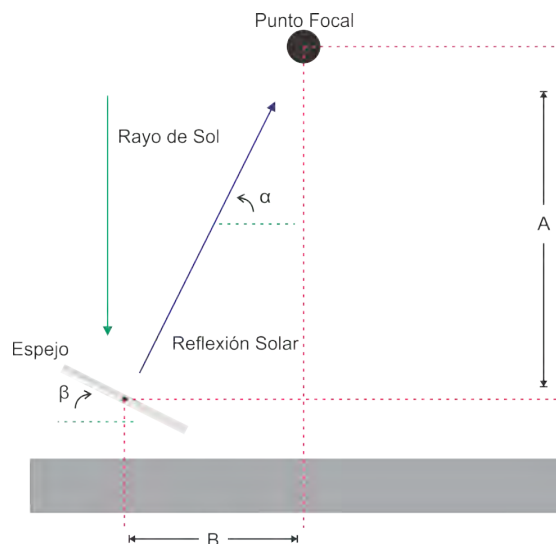


Figura 4. Acomodo angular de espejos reflectores.
Fuente: Elaboración propia

Con este arreglo angular, se puede determinar numéricamente el ángulo que deberá tener cada espejo individual como parte del conjunto, en relación a la distancia que guarda con el punto focal bajo el supuesto de que la estructura esta perpendicular a los rayos del sol en todo momento, en base a lo siguiente:

$$\beta = \arctan \left(\frac{B}{A} \right) \quad (1)$$

Con la ecuación (1) podemos conocer el ángulo de inclinación que deberá tener cada espejo para alcanzar la máxima eficiencia termodinámica, y se puede fijar el arreglo con las diferentes inclinaciones que asegurarán una óptima captura de la energía solar incidente. La tabla 1 muestra los valores establecidos para cada uno de los 12 espejos en el arreglo.

En este arreglo completo, β_x representa cada uno de los ángulos para los espejos de manera individual con respecto a la estructura, y x_x es la distancia al centro de cada espejo partiendo del límite de la estructura por lado.

Tabla 1. Dimensionamiento de espejos reflectores.

Ángulo (°)		Distancia (cm)		Ángulo (°)		Distancia (cm)	
β_1	21.71	x_1	16.26	β_7	179.31	x_7	81.63
β_2	17.61	x_2	27.16	β_8	175.05	x_8	91.70
β_3	13.43	x_3	37.76	β_9	170.79	x_9	101.88
β_4	9.21	x_4	48.12	β_{10}	166.57	x_{10}	112.24
β_5	4.95	x_5	58.30	β_{11}	162.39	x_{11}	122.84
β_6	0.69	x_6	68.37	β_{12}	158.29	x_{12}	133.74

Fuente: Elaboración propia

Los espejos individuales considerados tienen dimensiones de 150x10cm y 3mm de espesor, donde el efecto de reducción del espacio por efecto de inclinación del espejo es aprovechado para acomodar la mayor cantidad de área reflectiva posible, sin permitir que existan obstrucciones de la luz reflejada. En la tabla 1 se puede ver cómo la distancia entre los centros de cada uno de los espejos es variable, y depende de las condiciones de su respectivo ángulo y separación horizontal contra el punto focal. Además, el diagrama de la figura 5 muestra cómo se dimensionan estas condiciones para cada espejo haciendo uso de una modelación geométrica en el software GeoGebra.

Con una estructura fija de optimas condiciones como la descrita, se puede hacer un seguimiento solar usando el arreglo completo. Siempre y cuando el giro esté equilibrado sobre un centro de peso, como el que se indica en la figura 3, la energía consumida para realizar el seguimiento solar es mínima y preferible a la complicación que implica la utilización de un sistema convencionalmente utilizado de seguimiento individual por espejo. Esta propuesta sirve por igual como una consideración de reducción de costos en comparación con un sistema análogo que opere con seguimiento solar individual, así como simplicidad en diseño, instalación y mantenimiento.

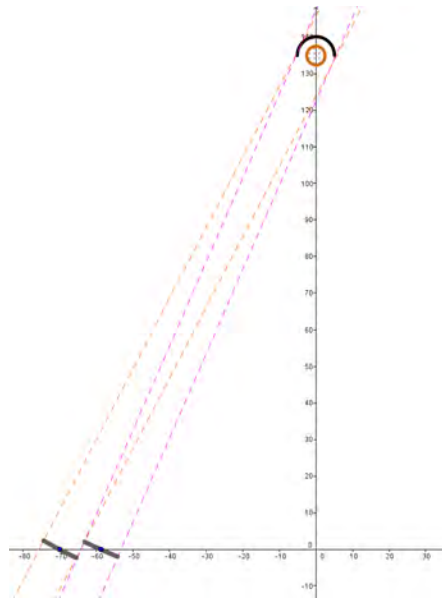


Figura 5. Dimensionamiento de espejos individuales.
Fuente: Elaboración propia

6.2.1.3 Requerimientos energéticos de la Sauna

Con el objetivo de cubrir la necesidad energética de la sauna, el arreglo total de espejos debe ser capaz de concentrar la energía suficiente para mantener una temperatura constante en el interior del cuarto de sauna. Considerando que la ciudad de Hermosillo cuenta con una radiación solar anual promedio de alrededor de 6.924 kWh/m² diarios (NREL, 2016) distribuidos en un total de 10 horas diarias de luz aprovechable, podemos estimar un valor que defina la cantidad de calor que debe ser posible aprovechar por esta incidencia mencionada, de la siguiente manera:

$$\left(\frac{6924 \text{ Watts} \times \text{hora}}{\text{m}^2 \times \text{día}} \right) \left(\frac{1 \text{ día}}{10 \text{ horas}} \right) = 692.4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (2)$$

El valor obtenido en (2) representa un máximo teórico de energía aprovechable por concentración solar en las condiciones de la ciudad. Este valor sólo se puede alcanzar si las condiciones climáticas y de eficiencia en el diseño del concentrador lo permiten. Siendo que las primeras son condiciones que no se pueden modificar, solo puede esperarse que se mantengan como regularmente se muestran para esta ubicación, con cielos despejados de nubosidad y en su mayoría libres de contaminación aérea. Acomodar el área máxima de reflexión con espejos, permite aprovechar el espacio que recibe incidencia solar y por consiguiente su energía, en base a la siguiente relación:

$$\dot{E}_R = 692.4 \frac{W}{m^2} \left((1.5)(.1) \frac{m^2}{espejo} \right) (12 \text{ espejos}) = 1246.32 W \quad (3)$$

Esta cantidad de energía disponible para el concentrador considera que no toda el área cuadrada de la estructura esta disponible para hacer reflexión, considerando la sombra que emite el absorbedor colocado en la parte central superior, y la separación entre los espejos para evitar la obstrucción de la luz reflejada. De ser este el caso, este máximo de energía aprovechable sirve como base para la elaboración del diseño de captura solar. El elemento principal de concentración de energía es el arreglo de espejos lineales Fresnel, pues su número y dimensiones estarán definidas en base al requerimiento total y la eficiencia termodinámica mencionada en el sistema.

Por otra parte, la energía para mantener a una temperatura deseable el volumen de aire al interior del cuarto de sauna está dictada por sus dimensiones de acuerdo al siguiente balance energético:

$$\rho V C_p \Delta T = \dot{Q}_1 \quad (4)$$

$$\Delta T = (80^\circ C - 25^\circ C) \quad V = (2 \times 2.5 \times 3)m \quad \rho = 1 \text{ Kg}/m^3 \quad C_p = 1000 \frac{J}{\text{Kg}^\circ K}$$

Donde V representa el volumen interno del cuarto sauna, y por lo tanto el volumen de aire a ser calentado. ρ y C_p representan la densidad y capacidad caloríficas del aire, respectivamente, mientras ΔT es el cambio de temperatura en el aire como resultado de la entrada de calor. Utilizando el valor obtenido en (4) es posible calcular el tiempo que toma calentar el cuarto a la temperatura deseada, si las condiciones de renovación de aire se consideran invariables.

Las condiciones de eficiencia se pueden controlar en gran parte, con medidas como la naturaleza y apropiada limpieza de los espejos que permitan el máximo nivel de reflexión de toda la luz solar incidente. Algunas especificaciones adicionales del diseño tienen la capacidad de afectar de igual o mayor manera la eficiencia de absorción energética. De igual modo, estas especificaciones se detallan más adelante en la metodología.

6.2.1.4 Absorbedor

El elemento superior que tiene la función de atrapar el calor que la radiación concentrada solar representa se llama absorbedor. Este debe ser capaz de recibir la mayor cantidad de energía posible sin dejarla escapar el sistema, permitiendo la transferencia unidireccional hacia el fluido de transferencia que viaja sobre un conducto central, y transporta la energía ya absorbida hacia su objetivo final. Su modo de funcionamiento se basa en reducir aún más el área donde se concentra la energía, para que la temperatura del fluido al interior del tubo absorbedor sea la mayor posible, como medida de eficiencia energética.

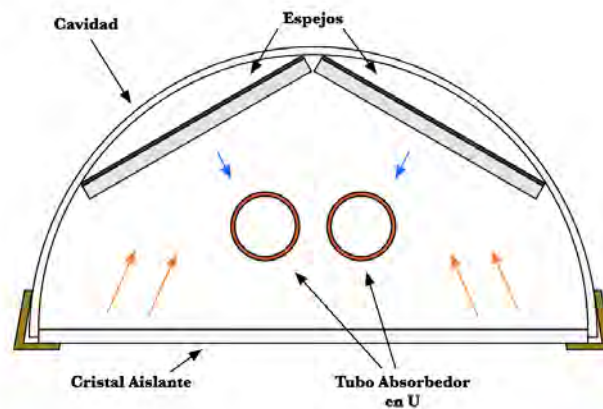


Figura 6. Diseño de absorbedor.

Fuente: Elaboración propia

La geometría de la cavidad de captura es una curva cóncava que permite la reflexión de vuelta al tubo absorbente, colocado en el foco de la curvatura para interceptar el haz reflejado por los espejos inferiores que no incida sobre el tubo absorbente en una primera instancia, haciendo uso de un alternó par de espejos sujetos sobre la cavidad a modo de seguir la forma curva de la misma como se muestra en la figura 6. En esta figura, se puede observar el tubo de cobre de 5/8" en forma U que tiene la función de exponer el fluido de transferencia de calor al haz solar, en dos pasos a lo largo de la cámara de absorción.

Debido a cuán considerable puede ser la pérdida de calor atribuida a convección como causa del diferencial de temperaturas entre el fluido interno y el aire circundante a la tubería de absorción, un panel de vidrio aislante se colocó en la parte inferior de la cámara, con el fin de permitir el paso de la luz y así cumplir el objetivo de absorción, mientras el efecto de cámara sellada no permite el contacto de aire frío con los elementos de trabajo en alta temperatura. El sistema absorbedor final se muestra con detalle en el Anexo 1.

6.2.2 Sistema de Transporte

El sistema de transporte tiene el objetivo de tomar el calor absorbido y dirigirlo hacia su disposición final, mediante el uso de un fluido de transferencia de calor circulando sobre un arreglo de tuberías especialmente acondicionadas con puntos de carga y descarga semiunidireccional de calor. De este modo, el primer elemento de transporte de calor es el último elemento en el sistema de captura de energía solar. El sistema de absorción de calor se cubrió a detalle en la sección 6.2.1.3, por lo que solo los elementos restantes se cubren a continuación.

6.2.2.1 Tubería de Transporte de Calor Absorbido

Con el propósito de transportar la energía absorbida por el concentrador solar, un arreglo de tuberías tiene el propósito de permitir al fluido de transferencia de calor circular entre los componentes del sistema. Dadas las elevadas temperaturas de trabajo, se seleccionó un fluido especial que puede cumplir esta tarea de transporte de calor. Esto se cubre más a detalle en la sección 6.2.2.3.

Un conjunto de tuberías permite la circulación del fluido de transferencia de calor a través de todo el sistema. Se eligió tubería de cobre como el material de tanto en la sección de carga como la descarga, así como en toda la sección de transporte principal. El razonamiento para esta decisión es la capacidad de soporte de calor que este material (así como sus uniones de base plomo-estaño) tiene, así como la nula reactividad con respecto al fluido utilizado en el interior, incluso considerando las temperaturas de trabajo o la posibilidad de adición de metales adicionales en la composición del fluido de transferencia de calor. Como capa adicional sobre la tubería de cobre, se utilizó un recubrimiento de espuma de poliestireno de 1" sujetado con ayuda de pequeños cinchos de plástico.



Figura 7. Tubería de transporte.
Fuente: Elaboración propia

En la sección móvil de la tubería, ubicada sobre el eje de giro del concentrador conforme tiene su movimiento de seguimiento solar, se hicieron adaptaciones para permitir conexiones con el sistema de tubería que no se vieran limitadas por el movimiento. Para este fin en particular, se utilizó una conexión independiente de manguera de acero inoxidable de 1/2". Esta sección cuenta con el mismo recubrimiento que el resto de la tubería. La figura 7 muestra toda la sección de tubería superior, incluyendo las conexiones en la sección móvil y los elementos incluidos en el sistema de absorción, todos con su respectivo aislamiento. Es posible también apreciar los distintos elementos del sistema de transporte final en el Anexo 1.

6.2.2.2 Intercambiador de Calor

El objetivo de la sección de descarga es liberar la mayor cantidad posible de calor, permitiendo así al fluido de transferencia absorber calor nuevamente en la mayor medida en la sección de carga. Incrementar la capacidad de carga y descarga de calor al sistema, es lo que le confiere eficiencia de operación,

La figura 8 muestra un primer esfuerzo en la construcción del serpentín de transferencia. Se puede observar aquí una bomba hidráulica que tendría por objetivo mover el fluido de transferencia al interior de la tubería. En este primer diseño, la bomba se colocó en un punto que está directamente colocado junto al serpentín y por ende justo antes del ascenso del

fluido para contrarrestar los efectos de la presión en el cabezal del mismo. La conexión entre ambos elementos, concentrador e intercambiador, se da por un par de tuberías verticales que llevan el fluido de absorbedor a estufa (fluido calentado) y de regreso al concentrador en la parte de arriba (fluido frío).



Figura 8. Intercambiador de calor preliminar.
Fuente: Elaboración propia.

El fluido de transferencia utilizado era aceite automotriz, dada la expectativa de absorción de calor por el diseño. La bomba que se utilizó para tal fin es una bomba automotriz de aceite de motor, adaptada de la refacción para un automóvil Volkswagen sedan. Esta adaptación incluyó la unión de la bomba de refacción y un motor eléctrico de 35 W de potencia.

Un segundo y final esfuerzo de la construcción para la estufa se muestra en la figura 9, donde se puede observar una estufa que no tiene interrupciones en el serpentín. Todo se encuentra aislado como una sola pieza, dado que el motor se trasladó a una posición externa al sistema, dado que de este modo se evita la exposición de la misma a la humedad y calor que pueden existir al interior del sauna. La bomba utilizada para circular el fluido de transferencia en la tubería es de la marca HSH-Flo, modelo RS15/6G.

Se puede observar también un serpentín de cobre sobre el cual descansará el elemento de transferencia final que funciona en la remoción de calor contenido en el serpentín, que además es el elemento estético a colocarse sobre la estufa: usualmente piedras volcánicas o de río.

Una estructura metálica mantiene todos los elementos del intercambiador de calor en posición, mientras que permite que el aire alcance la mayoría de los mismos y así procurar una mejor transferencia de calor. El límite superior de este conjunto se dará en un futuro por la placa metálica removible que descansa sobre el serpentín de transferencia. El propósito principal de dicha placa será el de absorber el calor que llega al serpentín por medio del fluido de transferencia de calor, y liberarlo al exterior de la estufa; tener este elemento independiente cubriendo el sistema de intercambio brinda facilidad en el mantenimiento del mismo, cuando se trata de limpieza de sales acumuladas debido a la evaporación de agua que se vierte sobre la estufa, en el caso de operar el sauna en modo húmedo.



Figura 9. Intercambiador de calor terminado.
Fuente: Elaboración propia.

Al exterior, una reja adicional de madera evitará que el usuario entre en contacto directo con los elementos al interior de la estufa por cuestiones de seguridad, dadas las elevadas temperaturas que el dispositivo puede alcanzar mientras está en operación, así como la susceptibilidad a accidentes que un ambiente húmedo puede provocar.

Los elementos finales estéticos del sistema, como placa de soporte, piedras de transferencia y jaula de madera, se agregarán posteriormente como parte de la construcción del cuarto de sauna.

6.2.2.3 Fluido de Transferencia de Calor

El transporte de calor se realiza mediante un fluido específicamente diseñado con este propósito. Dado que el sistema puede alcanzar temperaturas de hasta 100°C, un fluido de transferencia apropiado será uno que no cambie de fase durante el proceso. Para esta aplicación, se utilizó agua filtrada, dado que permite el manejo requerido de temperatura, mientras conserva niveles de viscosidad relativamente bajos que concuerdan con las especificaciones de carga en el sistema de transporte. La baja viscosidad de este fluido permite un menor esfuerzo requerido en el sistema de bombeo, al tiempo que las temperaturas de trabajo no se anteponen a la operación del sistema.

6.3 Resultados de Experimentación

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de los elementos en el sistema completo se ejecutaron diversos diseños experimentales. Asegurar de manera individual que el termoconcentrador lineal Fresnel, la tubería de transporte y el intercambiador de calor cumplen con sus respectivas funciones permite que el desarrollo del proyecto completo tome forma, y así poder esperar un correcto desempeño global del sistema de entrega de calor al sauna.

Los resultados de las diferentes fases experimentales se detallan a continuación, seguidos de los del sistema completo efectuando su labor principal global. Una evaluación de eficacia y eficiencia del desempeño del sistema se presenta en cada subsección, seguido de una discusión acerca de la medida en que ambos objetivos se logran en la discusión y conclusiones finales.

6.3.1 Termoconcentrador Solar Fresnel

Para verificar la efectividad del concentrador solar lineal Fresnel, se realizaron repetidas instancias de medición de temperatura sobre el absorbedor, mientras el dispositivo estaba en operación de seguimiento solar. El objetivo de cada evaluación estuvo determinado por el avance de construcción de los diferentes elementos que le conforman, con el fin de tener una preconcepción del impacto que cada uno tuviera sobre el esquema de avance global.

6.3.1.1 Evaluación de Seguimiento

Para determinar la capacidad de seguimiento del sistema electrónico, y el impacto que este tuviera sobre la capacidad de concentración, se llevaron a cabo pruebas en una etapa de construcción primaria. Las pruebas se llevaron a cabo en un día soleado del mes de Marzo, 2015. Sin tener aún completa la construcción del absorbedor, se optó por un valor de referencia sobre el cual hacer una medición de temperatura.

También resulta de interés conocer la capacidad que tiene el aire circundante al tubo de remover calor del mismo, de modo que se puedan inferir las pérdidas atribuibles al estado de construcción y la falta de los elementos de aislamiento térmico. Por esto mismo, se añade al experimento no solo una etapa de calentamiento, donde los espejos están dirigidos a concentrar la incidencia solar sobre el tubo, sino también una etapa de enfriamiento donde se mide la temperatura conforme esta disminuye como efecto del calor

que escapa de la tubería por convección hacia el aire frío alrededor de ella. Los valores registrados en ambas etapas se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Registros de temperatura medida en tubo de aluminio.

t	C (°C)	t	E (°C)
0	26.4	0	72.4
38	50	40	61.8
75	62.2	70	56.2
110	75.2	90	46
140	83	120	52.6
170	90.2	150	49.2
200	94.6	180	42.8
230	98.6		
255	100.4		
285	101.4		

Fuente: Elaboración propia

La figura 10 muestra los valores de ganancia y pérdida de temperatura en el sistema como fueron registrados por el termómetro. El resultado de crear una proyección mezclada de ambas medidas, enfriamiento y calentamiento, resulta en la posible combinación de las mismas en un valor único de cambio de temperatura global simulado. Esto simula un estado donde el calor que entra al sistema no se ve afectado por la medida de constante enfriamiento natural que ocurre en el concentrador en su actual estado.

La figura 11 muestra esta proyección, donde además se puede observar la función de una regresión cuadrática que aproxima los valores simulados con el fin de conocer el comportamiento de la simulación, así como tener una función que describa de manera analítica el cambio de temperatura en relación al paso del tiempo.

Tomando como ejemplo la ecuación del balance de energía para un sistema que gana energía de manera adiabáticamente, podemos hacer una aproximación de la energía que el sistema tiene capacidad de producir para el punto en que las mediciones de temperatura se realizan.

$$\dot{E} = \frac{dH}{dt} = m C_p \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

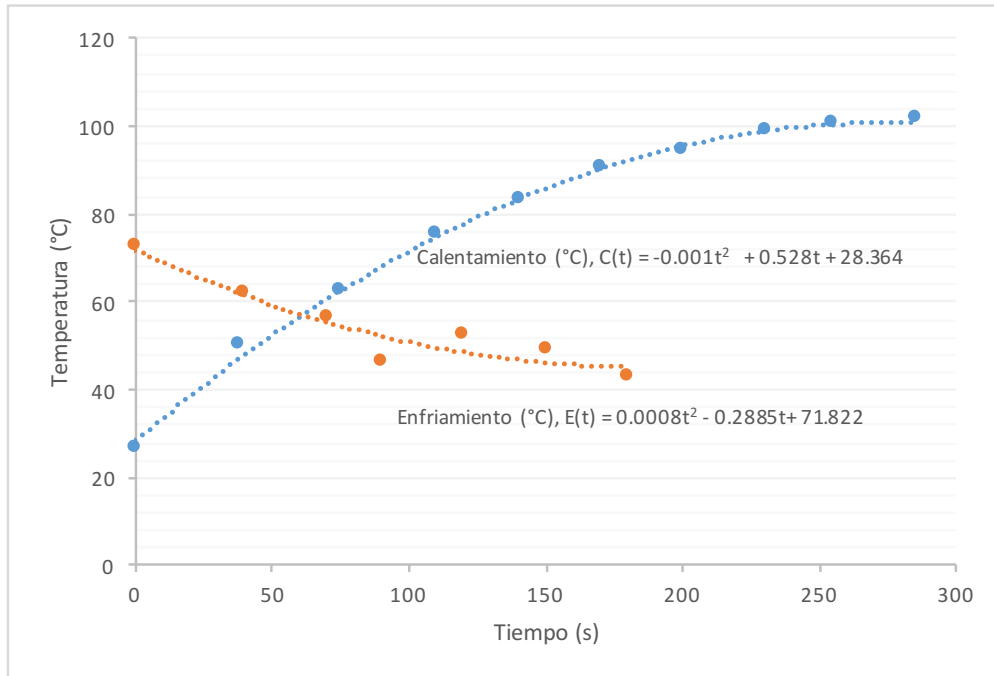


Figura 10. Proyección de las funciones C(t) y E(t) como representaciones del calentamiento y enfriamiento del tramo de tubo, respectivamente.
Fuente: Elaboración propia

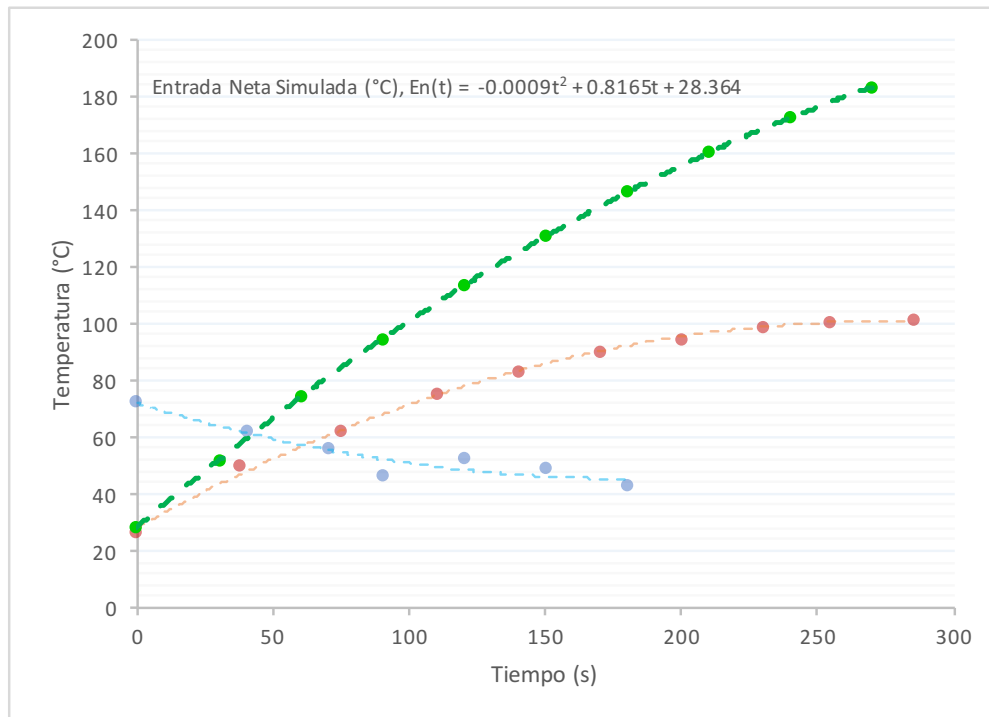


Figura 11. Proyección de la función $En(t)$ como función mixta de entrada y salida de calor al sistema.
Fuente: Elaboración propia

Donde \dot{E} es el flujo de energía entrante al sistema, $\frac{dH}{dt}$ representa el cambio de entalpía del sistema, el valor de m es la masa de control de 100 gramos para el tubo expuesto al calor de concentración, y Cp es la capacidad calorífica del aluminio, dado que es el material del que está hecho el tubo que se calienta. Asumiendo que $C(t)$ es representativa de $T(t)$, es posible establecer la relación:

$$\frac{dT}{dt} \cong C'(t) \quad (6)$$

Por último, la relación $\frac{dT}{dt}$ se puede determinar en base a las proyecciones realizadas anteriormente, donde de conocer el valor de la función $T(t)$ se puede realizar la derivación de la misma y obtener un valor de tasa de cambio con respecto al tiempo. Es decir, si se conoce que:

$$T_C(t) = -0.001 t^2 + 0.528 t + 28.364$$

$$T_E(t) = 0.0008 t^2 + 0.2885 t + 71.822$$

Donde $T_C(t)$ representa la función que describe la entrada de calor al sistema como calentamiento, y $T_E(t)$ la función que describe la pérdida de calor del tubo como flujo energético hacia el aire circundante, el valor de cada respectiva razón de cambio debe ser:

$$\frac{dT_C(t)}{dt} = -0.002 t + 0.528$$

$$\frac{dT_E(t)}{dt} = 0.0016 t - 0.2885$$

Por esto, un valor combinado de ganancia descontando la pérdida conocida se puede simular de la suma de la razón de cambio de entrada de calor, y el valor inverso de la pérdida de calor al tubo. Esta entrada neta de calor toma la forma:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT_C(t)}{dt} + \left(- \frac{dT_E(t)}{dt} \right) = -0.0036 t - 0.8165$$

Sustituyendo todos los valores ahora conocidos, obtenemos un resultado de flujo de calor correspondiente a la entrada neta de energía al tubo de acuerdo a las proyecciones y simulaciones. Este valor de entrada neta se muestra en la tabla 3, donde además se puede

apreciar una comparación contra el valor de temperatura simulada para cada punto de la corrida en el experimento. Es de importancia denotar en esta comparación que para esta simulación existe un punto de quiebre que de igual manera se muestra en la tabla, para el cual la temperatura en el tubo lleva a valores de pérdida energética mayores a los de entrada. Es decir, la temperatura ganada por el tubo es tal que el flujo energético de salida es mayor que el de entrada, y el tubo no hace más que perder toda la energía absorbida a partir de este punto teórico.

En la práctica, esta situación se remediaría por la remoción constante de calor del tubo a través del flujo constante de fluido de transferencia. Así, si nunca se llega a este punto de quiebre de entrada contra salida de energía, esta no se pierde como medida de balance energético en el sistema, sino el mismo opera en un constante estado de entrada controlada.

Tabla 3. Flujo energético neto simulado para el tubo de aluminio.

m (Kg)	Cp (KJ/Kg K)
0.1	0.91

t	Ė (W)	CE (°C)
0	48.048	28.364
30	38.22	52.049
60	28.392	74.114
90	18.564	94.559
120	8.736	113.384
150	-1.092	130.589
180	-10.92	146.174

Fuente: Elaboración propia

6.3.1.2 Evaluación de Posición

Una vez que la construcción del concentrador alcanzó un punto donde los elementos necesitaban estar direccionados, se optó por reevaluar la capacidad de calentamiento para una posición final con respecto al sol. Esta segunda etapa de pruebas se realizó en un día típico del mes de Junio, 2015, aproximadamente a las 11:30 hrs., cerca del punto de máxima incidencia solar.

De manera análoga a la primera etapa experimental, se utilizaron condiciones no finales de construcción como base de evaluación preliminar. En esta ocasión, la cámara del absorbedor contó con su vidrio de sello convectivo en pie, más no en un estado final que

garantizara la completa eliminación de pérdidas de calor. Sin embargo, se optó en esta ocasión por no hacer una consideración de las pérdidas de un modo similar al que se utilizó en la primera etapa.

La tabla 4 muestra los valores de temperatura registrados en 3 diferentes corridas del concentrador. La figura 12 muestra de igual modo, los valores registrados de manera gráfica donde además se adapta una regresión de orden cuadrático a cada una de las corridas a modo de tomar una función que de manera aproximada defina el comportamiento de ganancia de temperatura por corrida.

Tabla 4. Temperaturas registradas en el tubo completo de aluminio.

t	C 1(°C)	t	C 2(°C)	t	C 3(°C)
0	43	380	113.6	20	103.4
60	43	385	113.6	30	104.6
75	44	417	115.8	45	106
90	45	431	116.4	60	108.4
105	47	451	117.6	75	111
120	46.2	480	119	90	113
135	49.8			115	112.6
150	50.2			130	107
165	52.2			185	117.2
260	66.2			210	119
310	73.4			225	121.8
				240	123.6
				255	124.8
				270	125.4
				286	126.2
				300	125.6
				310	126.8
				330	128.2

Fuente: Elaboración propia

Tomando como base las funciones que definen las proyecciones de cada una de las corridas se determinó un valor promedio que describe las tasas de cambio de temperatura con respecto al tiempo, independientemente del estado de temperatura en el cual se opera, y por lo mismo, de los diferentes potenciales de ganancia de calor que se detectan a lo largo de la entrada de energía. Este valor promedio se calculó en base a:

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{\left(\frac{dC_1}{dt} + \frac{dC_2}{dt} + \frac{dC_3}{dt} \right)}{3} \quad (6)$$

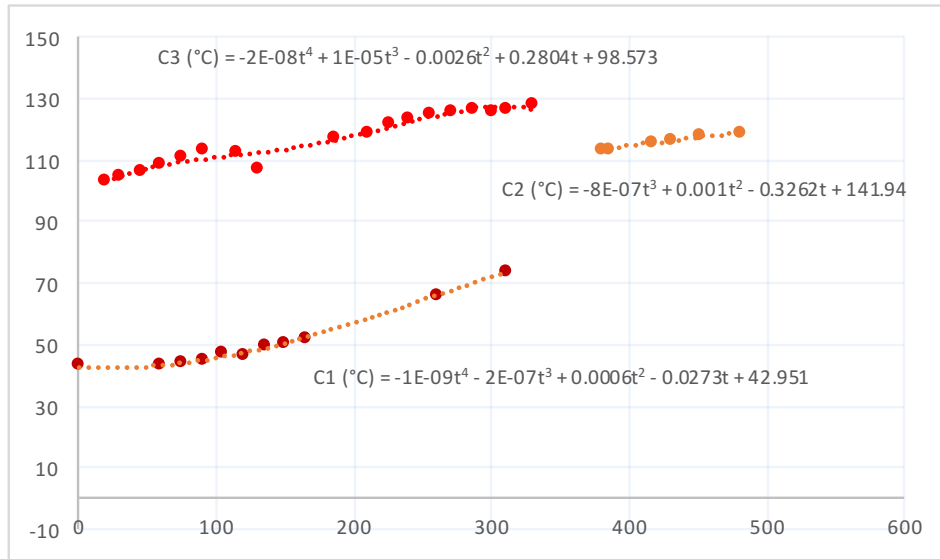


Figura 12. Proyección de las temperaturas registradas para el tubo completo de aluminio en una cabina semisellada.

Fuente: Elaboración propia

Donde los valores de todas las tasas de cambio individuales se mezclan a modo de tener una equivalencia única sobre la cual basar la velocidad de entrada de energía. La tabla 5 muestra los valores calculados para este valor $\frac{dC}{dt}$ a cada instante de tiempo. De manera análoga a lo establecido en la etapa experimental anterior, se puede hacer una aproximación del flujo neto de energía que entra al sistema en base a la ecuación de balance de energía mostrada en (5), donde el valor de m corresponde a 1.5 Kg en esta ocasión por ser un tramo de tubo completo sobre el cual se hace el muestreo.

Aquí se puede también ver el flujo neto y los valores registrados alrededor del punto de quiebre, para el cual se consigue un valor de entrada máximo para un determinado tiempo, que corresponde al punto en el que se consigue un máximo de temperatura que representa el equilibrio energético en el sistema.

Tabla 5. Tasa de cambio para temperatura medida en tubo y flujo neto de energía calculado.

m (Kg)	Cp (KJ/Kg K)
1.5	0.91

t	dC/dt	É (W)
0	0.0244	33.26050
30	0.0370	50.43766
60	0.0374	51.10378
90	0.0299	40.86082
120	0.0185	25.31074
150	0.0074	10.05550
180	0.0005	0.69706

Fuente: Elaboración propia

6.3.1.3 Evaluación de Aislamiento

Por último, una vez que el sistema se encontró completamente aislado se realizó una última sesión de prueba donde se evalúa la capacidad del sistema completo para concentrar energía solar. La tabla 6 muestra los valores de temperatura registrados en el termómetro dirigido sobre un punto fijo del tubo absorbedor. Estas pruebas preliminares de evaluación al desempeño del concentrador se realizaron en un día soleado del mes de Junio, aproximadamente a las 13:00 hrs., en el punto de máxima incidencia solar. Claramente se puede observar un crecimiento que disminuye en velocidad conforme se gana calor en el tubo.

Si las mediciones de temperatura se registran como una sola función del tiempo, es posible hacer proyecciones de cuánto se espera que sea el aumento máximo teórico del sistema. En la figura 13 se observa la proyección sobre un plano de las temperaturas registradas contra el tiempo en la medición. Los puntos se ajustan a una regresión cuadrática con una precisión bastante alta [$R^2=0.95$], por lo que utilizar la función $C(t)$ que describe la regresión es una excelente aproximación de la función real $T(t)$.

Tabla 6. Registros de temperatura medida en tubo absorbedor.

t	T (°C)	t	T (°C)	t	T (°C)
90	83.6	240	103	360	114.4
100	84.4	255	104.6	363	115.4
110	84.4	260	104.4	370	116.6
120	85.2	270	105.8	430	116.8
132	84.4	280	107	440	117.8
150	93.4	290	107.6	450	119
160	94.2	300	109.6	460	120
170	93.2	310	110.6	470	121
195	98.6	320	111	480	120.8
210	100	330	111.8	490	121.8
220	100.8	340	113	500	122.6
230	102	350	114.2	510	122.6

Fuente: Elaboración propia

Dado que el sistema se puede considerar cerrado donde la entrada energética se da de manera unidireccional a través de radiación, y no hay salidas de energía en esta forma, el aumento en la temperatura que se manifiesta en el absorbedor se puede representar mediante un balance de energía que respeta las condiciones establecidas en (5).

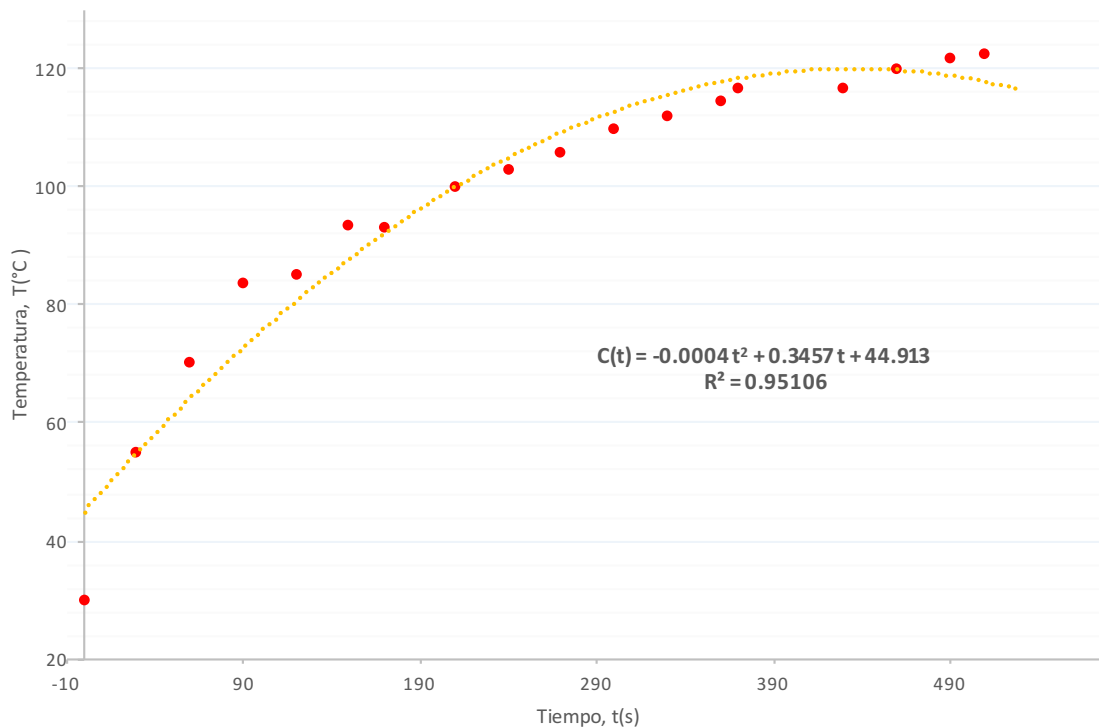


Figura 13. Proyección de la función C(t) como regresión cuadrática aproximando la función real de aumento en la temperatura con respecto al tiempo.

Fuente: Elaboración propia

En este caso, m es el valor de masa del tubo absorbedor ($m = 3 \text{ Kg}$), C_p es la capacidad calorífica del material del tubo ($C_{p_{\text{cobre}}} = 0.91 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$), y $\frac{dT}{dt}$ es la razón de cambio de temperatura con respecto al tiempo.

Dado que se respetan las condiciones supuestas para (6), el cambio real de temperatura con el tiempo se podría describir mediante la primer función derivada de $C(t)$. Es decir, es posible calcular un valor aproximado a la entrada de calor en el sistema mediante la expresión:

$$\dot{E}(t) = m C_p (-0.0008 t + 0.3457) \quad (7)$$

Este valor de entrada de energía al sistema es decreciente, puesto que el mismo tiene una capacidad limitada de retención de la energía por las pérdidas de calor que sean inevitables (transferencia por contacto a los elementos adyacentes de soporte de la estructura, diferencia de temperatura de la cabina completa y sus alrededores, etcétera).

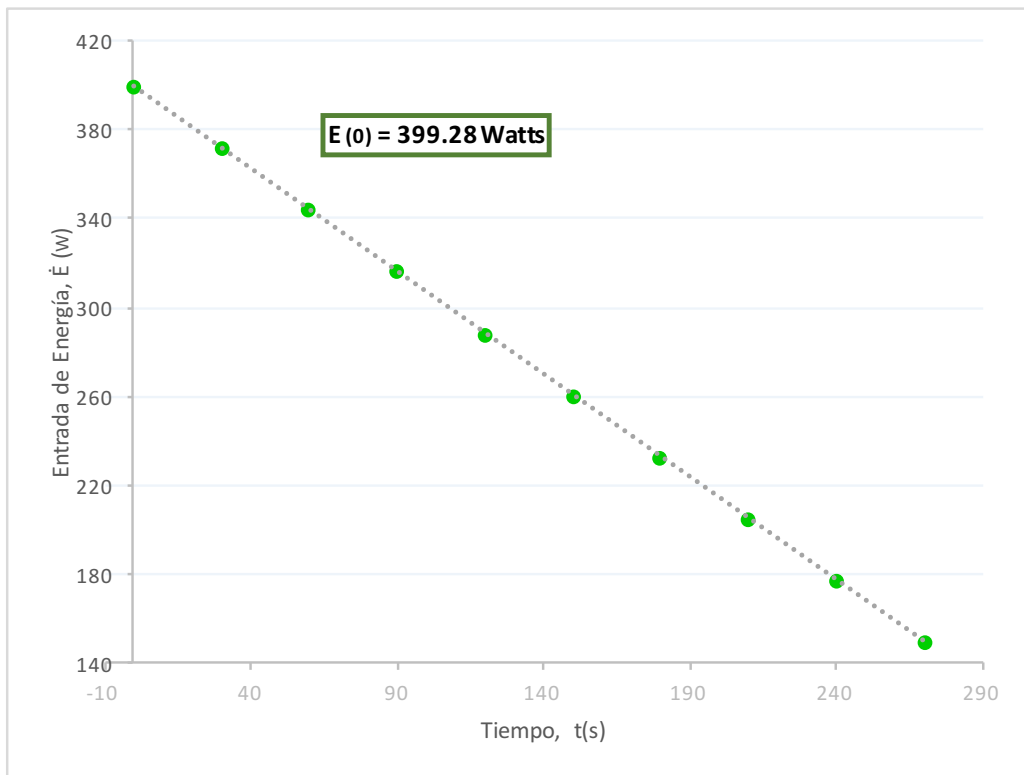


Figura 14. Proyección de la función $E(t)$, entrada de energía con el paso del tiempo.
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, considerando que el sistema en operación tendría la capacidad de redirigir la energía absorbida al punto de descarga, el dispositivo concentrador tiene este límite teórico de absorción si se logra la máxima eficiencia de transporte, así como idealmente contar con una entrada de fluido enfriado a muy baja temperatura. La figura 14 muestra la progresión de entrada energética con respecto al tiempo, así como el valor máximo de entrada esperado $E_{(0)} = 399.28 \text{ Watts}$.

Este valor de entrada de energía se puede comparar contra el máximo de energía aprovechable calculado en (3) con el fin de obtener un valor de eficiencia del concentrador. La eficiencia de absorción tiene la forma:

$$\eta_c = \frac{E_{(0)}}{E_R} = \frac{399.28 \text{ W}}{1246.32 \text{ W}} = 0.320 \quad (8)$$

Que indica un 32% de eficiencia en la etapa de absorción. Aunque este valor se obtiene de manera analítica sobre una base de consideraciones teóricas semi-ideales, representa una aproximación válida de la eficiencia del sistema termoconcentrador.

6.3.2 Sistema de Transporte y Descarga de Calor

Con el objetivo de comprobar la eficiencia en entrega de la energía absorbida, se llevó a cabo experimentación sobre el sistema de descarga. El experimento consistió en una medición de la temperatura que se tiene en un punto al inicio del serpentín de descarga, cuantificando así la entrada de calor al mismo y por ende su capacidad de calentamiento del aire circundante. Además, mediante la contabilidad de pérdidas atribuibles al recorrido del fluido caliente desde el punto de concentración hasta la entrada de la estufa en el sauna es posible determinar la eficiencia en el transporte. La figura 15 muestra un diagrama con la posición de los puntos de interés en cuanto a la medición de temperatura en la tubería.

Entre los puntos T_1 y T_2 se encuentra la sección caliente del sistema de tuberías, mientras los puntos T_3 y T_4 delimitan la sección fría. Si se definen las eficiencias de transporte de manera que la caída del principio al fin de cada sección, con respecto a una eficiencia perfecta si no existen pérdidas en dicha sección, se tienen eficiencias individuales η_1 y η_2 . El promedio de estas eficiencias implica una eficiencia global de transporte η_T , a modo que se tiene:

$$\eta_T = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} = \frac{\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \left(\frac{T_4}{T_3}\right)}{2} \quad (9)$$

De la ecuación (9) resulta obvio que tener una menor diferencia entre los puntos de inicio y fin de cada sección respectiva es una medida de mantener la eficiencia en un valor máximo posible. Aunque tener una entrada de fluido con menor temperatura en el concentrador es la mejor manera de garantizar una máxima absorción de energía (como se describe en la sección 6.3.1), no es ideal que el fluido pierda calor entre los puntos T_3 y T_4 ; el razonamiento tras este concepto es que el fluido debe estar enfriado como parte de la remoción de calor en la sección de descarga, y no por pérdidas en el sistema de transporte.

De manera similar al análisis de eficiencia detallado en (9) para la tubería de transporte, se tomaron como referencia los puntos en la entrada y salida de la tubería en el intercambiador con el fin de determinar su eficiencia, con base a la siguiente expresión:

$$\eta_I = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_\infty} \quad (10)$$

Donde los registros T_2 y T_3 corresponden a aquellos detallados en la figura 15, y T_∞ representa el valor de temperatura interno en el sauna; la relación del denominador comprende el total máximo de energía transferible dadas las condiciones del sauna, mientras el numerador establece la diferencia de carga de calor en la entrada y salida del intercambiador.

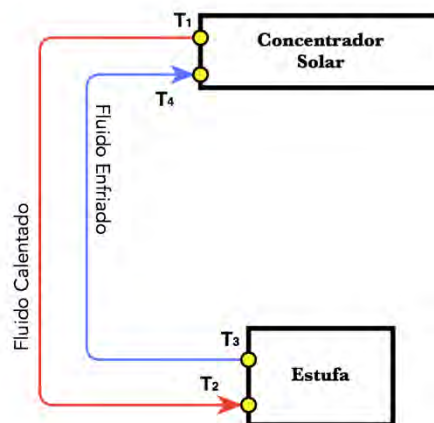


Figura 15. Puntos de medición de temperatura en tubería.
Fuente: Elaboración propia.

Si el fluido no presenta diferencias considerables de temperatura en los puntos de entrada y salida de ambos, concentrador e intercambiador, significa que las capacidades de carga y descarga no se están explotando.

La experimentación realizada comprendió tres de entre los últimos días del mes de Enero, 2016, en el punto de máxima radiación solar. Las pruebas consistieron en activar el sistema de concentración y bombeo de fluido de transferencia durante 30 minutos, y registrar el comportamiento de la temperatura contra el tiempo, medido sobre la superficie del intercambiador de calor. Los resultados obtenidos para estas pruebas se muestran en la tabla 7.

Las condiciones solares en esta época del año están lejos de ser las ideales. Mientras que la evaluación del sistema de concentración solar tuvo pruebas en los meses de máxima incidencia solar, el sistema completo solo contó con oportunidad de evaluación en el mes de Enero. Esta situación no es enteramente coincidental, pues permitió verificar la capacidad del sistema de aprovechar la energía solar en condiciones adversas, donde puede tenerse una mayor utilidad del calor absorbido para calentar el sauna cuando las temperaturas ambientales son las más bajas de todo el año.

Los resultados obtenidos en la tabla 7 no son nada satisfactorios. Por una parte, es evidente que como resultado de la acción del concentrador sobre el fluido de transporte la temperatura va en crecimiento. Sin embargo, este crecimiento es mínimo, y la velocidad con que esta crece es muy poca para asumir que se alcanza una temperatura de trabajo antes de que la disponibilidad solar del día termine.

La figura 16 muestra una proyección de los valores de crecimiento que se pueden esperar para el más positivo de los casos de calentamiento. Es decir, se proyectó una extrapolación para la regresión exponencial de los datos registrados durante el experimento para los siguientes 60 minutos después de los medidos. Esto con el fin de visualizar un máximo de temperatura alcanzable si se conservara la radiación solar en su máximo nivel sobre el concentrador. Se puede observar que la proyección solo expone la baja velocidad en la tendencia de crecimiento, y establece valores de temperatura a la entrada del intercambiador que distan bastante de ser los requeridos para un apropiado calentamiento del baño sauna.

Tabla 7. Temperaturas medidas en la entrada del intercambiador de calor.

t (mm:ss)	T2(°C)
0:00	15.2
4:05	14.6
14:20	12.4
26:37	16.5
33:30	16.2

t (mm:ss)	T2(°C)
0:00	15
1:00	16
2:15	17.6
4:10	16.6
5:15	17
6:30	17.4
8:20	17.4
13:00	17.4
15:00	18
20:10	18.1
24:20	19.1
28:40	20.1
32:40	19.7

t (mm:ss)	T2(°C)
0:00	20.6
1:00	21.6
2:15	21.4
3:15	22.6
4:00	23.4
5:00	22.6
6:00	21.8
8:01	18.6
9:30	19.8
10:10	20.2
12:30	22.8
14:20	22.6
17:40	22.5
20:00	23.2
22:40	23.5
27:40	24.9
30:10	24.4
33:00	25.1

Fuente: Elaboración propia

Es observable que para el mejor de los casos, la temperatura que se puede esperar alcanzar no supera los 34°C. En los otros casos, las temperaturas no son capaces de superar los 30°C. Es decir, no se puede cumplir el calentamiento apropiadamente. Estas proyecciones consideran además, que el punto de máxima radiación solar se puede conservar con el paso del tiempo, lo cual no sucede en la realidad.

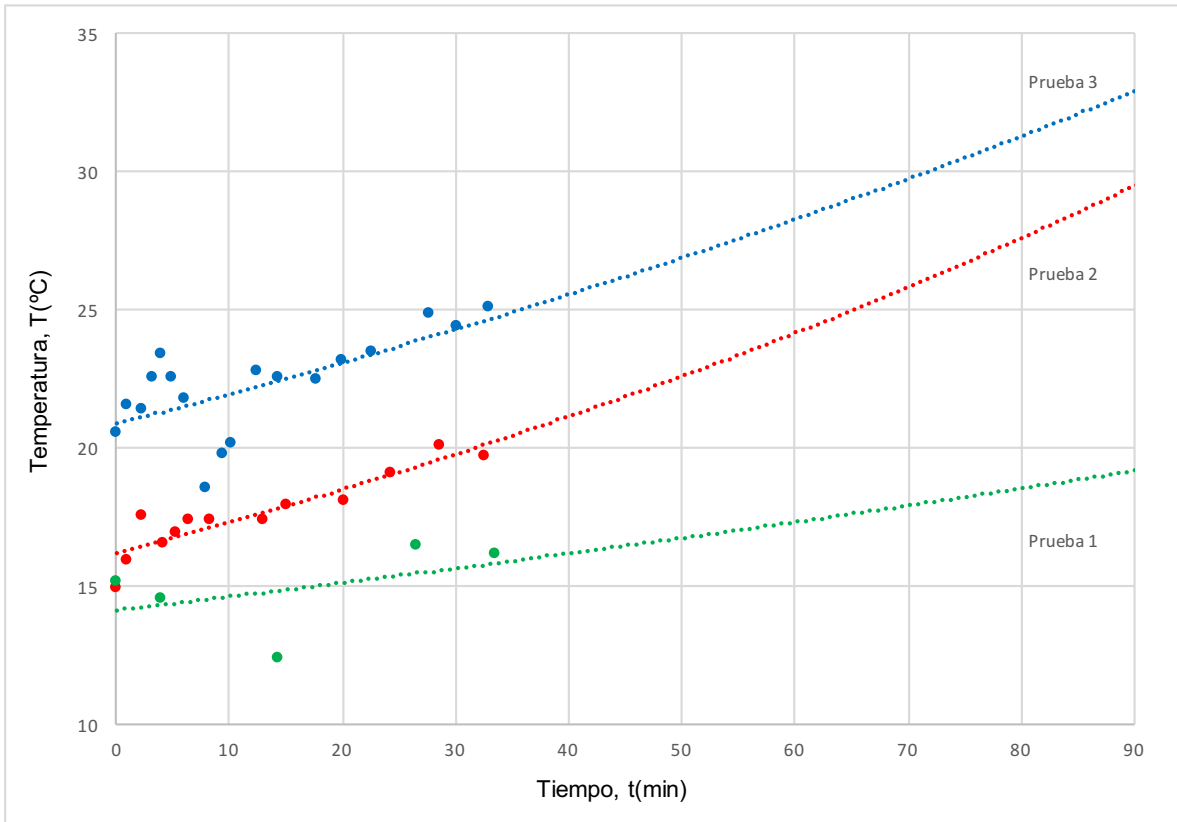


Figura 16. Proyección de temperaturas esperadas en intercambiador de calor.
 Fuente: Elaboración propia.

VII. DISCUSIÓN

La línea de investigación en materia de energías renovables es un área que sigue mostrando constante y acelerado crecimiento (Hartley et al., 2016); desarrollar innovación tecnológica con capacidad de aprovechar la energía solar abundante en la región propone ser una solución a los problemas ambientales y económicos que el futuro advierte (Hadwan y Alkholidi, 2016), aún cuando la explotación de este recurso implica alteraciones climáticas antropocéntricas (Huang et al., 2014). Si bien los resultados muestran que no todo proyecto representa capacidad de sustentar por completo las necesidades energéticas localizadas, y consecuentemente remediar la situación de energía a nivel global, esfuerzos por sustituir la metodología tradicional como en el presente deben continuar dada la inevitabilidad en la sustitución de fuentes de energía.

Los dispositivos de microgeneración demuestran constantemente en la literatura ser una medida efectiva de independencia energética de la red (Alstone et al., 2014), o en ocasiones una entrada económica adicional para hogares con alto nivel de aprovechamiento (Juntunen y Hyysalo, 2015); sin embargo, los resultados indican que alcanzar este cometido requiere no solo de condiciones óptimas de disponibilidad en la fuente de energía, sino el desarrollo de un sistema de alta complejidad técnica y consecuentemente de elevados costos de investigación, construcción, operación y mantenimiento.

Las actividades que involucran acondicionamiento térmico para confort se encuentran entre las que más energía consumen en un hogar (Kwong, Adam y Sahari, 2014), especialmente en zonas tropicales y de clima extremo (Pellegrino, Simonetti y Chiesa, 2016). Más allá de las implicaciones ambientales que un elevado consumo de energía de origen fósil tiene, los requerimientos energéticos de un hogar tienen un impacto económico considerable que la producción de energía renovable in situ sugiere satisfacer. Desafortunadamente, analizar los costos asociados al desarrollo de energía renovable en el presente proyecto muestra que son aún limitadas las áreas donde su implementación resulta económicamente viable.

Son diversas las posturas con respecto a la rentabilidad de un proyecto de pequeña escala de energía solar (Kwan y Kwan, 2011; Colclough y Griffiths, 2016). Al mencionar el costo de construir un proyecto de energía renovable, muchos autores parecen hacer hincapié al ahorro que una fuente gratuita e inagotable de energía representa (Muradov y Veziroglu, 2008), dejando en ocasiones de lado el exceso en inversión que la investigación y

desarrollo, así como mecanismos de producción más complejos y sofisticados pueden implicar. No se trata esto de una regla general, pero es de importante consideración si, como se muestra en la tabla 8, los costos que son atribuibles a la construcción del proyecto no son una buena representación de la realidad. Aquellos costos que no son evidentes en el desarrollo del proyecto son encima variables, pues dependen de muy diversos factores como la abundancia en el recurso a aprovechar, o el nivel de conocimiento y capacidad de resolver dificultades técnicas que se puedan presentar para quien desarrolla cada proyecto (Kennedy y Basu, 2013).

Tabla 8. Resumen de costos asociados a la construcción del sistema.

Categoría	Concepto	Monto
Concentrador	Conexiones y Tornillería	\$685.48
	Espejos	\$780.00
Transporte	Sistema de Bombeo	\$3,095.94
Estufa	Tubería y Conexiones	\$1,905.20
	TOTAL	\$6,466.62

Fuente: Elaboración propia

Si se compara este valor con otras alternativas de producción de energía, podemos tener una idea del potencial de ahorro de tener esta implementación en particular, cuando se suma también el costo operativo de cada solución y los costos ocultos ambientales y sociales que cada alternativa represente (Munguía, et al., 2016). Es aquí donde surge un verdadero análisis de la viabilidad de desarrollo de proyectos similares futuros, con el estado actual de la tecnología solar térmica.

Este proyecto demuestra viabilidad de producción energética, si se considera ante todo que no se utilizan recursos para la producción de la misma más allá de aquellos que la construcción del dispositivo requiere. No obstante, estos recursos utilizados representan un impacto que es potencialmente comparable con el de metodologías ya disponibles, cuando se habla de proyectos de desarrollo individual contra aquellos que ya tienen una visión de gran escala (Antonelli et al., 2015).

Con respecto a los materiales utilizados en la construcción del modelo desarrollado, el proyecto siempre conservó la perspectiva de no representar una carga contra ciertos

niveles preestablecidos de sustentabilidad (Choudhury, 2016). Es decir, se debe considerar que los materiales con que se logra coleccionar energía de la naturaleza provengan de fuentes recicladas, zonas libres de conflicto (Young y Dias, 2012), bajo consumo de recursos en obtención o procesamiento, sean de fin reciclable, preferiblemente no tóxicos y de inversión económica equiparable o rentable a plazo considerable. Ninguno de los materiales de construcción o sustancias utilizadas en el desarrollo del proyecto presenta complicaciones en cuanto a su proveniencia o futura disposición. El costo de desarrollo está de acuerdo a la inversión que se puede tener por un sistema similar tomado directamente del mercado.

Es de importancia aclarar que aunque los resultados obtenidos no son del todo satisfactorios, la explotación de diferentes tipos de energía renovable disponible para cada comunidad es un futuro inescapable (Hayward, 2015). El volumen de proyectos haciendo uso de energía solar está lejos de ser suficiente si lo que se pretende es sustituir completamente los medios de obtención de energía tradicionales que se saben ya perjudiciales por diversas cuestiones. El futuro de las energías renovables está pues relacionado a desarrollar proyectos que avancen la industria, independientemente de su efectividad, en una dirección de progreso tecnológico basado en iteraciones constructivas como la presentada en esta investigación.

VIII. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se diseñó y construyó un sistema con capacidad de producir calor para cubrir los requerimientos energéticos de un cuarto de sauna. Este diseño representa una contribución al campo de las energías renovables, al aprovechar el alto potencial de producción de energía solar para la región de Hermosillo, Sonora, a través de un dispositivo de pequeña escala que absorbe y hace uso del calor tal y como se recibe naturalmente. El sistema representa una innovación tecnológica debido a la disposición de elementos para la aplicación específica de producir energía renovable a utilizarse en un cuarto de baño sauna de un deportivo sustentable de la ciudad.

El sistema propuesto utiliza la tecnología de absorción de energía solar por medio de espejos lineales en un arreglo Fresnel, haciendo uso de agua como fluido de transferencia para absorber el calor y así depositarlo al interior del cuarto de baño sauna mediante un intercambiador de calor tradicional. Para obtener un mejor desempeño en cuanto a dicha absorción solar, el arreglo de espejos se distribuyó en una estructura móvil con capacidad de seguir al sol en su trayectoria diaria.

La evaluación del sistema concentrador solar arrojó resultados de eficiencia que se encuentran dentro de niveles aceptables cuando comparados contra diversas metodologías de captura solar. Un 32% de absorción de la energía disponible en la región, se traduce en un sistema que siendo de bajo costo de producción y nivel técnico de construcción es capaz de competir hasta con los esquemas de absorción más eficientes conocidos.

Sin embargo, los resultados de experimentación del sistema completo fueron insatisfactorios. Dadas las condiciones solares que se tenían cuando se llevaron a cabo las pruebas, no se puede determinar que la disponibilidad de energía sea del todo aprovechable con un sistema como el diseñado. Es decir, aún cuando el sistema tiene base en la literatura y los conceptos aplicables a la región dado su clima y latitud, la práctica indica una deficiencia del mismo para lograr su función dadas las limitaciones de diseño originales de movilidad para una trayectoria solar de baja inclinación, que en concepto no suponían un problema mayor. La alta variabilidad angular que la trayectoria solar tiene durante los meses de invierno, evitan que un seguimiento unidimensional como el implementado ofrezca una captación solar apropiada, que además de ser suficiente en cantidad, sea constante en capacidad.

Es por esta misma razón, que la limitante que se conoce en la producción de calor, se determinó relacionada al seguimiento solar y la insuficiente capacidad de captura relacionada. Un dispositivo con funcionamiento en base a reflexión solar tiene todo su potencial derivado de la efectividad con que es capaz de redireccionar los rayos solares para concentrarles en el punto de interés. Un sistema de seguimiento solar bidireccional habría tenido menor limitación para aprovechar el alto potencial de energía disponible en la región.

IX. RECOMENDACIONES

Las principales dificultades de desarrollo de cualquier tecnología de energía solar siempre parten de la disponibilidad limitada y aleatoria del recurso. La construcción del sistema de seguimiento solar puede ofrecer la garantía de obtener el provecho máximo de incidencia de los rayos solares y su aprovechamiento en el medio que se disponga.

El presente proyecto hace uso de seguimiento solar unidimensional que permite tener captura de energía solar para un horario relativamente extendido; sin embargo, la implementación de seguimiento en dos dimensiones puede significar ampliar en una mayor capacidad la absorción energética. En especial conforme a los cambios estacionarios, el dispositivo construido se limita a estar posicionado con una inclinación estándar hacia el sur y por ende no responde ante el constante ajuste de inclinación en el ángulo solar que se da por efecto de la traslación orbital de la tierra.

El fluido de transferencia se determinó en base a las limitaciones técnicas del equipo, y las capacidades de transferencia requeridas por el proceso. Con el objetivo de aumentar la eficiencia del sistema, se puede optar por hacer modificaciones en el diseño que permitan la utilización de fluidos con mejores propiedades termodinámicas de transferencia. La investigación apunta en la dirección de utilizar fluidos de propiedades enriquecidas como el caso de los nanofluidos, que no interfieran en naturaleza química en cuanto a reactividad con los materiales de construcción.

También, la ubicación de los elementos es de suma importancia. Un posicionamiento más apropiado de las partes del sistema responsables de cada una de las etapas, puede implicar una diferencia tan grande en lo que respecta a transporte, como lo es tener los elementos a calentar superiores en altura a aquellos que deben enfriarse. Respetar la naturaleza del flujo es una manera de incrementar la capacidad de transporte de calor en el sistema, que eventualmente se traduce en una mejor eficiencia global.

X. REFERENCIAS

- Alstone, P., Lai, P., Mills, E., y Jacobson, A., 2014. High Life Cycle Efficacy Explains Fast Energy Payback for Improved Off-Grid Lighting Systems. *Journal of Industrial Ecology*, 18(5), pp. 722-733.
- Andres, R. J., Gregg, J. S., Losey, L., Marland, G., y Boden T. A., 2011. Monthly, global emissions of carbon dioxide from fossil fuel consumption. *Tellus*, 63B, pp.309-327.
- Antonelli, M., Baccioli, A., Francesconi, M., Desideri, U., y Martorano, L., 2015. Electrical production of a small size Concentrated Solar Power plant with compound parabolic collectors. *Renewable Energy*, 83, pp. 1110-1118.
- Basu, D. N., Battacharyya, S., y Das, P. K., 2013. Development of a unified model for the steady-state operation of single-phase natural circulation loops. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62, pp.452-462.
- Bojić, M., 2010. Will Renewable Energy Save Our Planet. *AIP Conference Proceedings*, 1239(1), pp. 12-21.
- Budea, S., 2014. Solar Air Collectors for Space Heating and Ventilation Applications – Performance and Case Studies Under Romanian Climatic Conditions. *Energies*, 7, pp.3781-3792.
- Buschmann, M. H., 2013. Nanofluids in thermosyphons and heat pipes: Overview of recent experiments and modelling approaches. *International Journal of Thermal Sciences*, 72, pp.1-17.
- Buschmann, M. H., y Franzke, U., 2014. Improvement of thermosyphon performance by employing nanofluid. *International Journal of Refrigeration*, 40, pp.416-428.
- Celen, A., Çebi, A., Aktas, M., Mahian, O., Dalkilic, A. S., y Wongwises, S., 2014. A review of nanorefrigerants: Flow characteristics and applications. *International Journal of Refrigeration*, 44, pp.125-140.
- Chatterjee, A., Bernal, E., Seshadri, S., Mayer, O., Greaves, M., 2011. Linear Fresnel Reflector based Solar Radiation Concentrator for Combined Heating and Power. En: AIP (American Institute of Physics), 7th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems. Munich, Alemania, 2 Diciembre 2011. San José, CA: AIP.
- Chegade, A. A., Louahlia-Gualous, H., Le Masson, S., Victor, I., y Abouzahab-Damaj, N., 2014. Experimental investigation of thermosyphon loop thermal performance. *Energy Conversion and Management*, 84, pp.671-680.
- Chen, L., y Xie, H., 2009. Silicon oil based multiwalled carbon nanotubes nanofluid with optimized thermal conductivity enhancement. *Colloid and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 352, pp.136-140.
- Choudhury, I. A., 2016. Renewable And Sustainable Materials. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, pp. 1-2.
- Colclough, S., y Griffiths, P., 2016. Financial analysis of an installed small scale seasonal thermal energy store. *Renewable Energy*, 86, pp. 422-428.
- Cuce, E., Bali, T., y Sekucoglu, S. A., 2011. Effects of passive cooling on performance of silicon photovoltaic cells. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 6, pp.299-308.
- Cuthbert, R., Pan, F., Nieminen, K., Friedrich, K., Wilkinson, D., y Cotton, J., 2013, A Solar PV-Thermal Energy Design Optimization Study of a Building Footprint Limited Net-Zero Energy Facility. *ASHRAE Transactions*, 119(1), pp.1-15.
- Delucchi, M. A., y Jacobson, M. Z., 2013. Meeting the world's energy needs entirely with wind, water, and solar power. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 69(4), pp.30-40.
- Diğer, F., 2011. Overview of the photovoltaic technology status and perspective in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp.3768-3779.
- Dobriansky, Y., 2011. Concepts of self-acting circulation loops for downward heat transfer (reverse thermosyphons). *Energy Conversion and Management*, 52, pp.414-425.
- Energy Information Administration (EIA), 2013. *International Energy Outlook 2013*. E.U.A.: E.I.A.
- Faizal, M., Saidur, R., Mekhilef, S., y Alim, M. A., 2013. Energy, economic and environmental analysis of metal oxides nanofluid for flat-plate solar collector. *Energy Conversion and Management*, 76, pp.162-168.
- Flamant, G., Gauthier, D., Benoit, H., Sans, J. L., Boissière, B., Ansart, R., y Hemati, M., 2014. A new heat transfer fluid for concentrating solar systems: Particle flow in tubes. *Energy Procedia*, 49, pp.617-626.
- Gangadevi, R., Senthilraja, S., y Imam, S. A., 2013. Efficiency Analysis of Flat Plate Solar Collector Using Al₂O₃/Water Nanofluid. *Indian Streams Research Journal*, Abril, pp.1-4.
- Genwa, K. R., y Sagar, C. P., 2013. Energy efficiency, solar energy conversion and storage in photovoltaic cell. *Energy Conversion and Management*, 66, pp.121-126.
- Ghazvini, M., Akhavan-Behabadi, M. A., Rasouli, E., y Raisee, M., 2012. Heat Transfer Properties of Nanodiamond-Engine Oil Nanofluid in Laminar Flow. *Heat Transfer Engineering*, 33(6), pp.525-532.
- Golove, W., Brown, R., y Holt, E., 2010. *Guide to Purchasing Green Power: Renewable Electricity, Renewable Energy Certificates and On-Site Renewable Generation*. E.U.A.: Environmental Protection Agency.
- Hadwan, M., y Alkholidi, A., 2016. Solar power energy solutions for Yemeni rural villages and desert communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, pp. 838-849.
- Hart, G. H., 2011. Saving Energy by Insulating Pipe Components on Steam & Hot Water Distribution Systems. *ASHRAE Journal*, 53(10), pp.42-48.

- Hartley, P., Medlock III, K. B., Temzelides, T., y Zhang, X., 2016. Energy Sector Innovation And Growth: An Optimal Energy Crisis. *The Energy Journal*, 37(1), pp. 233-258.
- Hayward, J., 2015. Real-market view of renewables in the UK. *Renewable Energy Focus*, May/June, pp. 16-17.
- Hoble, D. A., 2013. Study of Solar Cells Operation under the Influence of Temperature. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 6(2), pp.17-20.
- Hordy, N., Rabilloud, D., Meunier, J-L., y Coulombe, S., 2014. High temperature and long-term stability of carbon nanotube nanofluids for direct absorption solar thermal collectors. *Solar Energy*, 105, pp.82-90.
- Hosny, Z. A.-Z., 2004. Heat transfer characteristics of some oils used for engine cooling. *Energy conversion and management*, 45, pp.2553-2569.
- Huang, H-H., Hedquist., B. C., Lee, T., y Myint, S. W., 2014. Climate Modeling for Renewable Energy Applications. *Advances in Meteorology*, 2014, pp. 1-2.
- Huminic, G., y Huminic, A., 2013. Numerical study on heat transfer characteristics of thermosyphon heat pipes using nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 76, pp.393-399.
- Hussein, A. M., Sharma, K. V., Bakar, R. A., y Kadirgama, K., 2014. A review of forced convection heat transfer enhancement and hydrodynamic characteristic of a nanofluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp.734-743.
- Ismail, Z., 2011. Opportunities for Further Renewable Energy Utilization in Malaysia. *International Journal of Energy Science*, 1, pp. 144-150.
- Javadi, F. S., Saidur, R., y Kamalisarvestani, M., 2013. Investigating performance improvement of solar collectors by using nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, pp.232-245.
- Jiang, H., Li, H., Zan, C., Wang, F., Yang, Q., y Shi, L., 2014. Temperature dependence of the stability and thermal conductivity of an oil-based nanofluid. *Thermochimica Acta*, 579, pp.27-30.
- Juntunen, J. K., y Hyysalo, S., 2015. Renewable micro-generation of heat and electricity—Review on common and missing socio-technical configurations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, pp. 857-870.
- Karami, M., Akhavan Bahabadi, M. A., Delfani, S., y Ghozatloo, A., 2014. A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 121, pp.114-118.
- Kennedy, M., y Basu, B., 2013. A study on the implementation of renewable heating technologies in the domestic sector in Ireland with implications on consumers' decision-making. *Journal Of Cleaner Production*, 44, pp. 133-142.
- Knight, I., y Dunn, G., 2005. Measured energy consumption and carbon emissions of air-conditioning in UK office buildings. *Building Services Engineering Research & Technology*, 26(2), pp.89-98.
- Khullar, V., y Tyagi, H., 2011. Enhancing Optical Efficiency of a Linear Parabolic Solar Collector through Nanofluids. *AIP Conference Proceedings*, 1391, pp.353-355.
- Kwan, C. L., y Kwan, T. J., 2011. The financials of constructing a solar PV for net-zero energy operations on college campuses. *Utilities Policy*, 19, pp. 226-234.
- Kwong, Q. J., Adam, N. M., y Sahari, B. B., 2014. Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review. *Energy and Buildings*, 68, pp. 547-557.
- Ladjevardi, S. M., Asnaghi, A., Izadkhast, P. S., y Kashani, A. H., 2013. Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption. *Solar Energy*, 94, pp.327-334.
- Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., y Eastman, J. A., 1999. Measuring thermal conductivity on fluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, 121, pp.280-289.
- Liu, Q., Yu, G., y Liu, J. J., 2009. Solar radiation as a large-scale resource for energy-short world. *Energy & Environment*, 20(39), pp.319-329.
- López-González, D., Valverde, J. L., Sánchez, P., y Sánchez-Silva, L., 2013. Characterization of different heat transfer fluids and degradation study using a pilot plant device operating at real conditions. *Energy*, 54, pp.240-250.
- Luo, Z., Wang, C., Wei, W., Xiao, G., y Ni, M., 2014. Performance improvement of a nanofluid solar collector based on direct absorption collection (DAC) concepts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, pp.262-271.
- Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I., y Wongwises, S., 2013. A review of the applications of nanofluids in solar energy, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57, pp.582-594.
- Malauskas, E., Pedišius, N., y Zygmantas, G., 2014. Investigation of liquid viscosity influence on flow rate measurement by rotary vane meters. *Mechanika*, 20(2), pp.158-164.
- Manikumar, R., y Arasu, A. V., 2014. Heat loss characteristics study of a trapezoidal cavity absorber with and without plate for a linear Fresnel reflector solar concentrator system. *Renewable Energy*, 63, pp.98-108.
- Meng, Z., Wu, D., Wang, L., Zhu, H., y Li, Q., 2012. Carbon nanotube glycol nanofluids: Photo-thermal properties, thermal conductivities and rheological behavior. *Particuology*, 10, pp.614-618.
- Misale, M., Devia, F., y Garibaldi, P., 2012. Experiments with Al₂O₃ nanofluid in a single-phase natural circulation mini-loop: Preliminary results. *Applied Thermal Engineering*, 40, pp.64-70.

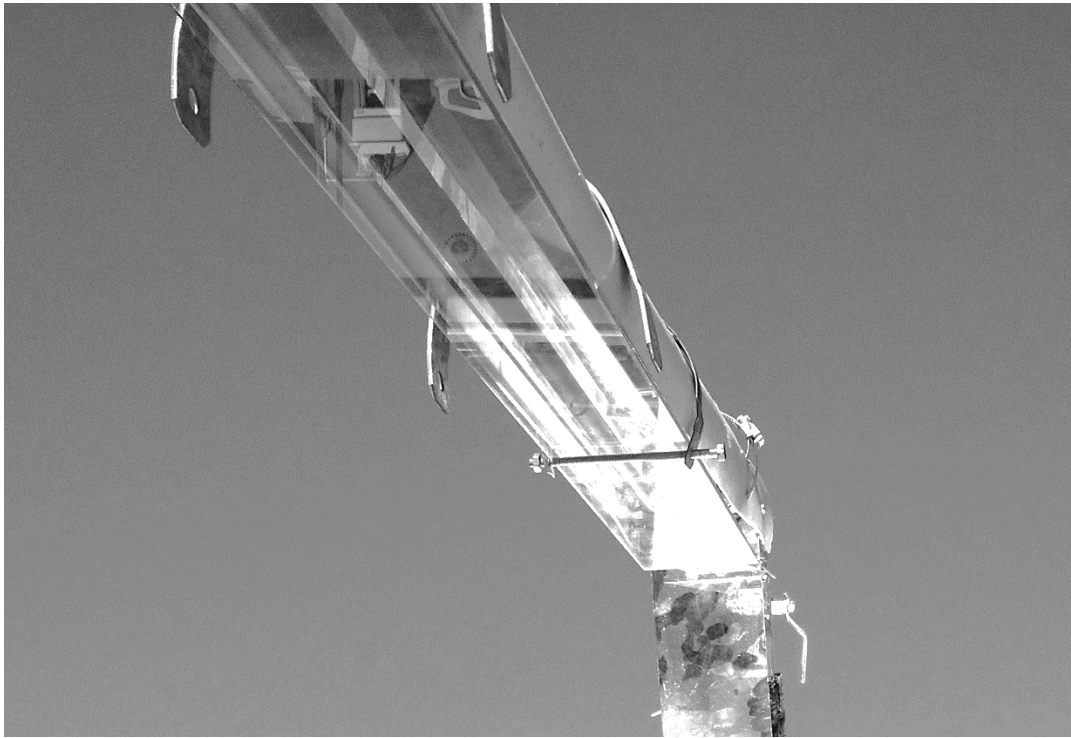
- Moran, M. J., y Shapiro, H. N., 2004. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 5ta Ed. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Moraveji, M. K., y Hejazian, M., 2013. Natural convection in a rectangular enclosure containing an oval-shaped heat source and filled with Fe₃O₄/water nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, pp.135-146.
- Muhammad-Sukki, F., Ramirez-Iniguez, R., McMeekin, S. G., Stewart, B. G., y Clive, B., 2010. *Solar concentrators*. *International Journal of Applied Sciences*, 1(1), pp.1-15.
- Mundo-Hernández, J., Alonso, B. de C., Hernández-Álvarez, J., y Celis-Carrillo, B., 2014. An overview of Solar photovoltaic energy in Mexico and Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, pp.639-649.
- Munguia, N., Velazquez, L., Perez, R., Rincón, D., Marin, M., Giannetti, B.F., Almeida, C.M.V.B. y Agostinho, F., 2015. Sustainability Assessment of Alternatives for Heat Generation and Transfer in Saunas. *Journal of Environmental Protection*, 6, pp. 1378-1393.
- Muradov, N. Z., y Veziroglu, T. N., 2008. "Green" path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 6804-6839.
- Mussard, M., y Nydal, O. J., 2013. Charging of a heat storage coupled with a low-cost small-scale solar parabolic trough for cooking purposes. *Solar Energy*, 95, pp.144-154.
- Nasrin, R., Alim, M. A., y Chamkha A. J., 2012. Buoyancy-driven heat transfer of water–Al₂O₃ nanofluid in a closed chamber: Effects of solid volume fraction, Prandtl number and aspect ratio. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, pp.7355-7365.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2016. Solar and Wind Energy Resource Assessment Map Tools. [en línea] Disponible en: <<https://maps.nrel.gov/swera/>> [Consultado 15/11/2016].
- Nithyanandam, K., y Pitchumani, R., 2013. Thermal energy storage with heat transfer augmentation using thermosyphons. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, pp.281-294.
- Nixon, J. D., Dey, P. K., Davies, P. A., 2013. Design of a novel solar thermal collector using a multi-criteria decision-making methodology. *Journal of Cleaner Production*, 59, pp.150-159.
- Nwosu, P. N., Meyer, J., y Sharifpur, M., 2014. Nanofluid Viscosity: A simple model selection algorithm and parametric evaluation. *Computer & Fluids*, 101, pp.241-249.
- Pakravan, H. A., y Yaghoubi, M., 2013. Analysis of nanoparticles migration on natural convective heat transfer of nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 68, pp.79-93.
- Parker, M., y Ho, P., 2013. *Solar and the Next Energy Revolution: Beginning to See the Light*. Black Book - Solar & the Next Energy Revolution: Beginning To See the Light, pp.1-142.
- Parvin, S., Nasrin, R., y Alim, M. A., 2014. Heat transfer and entropy generation through nanofluid filled direct absorption solar collector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, pp.386-395.
- Patel, M. R., 1999. *Wind and Solar Power Systems*. E.U.A.: CRC Press.
- Pellegrino, M., Simonetti, M., y Chiesa, G., 2016. Reducing thermal discomfort and energy consumption of Indian residential buildings: Model validation by in-field measurements and simulation of low-cost interventions. *Energy and Buildings*, 113, pp. 145-158.
- Pierce, A., 2010. Concentrating Solar Power = Clean Inexpensive Technology. *Tech Directions*, 69(10), pp.12-13.
- Potter, M. C., y Somerton, C. W., 1993. *Thermodynamics for Engineers*. Nueva York: Mc Graw-Hill.
- Pye, J. D., Morrison, J. L., y Behnia, M., 2003. Transient modelling of cavity receiver heat transfer for the compact linear Fresnel reflector. En: *Proceedings of ANZSES solar 2003*. Sydney, Australia, 26-29 de Noviembre 2003.
- Rashin, M. N., y Hemalatha, J., 2013a. Viscosity studies on novel copper oxide–coconut oil nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 48, pp.67-72.
- Rashin, M. N., y Hemalatha, J., 2013b. Synthesis and viscosity studies of novel ecofriendly ZnO–coconut oil nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51, pp.312-318.
- Razi, P., Akhavan-Behabadi, M. A., y Saeedinia, M., 2011. Pressure drop and thermal characteristics of CuO-base oil nanofluid laminar flow in flattened tubes under constant heat flux. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, pp.964-971.
- Ryzhkov, I. I., y Minakov, A. V., 2014. The effect of nanoparticle diffusion and thermophoresis on convective heat transfer of nanofluid in a circular tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, pp.956-969.
- Sahoo, S. S., Varghese, S. M., Kumar, C. S., Viswanathan, S. P., Singh, S., 2013. Experimental investigation and computational validation of heat losses from the cavity receiver used in linear Fresnel reflector solar thermal system. *Renewable Energy*, 55, pp.18-23.
- Saidi, M., y Karimi, G., 2014. Free convection cooling in modified L-shape enclosures using copperwater nanofluid. *Energy*, 70, pp.251-271.
- Sajid, M. H., Said, Z., Saidur, R., Adikan, F. R. M., Sabri, M. F. M., y Rahim, N. A., 2014. A time variant investigation on optical properties of water based Al₂O₃ nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 50, pp.108-116.

- Sigma Thermal (S.T.), 2010. Selecting a Thermal Fluid Heater for your Process. *Process Heating*, 17(11), pp.17-19.
- Singh, P. L., Sarviya, R. M., y Bhagoria, J. L., 2010. Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers. *Applied Energy*, 87, pp.541-550.
- Skouri, S., Salah, M. B., Bouadila, S., Balgouthi, M., y Nasrallah, S. B., 2013. Optical, geometric and thermal study for solar parabolic concentrator efficiency improvement under Tunisia environment: A case study. *Energy Conversion and Management*, 75, pp.366-373.
- Smil, V., 2014. The Long Slow Rise of Solar and Wind. *Scientific American* [en línea], 310(1), pp.52-57, [Consultado 16/III/2014].
- Sokhansefat, T., Kasaeian, A. B., y Kowsary, F., 2014. Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using Al₂O₃/Synthetic oil nanofluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, pp.636-644.
- Soleimani, S., Sheikholeslami, M., Ganji, D. D., y Gorji-Bandpay, M., 2012. Natural convection heat transfer in a nanofluid filled semi-annulus enclosure. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, pp.565-574.
- Taylor, R. A., Phelan, P. E., Otanicar, T. P., Walker, C. A., Nguyen, M., Trimble, S., y Prasher, R., 2011. Applicability of nanofluids in high flux solar collectors. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(2), pp.023104-1-023104-15.
- Teng, T.-P., Hung, Y.-H., Jwo, C.-S., Chen, C.-C., y Jeng, L.-Y., 2011. Pressure drop of TiO₂ nanofluid in circular pipes. *Particuology*, 9, pp.486-491.
- Titan, C. P., Morshed, A. M., y Khan, J. A., 2013. Nanoparticle enhanced ionic liquids (NEILS) as working fluid for the next generation solar collector. *Procedia Engineering*, 56, pp.631-636.
- Turgut, A., y Doganay, S., 2013. Thermal performance of a single phase natural circulation mini loop working with nanofluid. *High Temperatures-High Pressures*, 46, pp.311-320.
- United Nations Environment Programme (UNEP), 2013. Sustainable Public Procurement: A Global Review. Paris: UNEP.
- United States Patent and Trademark Office (USPTO), 2016. *Patent Search* [en línea] Disponible en: <http://www.uspto.gov/patents-application-process/search-patents> [Consultado 22/II/2016].
- Viskanta, R., 2013. Thermal Engineering Challenges for the 21st Century. *Energetika*, 59(4), pp.175-182.
- Wang, J. Y., Chuang, T. J., y Ferng, Y. M., 2013. CFD investigating flow and heat transfer characteristics in a natural circulation loop. *Annals of Nuclear Energy*, 58, pp.65-71.
- Wirz, M., Petit, J., Haselbacher, A., y Steinfield, A., 2014. Potential improvements in the optical and thermal efficiencies of parabolic trough concentrators. *Solar Energy*, 107, pp.398-414.
- World Energy Council (WEC), 2013. World Energy Insight 2013. Daegu: WCE.
- Young, S. B., y Dias, G., 2012. Conflict-free minerals supply-chain to electronics. *Electronics Goes Green 2012+*, pp. 1-5.
- Zhang, L., Liu, J., He, G., Ye, Z., Fang, X., y Zhang, Z., 2014. Radiative properties of ionic liquid-based nanofluids for medium-to-high-temperature direct absorption solar collectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, pp.521-528.

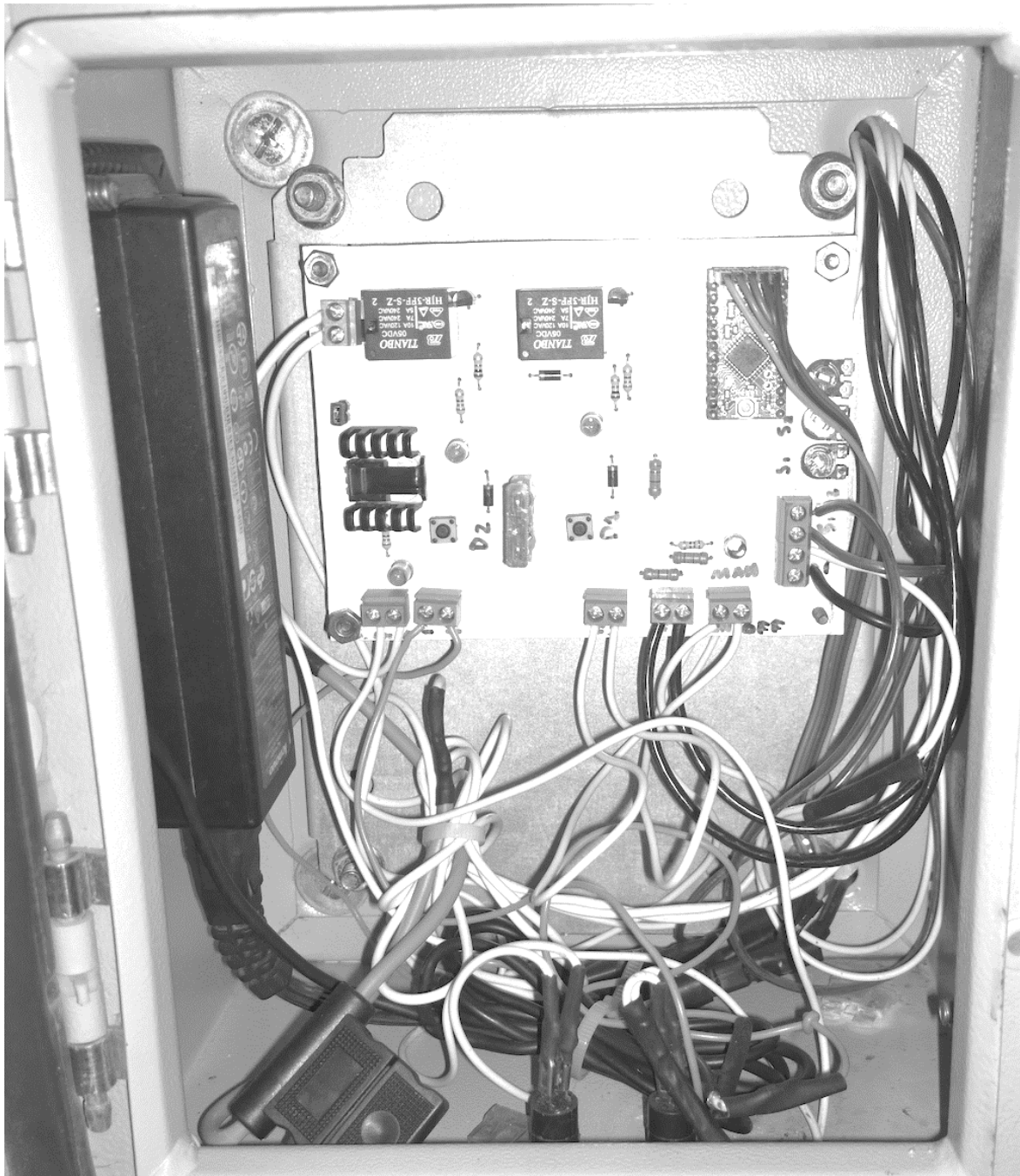
ANEXO 01

Evidencia Fotográfica de Construcción Final









ANEXO 02

TERMOCONCENTRADOR LINEAL FRESNEL PARA SAUNA MANUAL DE OPERACIONES

20 / ENERO / 2016

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se detallan los procedimientos de puesta en marcha y mantenimiento del equipo comprendido en el proyecto para calentar el aire interno de un sauna en un deportivo sustentable, alimentado únicamente por energía limpia.



2. CORRIDA DE EQUIPO

El sistema de concentración solar está diseñado para operar de manera completamente automática. Al final de cada jornada de trabajo, el equipo se prepara de forma automática para tener las condiciones de recepción solar de el próximo día. Solo en caso de que el día comience con alguna nubosidad que impida el paso del sol es que el concentrador no se comienza a reposicionar cuando una nueva jornada de trabajo se abre.

Por cuestiones de prueba y mantenimiento, así como corrección de posibles errores en el funcionamiento para lo que represente una jornada habitual, el sistema electrónico tiene la capacidad de funcionar también de modo manual. Esto significa que es posible tomar control sobre el posicionamiento del concentrador, y que este ignore las señales que los sensores de seguimiento envían. En la **figura 1** se observa la caja de control electrónico, junto a los puntos de interés para el control manual del concentrador.

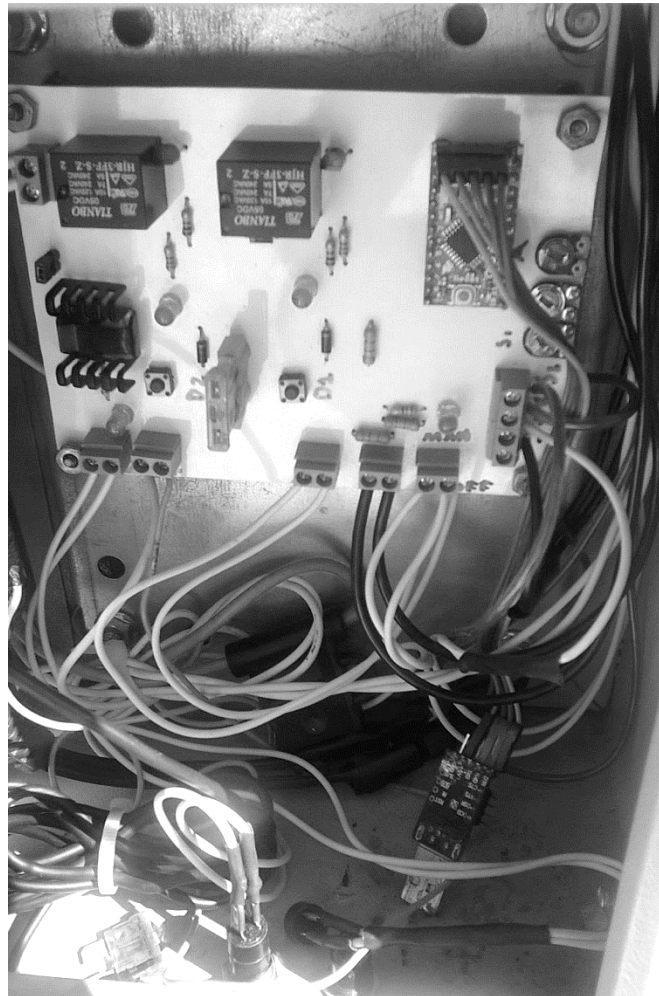


Figura 1. Control electrónico de Concentrador.

Una vez que el sistema de seguimiento comienza a funcionar, el concentrador se posiciona a modo de que la parábola de espejos crea

una reflexión concentrada sobre la cámara de absorción. El sistema de bombeo debe estar conectado y encendido entonces para permitir que el fluido de transferencia comience a circular primero por la tubería de



Figura 2. Tubería de transporte y sistema de bombeo.



Figura 3. Serpentín intercambiador para la descarga de calor.

transporte y segundo, el serpentín de descarga. Estos dos elementos se muestran en las figuras 2 y 3, respectivamente.

El sistema no tiene medición de temperatura al interior para limitar la entrada de calor al sauna, por lo que de ser necesario, se debe desviar la posición del concentrador manualmente si la temperatura de operación supera aquella que se espera al interior del sauna (80°C como máximo).

3. MANTENIMIENTO

3.1 ARREGLO DE ESPEJOS

El sistema de espejos necesita limpieza constante. Un buen plan de limpieza no solo permite mantener la eficiencia de reflexión en el máximo aprovechable, sino también extender la duración de los espejos previniendo la formación de manchas o quemaduras sobre el cristal.

La limpieza puede ser en seco si se trata de capas ligeras de polvo. Un paño seco puede encargarse de esto. Si el espejo tiene manchas más difíciles, entonces se debe proceder a una limpieza en húmedo. Utilizar agua con detergente para remover manchas es opción, siempre y cuando en todo momento se tenga presente la fragilidad del espejo en cuanto a su soporte; así como también el riesgo que representa su filo lateral. Los espejos no tienen un borde de protección para no añadir más complejidad y peso en la estructura, por lo que este último punto es fundamental. La figura 4 muestra el proceso de limpieza en seco.

De quedar manchas que no se pueden remover en el cristal con limpieza común, será necesario un proceso de lijado ligero, que no lastime considerablemente la superficie reflectora del espejo a manera de



Figura 4. Limpieza en seco de espejos reflectores.

impedir su futura utilización. Se puede utilizar una lija de papel con un nivel granular mayor a 1000 para prevenir la marca por rayones de tamaño considerable.

3.2 ABSORBEDOR DE CALOR

La cámara de absorción está sellada para impedir el paso de agentes de contaminación que obstruyan la entrada libre de calor. En caso de requerirse, es necesaria solamente la limpieza del cristal que cubre la cavidad a manera de evitar la acumulación de polvo. Esto se puede realizar una vez por mes, y solo es necesario hacerse en seco.

3.3 CONTROL ELECTRÓNICO

El control electrónico se divide en cuatro partes: sensores de seguimiento, caja de control, cableado y motor. Los dos últimos elementos enlistados no requieren de ningún mantenimiento especial, a

no ser que se requiera su sustitución por falla. De ser el caso, el reemplazo completo de los componentes sería justificable.

3.3.1 SENSORES DE SEGUIMIENTO

Los sensores se encuentran en la parte más alta del sistema. Están constantemente expuestos a elementos como el polvo, lluvia y sol. Estos dos últimos no representan un problema mayor, dado que los sensores están sellados y preparados para las condiciones ambientales exteriores. El polvo por otro lado, aunque no les daña directamente, sí afecta su funcionamiento.

Una limpieza sencilla en seco debe ser suficiente para mantener el polvo separado de la entrada de luz, a manera que no se anteponga al funcionamiento de detección del sol.

3.3.2 CAJA DE CONTROL

Todos los controles electrónicos se encuentran en una caja metálica, sellada herméticamente, que no permite la entrada de agentes externos como el polvo y el agua. Salvo de ser necesario el reemplazo de algún componente por falla, no existe un mantenimiento, ni de limpieza, que sea necesario al interior de la caja.

De requerirse, puede necesitarse el reemplazo del fusible de paso, que bloquea la entrada de corriente eléctrica a todo el sistema, de detectarse algún corto circuito. En la **figura 1** se puede ver especificado la ubicación del fusible de paso, así como todos los demás elementos del sistema electrónico al interior de la caja de control.

3.4 ESTUFA DE INTERCAMBIO DE CALOR

Dada la posible acumulación de sales en el serpentín de intercambio por efecto de la evaporación de agua, resultado de la humidificación del aire caliente al interior del sauna, una limpieza constante de la deposición de

residuos sólidos es necesaria. De ser posible, una vez por semana se debe hacer un lavado simple de la estufa completa, incluyendo con esto el serpentín al interior, y la cubierta de rocas de transferencia. El lavado de agua dulce removerá la mayoría de las sales depositadas en la superficie.

De ser insuficiente, la tubería puede anualmente requerir una remoción más profunda de sales incrustadas, misma que se puede lograr con una lija de lona de conteo de granos medio (inferior a 500). Un ejemplo de las sales que pueden adherirse a la tubería se muestra en la **figura 5**.

También, con el fin de mantener la integridad y funcionalidad del fluido de transferencia, este se debe sustituir por fluido nuevo regularmente. Cuando menos una vez por mes de tratarse de agua y al menos una vez cada seis meses si se trata de etilenglicol o algún otro alcohol específico.

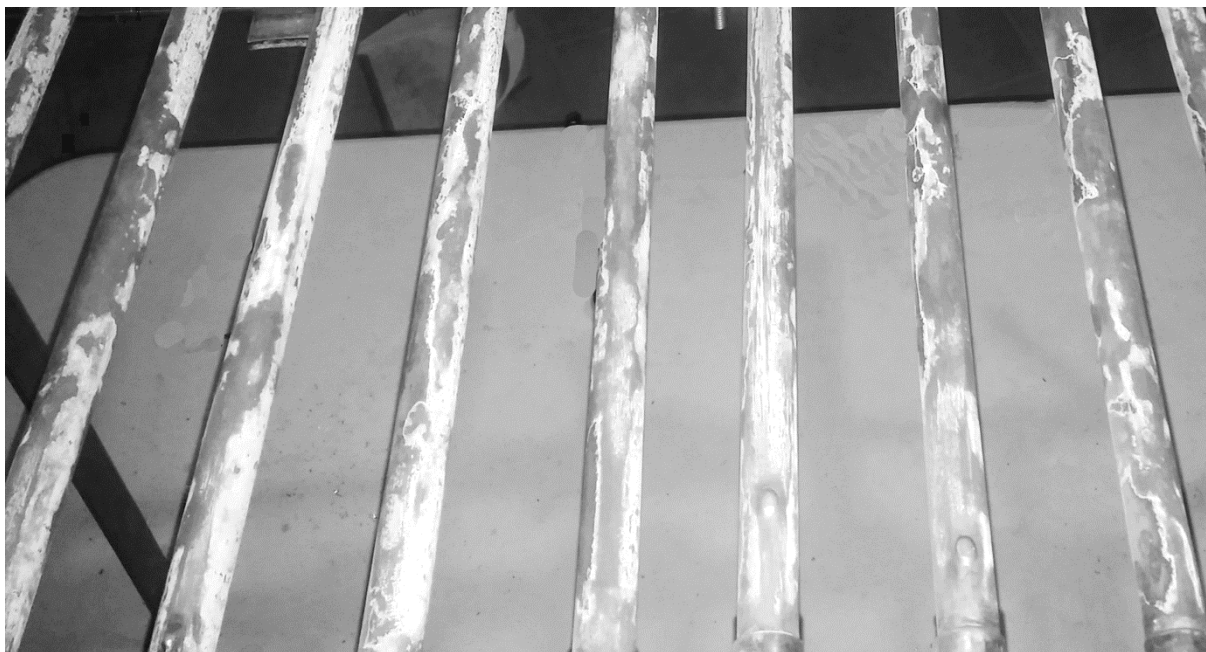


Figura 5. Sales acumuladas al exterior de la tubería del serpentín.