

Diseño y construcción de un concentrador solar cilíndrico parabólico (Design and Construction of a Solar Concentrator Cylindrical Parabolic)

Autor: Ing. Miguel Pineda Paredes

Universidad Valle del Momboy

Miguelpineda99@hotmail.com

RESUMEN

El propósito de la presente investigación, fue el de elaborar un Concentrador Solar Cilindro Parabólico con fines didácticos, para el estudio de su implementación como tecnología Solar Térmica y modelo de Energía Sustentable, mediante ensayos experimentales para el prototipo diseñado. La investigación fue del tipo experimental. El **Concentrador Cilíndrico Parabólico (CCP)** está compuesto fundamentalmente por 3 partes; La Superficie Reflectante, El tubo Captador o Absorbedor y el Sistema de seguimiento solar. Los materiales utilizados para su elaboración son de fácil obtención en el mercado nacional. El diseño fue hecho con software AutoCAD. Una vez construido el prototipo propuesto se realizaron un conjunto de ensayos, para esto se debe considerar las condiciones Geográficas y Meteorológicas del lugar, así como la Posición Solar desde el plano del observador. Para la instalación del Concentrador Cilíndrico Parabólico se considera, el ángulo de Incidencia de la radiación solar directa, ángulo de Inclinación del CCP, ángulo Azimut, con Orientación Sur-Norte. Las variables básicas que intervienen en la implementación son, Irradiación solar, Insolación, caudal del fluido Calorífico, temperatura. Los resultados obtenidos, rendimiento global de 82%, rendimiento térmico en el absorbedor de 92% las condiciones de trabajo fueron; fluido agua, Caudal 1,68 cm³/seg hora 2:00p.m. Con Sol Radiante, ángulo de inclinación $\beta = 34,92^\circ$, ángulo de incidencia de la radiación solar directa $\alpha = 55,0.8^\circ$, energía obtenida por el fluido caloportador = 592,52 Ws, radiación solar según datos de página de NASA 670 W/m², rendimiento óptico de 0,80.

Palabras claves: Energía Solar, Tecnología Solar térmica, Sustentabilidad.

ABSTRACT

The purpose of this investigation, It was to develop a Solar Concentrator cylindrical parabolic teaching purposes, to study its implementation as Solar Thermal Technology and Sustainable Energy Model, by experimental tests for the prototype designed. The research was experimental. The Parabolic Concentrator Cilíndrico (**CCP**) It is mainly composed of 3 parts; The reflective surface, The collector or absorber tube and solar tracking system. The materials used in its manufacture are readily available on the national market. The design was made with AutoCAD design software. Once they built the prototype a set of tests were performed, for this should be considered the geographical and meteorological conditions of the site, and the Solar Position from the plane of the observer. By Installation is considered, the angle of incidence of direct solar radiation, CCP inclination angle, Azimuth angle, Oriented South-North. The basic variables involved in implementation are,

Solar radiation, Insolation, Calorific fluid flow, temperature. The results, overall performance 82%, Thermal performance absorber 92%, working conditions were; fluid water, Flow 1,68 cm³/seg hour 2:00p.m. With radiant Sun, Inclination angle $\beta = 34,92^\circ$, angle of incidence of direct solar radiation $\alpha = 55,0.8^\circ$, energy obtained by the fluid = 592,52 Ws solar radiation according to data from web NASA 670 W/m², Optical Performance 0,80.

Keywords: Solar energy, Solar Thermal Technology, sustainability.

INTRODUCCION

La búsqueda de nuevas fuentes de generación de energía eficiente y sustentable ha llevado a aplicaciones tecnológicas con energía solar. La energía solar resulta del proceso de fusión nuclear que tiene en su masa el sol, la energía liberada se trasmite al exterior a través de la radiación solar en forma de ondas electromagnéticas, el conjunto de estas ondas son llamadas espectro solar, la longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas son importantes para determinar su energía, su visibilidad y poder de penetración, los rayos Ultravioleta, rayos luminosos, rayos infrarrojos o caloríficos además de otros espectros solares forman parte de esta energía. La energía sustentable ofrece al mercado oportunidades para alcanzar beneficios financieros, medioambientales además de una mejor calidad de vida.

La tecnología solar consiste en la implementación de técnicas y sistemas capaces de captar la radiación solar para el uso de su energía y así obtener beneficios. Estas tecnologías se pueden clasificar en tecnología Solar Térmica y tecnología Solar Fotovoltaica. Las tecnologías solar fotovoltaicas son paneles compuestos por capas de silicio además de nano partículas multiunión con polímeros, células foto electroquímicas que convierte los rayos luminoso (fotones) en movimiento de electrones generando energía eléctrica. En la exploración espacial desde los años 70 ha sido aplicada esta tecnología con éxito evolucionando logrando alta eficiencia energética, en España existe alrededor de 26 plantas con tecnología solar fotovoltaicas que aportan 380MW de energía.

La tecnología Solar Térmica, consiste en calentar un fluido aprovechando el calor que produce el sol a través de sistemas de absorción convirtiendo este calor en trabajo útil. Es una de las llamadas energías renovables, particularmente del grupo no contaminante, conocido como energía limpia o energía verde. Las tecnologías solar térmicas más utilizada actualmente son; las chimenea solar, discos Stirling o disco parabólico, sistemas de torre central y los concentradores cilíndrico parabólico. El caso de España, que en 12 años se ha convertido en una potencia solar, aprovechando los bajo costos de inversión e innovando en la industria de la energía solar térmica, otorga trabajo a más de 100 mil personas en más de 50 Centrales Termosolares, que producen 2354 MW al año, para el año 2020 tiene la meta producir 4800 MW.

Los Concentradores Solares Cilíndricos Parabólicos (CCP) son los más utilizados actualmente, debidos a la sencillez de su tecnología, viabilidad económica y buena relación de eficiencia. Estos sistemas solares básicamente están compuestos por un concentrador óptico y receptor solar. El sistema tiene utilidad en cualquier aplicación comercial, doméstico, industrial o de investigación en que sea necesario concentrar el calor solar para obtener beneficios. Los CCP son captadores de foco lineal, que transforman la radiación solar directa en energía térmica, gracias al calentamiento de un fluido de trabajo que puede llegar hasta los 450 °C en casos muy favorables. Por tanto, están englobados dentro de los colectores solares de media temperatura.

Considerando la importancia de esta tecnología y el gran aporte socioeconómico y ambiental que nos daría en nuestro país el desarrollar energía renovable sustentable. Surge el interés por fomentar su uso, la universidad Valle del Momboy tiene como misión el desarrollo humano sustentable, bajo esta premisa se dispuso la construcción de un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico para el laboratorio de termo fluido, y así dejar precedente para futuras investigaciones.

Con el fin de un estudio práctico de las propiedades geométricas de la parábola y su efecto de irradiación al foco, Los colectores solar parabólicos es la manera más sencilla de concentrar la potencia incidente de la irradiación solar para su conversión a trabajo útil, concentrando en un fluido el calor de irradiación se obtiene trabajo termodinámico, considerando la ubicación geográfica de nuestro país que está en la fraga tropical. Para el análisis de este tipo de tecnología las pruebas se realizara en la facultad de Ingeniería sede Estovacuy de la UVM, en el municipio San Rafael De Carvajal Estado Trujillo.

BASES TEORICA

RADIACION SOLAR

Según el físico Alemán Max Planck (1858-1947), el cual describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro. La energía que se libera debido a una serie de reacciones de fusión nuclear que producen una pérdida de masa en el sol llega a la tierra en forma de ondas electromagnéticas. El Sol se comporta prácticamente como un Cuerpo negro que emite energía siguiendo la ley de Planck (1920) a una temperatura superficial promedio de 6000 °K. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, pues las ondas ultravioletas, más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera fundamentalmente por el ozono. El valor de la radiación fuera de la atmosfera es conocida como constante solar $G_{sc} = 1.353 \text{ W/m}^2$ valor referencial actual que es variable durante el año $\pm 3\%$ a causa de la órbita terrestre según la ley de Planck. Los resultados de su medición por satélites arrojan un valor promedio de 1366 W/m^2 , el valor

aceptado por la NASA y por la ASTM es de 1353 W/m^2 , lo que en conclusión no representa una variación significativa entre ambos valores.

TIPOS DE RADIACIÓN SOLAR

En función de cómo incide la radiación solar en objetos situados en la superficie terrestre, según NASA existen varios tipos:

- **radiación directa.** Es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra bien definida de los objetos opacos que la interceptan con ella se define el ángulo con respecto al plano horizontal del lugar de observación según la órbita que describa el sol, a través de esta podemos darle el sentido a un vector solar referencial con respecto al norte geográfico y el acimut. La radiación solar directa se mide por medio de pirheliómetros.
- **radiación difusa.** Es la que sufre cambios en su dirección principalmente debido a la reflexión y absorción en la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.
- **radiación reflejada o Albedo.** Es la suma de la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión del suelo u otras superficies próximas, La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo.
- **radiación global.** Es la radiación total. Es la suma de las tres radiaciones. El instrumento necesario para medir la radiación global es el piranómetro.



Clasificación de la radiación solar.

IRRADIANCIA, INSOLACIÓN SOLAR O EXPOSICION RADIANTE.

La magnitud asignada para expresar la potencia solar incidente por unidad de superficie, y en general, de cualquier radiación, se utiliza el término irradiancia. La irradiancia, se expresa en vatios por metros cuadrados W/m^2 . Generalmente se usa el símbolo “G”. Cuando incide la radiación solar sobre una superficie, durante un tiempo determinado, irradia cierta cantidad de energía. Esta recibe el nombre de insolación. Las unidades más utilizadas son el kW.h/m^2 o Megajulio/ m^2 . A lo largo de un día

tendrá unidades de kWh/m²/día (insolación diurna) o en un año (insolación anual).

Insolación = Irradiancia x tiempo.

Se define como la integral de la irradiancia durante el período en cuestión. Generalmente se usa el símbolo “I” para la insolación por hora, mientras que “H” se usa para la insolación en el período de un día. Se aplican los mismos subíndices, por ejemplo: H_o simboliza la irradiación extraterrestre en un día; “I_d” simboliza la irradiación difusa en una hora, etc. De acuerdo con lo anterior, la relación entre la insolación y la irradiancia está dada por la expresión:

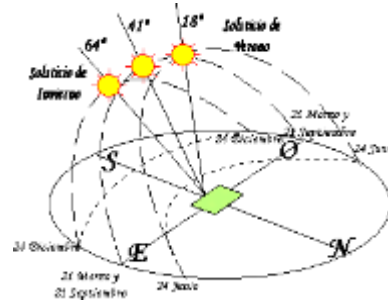
$$I = \int_{t_1}^{t_2} G(t) \cdot dt$$

Según estudios más recientes por parte de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) del concepto de insolación ha permitido el desarrollo y fabricación de instrumentación automática para la medición de las horas de insolación. Y define tiempo de insolación o insolación, como la suma de intervalos de tiempo (en horas) durante los cuales la radiación solar directa (normal al sol) supera el umbral de 120 W/m²

POSICIÓN DEL SOL

La tierra en su movimiento anual entorno al sol, describe una trayectoria elíptica a su vez tiene una inclinación aproximada de 23.5° con respecto al plano ecuatorial, esta inclinación es responsable por la variación de la elevación del sol en el horizonte con relación a la misma hora vista desde diferentes ubicaciones geográficas, a lo largo de los días, dando origen a las estaciones del año. La inclinación con la que los rayos del sol inciden sobre la superficie de la tierra determinará asimismo la intensidad de la energía térmica recibida a un plano referencial de observación.

El sistema referencial para definir cada una de estas posiciones es dado en coordenadas polares. En este sistema el origen está situado en la posición del receptor. El plano fundamental es el horizontal, tangente a la superficie terrestre. La perpendicular a este plano en dirección a la semiesfera celeste superior define la posición del ZENIT del lugar o zenit local. En la dirección opuesta, a través de la Tierra, se sitúa el NADIR. Las direcciones principales sobre el plano horizontal son la Norte-Sur, intersección con el plano meridiano del lugar, y la perpendicular a ella Este-Oeste, intersección con el plano denominado primer vertical.



Sistema referencial posición solar. Latitud solar por estación del año desde el hemisferio norte.

DECLINACIÓN SOLAR (δ)

Es el ángulo entre la línea Sol-Tierra al mediodía solar y el plano del Ecuador. El valor de la declinación solar varía a lo largo del año, es cero en los equinoccios de primavera y de otoño. En el caso de las zonas tropicales, cuando la declinación solar coincide con la latitud de una determinada zona tropical, la radiación solar incide perpendicularmente a la superficie terrestre. Durante los días próximos a esta coincidencia entre declinación solar y latitud, los índices UV aumentan de manera significativa, particularmente si se presentan condiciones de cielo despejado. De forma general se calcula con la siguiente expresión siendo “n” los días transcurridos del año, existen tablas de estos valores.

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin(360 \cdot (284 + n) / 365)$$

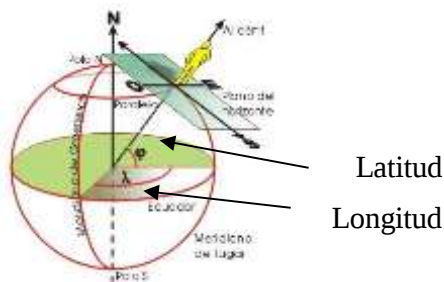
ANGULO HORARIO (ω)

Indica el desplazamiento angular del Sol sobre el plano de la trayectoria solar. Se toma como origen del ángulo el mediodía solar y valores crecientes en el sentido del movimiento del Sol. Cada hora corresponde a 15° ($360^\circ/24$ horas). Existen las siguientes consideraciones;

- Por la mañana, los valores son **Positivos**.
- Al mediodía, el valor es **Nulo**.
- Por la tarde, los valores son **Negativos**.

COORDENADAS GEOGRAFICAS

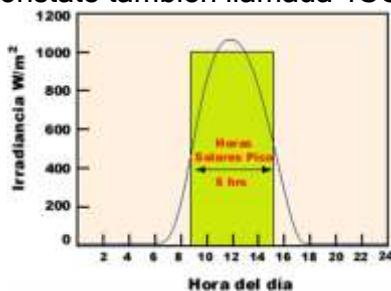
El sistema de coordenadas geográficas es un sistema de referencia que utiliza las dos coordenadas angulares latitud (norte o sur) y longitud (este u oeste) para determinar las posiciones de los puntos de la superficie terrestre. Estas dos coordenadas angulares medidas desde el centro de la Tierra son de un sistema de coordenadas esféricas que está alineado con su eje de rotación. Estas coordenadas se suelen expresar en grados sexagesimales.



Coordenadas geográficas.

HORAS SOLAR PICO (HSP)

La potencia de la radiación varía según el momento del día las condiciones atmosféricas y meteorológicas. Se puede asumir que en buenas condiciones de estas la radiación solar es constante y aproximadamente de 1000 W/m^2 en la superficie terrestre. Para conocer el valor de horas picos de un sitio se divide el valor de la insolación diaria entre 1000 W/m^2 . Para cálculos generalizados en paneles solares el valor de irradiancia de 1000 W/m^2 o $3,6 \text{ Mjudio/m}^2$ se considera constante también llamada 1SOL.



Grafica horas solar pico (HSP)

BRILLO SOLAR

Es una característica meteorológica que evalúa el periodo diario de insolación. La duración del brillo solar o heliofanía en horas, representa el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer. El total de horas de brillo solar de un lugar es uno de los factores que determinan el clima de esa localidad. El instrumento que registra el periodo en que el sol alumbra se denomina heliofanógrafo.

FACTORES QUE AFECTA LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación que llega a la superficie de la tierra varía la cantidad ya que parte de ella es absorbida o dispersada por moléculas en la atmósfera, el vapor de agua, ozono, polvo entre otras, así como de las condiciones meteorológicas atípicas de la región o el plano horizontal en estudio, entre los factores tenemos;

- factores geográficos, se debe considerar latitud, pluviometría, humedad, temperatura, inclinación del suelo, vegetación, masa de aire, entre otras.

- Factores atmosféricos, la nubosidad principal barrera para la radiación directa además de partículas naturales y antrópicas.
- Otros factores, tales como la variación de las condiciones por estación del año, la duración del día.

COLECTOR SOLAR

El principal componente de cualquier sistema de energía solar es el colector o captador solar. Los colectores de energía solar son tipos especiales de intercambiadores de calor que transforman la energía captada de la radiación solar en energía térmica y dicha energía la transfieren a un medio de transporte (por lo general agua, aceite o sales fundidas) que fluye a través del colector.

La mayoría de los estudios sobre aprovechamiento térmico de la radiación solar se basan en aplicaciones de baja, media y alta temperatura esto en función de la razón concentración de la radiación solar.

CLASIFICACIÓN DE COLECTORES

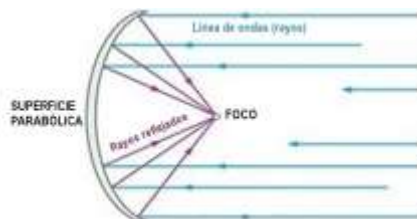
Hay varias maneras de clasificar a los colectores en los sistemas solares térmicos, de acuerdo al tipo de colector solar empleado, de acuerdo a la temperatura de operación que puede alcanzar el colector o de acuerdo a su razón de concentración solar con base a esto los más utilizados son:

- Colectores plano: En las aplicaciones solares de baja temperatura se emplean siempre colectores solares sin concentración, es decir, $C = 1$. En este caso, todos los elementos del subsistema solar tienen el mismo emplazamiento físico.
- Concentradores cilindros parabólicos: Son concentradores de foco lineal con seguimiento en un solo eje, concentraciones de la radiación de 10 a 200 veces.
- Sistemas de torre o de receptor central: Consisten en un campo de helióstatos que siguen la posición del Sol en todo momento (elevación y acimut) y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre. Los órdenes de concentración son de 200 a 1.000 veces.
- Discos parabólicos: Son pequeñas unidades independientes con reflector parabólico habitualmente conectado a un motor Stirling situado en el foco. Los niveles de concentración son superiores de 1.000 a 4.000 veces.

CONCENTRADOR CILINDRO PARABÓLICO (CCP)

El concentrador cilindro parabólico CCP, debe su nombre a uno de sus componentes principales: la superficie reflectante cilindro parabólica que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo absorbente colocado en la línea focal de la parábola aumentando la intensidad energética. Dependiendo del tiempo de insolación, el área de captación solar y la irradiancia del lugar, pueden obtenerse temperaturas por encima del

punto de ebullición del agua, llegando a temperaturas alrededor de 450 °C. Su funcionamiento se basa en las propiedades geométricas de la parábola, la propiedad principal, los rayos que llegan paralelos al eje de la parábola se reflejan y pasan a un mismo punto común llamado foco estos cuentan con un sistema de seguimiento solar para lograr mayor concentración de la radiación directa.



Propiedad geométrica de la parábola $y = x^2 / 4f$

SUPERFICIE REFLECTORA

Recibe y refleja la radiación solar proyectándola de forma concentrada sobre el tubo absorbedor situado en la línea focal del reflector. Para llevar a cabo la reflexión, se utiliza espejos con películas de plata o chapas de aluminio o acero pulido con alta reflectancia. Sin embargo, la reflectancia del metal se deteriora con rapidez cuando el material está a la intemperie.

Color	Factor de reflexión	Materiales	Factor de reflexión
Bianco	0.70-0.85	Mortero claro	0.35-0.55
Techo acústico blanco, según criterios		Mortero oscuro	0.20-0.30
Gris claro	0.50-0.65	Hormigón claro	0.30-0.50
Gris oscuro	0.40-0.50	Hormigón oscuro	0.15-0.25
Negro	0.10-0.20	Arenisca clara	0.30-0.40
Crema, amarillo claro	0.03-0.07	Arenisca oscura	0.15-0.25
Marrón claro	0.50-0.75	Ladrillo claro	0.30-0.40
Marrón oscuro	0.30-0.40	Ladrillo oscuro	0.15-0.25
Rosa	0.10-0.20	Mármol blanco	0.60-0.70
Rojo claro	0.45-0.55	Granito	0.15-0.25
Rojo oscuro	0.30-0.50	Madera clara	0.30-0.50
Verde claro	0.10-0.20	Madera oscura	0.10-0.25
Verde oscuro	0.45-0.65	Espejo de vidrio plateado	0.80-0.90
Azul claro	0.10-0.20	Aluminio mate	0.55-0.60
Azul oscuro	0.40-0.55	Aluminio anodizado y abrigantado	0.80-0.85
	0.05-0.15	Acero pulido	0.55-0.65

Factor de reflectividad de colores y materiales.

EL TUBO ABSORBEDOR O RECEPTOR

El receptor lineal del colector cilindro parabólico, también llamado Heat Collector Element (HCE), es el encargado de convertir la radiación solar concentrada en energía térmica que transporta el fluido calorífero. Se encuentra ubicado en la línea focal del concentrador cilindro parabólico. Es uno de los elementos fundamentales de todo CCP, ya que de él depende en gran medida el rendimiento global del colector.

En la actualidad existen dos tipos:

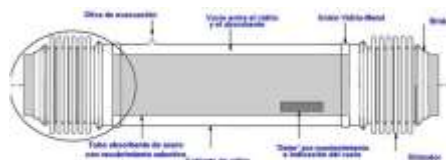
- Con recubrimiento de cristal.
- Con de recubrimiento de compuesto color negro.

Recubrimiento de cristal.

Consiste en un tubo absorbedor que a su vez está compuesto por dos tubos concéntricos; uno interior metálico, por el que circula el fluido calorífero, y otro exterior, de cristal. El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que

le proporciona una elevada absorción (94%) de la radiación solar y una baja emisividad en el espectro infrarrojo (15%), lo que le proporciona un elevado rendimiento térmico. Para temperaturas de hasta 425 °C, los recubrimientos selectivos que se utilizan son compuestos de productos mezcla de compuestos metálicos y cerámicos (**cermet**), que consiguen una absorptividad superior al 95% y una emisividad del 15%. El principal problema de este recubrimiento es que la mayoría de ellos se degradan en contacto con el aire cuando están calientes, por lo que se requiere que exista un alto vacío en la cámara que queda entre el tubo metálico interior y la cubierta de cristal.

El tubo de cristal que rodea al tubo interior metálico tiene una doble misión por un lado, proteger el recubrimiento selectivo de las incidencias meteorológicas, y reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo absorbedor. Este tubo suele llevar un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmisividad y, consecuentemente, el rendimiento óptico del colector.



Tubo absorbedor con cubierta de cristal.

En la figura se muestra el tubo absorbedor del colector LS-3, diseñado por la empresa Luz actualmente Soler Solar Systems.

La desventaja de este tipo de absorbedor son fallas por pérdidas de vacío por roturas del cristal debido a vientos así como elevados costos de fabricación y mantenimiento.

Recubrimiento de compuesto color negro.

Para reemplazar los tubos absorbedores que quedan en desuso en planta existentes, se prefieren opciones de menor costo y rendimiento, lo que ha dado origen a una serie de diseños modificados, la empresa Sunray Energy, ha desarrollado un nuevo diseño de receptor con el soporte de Sandia National Laboratories (SNL). El receptor se fabrica utilizando tubos de acero inoxidable reciclado, que pueden ser reparados en campo. Como recubrimiento absorbedor se utiliza una fina capa de pintura negra Pyromark, de la serie 2500. La sustitución de tubos antiguos por este diseño representa el 90% del rendimiento de los tubos UVAC y el 30% del costo.

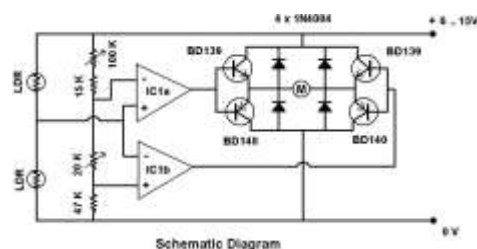
Otra opción que se está desarrollando actualmente, para tubo absorbedor de bajo costo, se basa en la utilización de un nuevo recubrimiento selectivo, conocido como cristal negro, y desarrollado por los laboratorios Energy Laboratories, Inc. (ELI) y Sandia National Laboratories (SNL).

Este recubrimiento incorpora un sobre-recubrimiento de sol-gel, que reduce la oxidación en presencia de aire en el espacio anular. Su absorptividad solar es de 0.94 y su emisividad térmica es de 0.25 a 300 °C; además, presenta

estabilidad térmica sobre sustratos de acero inoxidable hasta temperaturas de 375 °C, y tiene la ventaja de que se puede aplicar tanto a tubos de acero inoxidable nuevos como a tubos en funcionamiento que tenga el recubrimiento dañado.

EL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR

Para poder concentrar sobre el tubo absorbedor la radiación solar, el CCP debe estar enfocado hacia el Sol durante el día, para lo cual necesita un mecanismo de seguimiento solar que cambie la posición del colector con el movimiento aparente del Sol en el cielo. El sistema de seguimiento más común consiste en un dispositivo que gira la superficie reflectora alrededor de un eje. Un seguidor solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar los CCPs solares de forma que éstos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares. Cuando esto ocurre, la radiación solar captada es máxima. Estos dispositivos pueden aumentar el rendimiento de los paneles solares entre un 30% y un 40%, logrando hacer coincidir los rayos solares paralelo al eje de la parábola y una mayor concentración al eje focal.

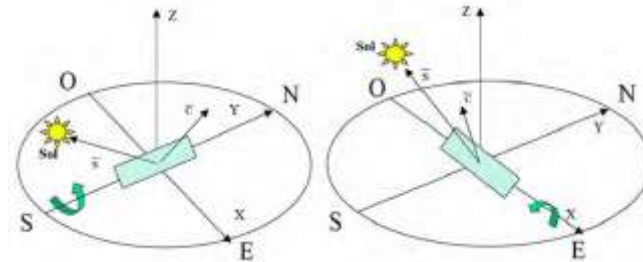


Circuito básico de un seguidor solar.

POSICIONAMIENTO DEL COLECTOR SOLAR

Michael W. Edenburn (1976) investigó las diferentes posibles orientaciones del colector y realizó un análisis de rendimiento teórico de un colector cilindro parabólico y lo comparó con resultados experimentales. Utilizó para ello un tubo absorbedor aislado por un tubo envolvente transparente para disminuir las pérdidas térmicas. El análisis consideraba las pérdidas por transferencia de calor y la transferencia de energía hacia el fluido de trabajo. A la hora de estudiar la inclinación más adecuada con la que se debe orientar los generadores fotovoltaicos, es necesario precisar la posición del sol en cada instante para optimizar su rendimiento.

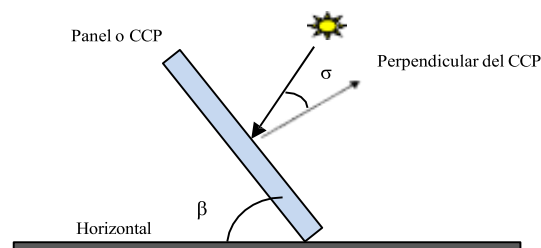
Los colectores se pueden montar en posición horizontal o aprovechando la inclinación natural del terreno. En el caso de orientación este – oeste siempre será horizontal, mientras que en el caso de montaje norte – sur se podrá optar por cualquiera de las dos posibilidades, siempre que la inclinación sea hacia el sur y la pendiente pequeña.



Las dos principales orientaciones del eje de giro de un colector cilindro parabólico.

ÁNGULO DE INCLINACIÓN Y ÁNGULO DE INCIDENCIA DE UN CCP

El ángulo de inclinación (β) es aquel entre la superficie del captador y el plano horizontal. Para un valor dado del ángulo de inclinación, dependiendo de la posición del sol sobre el horizonte, existirá un valor para el ángulo de incidencia (σ) que forma la perpendicular a la superficie del captador con los rayos incidentes del sol.



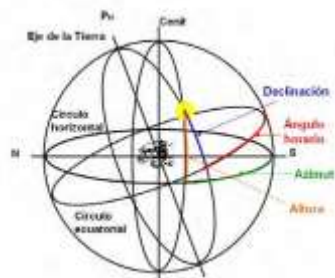
Angulo de Inclinación (β) e Incidencia (σ) fuente: Propia

Para calcular el ángulo de incidencia de la radiación directa en un momento del día para el caso de captadores con orientación sur ($\alpha=0$), y asumiendo que hay captación durante todo el día se emplea la siguiente expresión:

$$\sigma = \text{latitud}(\varphi) - \text{Inclinación}(\beta) - \text{declinación Solar}(\delta)$$

Para captar la máxima radiación solar posible se hace $\sigma = 0^\circ$, de manera que la inclinación quedaría dependiendo de la latitud del lugar y de la declinación solar la cual varía con el tiempo.

$$\text{Inclinación}(\beta) = \text{latitud}(\varphi) - \text{declinación Solar}(\delta)$$



Coordenadas horarias y horizontales.

RAZÓN DE CONCENTRACIÓN DE UN CCP

La razón entre el área de la superficie de reflexión o área de apertura (A_{apertura}) y el área de la superficie de absorción ($A_{\text{absorbedor}}$) es conocida como razón de concentración (Cr) de un colector y es una propiedad geométrica relevante e intrínseca de cada uno de ellos. Puede ser definida como:

$$Cr = \frac{A_{\text{apertura}}}{A_{\text{absorbedor}}}$$

El concentrador ideal transmitirá todos los rayos incidentes de entrada dentro del ángulo de aceptación ($\theta_{\text{aceptación}}$), es el máximo ángulo que pueden formar dos rayos en un plano transversal a la apertura del colector, de forma que ambos rayos reflejados intercepten al tubo receptor en su reflexión, mientras que el concentrador no ideal refleja una parte hacia el exterior sin aprovecharla. El nivel teórico máximo de concentración alcanzable es:

$$Cr = \frac{1}{\sin(\theta_{\text{aceptación}})}$$

Otra forma de encontrar la razón de concentración es la relación entre las irradiancias de luz concentrada y la irradiancia de luz reflejada. Concretamente, esto significa plantear como objetivo hacer medir en la zona del foco. La razón de concentración estaría dada por la fórmula:

$$Cr = \frac{I_{\text{Concentrada}}}{I_{\text{Reflejada}}}$$

Existen factores a considerar a la hora de evaluar la razón de concentración como son:

- Los rayos provenientes del sol no son paralelos.
- La superficie de reflexión no es perfecta, además hay que tomar en cuenta el coeficiente de reflexión.
- La forma del colector no es perfectamente parabólica.
- El seguimiento solar no es perfecto.
- Condiciones meteorológicas.
- Perdidas por sombra y orientación cenital, acimutal.

FLUIDOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA UN SISTEMA CCP

Los fluidos caloportadores usados depende de rango de temperaturas que se desea concentrar comúnmente son; agua, glicol-propileno, glicol-etileno y aire para rangos de temperaturas menores a 125°C hasta 220°C. Para temperaturas mayores hasta 400°C es más común el uso de hidrocarburos sintéticos, parafinas, aceites minerales refinados, refrigerantes y silicones. Para rango de temperaturas superiores a 400°C se hace uso de sales fundidas.

Para seleccionar un fluido de transferencia de calor se deben tener en cuenta las siguientes características:

- Coeficiente de expansión

- Viscosidad
- Capacidad térmica
- Punto de congelamiento
- Punto de ebullición
- Punto de explosión

Fluidos expuestos a altas temperaturas requerirán de un punto de ebullición más alto que para fluidos expuestos a bajas temperaturas.

La viscosidad y la capacidad térmica determinan la cantidad de energía requerida en el bombeo. Un fluido con baja viscosidad y alto calor específico es más fácil de bombear, porque es menos resistente a fluir y transfiere más calor. Otras propiedades que ayudan a determinar la efectividad del fluido son su corrosividad y estabilidad.

Principales desventajas a considerar:

- El aire no se congelaría ni herviría y no es corrosivo. Sin embargo, tiene una baja capacidad calorífica y tiende a fugarse de colectores y ductos.
- El agua, tiene un elevado calor específico desafortunadamente tiene un punto de ebullición relativamente bajo y un punto de congelación elevado. También puede ser corrosiva si el pH (nivel de acidez/alcalinidad) no se mantiene a un nivel neutral. El agua con contenido mineral puede causar depósitos, tapando las tuberías y el sistema de flujo del líquido.
- Las mezclas de glicol/agua al 50/50 o 60/40. El glicol-etileno o glicolpropileno son anticongelantes. El glicol-etileno es extremadamente tóxico y solo puede ser usado en un sistema con doble pared o en un sistema completamente cerrado. La mayoría de los glicoles se deterioran a altas temperaturas, pero estas mezclas deben revisarse, al menos en su pH para determinar si requieren reemplazarse o mantienen su estabilidad y eficacia.
- Los aceites sintéticos, las pérdidas térmicas del colector son mayores, debido a su alta absorción de calor específico además se degrada a altas temperaturas y debe ser reemplazado periódicamente para garantizar su rendimiento.
- Las sales fundidas, requiere utilizar bombas especiales de mayor potencia para su circulación, además dependiendo de su aplicación su punto de congelación es elevado (12°C a 120°C) según el rango de trabajo mientras más elevada la temperatura mayor el punto de solidificación según el tipo de sal utilizada.

PÉRDIDAS CONSIDERABLES EN LA SUPERFICIE REFLEXTORA DE UN CCP

Cuando la radiación solar alcanza la superficie de un colector parabólico, se pierde una cantidad debido a diferentes factores, se pueden

clasificar en pérdidas ópticas y geométricas. Además de las producidas por atenuación del ángulo de incidencia (σ) sobre la superficie así como por su inclinación (β) a lo largo del día debido a variación del ángulo acimutal.

Pérdidas ópticas: Son debidas a que los propios elementos del Colector no son perfectos. Estas imperfecciones provocan que solo una parte de la radiación solar directa que incide sobre la superficie del concentrador parabólico llegue al fluido que circula por el tubo receptor. Los cuatro parámetros que afectan a las pérdidas ópticas son; Reflectividad de la superficie del concentrador (ρ) Los valores de la reflectividad disminuyen progresivamente según aumenta la suciedad en la superficie. Factor de interceptación (γ) Se aplica este factor puesto que las imperfecciones de los espejos y los posibles errores de seguimiento solar, provocan que no todos los rayos reflejados intercepten al tubo absorbente. Transmisividad (τ) Una parte de la radiación solar reflejada por los espejos y que alcanza a la cubierta de cristal del tubo absorbente, no es capaz de atravesarlo. Absortividad (α) Cuantifica la cantidad de radiación incidente sobre la superficie selectiva que ésta puede absorber.

Por tanto, se define como Rendimiento **Óptico Pico del CCP**, al producto de estos cuatro parámetros según la expresión:

$$\eta_{\text{óptico}} = \gamma \cdot \tau \cdot \rho \cdot \alpha$$

Pérdidas geométricas: Provocan la disminución del área efectiva de captación solar de los colectores debido a sombras externas o a la posición relativa de los colectores entre sí, los cuales se pueden dar sombra. Además por motivo del ángulo de incidencia, el cual provoca que en los extremos del colector haya una pérdida de superficie reflexiva útil.

BALANCE DE ENERGIA EN EL ABSORBEDOR.

Según Michael W. Edenburn (1976) en estado estable, el funcionamiento de un colector solar se puede describir mediante la ecuación de balance energía el sistema cumple la siguiente relación:

$$\text{Energía Absorbida} = \text{Energía Útil} - \text{Pérdidas.}$$

$$Q_{\text{Absorbedor}} = Q_{\text{Útil}} + Q_{\text{Pérdidas}}$$

Las pérdidas asociadas están formadas por pérdidas por conducción, por convección y por radiación de los diferentes medios que conforman el tubo absorbente. Aunque cada una de las pérdidas asociadas se pueden calcular de forma independiente según las ecuaciones de transferencia de calor, en la práctica las pérdidas térmicas totales $Q_{\text{Pérdidas}}$ se engloban en un único coeficiente global U_L expresadas en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

$$Q_{\text{Pérdidas}} = Q_{\text{Radiación}} + Q_{\text{Convección}} + Q_{\text{Conducción}}$$

Sustituyendo U_L de forma general nos queda:

$$Q_{\text{Pérdidas}} = U_L \cdot S_{\text{Abs}} \cdot (T_{\text{MAbs}} - T_{\text{Amb}})$$

Dónde: S_{Abs} = Superficie del tubo metálico del absorbente.

T_{MAbs} = Temperatura Media en el Absorbente.

T_{Amb} = Temperatura Ambiental.

La energía recibida proviene del sol, es decir la irradiancia solar. El flujo de calor correspondiente a esta energía es:

$$Q_{\text{Absorbedor}} = S_{\text{Abs}} \cdot I$$

Donde. I = Irradiancia incidente

El absorbedor no recoge toda la energía que incide sobre él, sino que hay que contar con las pérdidas que se producen en la cubierta por su transmitancia y por el coeficiente de absorción, cuyo valor se calcula con ensayos de laboratorio y es inferior a la unidad.

$$Q_{\text{Absorbedor}} = \alpha \cdot \tau \cdot S_{\text{Abs}} \cdot I$$

En estado estable, la energía Útil incidente en el absorbedor se calcula despejando:

$$Q_{\text{Útil}} = Q_{\text{Absorbedor}} - Q_{\text{Pérdidas}}$$

Sustituyendo, la energía útil en el Absorbedor sería :

$$Q_{\text{Útil}} = \alpha \cdot \tau \cdot S_{\text{Abs}} \cdot I - U_L \cdot S_{\text{Abs}} \cdot (T_{\text{MAbs}} - T_{\text{Amb}})$$

La ecuación característica de un captador solar con fluido caloportador está representada por la ecuación de Bliss:

$$Q_{\text{Útil}} = Fr \cdot [\alpha \cdot \tau \cdot S_{\text{Abs}} \cdot I - U_L \cdot S_{\text{Abs}} \cdot (T_E - T_{\text{salida}})]$$

$$Q_{\text{Útil}} = S_{\text{Abs}} \cdot [Fr \cdot (\alpha \cdot \tau) \cdot I - Fr \cdot U_L \cdot (T_E - T_{\text{Salida}})]$$

Fr se define como la relación entre la potencia captada y la que captaría si la temperatura del absorbedor fuese la misma que la Temperatura de entrada (T_E) del fluido en el captador. Es un factor que reduce la potencia útil calculada, frente a la potencia captada real.

$$Fr = \frac{S_{\text{Abs}} \cdot [Fr \cdot (\alpha \cdot \tau) \cdot I - Fr \cdot U_L \cdot (T_{\text{MAbs}} - T_{\text{Amb}})]}{S_{\text{Abs}} \cdot [Fr \cdot (\alpha \cdot \tau) \cdot I - Fr \cdot U_L \cdot (T_E - T_{\text{Amb}})]}$$

De la ecuación característica del captador representa una relación calor útil vs temperatura de la cual se obtiene una recta que representa la energía absorbida por unidad de tiempo por el captador, en consecuencia con esta ecuación se puede calcular la potencia útil conocida la superficie.

$$Q_{\text{Útil}} = S_{\text{Abs}} \cdot [Fr \cdot (\alpha \cdot \tau) \cdot I - Fr \cdot U_L \cdot (T_E - T_{\text{Amb}})]$$

Dónde:

$$Q_{\text{útil}} = S_{\text{Abs}} \cdot [b - m (T)]$$

$b = Fr \cdot (\alpha \cdot \tau) \cdot I$ = representa la ordenada en el origen es adimensional

$m = Fr \cdot U_L$ = representa la pendiente de la recta.

RENDIMIENTO TERMICO

El rendimiento del absorbedor es la relación entre la energía útil y la energía recibida, y es el factor determinante del diseño de la instalación. Su expresión es:

$$\eta = \frac{\text{Energía Util}}{\text{Energía Recibida}}$$

Sustituyendo:

$$\eta = \frac{S_{Abs} \cdot [Fr \cdot (\alpha \cdot \tau) \cdot I - Fr \cdot U_L \cdot (T_E - T_{Amb})]}{S_{Abs} \cdot I}$$

Esta expresión representa la curva de rendimiento que varía con el tiempo, Si se considera en un instante constante, esta se asemeja a una ecuación de la recta rendimiento vs temperatura/irradiancia:

$$\eta = Fr \cdot (\alpha \cdot \tau) - Fr \cdot U_L \cdot (T_E - T_{Amb}) / I$$

dónde: $Fr \cdot (\alpha \cdot \tau)$ = Coeficiente óptico es la ordenada en el origen (b).

$Fr \cdot U_L$ = Coeficiente de pérdidas, es la pendiente (m) de la recta.

El análisis de esta curva indica que el comportamiento del absorbedor será mejor cuando:

- Cuando mayor sea su coeficiente óptico.
- Cuando menor sea su coeficiente de pérdidas.

Estas ecuaciones son válidas para captadores solar plano análogamente se puede hacer el estudio para el concentrador cilíndrico parabólico conocido su rendimiento óptico y su coeficiente de pérdidas.

TEMPERATURA DE ESTANCAMIENTO DEL CAPTADOR O ABSORBEDOR:

Corresponde a la máxima temperatura que se obtiene cuando, sometido el captador a altos niveles de radiación y temperatura ambiente y siendo la velocidad del viento despreciable, no existe circulación en el captador y se alcanzan condiciones cuasi-estacionarias.

Los fabricantes de colectores solares informan en sus catálogos comerciales de las características de éstos, y de sus gráficas de rendimiento. Pero en ocasiones no está la gráfica representada, sino su función, por lo cual es necesario representar dos valores de la función y trazar la línea recta que los una, ya que todos los demás valores se encontrarán dentro de dicha recta.

DISEÑO DE UN CONCENTRADOR CILINDRICO PARABOLICO.

Para el diseño y dimensionamiento de la superficie de captación es necesario considerar parámetros teóricos referenciales. Cabe mencionar que el concentrador solar cilíndrico parabólico que vamos a realizar es de construcción sencilla y rápida, lo que hace posible su instalación en cualquier lugar.

Las condiciones necesarias debido a las limitaciones y requerimientos son:

- Se toma 1000W como requerimiento de energía captada.
- No cuenta con sistema de seguimiento solar automático.
- El tipo de CCP es semiestático de eje horizontal.
- Amplio ángulo de aceptación.
- Razón de concentración media.
- Orientación sur, inclinación variable según posición solar.

De manera que la superficie necesaria en condiciones ideales, con ángulo de incidencia 0° , con una irradiación teórica de 630W/m^2 se obtiene:

$$\text{Energía que recibe el panel} = S \cdot I \cdot \cos(\sigma_{\text{Incidencia}})$$

Despejando superficie:

$$S = 1000\text{W} / 630 \text{ W/m}^2 = 1,58 \text{ m}^2$$

Para el diseño del canal parabólico, se cuenta con una superficie cuyas dimensiones son de 1.58 metros x 1.0 metros. Se toma el lado de 1.58 m como lado curvo de parábola puesto que estructuralmente es más sencillo construir una estructura de soporte de menor tamaño y costo. Para poder saber el tamaño del lado recto, se fija la distancia focal a 36cm, logrando con esto una curva más suave de construir y de colocar los espejos. La ecuación de la parábola quedaría expresada de la siguiente manera:

$$f(x) = y = \frac{x^2}{4f} = \frac{x^2}{4(36)}$$

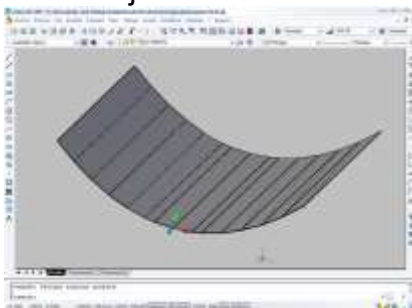
La parábola tiene las dimensiones siguientes:

x	0	10	15	25	35	45	55	65	75	80
y	0,00	0,69	1,56	4,34	8,51	14,06	21,01	29,34	39,06	44,44

Valores de $f(x)$ en centímetros

Para el diseño se utilizó el software de diseño AUTOCAD, el cual a partir de una hoja de cálculo en Excel concatenamos los valores de la función que describe la parábola para graficarla, partiendo de esta se hizo el diseño del concentrador cilíndrico parabólico prototipo a construir. Además el software cuenta con herramientas 3D que permiten visualizar pasos para una construcción rápida y sencilla.

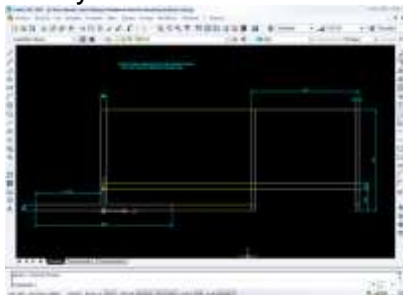
Con el panel de herramientas de AutoCAD 3D se dibuja el layout de la superficie reflectora, para una mejor visualización.



Modelado Superficie reflectora 3D

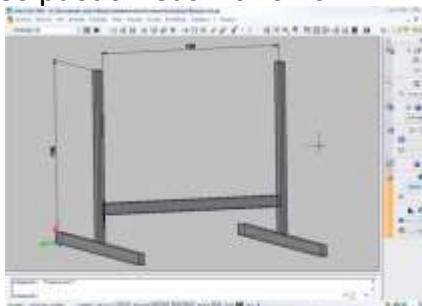
Para el tubo absorbedor se toma un cilindro con característica comercial diámetro de $\frac{3}{4}$ pulgadas material aluminio, el cual nos daría una razón de concentración de $Cr = 25$ veces, de manera que nos proporciona un rango de temperatura media de trabajo de $(60 @ 100)^\circ\text{C}$ según la clasificación en función de su razón de concentración.

Para la estructura base que soporta la superficie reflectora del CCP, a continuación se presenta el layout en AutoCAD 2D



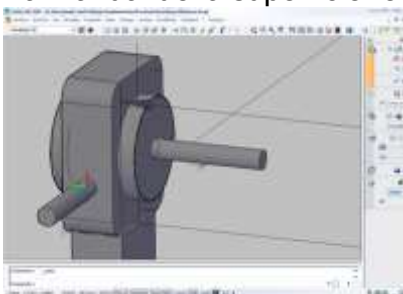
Layout AutoCAD 2D estructura base.

Base para soporte del Concentrador Cilíndrico Parabólico, el material a utilizar es tubo pulido acero calibre 22 de medidas comercial 1 ½ x 2 ½ pulgada, del layout 2D se puede visualizar en 3D.



Modelado base soporte CCP AutoCAD 3D

El Concentrador Cilíndrico Parabólico es del tipo semiestático, con eje horizontal su movilidad se hace con una caja reductora del tipo sinfín corona de uso comercial, la cual se fija a la estructura de la base para poder hacer el seguimiento solar de forma manual de la superficie reflectora.



Modelado Seguidor Solar manual del CCP AutoCAD 3D

Para fijar la base reflectora se coloca el seguidor solar y una base fija de pletina de ¼ pulgada de espesor al otro extremo de la estructura, una vista 3D desde diferentes perspectivas da una imagen de los detalles para su colocación.



Modelado prototipo del CCP AutoCAD 3D

CONSTRUCCION DEL CONCENTRADOR CILINDRICO PARABOLICO

La tecnología solar de estudio se construyó sin complicados procesos de manufactura, de forma tal se asegura que se puede duplicar fácilmente. Se eligió material de construcción comercial y de fácil obtención en el mercado nacional actual, de manera de construir un módulo ligero y resistente a las condiciones climáticas. Se debe mencionar que para construir la superficie parabólica se escogió, espejo como material reflectante de 3mm de espesor de reflectividad cercana al 90% y bajo coeficiente de transmisibilidad.

MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION DEL CCP

DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO Bsf/UND	TOTAL Bsf
Pletina 1x1/8"	5	metros	90,00	450,00
Angulo 90°x1/8"	5	metros	125,00	625,00
Cabilla lisa 8mm	9.6	metros	100,00	960,00
Espejo 3mm	1.6	M ²	1500,00	2400,00
Electrodos	1	Kilogramos	850,00	850,00
Tubo 1,1/2x2,1/2"	6	metros	230,00	1380,00
Caja reductora	1	Pieza	3500,00	3500,00
Fondo herrero	1/4	Galón	2000,00	500,00
Pintura blanca	1/4	Galón	2800,00	700,00
Tubo aluminio D 3/4"	1	metros	600,00	100,00
Juego de ruedas	1	Pieza	400,00	400,00
Mano de Obra				10000,00
			Total general:	21.865,00

Tabla de materiales utilizados para construir el CCP

A continuación se muestra el Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico terminado con ángulo de inclinación diferente que evidencia la operatividad del seguidor solar manual.



Concentrador Solar terminado.

Colocación del tubo Absorbedor en la línea focal del concentrador cilíndrico parabólico, hecho con tubo de Aluminio calibre 2mm, diámetro exterior de $\frac{3}{4}$ pulgada y 90 centímetros de largo.



Concentrador Solar con Tubo absorbedor Instalado.

ENSAYOS Y PRUEBAS

El ensayo experimental se realizó en la Universidad Valle del Momboy sede ESTOVACUY específicamente entre los días 29 junio al 09 de Julio del año 2015. Las condiciones de trabajo nominales para los ensayos dependen de las características geográficas y meteorológicas de la ubicación.

Condiciones de Trabajo	
Latitud N (°)	9.301970
Longitud E (°)	-70.592149
Altitud (metros)	586
Solsticio	Invierno
Nubosidad	Máxima
Radiación(W/m ²) (NASA)	670

Se realizaron un conjunto de ensayos experimentales, con base a las condiciones de trabajo se ubicó el Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico, con orientación norte debido a la posición del sol, y ángulo de inclinación variable, realizando los ensayos correspondientes para la caracterización del

CCP, su rendimiento global e instantáneo. Se procede a la adquisición de datos con los instrumentos existente en el laboratorio de Termofluido.

Ensayo lunes 29 de junio.

Día parcialmente nublado se ubica el Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico de acuerdo a la posición del sol, orientación norte, con ayuda de una brújula y con un reloj solar se calcula el ángulo de incidencia de la radiación solar directa.



Reloj solar y brújula.



Orientación noreste-suroeste

Se ubica el reloj solar con orientación Sur – Norte, para captar la sombra de la radiación solar directa, midiendo el tamaño de la sombra (**s**) y conocido el tamaño del puntero (**h**) solar calculamos el ángulo de incidencia de la radiación solar directa (**α**), el ángulo acimutal (**ψ**) se mide directamente con respecto al norte geográfico o se calcula. Se toma las medidas en horas de radiación solar directa. Se ubica el concentrador solar orinetacion norte-sur en direccion al vector radiacion solar directa con angulo de inclinacion (**β**) variable y seguimiento azimuth gracias a la movilidad de las ruedas del panel. Al fondo se puede observar dia parcialmente nublado.

hora	h (cm)	s (cm)	altitud (α)	azimut (ψ)
01:00:00 p.m.	8,50	3,30	68,78	318,19
01:30:00 p.m.	8,50	4,66	61,27	300,87
02:00:00 p.m.	8,50	5,90	55,23	298,19
02:30:00 p.m.	8,50	7,10	50,13	297,46
03:00:00 p.m.	8,50	8,80	44,01	291,28
03:30:00 p.m.	8,50	10,74	38,36	291,39
04:00:00 p.m.	8,50	14,10	31,08	291,71

Valores de ángulos calculados.

VISTA SATELITAL DE LA ZONA

Con ayuda de <http://www.sunearthtools.com>, se obtienen datos de ángulo azimut y altitud solar de mayor precisión a lo largo del día.



Datos Vista satelital.

En esta página web se puede encontrar información satelital de la posición del sol con solo colocar las coordenadas GPS, tales como ángulo de la radiación solar directa, ángulo de la sombra, azimuth, altitud solar, además de un informe detallado de la horas de sol, hora del alba, hora crepuscular. De la misma forma se obtiene los datos de radiación solar en el sitio a través de la página de la NASA <https://eosweb.larc.nasa.gov>.

Ensayo martes 30 de junio.

Día parcialmente nublado, se toman datos para el cálculo del ángulo de incidencia de la radiación solar para comparar con los datos satelitales, se ajusta el norte geográfico con la brújula compensando la declinación magnética 20 grados sentido horario.

hora	h (cm)	s (cm)	altitud (α)	azimut (ψ)
11:40:00 a.m.	8,50	3,00	70,56	15,47
12:01:00 m	8,50	2,80	71,77	0,00
12:15:00 p.m.	8,50	2,90	71,16	343,99
12:30:00 p.m.	8,50	3,00	70,56	330,00
01:00:00 p.m.	8,50	3,50	67,62	321,06
01:30:00 p.m.	8,50	4,30	63,17	313,87

Datos obtenidos

Para los cálculos en los ensayos se consideran las siguientes características del Concentrador Cilíndrico Parabólico.

Especificación de CCP	
Área de Apertura	1,35 m ²
Área superficie Reflectora	1,56 m ²
Diámetro exterior tubo absorbedor	1,905 cm
Diámetro interior tubo absorbedor	1,605 cm
Tamaño tubo absorbedor	88 cm
Volumen interno tubo absorbedor	178,04 cm ³
Volumen externo tubo absorbedor	250,82 cm ³

Masa tubo absorbedor	196,51 gr
Material tubo absorbedor	Aluminio
Reflectividad del espejo	0,92
Absortividad del tubo absorbedor	0,94
Emisibilidad térmica absorbedor (pintura negra)	0,038
Calor específico del Aluminio	0,215
Cal/gr.°C	0,80
Rendimiento Óptico	

Características de CCP.

Ensayo miércoles 01 de julio.

Día con baja nubosidad, se ubica el colector solar orientación sur – norte con ángulo de inclinación variable (β) complementario al ángulo de incidencia de la radiación solar directa, de esta manera se hace coincidir los rayos con el eje de la parábola. En este ensayo se busca visualizar el rendimiento máximo de la temperatura en el absorbedor, sin fluido, la energía captada es igual a las pérdidas, esto nos da una estimación de la temperatura máxima que se puede obtener con el Concentrador Cilíndrico Parabólico si la soporta o no.



Radiación solar sobre el eje focal.

En la figura anterior se muestra el efecto de concentración de la radiación solar sobre el eje focal, a medida que se varia el ángulo de inclinación β se hace coincidir la radiación solar directa con el eje de la parábola concentrándose sobre el eje focal y así calentar el tubo absorbedor. De esta manera se comprueba las propiedades geométricas de la parábola y se procede a tomar valores de temperatura.



**Concentración máxima en el absorbedor con Sol radiante.
Temperatura de Estancamiento sobre 100°C.**

Se tomaron valores de temperatura para visualizar el alcance del módulo solar CCP, debido a la movilidad de su diseño se varia su ángulo de acuerdo a la orientación del sol y el ángulo de incidencia de la radiación solar, el equipo por ser liviano es fácil su manipulación para hacer coincidir la luz solar.

hora	t abs °C	t amb °C	(α)	(β)	U (W)
09:30:00 a.m.	60	28	46,95	43,05	5624,27
09:45:00 a.m.	79	28	46,95	43,05	8963,69
10:00:00 a.m.	55	28	52,00	38,00	4745,48
10:03:00 a.m.	70	29	52,00	38,00	7206,10
10:30:00 a.m.	40	29	59,04	30,96	1933,34
10:50:00 a.m.	70	29	59,53	30,47	7206,10
11:00:00 a.m.	85	30	63,60	26,40	9666,72
11:10:00 a.m.	93	30	63,60	26,40	11072,79
11:15:00 a.m.	96	31	67,33	22,67	11424,31
11:30:00 a.m.	60	31	68,96	21,04	5097,00
11:45:00 a.m.	58	31	70,56	19,44	4745,48
11:55:00 a.m.	80	32	70,86	19,14	8436,41
12:02:00 p.m.	95	33	70,86	19,14	10897,03
12:30:00 p.m.	103	33	69,96	20,04	12303,10
12:35:00 p.m.	107	33	72,86	17,14	13006,13
12:43:00 p.m.	85	33	68,20	21,80	9139,44
12:53:00 p.m.	80	33	66,82	23,18	8260,65
01:00:00 p.m.	72	33	66,82	23,18	6854,58
01:05:00 p.m.	70	33	64,25	25,75	6503,07
01:15:00 p.m.	72	33	62,63	27,37	6854,58
01:20:00 p.m.	82	32	68,68	21,32	8787,93
01:30:00 p.m.	70	32	60,04	29,96	6678,82
01:45:00 p.m.	60	33	57,57	32,43	4745,48
01:55:00 p.m.	75	33	55,23	34,77	7381,86
02:00:00 p.m.	60	33	54,33	35,67	4745,48
02:30:00 p.m.	65	31	48,58	41,42	5975,79
03:00:00 p.m.	70	30	42,43	47,57	7030,34
					205285,98

La tabla anterior muestra la temperatura en el absorbedor (Tabs), temperatura ambiental (t amb), ángulo de incidencia del vector radiación solar (α), inclinación del CCP (β), potencia instantánea (U) incidente sobre el tubo absorbedor calcula por variación de temperatura.

Ensayo jueves 02 de julio.

Día parcialmente nublado, se utiliza agua como fluido captador, para calcular el rendimiento del tubo absorbedor se varía el caudal, para esto se instaló una acometida de agua blancas directamente al concentrador cilíndrico parabólico en una de las tomas del tubo absorbedor, se mide la temperatura a la entrada y a la salida del tubo absorbedor. Este ensayo se hace sin recirculación de agua ya que nos interesa la eficiencia instantánea.



CCP conectado a la toma de agua



Válvula para regular el caudal.

Se toma la temperatura de entrada y salida del fluido en el tubo absorbedor con diferentes caudales para comprobar el intercambio de calor en el tubo receptor.



T: 45°C de salida sol intermitente.



T: 40°C promedio día nublado

Toma de datos para un caudal

$$Q_1 = 100 \text{ cm}^3 / 4,35 \text{ seg} = 22,98 \text{ cm}^3 / \text{seg}$$

caudal = 22,98 cm ³ / seg						
hora	t ent (°C)	t sal (°C)	T abs (°C)	t amb (°C)	U(W)	Rend Inst
01:15 p.m	26	34	65	33	5925,17	0,52
01:25 p.m	27	33	63	33	4443,88	0,52
01:35 p.m	26	34	65	34	5925,17	0,52
01:45 p.m	27	32	55	33	3703,23	0,58
01:55 p.m	27	31	46	33	2962,59	0,67

Toma de datos para un caudal

$$Q_2 = 100 \text{ cm}^3 / 12,51 \text{ seg} = 7,99 \text{ cm}^3 / \text{seg}$$

caudal = 7,99 cm ³ / seg						
hora	t ent (°C)	t sal (°C)	T abs (°C)	t amb (°C)	U(W)	Rend Inst
02:00 p.m	27	36	66	34	6665,82	0,55
02:10 p.m	27	35	60	34	5925,17	0,58
02:20 p.m	27	33	47	34	4443,88	0,70
02:30 p.m	27	35	50	33	5925,17	0,70
02:40 p.m	27	35	56	33	5925,17	0,63

Toma de datos para un caudal

$$Q_3 = 100 \text{ cm}^3 / 52,40 \text{ seg} = 1,90 \text{ cm}^3 / \text{seg}$$

caudal = 1,90 cm ³ / seg						
hora	t ent (°C)	t sal (°C)	T abs (°C)	t amb (°C)	U(W)	Rend Inst
02:40 p.m	28	40	50	34	8887,76	0,75
02:50 p.m	28	40	48	34	8887,76	0,86
03:00 p.m	28	45	55	34	12590,99	0,81
03:10 p.m	29	47	60	33	13331,64	0,67
03:20 p.m	28	44	56	33	11850,34	0,70

Con el valor de caudal menor se hace evidente la mejor absorción de calor por el fluido captador, las condiciones meteorológicas del momento es cielo parcialmente nublado y bajo brillo de luz solar.

Ensayo viernes 03 de julio.

Día nublado se instala el captador solar con toma de agua, se calibra el caudal hasta llegar a un valor aceptable para la absorción de calor por el fluido, se hace el ensayo con cielo nublado.



Instalación y calibración del caudal de trabajo.

Toma de datos para un caudal

$$Q_4 = 100 \text{ cm}^3 / 45,03 \text{ seg} = 2,22 \text{ cm}^3 / \text{seg}$$

caudal = 2,22 cm ³ / seg						
hora	t ent (°C)	t sal (°C)	T abs (°C)	t amb (°C)	U(W)	Rend Inst
12:00 p.m	27	34	38	32	5184,52	0,89
01:00 p.m	27	40	48	33	9628,40	0,83
01:15 p.m	29	35	37	33	4443,88	0,95
01:30 p.m	28	36	40	33	5925,17	0,90
01:45 p.m	28	45	53	33	12590,99	0,85
02:00 p.m	27	34	38	33	5184,52	0,89

Las condiciones meteorológicas del día afecta la captación de radiación solar directa, debido a la alta nubosidad del día, se aprecia poca variación de temperatura, solo se aprecia radiación difusa.

Ensayo jueves 09 de julio.

Día de baja nubosidad, se instala la toma de agua al captador solar del concentrador cilíndrico parabólico, se calibra el caudal hasta llegar cerca del valor referencial antes utilizado.

Toma de datos para un caudal

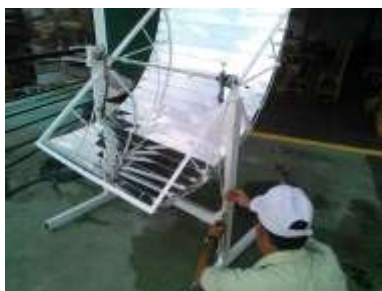
$$Q_5 = 100 \text{ cm}^3 / 59,28 \text{ seg} = 1,68 \text{ cm}^3 / \text{seg}$$

caudal = 1,68 cm ³ / seg						
hora	t ent (°C)	t sal (°C)	T abs (°C)	t amb (°C)	U(W)	Rend Inst
02:00 p.m	27	35	38	32	5925,17	0,92
02:10 p.m	29	45	55	32	11850,34	0,82
02:15 p.m	30	57	70	32	19997,45	0,81
02:20 p.m	30	60	73	32	22219,39	0,82
02:25 p.m	30	68	81	32	28144,56	0,84
02:30 p.m	30	72	83	32	31107,15	0,87
02:35 p.m	32	67	75	32	25922,62	0,89
02:40 p.m	35	68	80	32	24441,33	0,85
02:45 p.m	35	70	81	33	25922,62	0,86
02:50 p.m	35	74	82	33	28885,21	0,90
02:55 p.m	37	80	86	33	31847,80	0,93
03:00 p.m	35	76	83	33	30366,50	0,92

Las condiciones de cielo despejado, se obtienen variaciones de temperatura considerables en una hora continua a sol radiante.



Temperatura inicial 27°C y Temperaturas salidas 45°C, 55°C

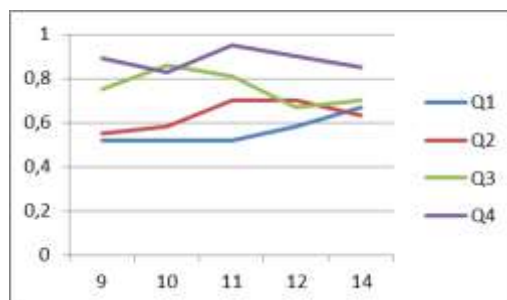


Toma de Temperatura del fluido (70°C)



Temperatura de salida 60°C, 70°C, 74°C.

A continuación se muestra la evolución del rendimiento en función del caudal utilizado, se representa con valores de temperatura obtenidos en los diferentes ensayos.



Gráficos de rendimiento según caudal utilizado Vs tiempo (h).

CALCULO DEL RENDIMIENTO GLOBAL INSTANTANEO DEL CCP.

Para el cálculo de Rendimiento Global Instantáneo del Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico, se toma como punto de operación el ensayo del día 09 julio por las condiciones meteorológicas favorables de este día. Caudal de **1,68 cm³/ seg** hora 2:00p.m. Temperatura de entrada 27°C, temperatura final 35°C energía obtenida por el fluido debido a variación de temperatura 5925,17 Ws con un tiempo de Insolación 10 segundos, radiación solar según datos de página de NASA 670 W/m², rendimiento óptico de 0,80
Rendimiento Global:

$$\eta = Q_{\text{FLUIDO}} / Q_{\text{CAPTADA}}$$

La energía captada por el Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico se obtiene a continuación:

$$Q_{\text{CAPTADA}} = A_{\text{APERTURA}} * \text{Irradiación} * R_{\text{Óptico}}$$

$$Q_{\text{CAPTADA}} = 1,35 * 670 \text{ W} / \text{m}^2 * 0,80 = 723 \text{ W}$$

La energía captada por el fluido en 10 segundos es 5925,17 Ws la energía instantánea sería:

$$Q_{\text{FLUIDO}} = 5925,17 \text{ W seg} / 10 \text{ seg} = 592,52 \text{ W}$$

El rendimiento global:

$$\eta = 592,52 \text{ W} / 723 \text{ W} = 0,82$$

ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados experimentales obtenidos, el rendimiento global instantáneo del Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico es de $\eta_{\text{GLOBAL}} = 0,82$ o 82% y un rendimiento térmico en el absorbedor de $\eta_{\text{TERMICO}} = 0,92$ o 92% a condiciones de trabajo; fluido agua, Caudal de 1,68 cm³/ seg hora 2:00p.m. Con Sol Radiante, ángulo de inclinación $\beta = 34,92^\circ$, ángulo de incidencia de la radiación solar directa $\alpha = 55,0.8^\circ$, Temperatura de entrada 27°C, temperatura final 35°C energía obtenida por el fluido caloportador = 5925,17 Ws, con un tiempo de Insolación 10 segundos, radiación solar según datos de página de NASA 670 W/m², rendimiento óptico de 0,80.

CONCLUSIONES

De los objetivos principales de este estudio se pueden concluir los siguientes puntos:

Para el diseño del Concentrador solar Cilíndrico Parabólico se tomó como punto inicial de cálculo el tamaño de la superficie reflectante para la captación de 1000W de energía. A partir de este dato se calculó los demás parámetros y componentes, tales como la curva de la parábola, la razón de concentración y todas sus medidas.

Durante las diferentes etapas del diseño y sus resultados se puede estimar que para futuros proyectos de energía solar térmica hay suficiente información para una mejor eficiencia de los prototipos, considerando como base principal su razón de concentración, temperatura deseada, y así obtener superficies de mayor captación de energía, además de considerar las características del tubo absorbedor para un eficaz rendimiento térmico.

El uso de software de dibujo asistido (AutoCAD) facilitó la visualización del Concentrador solar Cilíndrico Parabólico a construir aportando detalles y proporcionando precedente didáctico del uso de estos programas para diseño y modelado de prototipos en 3D.

La construcción del prototipo se realizó en base a los materiales existente en el mercado nacional así como de los equipos y herramientas existentes en el laboratorio de Termofluido de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad Valle de Momboy.

El proceso de elaboración fue desglosado de tal manera que se pueda mejorar, además a medida que se construyó el Concentrador Solar se observó otras maneras de fabricación simplificando materiales y operaciones. Por otra parte se busca mejor la exactitud para fabricar la curva de la superficie reflectante y la colocación de los espejos realizando estructuras más livianas económicas y resistentes para la implementación de esta tecnología.

De los ensayos realizados se determinó el rendimiento termodinámico instantáneo (92%), rendimiento Global (82%) a una determinada condición de trabajo. La factibilidad de proyectos que cuenten con este concentrador como equipo principal es viable tanto económicamente como energéticamente. Contribuyendo al desarrollo humano sustentable.

Cabe mencionar que conocer el posicionamiento solar los valores de Radiación Solar, Insolación, ángulos de radiación Directa, Azimut y Cenit en una ubicación geográfica específica es de vital importancia para la implementación y el éxito de cualquier tecnología Solar. Conocidos, estos datos nos permite mejor diseños para aprovechar la energía solar del sitio.

RECOMENDACIONES

- ✓ Crear un micro centro meteorológico en las Instalaciones de la facultad de ingeniería para obtener datos de Radiación Solar, Insolación, y demás variables meteorológicas.

- ✓ La implementación de este equipo como complemento didáctico en estudio de tecnología Solar como energía sustentable.
- ✓ Crear líneas de investigación dirigidas a la viabilidad de la tecnología solar y su implementación en Venezuela.
- ✓ Adquirir tarjetas de adquisición de datos para automatizar la toma de medidas y variables en investigaciones experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Beer, F. Mecánica vectorial para ingenieros, Mac Graw Hill, México. 1983
Streeter, V. Mecánica de los fluidos, Mac Graw Hill, México. 1986
Tamayo, M. "El proceso de la investigación científica", Limusa, México 2000
Grajales T. Metodología. Alianza Editorial Mexicana, S.A. México 2008
Javier Méndez y Rafael Cuervo. Energía Solar Térmica, 3ra Edición, Fundación Confemetal, Madrid España. 2010

Zaida Salamanca Félix (2009) España **"Instalación Solar Térmica Para Producción De Acs En Edificio De Viviendas En Salamanca"** documento PDF Disponible en: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/7731>

Daniel Serrano García (2012) España **"Cálculo, Diseño Y Análisis De Una Central Termosolar De Colectores Cilíndrico parabólicos Operando Con Sales Fundidas"** Documento PDF Disponible en: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/14683/PFC_Daniel_Serrano_Garcia.pdf?sequence=1

Delgado Sergio (2010) URU Maracaibo Edo Zulia **"Diseño De Un Sistema De Alimentación Eléctrica Para Las Cargas Críticas De Una Vivienda Multifamiliar Basado En Energía Solar"** Documento PDF Disponible en: <http://200.35.84.131/portal/bases/marc/texto/2201-10-03920.pdf>

Carmen Paredes Velasco (2012) Paraguay **"Diseño De Captador Solar Cilíndrico Parabólico Para Aplicaciones Rurales En Paraguay"** Documento PDF Disponible en: <http://oa.upm.es/14011/>.