



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y
VINCULACIÓN CON LA COLECTIVIDAD**

**MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES
IV PROMOCIÓN**

**TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

TEMA:

**ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA RADIACIÓN SOLAR
CONCENTRADA UTILIZANDO LENTES Y ESPEJOS
PARABÓLICOS PARA APLICACIONES EN ZONAS DE LATITUD
0°**

**AUTOR: CALVOPIÑA TAPIA, ROBERTO PAÚL
DIRECTOR: Ing. MGs. PÉREZ ROSALES, JOSÉ EMILIO**

**Sangolquí-Ecuador
2015**

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR

El suscrito Ing. José Emilio Pérez Rosales MGs, de nacionalidad ecuatoriana, en calidad de Director de Tesis de la Maestría de Energías Renovables,

CERTIFICA

Que el presente proyecto de grado de Magíster que lleva como título **“ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA UTILIZANDO LENTES Y ESPEJOS PARABÓLICOS PARA APLICACIONES EN ZONAS DE LATITUD 0°”** realizado por el señor Ingeniero Roberto Paúl Calvopiña Tapia, de nacionalidad ecuatoriana, con cédula de identidad N° 1718815416, como requisito previo para la obtención del título de Magíster en Energías Renovables, IV Promoción de la Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, fue elaborado bajo mi dirección y asesoría técnica, científica. Por lo que, puedo manifestar que el documento en mención, cumple con los requerimientos académicos y de investigación requeridos en el programa de Maestría, razón por la cual autorizo su presentación y defensa.

Sangolquí, Agosto 5 de 2015

Ing. José Pérez, MGs
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

ROBERTO PAÚL CALVOPÍÑA TAPIA

DECLARA QUE:

El proyecto de investigación de posgrado, correspondiente a la Maestría en Energías Renovables, IV Promoción, que lleva como título: “**ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA UTILIZANDO LENTES Y ESPEJOS PARABÓLICOS PARA APLICACIONES EN ZONAS DE LATITUD 0°**”, ha sido desarrollado con base a una investigación científica, técnica exhaustiva, respetando los derechos de autor que constan en los artículos, libros y fuentes de consulta utilizados.

Consecuentemente este trabajo es de autoría intelectual propia.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de posgrado en mención.

Sangolquí, Agosto 5 de 2015

Ing. Roberto Paúl Calvopiña Tapia

AUTOR

AUTORIZACIÓN

Yo,

ROBERTO PAÚL CALVOPÍÑA TAPIA

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la Institución, del trabajo de investigación científica técnica, titulado: **“ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA UTILIZANDO LENTES Y ESPEJOS PARABÓLICOS PARA APLICACIONES EN ZONAS DE LATITUD 0°”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Agosto 5 de 2015

Ing. Roberto Paúl Calvopiña Tapia

AUTOR

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, ya que, sin sus bendiciones no hubiese sido posible empezar y culminar este programa. A mis padres, Luis y Elba, ya que desde niño me inculcaron, con su ejemplo, a no rendirme y ser siempre un buen profesional, y sobre todo un excelente ser humano. A mi hermana Karina, que a pesar de ser menor me ha enseñado mucho, principalmente a luchar por mis sueños y ser perseverante. A la ESPE, y concretamente al DECEM ya que, debido a la excelente educación que recibí en pregrado, decidí continuar mis estudios de cuarto nivel en la misma institución. A ASTEC, que me brindó las facilidades para poder cumplir mi objetivo de estudiar esta maestría. Al Ing. José Guasumba, quien fue quien ideó la creación de esta maestría y que siempre me tomó en cuenta para que fuera parte de este programa. Al Msc. Alexander Ibarra, actual coordinador de la Maestría, por la orientación y la paciencia brindada para poder concluir con la tesis. Al MGs. José Pérez, quien con mucha voluntad y profesionalismo supo guiarme para poder concluir este trabajo. A todos aquellos que con sus palabras de aliento supieron darme fuerzas para no decaer en mi objetivo.

Paúl Calvopiña

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mi familia, Luis, Elba y Karina, quienes siempre me apoyaron desde el momento que les participé mi idea de seguir este programa, y estuvieron ahí para apoyarme, con una palabra, un gesto de cariño, una palabra de aliento. Para ellos que son parte de este esfuerzo.

Paúl

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	xv

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 General	3
1.3.2 Específicos.....	3
1.4 Alcance	4
1.5 Justificación e importancia de la investigación.	4

CAPITULO 2**MARCO TEÓRICO**

2.1. Geometría solar	6
2.2. Diagrama estereográfico.....	9
2.3. Análisis de radiación directa para cielo isótropo.....	10
2.4. Lentes	11
2.5. Espejos.....	12
2.6. Heliostatos	15
2.7. Distancia focal y razón de concentración.....	17
2.8. Temperatura focal.....	18
2.9. Balance energético de los concentradores	19

CAPITULO 3**ESTADO DEL ARTE**

3.1. Lentes de concentración [13].....	22
3.2. Espejos parabólicos.....	26
3.3. Heliostatos	29

CAPITULO 4**DESARROLLO EXPERIMENTAL**

4.1. Determinación de parámetros de ensayo	41
4.2. Equipos e instrumentos	47
4.3. Procedimiento.....	50
4.4. Toma de datos.....	50

CAPITULO 5**ANÁLISIS DE DATOS**

- 5.1. Caracterización de datos por sistemas de concentración..... 54
- 5.2. Temperaturas del proceso 57
- 5.3. Análisis estadístico de los parámetros de medición 58
- 5.4. Eficiencias del sistema..... 63

CAPÍTULO 6**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- 6.1. Conclusiones 64
- 6.2. Recomendaciones 65

BIBLIOGRAFÍA..... 67

WEBGRAFÍA..... 68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Refracción de la luz	7
Figura 2: Ángulo cenital (θ_s) y ángulo azimutal (β_s)	9
Figura 3: Carta estereográfica de la ESPE	10
Figura 4: Esquema que muestra ángulos θ_s , β e i	11
Figura 5: Diferencias entre espejos cóncavos y convexos	12
Figura 6: Elementos de un espejo esférico.....	13
Figura 7: Gráfica de la parábola.....	14
Figura 8: Esquema de un sistema de torre de potencia solar	16
Figura 9: Vista de los helióstatos del pueblo de Rjukan, Finlandia	16
Figura 10: Helioestatos de la planta Gemasolar	17
Figura 11: Esquema de lentes convergentes y divergentes.	18
Figura 12: Razón de concentración para CCP	18
Figura 13: Generador solar	22
Figura 14: Generador solar esférico	23
Figura 15: Techo del proyecto “Light Farm”	24
Figura 16: Esquema de funcionamiento de los lentes tipo Fresnel.....	24
Figura 17: Panel fotovoltaico y disipador de calor.....	25
Figura 18: Vista de la fachada del proyecto Light Farm.....	25
Figura 19: Fotografía de un HCPV.....	26
Figura 20: Esquema captación de la radiación solar sin concentrador	27
Figura 21: Esquema captación de la radiación solar con concentrador.....	27
Figura 22: Esquema del rayo láser a base de radiación solar	28
Figura 23: Fotografía del rayo láser solar.	29
Figura 24: Esquema de iluminación con helióstatos	29
Figura 25: Plaza de Rjukan con la mancha solar.....	30
Figura 26: Vista del sol desde la plaza central de Rjukan.....	31

Figura 27: Esquema de los flujos de calor en la sección transversal y longitudinal del tubo absorbedor	31
Figura 28: Ubicación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE	42
Figura 29: Radiación solar media mensual en superficie horizontal ISOCAD .	44
Figura 30: Mapa de Ecuador.....	47
Figura 31: Esquema Concentrador Cilíndrico Parabólico	47
Figura 32: Pantalla del higrómetro	48
Figura 33: Anemómetro	48
Figura 34: Pantalla Termohigrómetro	48
Figura 35: Piranómetro	49
Figura 36: Piranómetro laser.....	49
Figura 37: Termómetro digital	49
Figura 38: Vista del Lente de Fresnel utilizado para la toma de datos.....	50
Figura 39: Temperatura de entrada y salida del aceite térmico	58
Figura 40: Temperaturas del absorbedor.....	59
Figura 41: Irradiancia solar local	59
Figura 42: Temperaturas de entrada y salida del IC	60
Figura 43: Temperaturas en la cámara del IC	61
Figura 44: Temperaturas en el Lente de Fresnel	62
Figura 45: Irradiancia solar local	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: i-ésimo día y día típico de cada mes	8
Tabla 2: Tabla generada a partir de información NASA para la latitud 0°	42
Tabla 3: Tabla generada a partir de información NASA para la latitud 5°	43
Tabla 4: Tabla generada a partir de información NASA para la latitud -5°	43
Tabla 5: Variación solar media mensual en superficie horizontal ISOCAD	45
Tabla 6: Variación solar media mensual en superficie horizontal según Armstrong Page	45
Tabla 7: Variación solar media mensual en superficie horizontal según ISF ...	46
Tabla 8: Promedio de datos del Concentrador Cilíndrico Parabólico (Concentrador)	51
Tabla 9: Promedio de datos del Concentrador Cilíndrico Parabólico (Intercambiador de Calor)	52
Tabla 10: Promedio de datos del Lente de Fresnel.....	53
Tabla 11: Resumen de caracterización de datos	57
Tabla 12: Resumen de temperaturas presentes en el proceso	57
Tabla 13: Promedio de datos del Concentrador Cilíndrico Parabólico (Concentrador)	58
Tabla 14: Promedio de datos del Concentrador Cilíndrico Parabólico (Intercambiador de Calor)	60
Tabla 15: Promedio de datos del Lente de Fresnel.....	61
Tabla 16: Resumen de caracterización de datos	63

RESUMEN

El Ecuador por ubicarse en la línea equinoccial posee el inconveniente que el recorrido del sol en el cielo pasa sobre las instalaciones solares, situación que no acontece con las ubicadas en zonas distantes de la misma, lo cual genera un problema para el seguimiento automático de posición, razón por la cual debemos determinar cómo afecta la ubicación del emplazamiento según la latitud a la que se encuentra. Para las aplicaciones de media y alta temperatura es necesario conocer la temperatura focal, así como la eficiencia óptica de las mismas, para poder determinar la posición más recomendable para aprovechar de mejor manera la radiación solar incidente en nuestro país. Se hace una comparación de los datos de radiación que recibe nuestro país mediante diferentes métodos, NASA, ISF, Armstrong-Page e Isocad, contrastados con los datos de mediciones reales para conocer que los datos arrojados por los programas y cálculos son muy similares a los medidos, lo que da un mayor nivel de confianza de los datos que se utilizan en la oficina para los cálculos y no requerir demasiado tiempo para realizar mediciones. También se revisa las diferentes tecnologías que actualmente se utilizan para el aprovechamiento de la energía solar, para aumentar su rendimiento y aprovechar de mejor manera el espacio disponible, ya que, son instalaciones que ocupan grandes extensiones de terreno, lo que puede ser perjudicial ya que se utilizarán superficies de cultivo para la instalación de éstas plantas. Finalmente se exponen los datos registrados y las variaciones de temperaturas presentes en los diferentes equipamientos utilizados en los experimentos.

PALABRAS CLAVES:

- **LENTE DE FRESNEL**
- **HELIÓSTATO**
- **CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO**
- **TEMPERATURA FOCAL**
- **EFICIENCIA ÓPTICA**

ABSTRACT

As Ecuador is located in equinoctial line has a problem that the path of the sun in the sky passes over some solar equipment, this situation doesn't occur with the equipment located in other places far from that zone, that's a problem for the automatic tracking position, that's why we must determine how it affects the site location by latitude to which is . For medium and high temperature applications we must calculate the focal temperature, and optical efficiency in order to determine the most advisable to make better use of solar radiation in our country. We established a comparison of the radiation data between different methods, NASA, ISF (Engineers Without Borders, for it's acronym in Spanish), Armstrong-Page and Isocad software, compared with measurement data for determinate that the theoretical data are very similar to those measured, that makes the first ones more reliable in order to use those ones in our offices instead of taking a lot of time making field measurements. Also the different technologies currently used for the utilization of the solar energy is reviewed to increase performance and make better use of the space available, because those are very big power plants and it space can be used in other activities as arable land. Finally the measured data are exposed and the variation of the equipment's temperatures during the experiments.

INTRODUCCIÓN

El Ecuador en los últimos tiempos está incursionando en la investigación de las energías renovables, puntualmente con la energía eólica, hidroeléctrica y solar, siendo esta última motivo de un estudio un poco más detallado debido al enorme recurso del que dispone el país, adicional de la excelente posición que tiene nuestro país, con una constante exposición a la luz solar, lo que favorece la implantación de este tipo de tecnología.

En los actuales momentos es política de estado, que consta en nuestra constitución, el derecho a la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable. Según consta en el plan del Buen Vivir, en su numeral 4.3.3, “El 6% de aporte de la capacidad eléctrica instalada debe ser con energías renovables, diferentes de la energía hidroeléctrica” (SENPLADES 2009-2013).

Es por esto que se debe considerar la mejor manera de aprovechar el recurso solar presente, utilizando para ello dos equipos como son el Concentrador Cilíndrico Parabólico y el Lente de Fresnel, equipos que nos pueden mostrar de mejor manera el fenómeno de la concentración de la radiación solar y su posterior aprovechamiento.

Esta investigación es parte del megaproyecto que está realizando la Universidad de las Fuerzas Armadas, el cual consiste en utilizar un fluido de trabajo (aceite térmico) para elevar su temperatura por medio de un grupo de Concentradores Cilíndrico Parabólicos, este fluido de trabajo ingresa a la vivienda, que funcionará como un intercambiador de calor para entregar calor al interior y generar una temperatura de confort al interior de la misma, y luego regresa al tanque acumulador para repetir el ciclo.

De esta manera podemos aplicar los conocimientos adquiridos durante el ciclo de estudios a situaciones reales, para mejorar las condiciones de vida de las personas dentro y fuera de nuestro país, generar conocimiento que sea consecuente con la realidad que vive nuestro país, generar nuestra propia investigación con datos basados en nuestra realidad.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

Ecuador se encuentra iniciando un proceso de investigación sobre las aplicaciones de la energía solar térmica de media y alta temperatura que tienen un gran potencial en este territorio, debido a la ubicación del país en la zona tórrida del planeta y que no ha sido aprovechada eficientemente por diversos factores como la ausencia de una política para iniciar dicha investigación en épocas anteriores, falta de profesionales calificados para llevarla a cabo, la dificultad de poseer tecnología en este campo que nos permita realizar la investigación de este tema, entre otras.

Un aspecto que perjudicó la investigación y el desarrollo de energías alternativas en Ecuador es el precio subsidiado de los derivados del petróleo, como el GLP y las gasolinas, que no genera una necesidad por obtener energía a un menor costo.

Debido al desarrollo de plataformas de comunicación como el internet y también a lo expuesto por algunos profesionales que nos han visitado para compartir sus experiencias y conocimientos durante el desarrollo de la maestría, podemos apreciar que otros países ya poseen marcos legales que impulsan la utilización de las energías alternativas para la generación de energía, de entre ellas la que llama nuestra atención es la energía solar.

Este tipo de energía se basa en aprovechar la energía solar, concentrar dicho recurso ya que en la naturaleza lo encontramos de manera dispersa, realizar un proceso de conversión térmica (concentrar la energía solar y transformarla en calor), aplicar este calor en un intercambiador de calor para calentar otro fluido de trabajo para la calefacción de viviendas autosustentables.

Pero el recurso presenta una dificultad para ser concentrado debido a la ubicación de los diferentes sitios de investigación y producción de energía en diferentes latitudes, por lo que se requiere métodos para un seguimiento automático de la trayectoria solar, esta dificultad aumenta en zonas como Ecuador en las cuales la trayectoria es mucho más variable que en zonas ubicadas en los trópicos, razón por la cual el seguimiento se complica al tener que invertir mayores recursos para cumplir este propósito.

Es por esto que nace la necesidad de realizar una modelación de los diferentes concentradores que tenemos disponibles, como lentes y espejos parabólicos y determinar las opciones de mejora y obtener el máximo rendimiento de estos concentradores y aprovechar de mejor manera el recurso solar disponible en el Ecuador realizando un estudio de la mejor manera de aprovecharlos, para su posterior optimización dentro del megaproyecto que se está desarrollando por el Grupo de investigación en Energías Renovables y Eficiencia Energética.

1.2 Definición del problema

La radiación solar que incide en nuestro planeta no se comporta de la misma manera en todas las latitudes, depende de su ubicación con respecto a la línea equinoccial, donde los territorios que se encuentran lejos de la misma tienen una mayor facilidad para la ubicación de dispositivos de concentración de radiación solar y paneles solares, ya que el recorrido del sol en el cielo durante el año no pasa sobre los dispositivos, necesitando únicamente sistemas de ubicación en un solo eje. Mientras que en nuestro país o en zonas cercanas o

sobre la línea ecuatorial si presentan este inconveniente ya que la trayectoria del sol cambia según la estación en que nos encontramos, haciendo que el seguimiento solar sea más complejo, para lo cual se requiere un sistema de seguimiento en dos ejes, haciendo que esta función sea más compleja y costosa de realizar.

Como contrapunto se tiene que Ecuador se encuentra en la zona tórrida del planeta, razón por la cual la incidencia de la radiación es abundante, adicional se dispone de este recurso en un número de horas iguales todo el año, pero no aprovechable si no se lo concentra en un punto determinado para aplicarlo en sistemas de media y alta temperatura, como concentradores y torres de potencia, con el inconveniente del seguimiento solar. Por lo que, el motivo de este trabajo de investigación es evaluar la cantidad de energía que recibimos todos los días del sol, evaluar cuánto de esa energía se puede concentrar con lentes, espejos y helióstatos en un sistema de absorción, realizar las mejoras necesarias para la optimización de la captación de la energía solar con estos instrumentos, generar alternativas para la optimización de la concentración y que estas puedan aplicarse en el megaproyecto que está llegando a cabo por el Grupo de Investigación en Energías Renovables y Eficiencia Energética de la ESPE.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Determinar las características energéticas de la radiación solar concentrada por lentes y espejos para ser utilizados en zonas de latitud 0°

1.3.2 Específicos

- Realizar el modelo matemático y el análisis energético de dos sistemas de concentración (lentes, espejos).

- Determinar la altura focal teórica y experimental para alcanzar la mayor área de captación de la radiación solar concentrada.
- Analizar la temperatura focal de acuerdo con la distancia del haz de radiación tomando como referencia la distancia entre el concentrador y absorbedor.

1.4 Alcance

Realizar los experimentos de la radiación solar utilizando prototipos de lentes, espejos y helióstatos a fin de determinar los parámetros energéticos óptimos que permitan definir de manera adecuada el dimensionamiento de centrales solares térmicas de media y alta temperatura.

1.5 Justificación e importancia de la investigación.

Desde finales del siglo XIX el hombre ha utilizado combustibles fósiles para producir electricidad, comenzó con la quema de keroseno, luego las centrales de carbón y diésel, turbinas de gas etc. Y los gases que se producen son desechados hacia la atmósfera, lo que ha generado un aumento de los gases el efecto invernadero en nuestra atmósfera, ocasionando un sinnúmero de fenómenos atmosféricos que han alterado el clima de la tierra.

Por otra parte, el sol es una fuente de energía inagotable, de alrededor de 1'559280 TWh/año, misma que representa 15000 veces más que lo que consumimos actualmente en todo el mundo en un año.[1]

Debemos considerar que aproximadamente el 30% de toda esta energía regresa al espacio (467784 TWh/año), el 50% es absorbida por el planeta y el 20% interviene en el ciclo del agua, origina los vientos, los que generan las olas del mar y también ayuda en el proceso de la fotosíntesis de las plantas, además de la energía que queda retenida en la atmósfera temporalmente¹.

¹ José A. C. González, Roque C. Pérez, Antonio C. Santos, Manuel-A.C. Gil; CENTRALES DE ENERGÍAS RENOVABLES: GENERACIÓN ELÉCTRICA CON ENERGÍAS RENOVABLES; Pág. 27.

Pero este recurso se encuentra disperso en la superficie de la tierra, por lo que es necesario concentrarlo para su posterior utilización, es por esto que es muy importante el estudio de los diferentes métodos e instrumentos para concentrar la radiación solar, y su posterior utilización en la caldera, transferir el calor al fluido de trabajo (agua) y que ésta sea la que realice el calentamiento del ambiente de la casa.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Geometría solar

Para poder entender a cabalidad los términos más utilizados en este campo es preciso detallar su definición:

- **Radiación solar:** es la suma de las radiaciones: directa, difusa y de albedo que recibe una superficie.
- **Radiación solar directa:** Es la radiación que incide en una superficie directamente desde el sol sin sufrir desviaciones al atravesar la atmósfera terrestre.
- **Radiación difusa:** Es la que se recibe desde el sol, después de sufrir desviaciones al atravesar la atmósfera.
- **Radiación de albedo:** Es la que proviene de objetos en la superficie terrestre, como el reflejo de paredes blancas, nieve, masas de agua, etc.
- **Irradiancia:** Es la rapidez de la incidencia de energía radiante sobre una superficie por unidad de área.
- **Irradiación:** Es la cantidad de energía por unidad de área que incide durante un período de tiempo.
- **Helióstato:** Conjunto de espejos distribuidos para concentrar la radiación solar directa en un punto fijo.

- **Concentradores cilíndrico parabólicos (CCP):** Son concentradores con forma parabólica los cuales concentran la radiación solar a lo largo del foco de la parábola de la que están conformados.
- **Lentes:** Concentran la luz solar usando el fenómeno óptico de la refracción
- **Refracción:** Es el cambio de dirección que experimenta la luz cuando atraviesa de manera oblicua la superficie de separación de dos medios transparentes de distinta naturaleza.

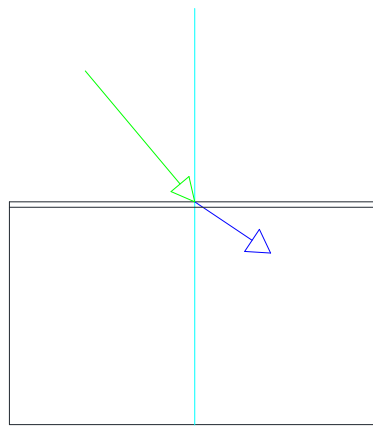


Figura 1: Refracción de la luz

Fuente: Calvopiña, P., Salinas, R. TPS, 2008

Dentro de este estudio es también importante conocer los ángulos presentes en este estudio:

- **Latitud (ϕ):** es el ángulo formado por la posición del sol con respecto a la línea ecuatorial medido desde el centro de la tierra, es positivo al norte de la línea y negativo al sur de la misma.
- **Ángulo horario (τ):** Es el ángulo que recorre la tierra para ubicar un meridiano que pasa por un punto directamente bajo el sol.

$$\tau = 15 * (HR - 12) \quad (1)$$

- Declinación (δ): Es la posición del sol al medio día solar, con respecto al plano del Ecuador terrestre, siempre se registra este ángulo al medio día solar.

$$\delta = 23.45 * \sin\left(360 * \frac{284+n}{365}\right) \quad (2)$$

Dónde: n es el día juliano

Tabla 1: i-ésimo día y día típico de cada mes

Meses	N para i-ésimo día del año	Día tipo
Enero	i	17
Febrero	31+i	15
Marzo	59+i	16
Abril	90+i	15
Mayo	120+i	15
Junio	151+i	10
Julio	181+i	17
Agosto	212+i	17
Septiembre	243+i	16
Octubre	273+i	16
Noviembre	304+i	15
Diciembre	334+i	11

Fuente: Jutglar, Energía Solar

- **Ángulo cenital (θ_s):** Es el formado por la radiación solar directa del sol y la vertical del lugar, en un punto cualquiera en la Tierra. Varía a lo largo del día y depende de la latitud del lugar y de la declinación, varía entre 0 y 90°.

$$\cos(\theta_s) = \sin(\delta) * \sin(\lambda) + \cos(\delta) * \cos(\lambda) * \cos(\beta) * \cos(\tau) \quad (3)$$

- **Ángulo azimutal (β_s):** Es el formado por la componente horizontal de la radiación solar directa con respecto a la dirección Norte-Sur en el hemisferio norte, se mide sobre un plano horizontal que pase por el lugar, varía entre 0 y 360°.

$$\sin(\beta_s) = \frac{\sin(\tau) \cdot \cos(\delta)}{\sin(\theta_s)} \quad (4)$$

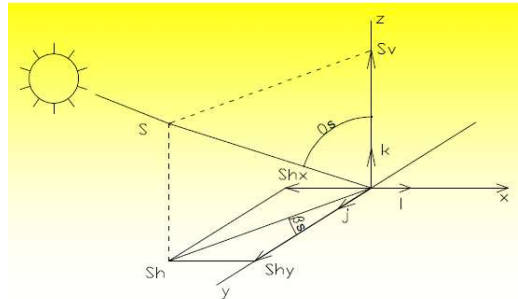


Figura 2: Ángulo cenital (θ_s) y ángulo azimutal (β_s)

Fuente: Calvopiña, P. Salinas, R., TPS, 2008

2.2. Diagrama estereográfico

La carta estereográfica se confecciona para poder observar el recorrido del sol por el cielo del lugar donde vamos a realizar nuestro estudio durante todo el año, para lo cual se requiere determinar los ángulos cenitales y azimutales tomando en cuenta los días representativos de cada mes para los cálculos, confeccionamos una tabla en Excel y en el sitio donde se cruzan ambos ángulos se ubica un punto, la unión de estos puntos genera la trayectoria del sol a lo largo del día, con la variación del día típico varía también la trayectoria del sol en el cielo, una carta estereográfica realizada para la latitud de la ESPE se muestra a continuación:

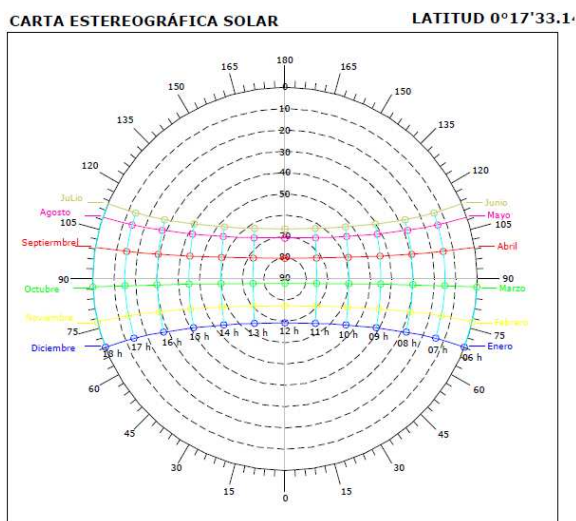


Figura 3: Carta estereográfica de la ESPE

Fuente: Calvopiña, P., Salinas, R. TPS, 2008

2.3. Análisis de radiación directa para cielo isótropo

El modelo del cielo isótropo considera a la bóveda celeste como una fuente de radiación perfectamente difusa y uniforme, no tiene en cuenta la anisotropía (direccional y no uniforme) de la radiación que llega desde el cielo, como el brillo del horizonte.

La radiación solar viene expresada por la expresión:

$$I = \bar{I}_{bo} * R_b + \bar{I}_{do} * R_d + (\bar{I}_{bo} + \bar{I}_{do}) * R_r \quad (5)$$

Dónde: \bar{I}_{bo} radiación solar directa, \bar{I}_{do} radiación solar difusa del sitio donde se realiza la medición, R_b , R_d y R_r son factores de inclinación de la radiación directa, difusa y de albedo.

Para el cálculo de R_b , R_d y R_r utilizamos las fórmulas:

$$R_b = \frac{\cos(i)}{\sin(\theta_s)} \quad (6)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (7)$$

$$R_r = \rho * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (8)$$

Dónde: θ_s es el ángulo cenital, β el ángulo de inclinación de la superficie con respecto a la horizontal e i es el ángulo de incidencia de la radiación directa con respecto a la normal a la superficie de medición.

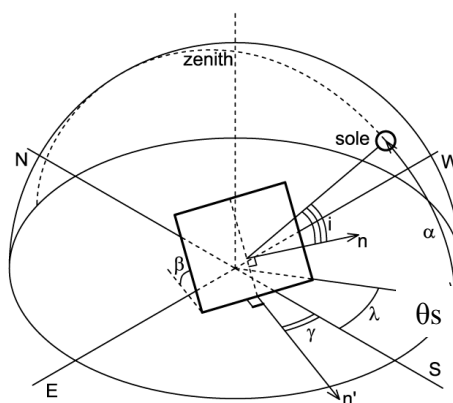


Figura 4: Esquema que muestra ángulos θ_s , β e i

Fuente: Calvopiña, P; Salinas, R; TPS, 2008

2.4. Lentes

Son instrumentos que nos sirven para concentrar la luz solar en un área muy pequeña para generar calor, que a su vez puede tener aplicaciones como producción eléctrica, generación de calor para calefacción, etc. Dejan pasar la luz y durante esto, la luz se refracta.

Las superficies de los lentes suelen ser esféricas, cilíndricas o parabólicas siendo las esféricas las más comunes por la facilidad de fabricación

Los lentes sencillos o compuestos se caracterizan por dos factores: la distancia focal de la lente y la relación entre la distancia focal y el diámetro del lente. La distancia focal es la longitud entre el centro del lente y el objeto a enfocar. La relación entre la distancia focal y el diámetro del mismo determina su capacidad para receptor la luminosidad, se representa con la letra f .

Los lentes con superficies de radios de curvatura pequeños poseen distancias focales cortas y aquellos que tienen superficies de radios de curvatura amplios tienen distancias focales grandes, un lente con dos superficies convexas tiene los rayos paralelos al eje óptico de tal suerte que se juntan o convergen en un punto situado en la lente opuesta al objeto.

Ecuación de los lentes:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) * \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (9)$$

Donde: **n** índice de refracción del material; **r1 y r2** radios de curvatura de las dos superficies esféricas. Esta ecuación es válida para todas las lentes. Los radios de curvatura se consideran positivos en superficies convexas y negativos en las cóncavas [5]

2.5. Espejos

Los espejos son superficies planas que reflejan la luz que incide sobre ellos siguiendo las leyes de la reflexión.

Los espejos planos reflejan la luz y componen una imagen virtual de los objetos reflejados en él, es virtual ya que no puede ser proyectada en otra superficie, sólo puede ser observada en el espejo.

Los espejos esféricos pueden clasificarse en cóncavos y convexos, los primeros son aquellos que tienen su superficie interna pulida y los segundos la externa:

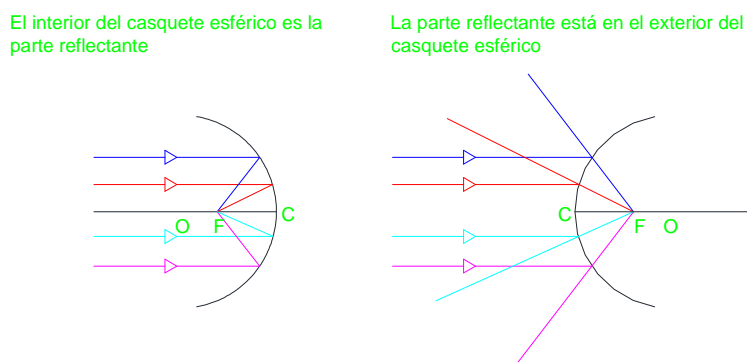


Figura 5: Diferencias entre espejos cóncavos y convexos

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos

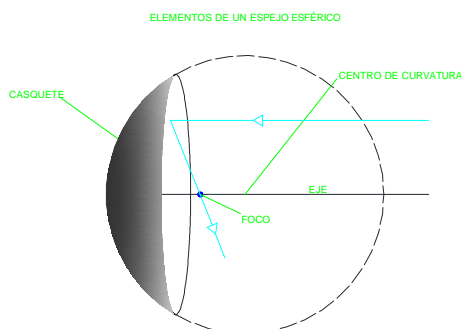


Figura 6: Elementos de un espejo esférico

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos

El centro de curvatura es el centro de la esfera (O), cualquier haz de luz que pase por este punto se reflejará sin sufrir ninguna distorsión, el foco (F) es el punto donde convergen todos los rayos reflejados. La distancia focal es la distancia entre los puntos F y C.

Elementos:

- Centro de curvatura: es el centro de la esfera a la que pertenece el casquete.
- Radio de curvatura: es el radio de la esfera a la que pertenece el casquete.
- Vértice del espejo: es el polo del casquete que pertenece al espejo.
- Eje principal: es la línea que pasa por el polo y el foco de la esfera.
- Eje secundario: es cualquier recta que pasa por el centro de curvatura.
- Apertura o ángulo del espejo: es el ángulo formado por los ejes secundarios que pasan por el borde del espejo.

En los espejos cóncavos podemos observar algunas características, entre ellas:

- Los rayos paralelos al eje principal se reflejan pasando por el foco.
- Todo rayo que pase por el centro de curvatura se reflejará sobre sí mismo.

En los espejos convexos también se presentan algunas características:

- La distancia focal es virtual, por lo cual es negativa.
- Todo rayo paralelo al eje principal se refleja de manera que la prolongación del mismo pasa por el foco.
- Todo rayo que tiende a pasar por el foco se refleja de manera paralela al eje principal.

Aplicaciones prácticas podemos citar los espejos cóncavos de los dentistas, los cuales requieren concentrar la luz en un punto en específico para poder observar los detalles, los espejos retrovisores son convexos, por lo que se puede observar la leyenda “Los objetos observados están más cerca de lo que parecen” nos dan una visión de lo que podemos observar atrás, mas no la distancia real de los objetos.

Partiendo de la ecuación de la parábola con eje focal en Y tenemos:

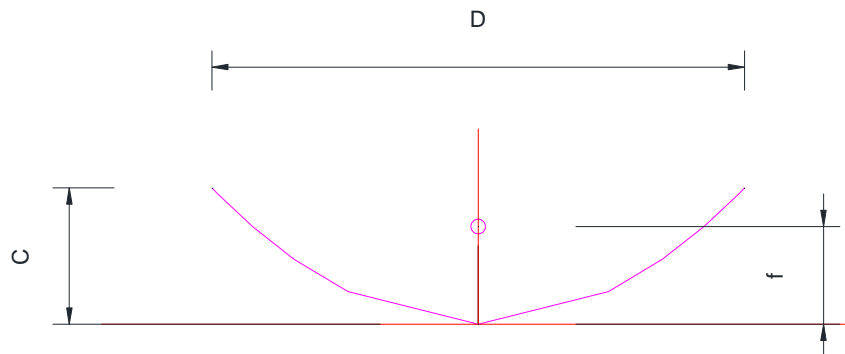


Figura 7: Gráfica de la parábola

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos

$$x^2 = 4 * f * y \quad (10)$$

Donde: **f** distancia focal en m, **x** abscisa, **y** ordenada.

Utilizando la figura 7 se reemplaza A(D/2,C) en la ecuación 2.10 para obtener:

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 = 4 * f * C \quad (11)$$

Donde: **D** diámetro del concentrador parabólico en m, **C** altura del espejo parabólico en m.

Arreglando la expresión 2.11 se obtiene:

$$C = \frac{D}{16 * \left(\frac{f}{D}\right)} \quad (12)$$

Donde: $\frac{f}{D}$ relación focal diámetro del concentrador.

En el diseño de antenas se utiliza para la relación f/D la siguiente expresión:

$$0,25 < \frac{f}{D} < 0,6 \quad (13)$$

Para valores f/D cercanos a 0,25 el foco está dentro del paraboloide, esto en una condición real origina que el calor sea reradiado hacia el espejo, sin embargo se reducen pérdidas por convección. Para relaciones f/D cercanas a 0,6 existe la desventaja de que los componentes tubo absorbedor y envolvente de vidrio tengan pérdidas por convección.

2.6. Heliostatos

Un heliostato es un espejo o un conjunto de espejos que se extienden a lo largo de una gran superficie, que deben seguir la posición del sol en 2 ejes, con esto, se puede focalizar la radiación solar de todo el día en un punto fijo

determinado. Para esto, la superficie reflectiva del espejo se mantiene de manera perpendicular a la bisectriz del ángulo entre las direcciones del sol y el objetivo que se ve desde el espejo.

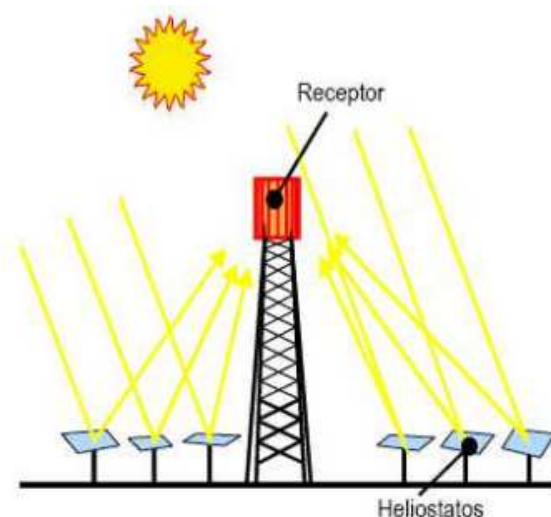


Figura 8: Esquema de un sistema de torre de potencia solar

Fuente: Calvopiña, P., Salinas, R., TPS, 2008

Su aplicación actualmente se enfoca en la iluminación natural (caso del pueblo de Rjukan, Finlandia) y en la concentración para la producción de energía que es básicamente la aplicación más conocida y empleada por nosotros.



Figura 9: Vista de los heliostatos del pueblo de Rjukan, Finlandia

Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-305625/espejos-gigantes-reflejan-el-sol-de-invierno-en-la-ciudad-noruega-de-rjukan>



Figura 10: Helióstatos de la planta Gemasolar

Fuente: Calvopiña, P, 2013

Están compuestos de una superficie reflectante, su estructura soporte, mecanismos de movimientos en dos ejes y el sistema de control respectivo, se emplean como superficies reflectantes espejos de vidrio, que pueden ser planos o tener una ligera curvatura, también se emplea superficies reflectantes a base de películas poliméricas de alta reflectividad, la diferencia entre ambas es la menor duración de las segundas.

El limitante para su tamaño lo genera la capacidad de fabricación, transporte e instalación, haciendo que entre más pequeños sean, sus costos de logística también disminuyan.

2.7. Distancia focal y razón de concentración

La distancia focal de un lente es la distancia entre el centro óptico de la lente y el foco, su inversa se conoce como la potencia del lente.

Para una lente convergente la distancia es positiva, para una divergente es negativa.

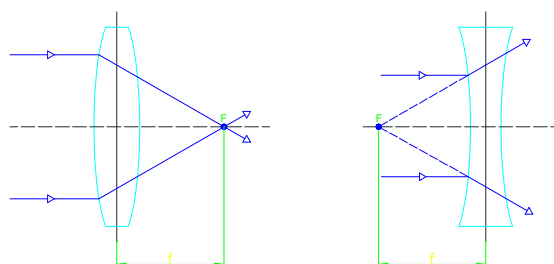


Figura 11: Esquema de lentes convergentes y divergentes.

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos; 2015

La razón de concentración es la relación entre la densidad de radiación incidente y la utilizada por el absorbedor. Para los CCP (Concentrador Cilíndrico Parabólico) la razón de concentración es de:

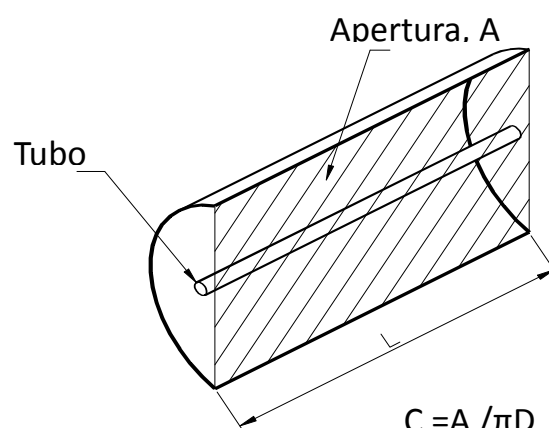


Figura 12: Razón de concentración para CCP

2.8. Temperatura focal

Un fenómeno que debemos tener en cuenta es la temperatura a la que llegan las aplicaciones solares, se consideran de baja temperatura cuando su temperatura no supera los 100°C (Colectores solares), de media temperatura (100-400°C) como los concentradores cilíndrico-parabólicos, y los que superan los 400°C como los lentes de Fresnel, torres de potencia, hornos solares, etc. Es en este último caso donde se requieren materiales de alta reflectividad, que en muchos casos generan una gran huella ecológica muy grande para su

fabricación. Se han propuesto investigaciones donde la luz es concentrada hasta llegar a temperaturas cercanas a los 2000°C.

En el caso de concentradores de tipo lente, donde se utiliza el agua como medio óptico, se puede generar temperaturas elevadas dependiendo de la relación de concentración, la calidad de los materiales, la irradiancia del sitio del emplazamiento.

La expresión que relaciona todos estos parámetros es:

$$T_f = \sqrt[4]{\frac{R_c * H_b * \tau_a * \rho_l * \alpha_a * \gamma * F * k_s * f_t}{\epsilon_a * \sigma}} \quad (14)$$

Donde: **T_f** Temperatura focal (k); **R_c** razón de concentración; **H_b** irradiancia; **ε_a** emisividad del recubrimiento del absorbedor, **σ** Constante de Stefan-Boltzmann, **ρ_l** reflejancia de la lente, **α_a** absortancia del absorbedor, **γ** imperfecciones en la superficie, **F** fracción de apertura no sombreada, **k_s** factor de suciedad, **f_t** error en el seguimiento, **τ_a** transmitancia del absorbedor.

2.9. Balance energético de los concentradores

Una aplicación importante de los concentradores puede hacerse en los procesos industriales, para calentar fluidos de trabajo a temperaturas menores de 100 °C [2] es solo del 5%, lo restante a mayores temperaturas, por lo cual una aplicación de la energía solar en este sector se realizaría por captadores de enfoque.

Con un balance de energía se puede observar como los concentradores son más eficientes que los colectores planos. El calor útil entregado al fluido de trabajo está dado por la energía recibida por el absorbedor, menos las pérdidas de calor al medio ambiente, es decir:

$$q_u = q_{abs} - q_p = q_{abs} - U_c * (T_c - T_a) * A_r \quad (15)$$

Donde la energía que recibe el absorbedor (q_{abs}) está dado por

$$q_{abs} = \eta_o * A_a * G_d \quad (16)$$

Donde: A_a área de apertura; A_r área del absorbedor; G_d radiación solar directa incidente sobre el colector; T_a temperatura ambiente en °C; T_c temperatura del absorbedor en °C; U_c coeficiente global de transferencia de calor; η_o eficiencia óptica.

Si la eficiencia instantánea del colector es:

$$\eta_c = \frac{q_u}{G_d * A_a}$$

Entonces

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_c * (T_c - T_a)}{G_d} * \frac{1}{C} \quad (17)$$

Donde la razón de concentración C está dada como $C = \frac{A_a}{A_r}$

Debido a las pérdidas de un colector plano en el que $A_a/A_r=1$ crecen al aumentar la temperatura, la ganancia de energía a altas temperaturas es baja. Al contrario, en concentradores, al aumentar la razón de concentración A_a/A_r , manteniendo A_a constante, las pérdidas térmicas se reducen, permitiendo obtener altas temperaturas. Sin embargo, las pérdidas por reflexión, factor de forma, y la no concentración de radiación difusa en los concentradores, reducen la energía absorbida comparada con la que capta un concentrador plano. [3]

La eficiencia óptica de un canal parabólico es muy semejante a la de un paraboloide de revolución y está dada por:

$$\eta_o = \rho_R * \tau * \alpha * F * f_t \quad (18)$$

Donde: f_t fracción de la apertura no sombreada por soportes y absorbedor; F error en el seguimiento; α absorptancia del absorbedor; Y factor de forma que depende de los errores en la pendiente del espejo y de la dispersión que sufre la radiación solar directa incidente; ρ_R reflejancia del espejo; τ transmitancia de la envolvente del absorbedor.

Todos los parámetros son adimensionales y los valores típicos están entre 0,90 a 0,95, con excepción de ρ_R cuyo valor está entre 0,75 y 0,85 [4], dependiendo la calidad del reflector. Como el área del absorbedor es reducida, las pérdidas térmicas son pequeñas y principalmente radiativas, por lo general no es necesario utilizar cubierta en el absorbedor para evitar efectos convectivos. El funcionamiento de un paraboloide de alta concentración es mucho más sensible a las propiedades ópticas del sistema que a las pérdidas térmicas.

CAPITULO 3

ESTADO DEL ARTE

3.1. Lentes de concentración [13]

Los lentes de concentración sirven, como su nombre lo indica para concentrar la radiación solar que existe en una superficie amplia en una muy pequeña, lo que genera mucho calor que puede ser utilizado para la generación de electricidad mediante el calentamiento de un fluido de trabajo que ingresará en un ciclo termodinámico o, como se está investigando recientemente, para la concentración de la radiación solar que incidirá sobre un panel fotovoltaico [14] para mejorar su eficiencia de conversión en un 35%. [15]



Figura 13: Generador solar

Fuente: <http://www.experimenta.es/noticias/industrial/rawlemon-futuro-energia-solar-esfera-4424>

Se ha creado un generador solar con una lente esférica, que es un globo lleno de agua que concentra la radiación solar en un panel fotovoltaico en alrededor de 10000 veces. Su creador es el diseñador y arquitecto André Broessel. El diseño incluye también un sistema de seguidores automáticos que ayudan en la optimización de la luz diurna, su ventaja es que puede ser instalada en la fachada de los edificios para su uso sobre paneles fotovoltaicos o la generación de calor. Sus limitaciones son el peso (esfera grande llena de agua), cuanto puede afectar a la estructura del edificio en caso de un sismo (por tener una masa líquida en movimiento) y el precio de fabricación e instalación.



Figura 14: Generador solar esférico

Fuente: <http://iluminet.com/rawlemon-generador-solar-esferico/>

Otro avance en la utilización de lentes de concentración es el utilizado en el proyecto “Light Farm” liderado por dos científicos iraníes que viven en Italia quienes generan electricidad y calor utilizando lentes de concentración tipo Fresnel. Esto ha generado que la eficiencia de los paneles fotovoltaicos aumente a más del doble de un panel convencional (19% inicial al 40%).² Esto se da colocando los lentes concentradores en fachadas y techos de las viviendas.

² <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/11/04/lentes-fresnel/>



Figura 15: Techo del proyecto “Light Farm”

Fuente: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/11/04/lentes-fresnel/>

Los lentes utilizados son de amplia apertura y corta distancia focal, los cuales se encuentran dentro de un vidrio para aumentar su efectividad, diseñados de tal manera que también aprovecha el calor que no absorbe las células fotovoltaicas, el cual se transmite a radiadores que lo emplean como calefacción o para el calentamiento de agua.

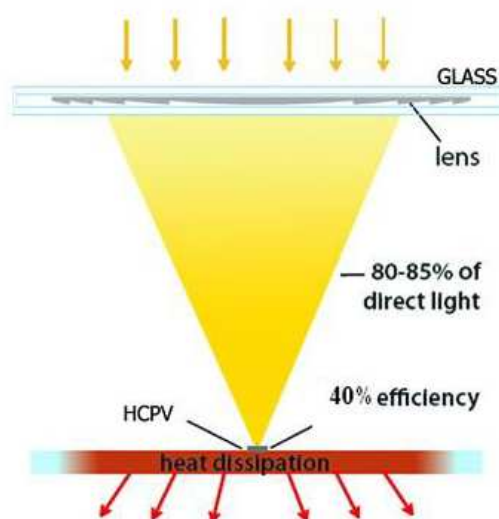


Figura 16: Esquema de funcionamiento de los lentes tipo Fresnel

Fuente: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/11/04/lentes-fresnel/>

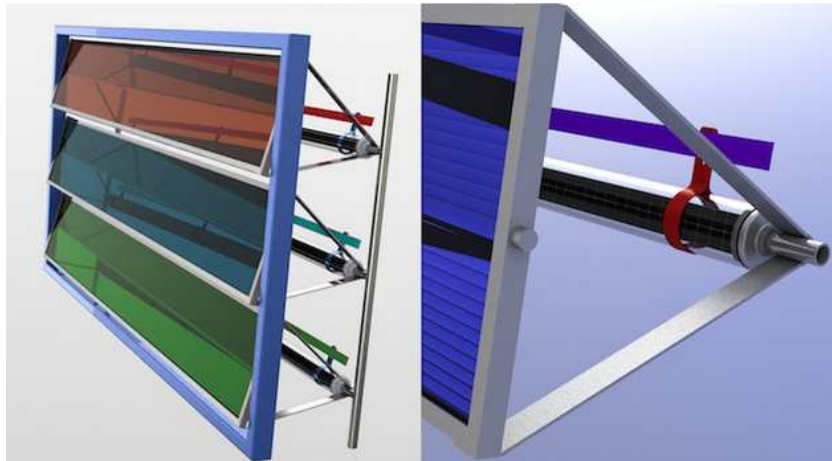


Figura 17: Panel fotovoltaico y disipador de calor

Fuente: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/11/04/lentes-fresnel/>



Figura 18: Vista de la fachada del proyecto Light Farm

Fuente: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/11/04/lentes-fresnel/>

3.2. Espejos parabólicos

Uno de los recientes desarrollos en la actualidad de los lentes de concentración es la llamada “Energía Solar Fotovoltaica de Alta Concentración” o HCPV³ por sus siglas en inglés, aunque se empezó a investigar desde hace 20 años atrás aproximadamente con el estudio de uno de los aspectos que encarece esta tecnología, los materiales fotovoltaicos. En la actualidad ya se puede contar con esta tecnología que genera ahorro en materiales y un aumento en el rendimiento de las células fotovoltaicas.



Figura 19: Fotografía de un HCPV

Fuente: <http://www.sitiosolar.com/la-energia-solar-fotovoltaica-de-alta-concentracion-hcpv/>

La tecnología que encierra el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos tiene como base los materiales semiconductores que son caros debido a la manera en que son fabricados (obleas de silicio) cuyo trabajo es transformar la energía que contienen los fotones de la luz solar en impulsos eléctricos. Además si vamos a producir grandes cantidades de energía se requieren extensas superficies para la instalación de paneles fotovoltaicos, inversores, bancos de baterías, etc., lo que hace que para esta tecnología, el costo de producción sea caro, a pesar que en tiempos actuales su costo ha disminuido considerablemente, todavía no posee un precio muy competitivo con respecto al

³ <http://www.sitiosolar.com/la-energia-solar-fotovoltaica-de-alta-concentracion-hcpv/>

costo de producción de otras fuentes de energía como la hidroelectricidad o eólica.

Con esta tecnología se busca reducir el área de los paneles fotovoltaicos y concentrar la mayor cantidad de radiación solar en un área más pequeña y que se pueda aprovechar de mejor manera el recurso utilizando para lentes de concentración.

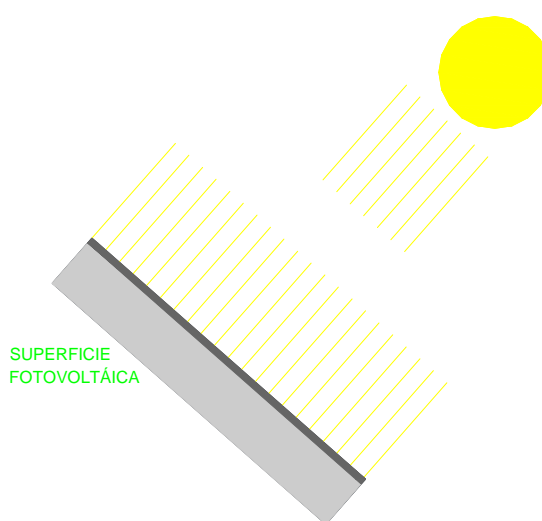


Figura 20: Esquema captación de la radiación solar sin concentrador

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

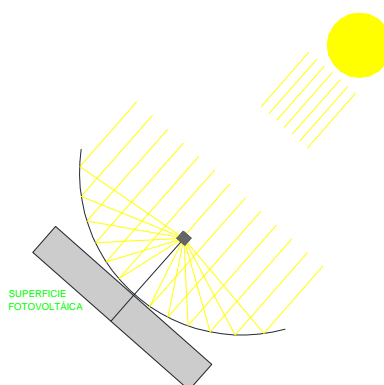


Figura 21: Esquema captación de la radiación solar con concentrador

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos

Científicos de la Asociación de Investigación y Producción de Uzbekistán cuyo referente es el ingeniero Shermakhamat Payziyev proponen un método científico sólido para la creación del “Espejo de Arquímedes” para la construcción de un rayo láser a partir de la radiación solar.

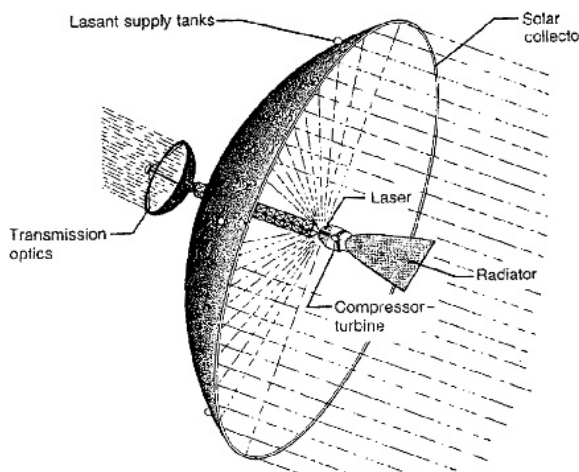


Figura 22: Esquema del rayo láser a base de radiación solar

Fuente: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/09/19/espejos-arquimedes/>

Son capaces de transformar el 35%⁴ de la radiación solar en un rayo láser aumentando la potencia máxima de los actuales láseres solares de bombeo, los cuales presentan un 2% de eficiencia para el proceso de conversión.

Están conformados por un espejo de un metro de diámetro, cuyo punto focal tiene 2.3cm de diámetro, la luz que se concentra atraviesa un disco cerámico de dos capas de Nd-YAG (Neodimio de cristales de óxido de Ytrio y Aluminio), los que se usan en láseres oftálmicos.

Uno de los lados del disco está cubierto de material reflectante y el otro anti reflectante, cuando la luz pasa a través del material cerámico, sus electrones se excitan y generando una emisión de luz láser con una longitud de onda específica (1.06 micrómetros en el infrarrojo). El análisis de resultados arrojó como conclusión que la potencia obtenida es de hasta 250 kW.

⁴ <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/09/19/espejos-arquimedes/>

Para eliminar el exceso de calor generado se instaló un disipador de calor que funciona con agua.

La luz viaja hacia un objetivo y se refleja nuevamente en la superficie del cerámico y continúa su camino en dirección oblicua. “Con este paso doble se produce una impresionante ganancia en eficiencia” haciendo posible que una mayor cantidad de luz se transforme en luz láser.

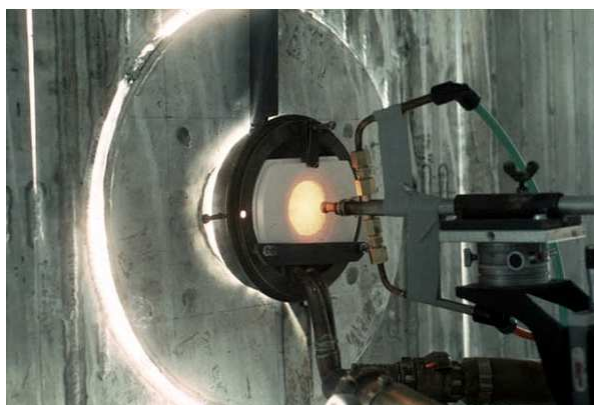


Figura 23: Fotografía del rayo láser solar.

Fuente: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/09/19/espejos-arquimedes/>

3.3. Heliostatos

Los heliostatos no solo se utilizan en la industria para la concentración de la radiación para la producción de energía solar, también en aplicaciones de iluminación para edificios.

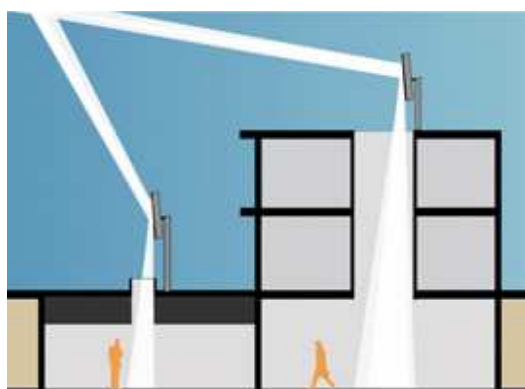


Figura 24: Esquema de iluminación con heliostatos

Fuente: <http://vilssa.com/sistemas-para-captar-la-luz-natural>

Son sistemas que presentan seguimiento automático solar, concentrando el haz de luz en un solo punto durante todo el día, donde se pueden utilizar espejos para re direccionar la luz a otros ambientes.

El caso de Rjukan Noruega

Noruega es un país ubicado al norte de Europa, por lo que el tiempo que se expone a la radiación solar es menor que los que nos encontramos más al sur, hay sitios en los que la noche puede durar hasta dos meses, el caso de esta ciudad que se encuentra en un valle en el cual, durante los meses de septiembre a marzo el sol ilumina las cumbres de las montañas que la rodean, pero no sus casas, calles, parques, etc.

El heliostato que ahora provee de luz del sol a la plaza central de este pueblo de 3000 habitantes posee una superficie de 51m², repartidos en 3 heliostatos que reflejan la radiación solar entre un 80% y 90% de la luz solar en una superficie de entre 200 y 600 m², poseen seguidores automáticos alimentados por energía solar y eólica, su costo: 600.000 euros.



Figura 25: Plaza de Rjukan con la mancha solar

Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-305625/espejos-gigantes-reflejan-el-sol-de-invierno-en-la-ciudad-noruega-de-rjukan>



Figura 26: Vista del sol desde la plaza central de Rjukan

Fuente: http://www.elconfidencial.com/multimedia/album/mundo/2013-10-25/rjukan-y-viganella-dos-pueblos-iluminados-por-espejos_45863/

Modelo Matemático

Las consideraciones adoptadas para el estudio térmico del tubo absorbedor en estado estable permiten simplificar justificadamente el análisis de los mecanismos de transferencia de calor en toda la sección del absorbedor, en la figura 27 se muestra un esquema infinitesimal del área involucrada en este proceso, de la cual se procede a desarrollar matemáticamente las ecuaciones de balance de energía previamente demostradas.

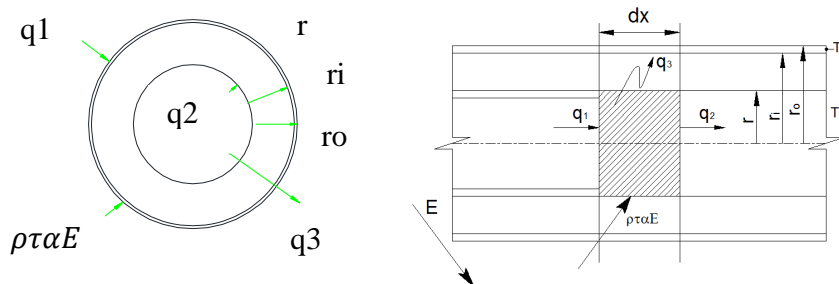


Figura 27: Esquema de los flujos de calor en la sección transversal y longitudinal del tubo absorbedor

Fuente: Toro, M; Central solar térmica con CCP, 2015.

Donde:

$$q_1 = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_2 = -kA \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[-kA \frac{\partial T}{\partial x} \right] d_x$$

$$q_3 = U_o \pi d_o d_x (T - T_\infty)$$

$$q_{ap.solar} = \rho \tau \alpha E \pi d d_x$$

$$q_{alm} = \rho C_p A d_x \frac{\partial T}{\partial t}$$

Considerando.

$$q'_{\acute{u}til} = q'_{ap.solar} - q'_3$$

Por Balance de Energía.

$$q_1 + q_{ap.solar} - (q_2 + q_3) = q_{alm} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} -kA \frac{\partial T}{\partial x} + \rho \tau \alpha E \pi d d_x - \left[-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[-kA \frac{\partial T}{\partial x} \right] d_x + U_o \pi d_o d_x (T - T_\infty) \right] \\ = \rho C_p A d_x \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned}$$

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \rho \tau \alpha E \pi d d_x + kA \frac{\partial T}{\partial x} + kA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} d_x - U_o \pi d_o d_x (T - T_\infty) = \rho C_p A d_x \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\rho\tau\alpha E\pi d d_x + kA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} d_x - U_o \pi d_o d_x (T - T_\infty) = \rho C_p A d_x \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\rho\tau\alpha E\pi d + kA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - U_o \pi d_o (T - T_\infty) = \rho C_p A \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{k}{\rho C_p} = \alpha$$

$$\frac{\rho\tau\alpha E\pi d}{kA} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{U_o \pi d_o (T - T_\infty)}{kA} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$T - T_\infty = \theta$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\rho\tau\alpha E\pi d}{kA} - \frac{U_o \pi d_o \theta}{kA} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Se determina la ecuación fundamental y se distinguen parámetros propios del sistema los mismos que serán considerados como constantes.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - K_1 \theta + K_2 = K_3 \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (20)$$

Donde.

$$K_2 = \frac{\rho\tau\alpha E\pi d}{kA}$$

$$K_1 = \frac{U_o \pi d_o}{kA}$$

$$K_3 = \frac{1}{\alpha} = \frac{k}{\rho C_p}$$

Si los valores de cada parámetro perteneciente a las constantes es conocido el desarrollo matemático de la ecuación debe involucrar un método adecuado de resolución de ecuaciones diferenciales de segundo orden.

El coeficiente global de transferencia de calor se determina con la analogía de resistencias térmicas que se detalla a continuación considerando el análisis esquematizado en la figura 27.

$$R_i = \frac{1}{2\pi r_e h_i L}; \quad r_e = r_i - r$$

$$R_o = \frac{1}{2\pi r_o h_o L}$$

$$R_c = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k_c L}$$

Determinadas las resistencias térmicas se procede a resolver la siguiente relación.

$$U_o = \frac{1}{A_o \sum R_{teq}}$$

Reemplazando:

$$U_o = \frac{1}{2\pi r_o L \left[\frac{1}{2\pi r_e h_i L} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k_c L} + \frac{1}{2\pi r_o h_o L} \right]}$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_e h_i} + r_o \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_c} + \frac{1}{h_o}} \quad (21)$$

Aplicando el criterio y consideraciones expuestas anteriormente, el coeficiente global de transferencia de calor se determina según la ecuación 21.

Determinación del perfil de temperaturas del tubo absorbedor.

El estudio energético del tubo absorbedor ha sido desarrollado previamente donde se ha logrado determinar la ecuación matemática que determinará como el fluido eleva su potencial energético al incrementar su temperatura a lo largo del tubo absorbedor.

Debido a que el concentrador es de fabricación artesanal y no obedece a una matriz o patrón que garantice su forma ideal al igual que su superficie reflectante, parámetros de forma, alineación, suciedad, seguimiento y dispersión son considerados.

Para la resolución de la ecuación diferencial se debe determinar las constantes K_1 , K_2 y K_3 .

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - K_1 \theta + K_2 = K_3 \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$K_2 = \frac{\rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot E \cdot \pi \cdot d \cdot \gamma \cdot f_t \cdot k \cdot f_d}{3kA} \quad (22)$$

Donde:

ρ = 0,75 reflectividad del concentrador; τ = 0,9 transmisividad de la cubierta; α = 0,9 absorción del absorbedor; $d = \frac{d}{3}$ [m] diámetro del tubo absorbedor; γ = 0,7 factor de forma del concentrador; f_t = 0,8 factor de apertura y sombra; k = 0,8 factor de suciedad; f_d = 0,5 factor de dispersión; E = 726 [W/m²] irradiancia solar; A = 9,5799x10⁻⁴ [m²] área del tubo absorbedor.

Reemplazando valores y resolviendo.

$$K_2 = \frac{(0.75) \cdot (0.9) \cdot (0.9) \cdot (726) \cdot (\pi) \cdot (0.034925) \cdot (0.7) \cdot (0.8) \cdot (0.8) \cdot (0.5)}{3 \cdot (401) \cdot (9,5799 \times 10^{-4})}$$

$$K_2 = 9,4$$

$$K_1 = \frac{U_o \pi d_o}{kA} \quad (23)$$

Donde:

$U_o = 3 \left[\frac{W}{m^2 K^o} \right]$ coeficiente global gas en convección natural a gas que fluye;

$d_o = 0,0034925[m^2]$ diámetro externo del tubo absorbedor; $k = 401 \left[\frac{W}{mK^o} \right]$ conductividad del cobre; $A = 9,5799 \times 10^{-4}[m^2]$ área del tubo absorbedor.

Reemplazando valores y resolviendo.

$$K_1 = \frac{(3) \cdot (\pi) \cdot (0,034925)}{(401)(9,5799 \times 10^{-4})}$$

$$K_1 = 0,85$$

$$K_3 = \frac{1}{\alpha} = \left(\frac{k}{\rho_c C_p} \right)^{-1} \quad (24)$$

Donde:

$\rho_c = 8933 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ densidad del cobre; $C_p = 394 \left[\frac{J}{kgK^o} \right]$ calor específico del cobre;

$k = 401 \left[\frac{W}{mK^o} \right]$

Reemplazando valores y resolviendo.

$$K_3 = \frac{1}{\alpha} = \left(\frac{401}{(394)(8933)} \right)^{-1}$$

$$K_3 = 8777$$

Una vez que se determinan todos los parámetros, valores y constantes para la resolución de la ecuación fundamental se procede a su desarrollo matemático utilizando el método de resolución de ecuaciones diferenciales homogéneas con coeficientes constantes.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 0.85 \theta + 9.4 = 8777 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 0.85 \theta + 9.4 = 8777 \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Estado Estable}$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 0.85 \theta + 9.4 = 0$$

$$\theta = e^{mx}$$

$$\theta' = m e^{mx}$$

$$\theta'' = m^2 e^{mx}$$

Se aplica y resuelve.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 0.85 \theta = 0$$

$$m^2 - 0.85 = 0 \rightarrow m = \pm 0.921$$

$$\theta_H = C_1 e^{0.921x} + C_2 e^{-0.921x} \quad (26)$$

Si.

$x = 0 \quad \theta_0 = 0$, reemplazando

$$\frac{d\theta_H}{dx} = C_1 e^{0.921(0)} + C_2 e^{-0.921(0)}$$

$$0 = 0.921 C_1 + 0.921 C_2$$

$$0 = C_1 + C_2$$

$$\frac{\theta_0}{2} = C_2 \quad ; \quad \frac{\theta_0}{2} = C_1$$

Entonces

$$\theta = \frac{\theta_0}{2} [e^{0.921x} + e^{-0.921x}] \quad (27)$$

Si $L = 5.8\text{m}$, Longitud del tubo absorbedor.

$$\theta_L = T_L - T_{\text{amb}}$$

$$\theta_L = 57.5 - 26.1$$

$$\theta_L = 31.4$$

Entonces.

$$C_1 + C_2 = 15.7$$

Para $x=L$; $L = 5.8\text{m}$

$$31,4 = C_1 e^{0.921(5,8)} + C_2 e^{-0.921(5,8)}$$

Reemplazando

$$C_1 = 15.7 - C_2$$

Se obtiene.

$$C_1 = 0.151$$

$$C_2 = 15,549$$

Si

$$f(x) = A$$

$$\theta = A$$

$$\theta' = 0$$

$$\theta'' = 0$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 0.85 \theta = -9.4$$

$$A = \frac{-9,4}{-0,85} = 11$$

La solución a la ecuación fundamental queda definida por la ecuación 28.

$$\theta = 0.151e^{0.92x} + 15.7e^{-0.92x} + 11 \quad (28)$$

CAPITULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para iniciar el estudio debemos realizar una breve descripción de los 2 equipos a utilizar, el Lente de Fresnel y el Concentrador Cilíndrico Parabólico:

- Lente de Fresnel

Consiste en un lente rectangular de 111x78cm y de 500W de potencia teórica, que generan un área de 0,858cm². El área del haz de radiación generado por el Lente de Fresnel es 12x8cm, es decir 9,6x10⁻³m. El foco se encuentra a una distancia de 80cm desde el lente hasta la cámara de reacción. El equipo tiene un mecanismo de seguimiento en 2 direcciones para un mejor enfoque del sol.

La cámara de reacción para líquidos es del tipo cilíndrico, misma que posee 0,2m de diámetro externo y 0,194m de diámetro interno, con una altura de 60cm. Posee 5 compartimientos internos para colocar líquidos en el interior. Posee entradas y salidas de aceite para la circulación del mismo por la cámara de reacción y por el intercambiador de calor.

El intercambiador de calor posee 12 tubos internos de 19,05mm (3/4") de diámetro y dentro de un tanque de 201mm de diámetro y 410mm de longitud, cubierto con lana de vidrio y una capa externa de 206mm de diámetro.

En el Lente de Fresnel se registran temperaturas del aceite (**Taceite**), temperatura del agua (**Tagua**), radiación incidente (**radiación**), temperatura ambiente (**Tambiente**) y temperatura de placa (**Tplaca**).

- Concentrador Cilíndrico Parabólico

Consiste en tres parábolas de 6m de longitud y 1.2m de apertura de la parábola, por el foco de la misma se coloca un tubo de cobre de 1" de diámetro recubierto por lana de vidrio y recubierto de un tubo de vidrio de 2" de diámetro. El Intercambiador de calor es un recipiente de 0,4m de largo, 0,37m de ancho y 0,16m de altura, generando un volumen de 23l para el calentamiento. El aceite empieza en el tanque reservorio, por medio de gravedad baja para atravesar el CCP, posteriormente ingresa en la cocina (intercambiador de calor), y luego al tanque calentador, posterior a esto pasa por una bomba y el aceite regresa al tanque acumulador.

En el CCP se registra temperaturas de ingreso (**Tc1**) y salida (**Tc2**) del aceite, temperatura del tubo de cobre (**Tp1**), del recubrimiento de vidrio (**Tg1**) y del panel del concentrador (**Tpc1**). En el intercambiador de calor se registra temperaturas al ingreso (**Tic1**) y salida (**Tic2**), en la base (**Tb1**), en el interior (**Ti**) y exterior (**Te**). Para ambos casos se toma flujo másico (\dot{m}) la radiación incidente (**radiación**), temperatura ambiental (**Ta**) y velocidad del viento (**Vv**).

4.1. Determinación de parámetros de ensayo

Para iniciar nuestro estudio es necesario conocer el sitio donde realizaremos el experimento, en nuestro caso las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas Campus ESPE, determinar el recurso solar existente, comparando entre cuatro métodos comúnmente utilizados:

- NASA

Iniciamos ubicando las coordenadas geográficas del sitio utilizando el programa Google Earth.



Figura 28: Ubicación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Fuente: Google Earth

Obtenemos las coordenadas geográficas con el programa y transformamos a coordenadas G.s para ingresar dichos valores en la página de la NASA para determinar, entre otros valores, la radiación solar diaria horizontal diaria, cuyos datos se muestran a continuación:

Tabla 2: Tabla generada a partir de información NASA para la latitud 0°

Month	Air temperatura °C	Relative humidity %	Daily			Earth temperature °C	Heating degree- days °C-d	Cooling degree- days °C-d
			solar radiation– horizontal kWh/m ² /d	Atmospheric pressure kPa	Wind speed m/s			
January	17,5	80,2	4,14	83,3	1,7	19,2	21	232
February	17,6	80,3	4,35	83,3	1,5	19,2	16	217
March	18,0	78,7	4,55	83,3	1,4	19,8	10	250
April	17,9	76,6	4,33	83,3	1,5	19,8	12	239
May	17,8	70,9	4,12	83,4	1,7	19,8	14	243
June	17,3	66,8	4,02	83,5	2,1	19,2	26	218
July	17,5	57,8	4,27	83,5	2,3	19,9	24	233
August	18,6	51,4	4,46	83,5	2,3	21,8	8	264
September	19,3	53,8	4,27	83,4	2,1	22,9	4	276
October	19,3	60,3	4,24	83,3	1,9	23,1	4	288
November	18,3	71,2	4,30	83,3	1,9	21,3	10	251
December	17,6	79,8	3,98	83,3	1,8	19,6	17	237
Annual	18,0	69,0	4,25	83,4	1,9	20,5	166	2948

Fuente: Calvopiña, P., NASA, Lentes y espejos parabólicos, 2015

El mes con mayor radiación solar es marzo (4,55kWh/m²/d), el menor es diciembre (3,9855kWh/m²/d). El mes de mayor temperatura es septiembre y octubre (19,3°C) y el menor es junio (17,3°C).

Tabla 3: Tabla generada a partir de información NASA para la latitud 5°

Month	Air temperatura °C	Relative humidity %	Daily	Atmospheric pressure kPa	Wind speed m/s	Earth temperature °C	Heating degree- days °C-d	Cooling degree- days °C-d
			solar radiation– horizontal kWh/m ² /d					
January	25,2	87,0	4,43	100,4	2,6	26,4	0	471
February	25,2	86,3	5,41	100,3	2,1	26,1	0	429
March	25,1	86,7	5,56	100,3	2,0	26,0	0	465
April	25,3	88,1	4,77	100,3	2,1	26,7	0	458
May	25,9	85,6	4,14	100,4	2,6	27,5	0	493
June	25,9	84,8	3,55	100,5	2,8	27,5	0	475
July	25,8	83,6	3,69	100,5	2,9	27,3	0	488
August	25,7	84,2	3,50	100,5	3,3	27,2	0	485
September	25,5	84,6	3,54	100,5	3,7	26,9	0	462
October	25,4	84,4	3,69	100,4	3,7	26,8	0	478
November	25,4	84,7	3,55	100,4	3,7	26,7	0	462
December	25,8	86,5	3,66	100,4	3,1	26,6	0	477
Annual	25,5	85,6	4,12	100,4	2,9	26,8	0	5643

Fuente: Calvopiña, P., NASA, Lentes y espejos parabólicos, 2015

El mes con mayor radiación solar es marzo (5,56kWh/m²/d), el menor es agosto (3,50kWh/m²/d). El mes de mayor temperatura es mayo y junio (25,9°C) y el menor es marzo (25,1°C).

Tabla 4: Tabla generada a partir de información NASA para la latitud -5°

Month	Air temperatura °C	Relative humidity %	Daily	Atmospheric pressure kPa	Wind speed m/s	Earth temperature °C	Heating degree- days °C-d	Cooling degree- days °C-d
			solar radiation– horizontal kWh/m ² /d					
January	21,6	63,1	3,99	88,2	2,0	23,7	0	360
February	20,9	70,9	3,81	88,2	2,0	22,5	0	308
March	21,2	69,2	4,05	88,2	2,0	22,9	0	346
April	20,7	68,1	3,98	88,3	2,2	22,7	0	321
May	20,6	60,5	4,05	88,3	2,3	22,5	1	326
June	20,2	53,4	4,02	88,4	2,9	22,0	1	306
July	19,9	46,1	3,98	88,5	2,9	21,8	1	308

CONTINÚA 

August	20,8	42,3	4,29	88,4	2,8	23,0	0	331
September	21,9	42,7	4,62	88,3	2,5	24,4	0	354
October	22,7	44,9	4,68	88,2	2,1	25,5	0	391
November	22,5	50,9	4,80	88,2	2,1	25,2	0	372
December	21,8	60,9	4,40	88,2	2,0	24,0	0	365
Annual	21,2	56,1	4,22	88,3	2,3	23,4	3	4088

Fuente: Calvopiña, P., NASA, Lentes y espejos parabólicos, 2015

El mes con mayor radiación solar es noviembre (4,80kWh/m²/d), el menor es febrero (3,81kWh/m²/d). El mes de mayor temperatura es octubre (22,7°C) y el menor es julio (19,9°C).

- Isocad

Para utilizar este método instalamos el programa, ingresamos el país y la ciudad, el programa nos entrega una ventana con la radiación solar promedio mensual en la locación seleccionada, como en la lista no se muestra Sangolquí, se coloca la ciudad de Quito.

SELECCIÓN DE LUGAR

Localidad

PAÍS

ECUADOR

CIUDAD

QUITO-NAQUITO

LATITUD

-0,1

Datos de radiación

RADIACIÓN DIARIA MEDIA MENSUAL SOBRE SUPERFICIE HORIZONTAL

ENERO	4,94
FEBRERO	4,64
MARZO	4,78
ABRIL	4,53
MAYO	4,83
JUNIO	4,69
JULIO	5,53
AGOSTO	5,47
SEPTIEMBRE	4,89
OCTUBRE	5,25
NOVIEMBRE	5,14
DICIEMBRE	5,14

Aceptar
Cancelar

Unidades de radiación

kWh/m²
 Langleys
 MJ/m²

Figura 29: Radiación solar media mensual en superficie horizontal ISOCAD

Fuente: Marina Rosales, Isofotón, 2003

Tabla 5: Variación solar media mensual en superficie horizontal ISOCAD

Mes	Radiación (kWh/m ₂)
Enero	4,94
Febrero	4,64
Marzo	4,78
Abril	4,53
Mayo	4,83
Junio	4,69
Julio	5,53
Agosto	5,47
Septiembre	4,89
Octubre	5,25
Noviembre	5,14
Diciembre	5,14

Fuente: Calvopiña, P., Lentes y espejos parabólicos, 2015

- Método de Armstrong-Page

Realizamos el cálculo utilizando para ello una tabla de Excel donde se ingresa la latitud del sitio, el ángulo de inclinación $\beta=0^\circ$ para calcular la radiación en una superficie horizontal, determinamos la radiación solar media mensual.

Tabla 6: Variación solar media mensual en superficie horizontal según Armstrong Page

Mes	Radiación en superficie horizontal (kWh/m ₂)
Enero	4,34
Febrero	4,47
Marzo	4,52
Abril	4,38
Mayo	4,14
Junio	3,99
Julio	4,04
Agosto	4,25
Septiembre	4,44
Octubre	4,46
Noviembre	4,35
Diciembre	4,27

Fuente: Calvopiña, P., Lentes y espejos parabólicos, 2015

- Método ISF (Coeficientes A y B)

En este método realizamos una tabla para recalculamos la irradiancia en una superficie que se encuentra a una latitud e inclinación dada, utilizando para esto los coeficientes A y B encontrados en el método, para lo cual debemos determinar el tipo de superficie en que se encuentra el equipo y determinar el valor de ρ (reflectividad del suelo), en este caso es de 0,4 por cuanto se encuentra en una superficie pavimentada. Adicional a esto debemos determinar el $G_{dm}(0^\circ)$ que es la irradiancia en superficies horizontales, obtenidos desde la página de la NASA. Luego de lo cual realizamos el cálculo aplicando la fórmula:

$$G_{dm}(\beta) = A * G_{dm}(0^\circ) + B * (G_{dm}(0)) ^2 \quad (29)$$

Tabla 7: Variación solar media mensual en superficie horizontal según ISF

Radiación mediante Método ISF						
MES	$\phi=0^\circ; \beta=0^\circ$	$\phi=0^\circ; \beta=-5^\circ$	$\phi=5^\circ; \beta=5^\circ$	$\phi=5^\circ; \beta=-5^\circ$	$\phi=-5^\circ; \beta=5^\circ$	$\phi=-5^\circ; \beta=-5^\circ$
Enero	4,195	3,996	4,525	4,239	3,874	4,020
Febrero	4,369	4,236	5,485	5,215	3,733	3,807
Marzo	4,513	4,488	5,545	5,452	4,010	4,003
Abril	4,236	4,330	4,681	4,754	3,992	3,882
Mayo	3,984	4,167	4,023	4,169	4,118	3,893
Junio	3,863	4,090	3,441	3,583	4,119	3,834
Julio	4,109	4,339	3,582	3,718	4,062	3,812
Agosto	4,338	4,485	3,429	3,496	4,332	4,155
Septiembre	4,215	4,233	3,506	3,498	4,599	4,540
Octubre	4,241	4,147	3,699	3,601	4,592	4,666
Noviembre	4,351	4,157	3,595	3,429	4,653	4,842
Diciembre	4,042	3,832	3,732	3,510	4,250	4,455

Fuente: Calvopiña, P., Lentes y espejos parabólicos, 2015

Estos datos se han calculado para latitudes de -5° , 0° y 5° ya que, nuestro país ocupa ambas latitudes, razón por lo cual el seguimiento solar es más complejo que en lugares ubicados en latitudes más altas o bajas con respecto a la línea equinoccial, ya que el recorrido solar no pasa sobre los equipos, como sucede en nuestro país.

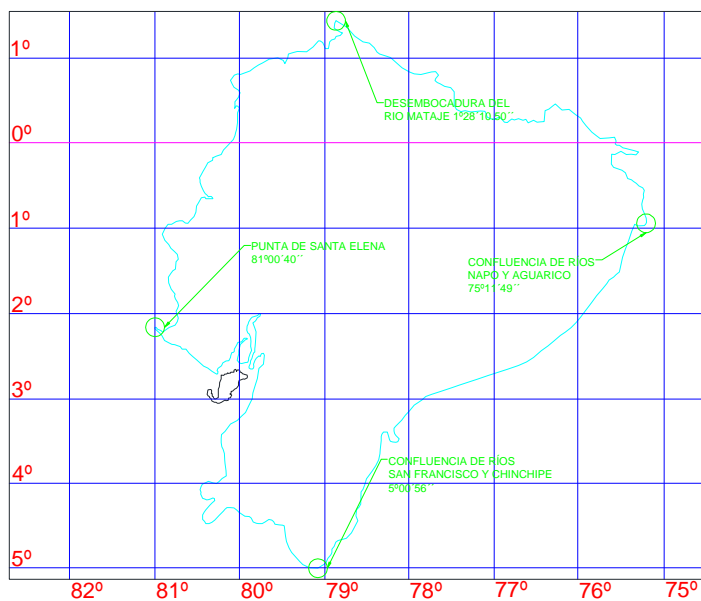


Figura 30: Mapa de Ecuador

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos; 2015

4.2. Equipos e instrumentos

Para la realización de estos experimentos utilizamos:

- Concentrador Cilíndrico Parabólico



Figura 31: Esquema Concentrador Cilíndrico Parabólico

Fuente: Orbea, E; Silva, J; Mantenimiento CCP; 2015

- Higrómetro: Mide humedad del ambiente



Figura 32: Pantalla del higrómetro

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

- Anemómetro: Mide la velocidad del viento



Figura 33: Anemómetro

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

- Termohigrómetro: Mide la temperatura ambiental y la humedad del ambiente.



Figura 34: Pantalla Termohigrómetro

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

- Piranómetro: Mide la radiación solar global



Figura 35: Piranómetro

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

- Piranómetro laser: Mide la temperatura de elementos a distancia.



Figura 36: Piranómetro laser

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

- Termómetro digital



Figura 37: Termómetro digital

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

- Lente de Fresnel



Figura 38: Vista del Lente de Fresnel utilizado para la toma de datos

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

4.3. Procedimiento

Para realizar el análisis energético de la radiación solar concentrada sobre espejo y lentes parabólicos es necesario seguir el siguiente procedimiento:

- Determinación de las variables energéticas y ambientales del proceso, tales como temperatura ambiental, velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar, temperatura en fluidos de trabajo.
- Identificación de la tecnología a utilizar, sean estas de concentración con lentes o espejos.
- Preparación de instrumentos de medición a utilizar, considerando la apreciación y rango.
- Levantamiento de información técnica.
- Análisis de los datos y caracterización de resultados.

4.4. Toma de datos

Los datos energéticos y ambientales tomados en los sistemas de Concentración Cilíndrico Parabólico con Tubo Absorbedor y Lente de Fresnel con cámara de

reacción, constan en los Anexos 1 y 3 respectivamente. Sus promedios se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 8: Promedio de datos del Concentrador Cilíndrico Parabólico (Concentrador)

	Tc1	Tg1	Tpc1	Tp1	Tc2	\dot{m}	radiación	Ta	Vv
ENSAYO	°C	°C	°C	°C	°C	kg/s	w/m ²	°C	m/s
1	41,42	47,24	36,45	57,27	57,88	0,08	696,14	25,35	7,78
2	41,01	52,22	41,29	56,12	55,53	0,07	701,11	27,59	7,14
3	44,75	55,70	39,49	63,72	62,88	0,07	801,00	25,01	7,00
4	40,54	49,93	35,90	57,52	56,97	0,08	696,14	25,04	7,78
5	41,67	46,35	37,61	56,59	58,42	0,08	701,11	24,62	7,14
6	45,85	56,72	40,56	64,89	64,15	0,08	696,14	26,10	7,78
7	36,79	49,29	37,11	50,78	50,25	0,07	750,70	26,78	6,22
8	38,68	50,80	38,70	52,51	52,13	0,07	765,95	28,40	7,65
PROMEDIO	41,34	51,03	38,39	57,42	57,28	0,08	726,03	26,11	7,31

Fuente: Orbea, E; Silva, J; Mantenimiento CCP; 2015

Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

Con referencia a los datos de la tabla anterior, tomados en el CCP, se puede indicar que la temperatura de ingreso del aceite térmico Tc1 es de 41,34°C, la de salida Tc2 es 57,28°C, produciendo una diferencia de temperatura de 15,94°C; la temperatura de la cubierta de vidrio Tg1 alcanza los 51,03°C; el flujo másico \dot{m} por el interior de la tubería de cobre es de 0,08 kg/s; en cuanto a la temperatura superficial o temperatura del tubo Tp1 se tiene un valor promedio de 57,42°C.

Estos valores han sido tomados con las siguientes condiciones ambientales:

Irradiancia solar local 726,03 W/m²; velocidad del viento Vv 7,31m/s y temperatura ambiental Ta de 26,11°C.

El aceite térmico ingresa en un intercambiador de calor, donde también se realizó una toma de datos, cuyos valores promedios se muestran a continuación:

Tabla 9: Promedio de datos del Concentrador Cilíndrico Parabólico (Intercambiador de Calor)

	Tic1	Tic2	Tb1	Ti	Te
ENSAYO	°C	°C	°C	°C	°C
1	56,01	48,90	38,57	30,75	23,68
2	54,54	47,55	38,93	31,29	23,83
3	61,68	53,29	42,94	32,54	22,82
4	55,89	48,75	38,06	30,54	23,35
5	56,96	48,82	39,05	30,88	23,73
6	62,78	54,36	43,92	33,58	23,31
7	49,33	43,17	35,86	33,92	25,65
8	50,95	44,76	37,31	35,45	26,77
Promedio	56,02	48,70	39,33	32,37	24,14

Fuente: Orbea, E; Silva, J; Mantenimiento CCP; 2015

Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

Con referencia a los datos de la tabla anterior, tomados en el Intercambiador de Calor del CCP, se puede indicar que la temperatura de ingreso del aceite térmico Tic1 es de 56,02°C, la de salida Tic2 es 48,70°C, produciendo una diferencia de temperatura de 7,32°C; la temperatura de la base del IC Tb es 39,33°C; la temperatura interna de la cámara de secado Ti es 32,37°C y del exterior de la misma Te es 24,14°C; el flujo másico por el interior de la tubería de cobre es de 0,08 kg/s.

Estos valores han sido tomados con las siguientes condiciones ambientales: Irradiancia solar local 726,03 W/m²; velocidad del viento Vv 7,31m/s y temperatura ambiental Ta de 26,11°C.

A continuación se realiza un análisis similar para los datos promedio que son el resultado del uso del lente de Fresnel que concentra la radiación en una cámara de reacción de tipo cilíndrico.

Tabla 10: Promedio de datos del Lente de Fresnel

ENSAYO	Taceite inicio	Taceite promedio (°C)	Tagua inicio	Tagua promedio (°C)	Radiación (W/m ²)	Tambiente (°C)	Tplaca (°C)
1	31,00	45,21	21,90	32,77	841,76	25,85	79,73
2	31,60	43,16	22,00	35,07	746,43	25,97	69,07
3	28,00	39,11	22,50	31,15	590,95	27,63	61,46
4	26,00	48,74	20,90	38,26	773,26	25,67	75,52
5	29,00	40,14	22,00	31,47	674,41	26,34	65,76
6	30,00	44,05	20,00	35,26	722,80	25,25	69,91
7	29,00	39,32	21,6	31,54	603,58	27,93	58,01
8	32,00	38,42	21,20	30,84	616,00	28,12	53,72
9	32,00	47,65	20,70	38,53	762,50	25,86	72,85
10	32,00	54,00	21,80	43,53	884,30	27,62	87,56
11	32,00	44,59	21,50	37,13	699,24	27,12	65,41
12	32,00	39,90	21,5	31,80	556,45	26,46	54,84
13	32,6	44,29	21,5	37,00	690,79	26,21	66,26
14	29,00	30,22	19,80	22,87	483,56	19,86	37,61
15	30,00	44,86	20,70	35,98	771,95	25,31	73,71
Promedio	30,41	42,91	21,31	34,21	694,53	26,08	66,09

Fuente: Román, L; Silva, J; Lente de Fresnel; 2015

Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

Con referencia a los datos de la tabla anterior, tomados en la cámara de reacción (recipiente con aceite) del Lente de Fresnel, se puede indicar que la temperatura del aceite térmico Taceite es de 42,91°C, la del agua Tagua es 34,21°C; la temperatura de placa Tplaca es 66,09°C.

Estos valores han sido tomados con las siguientes condiciones ambientales: Irradiancia solar local Radiación 694,53 W/m² y temperatura ambiental Tambiente de 26,08°C.

CAPITULO 5

ANALISIS DE DATOS

5.1. Caracterización de datos por sistemas de concentración

Para realizar la caracterización de los datos obtenidos por el sistemas CCP y el Concentrador con lente de Fresnel se utiliza el procedimiento indicado en Energía solar Térmica y de Concentración de Antonio Madrid Vicente.

Para el cálculo de la Razón de concentración aplicamos:

$$RC = \frac{A_{apertura}}{A_{concentrador}} \quad (30)$$

Para el cálculo del área del concentrador se utiliza:

$$A_{concentrador} = 2 * f * \tan(0,267) * L1 \quad (31)$$

Para el cálculo de la Temperatura focal se utiliza la ecuación 14.

Para el cálculo de la eficiencia óptica se utiliza la ecuación 18:

Para el cálculo de la potencia aplicamos la ecuación:

$$\eta_o = \frac{P_{entrada}}{P_{salida}} = \frac{P_{entrada}}{H_b * A_{apertura}} \quad (32)$$

Despejando P_{entrada}

$$P_{\text{entrada}} = \eta_o * H_b * A_{\text{Apertura}} \quad (33)$$

- Para el CCP

Donde: $f=0,3\text{m}$; $L1=6\text{m}$

$$A_{\text{Concentrador}} = 0,017\text{m}^2$$

Para este CCP, por diseño: $A_{\text{apertura}}= 7,2 \text{ m}^2$.

Entonces:

$$Rc = \frac{7,2}{0,017}$$

$$Rc = 429$$

Para el cálculo de la temperatura focal, donde: $R_c=429$, $H_b= 726,06 \text{ W/m}^2$,
 $\tau_a=0,9$; $\rho_l=0,75$; $\alpha_a=0,9$; $Y=0,9$; $F=0,9$; $k_s=0,9$; $f_t=0,9$; aplicando en la ecuación
 14:

$$Tf = 617,29^\circ K$$

$$Tf = 344,29^\circ C$$

Para el cálculo de la eficiencia óptica, donde: $\rho_R=0,8$; $\tau_a=0,9$; $\alpha_a=0,9$; $Y=0,9$;
 $F=0,9$; $f_t=0,9$; aplicando en la ecuación 18:

$$\eta_o = 0,472$$

Reemplazando en la ecuación 33, donde: $\eta_o = 0,472$; $H_b= 726,06\text{W/m}^2$;
 $A_{\text{apertura}}= 7,2\text{m}^2$.

$$P_{\text{entrada}} = 2457,25\text{W}$$

- Para el Lente de Fresnel

$$A_{\text{apertura}} = 0,858 \text{ m}^2$$

Para este CCP, por diseño: $A_{\text{concentrador}} = 9,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

Entonces:

$$Rc = \frac{0,858}{9,6 \times 10^{-3}}$$

$$Rc = 89,3$$

Para el cálculo de la temperatura focal, donde: $Rc=89$; $H_b= 694,53 \text{ W/m}^2$,

$\tau_a=0,9$; $\rho_l=0,75$; $\alpha_a=0,9$; $Y=0,9$; $F=0,9$; $k_s=0,9$; $f_t=0,9$; $\xi_a=0,91$, aplicando en la ecuación 14:

$$Tf = 412,82^\circ K$$

$$Tf = 139,82^\circ C$$

Para el cálculo de la eficiencia óptica, donde: $\rho_R=0,85$; $\tau_a=0,9$; $\alpha_a=0,9$; $Y=0,9$; $F=0,9$; $f_t=0,9$; aplicando en la ecuación 18:

$$\eta_o = 0,502$$

Reemplazando en la ecuación 33, donde: $\eta_o = 0,502$; $H_b= 694,53 \text{ W/m}^2$; $A_{\text{apertura}}= 0,858 \text{ m}^2$.

$$P_{\text{entrada}} = 299,09 \text{ W}$$

Tabla 11: Resumen de caracterización de datos

Parámetros	Fresnel	CCP
Temperatura focal; Tf (°C)	139,82	344,29
Razón de Concentración; RC	89	429
Radiación (W/m ²)	694,53	726,06
Fluido Térmico	Aceite Térmico	Aceite Térmico
Temperatura Ambiente; Ta (°C)	26,08	26,11
Potencia (W)	299,09	2457,25
Altura Focal; Af (m)	0,8	0,3

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

5.2. Temperaturas del proceso

Tabla 12: Resumen de temperaturas presentes en el proceso

Temperatura	Concentrador Cilíndrico Parabólico	Lente de Fresnel
Temperatura de entrada	✓	✗
Temperatura de salida	✓	✗
Temperatura del vidrio	✓	✗
Temperatura de placa	✓	✓
Temperatura de la tubería	✓	✗
Temperatura ambiente	✓	✓
Temperatura de placa base	✓	✓
Temperatura interna IC	✓	✗
Temperatura externa IC	✓	✗
Temperatura de aceite	✓	✓
Temperatura de agua	✗	✓

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

5.3. Análisis estadístico de los parámetros de medición

- Concentrador

Tabla 13: Promedio de datos del Concentrador Cilíndrico Parabólico (Concentrador)

	Tc1	Tg1	Tpc1	Tp1	Tc2	\dot{m}	radiación	Ta	Vv
ENSAYO	°C	°C	°C	°C	°C	kg/s	w/m2	°C	m/s
1	41,42	47,24	36,45	57,27	57,88	0,08	696,14	25,35	7,78
2	41,01	52,22	41,29	56,12	55,53	0,07	701,11	27,59	7,14
3	44,75	55,70	39,49	63,72	62,88	0,07	801,00	25,01	7,00
4	40,54	49,93	35,90	57,52	56,97	0,08	696,14	25,04	7,78
5	41,67	46,35	37,61	56,59	58,42	0,08	701,11	24,62	7,14
6	45,85	56,72	40,56	64,89	64,15	0,08	696,14	26,10	7,78
7	36,79	49,29	37,11	50,78	50,25	0,07	750,70	26,78	6,22
8	38,68	50,80	38,70	52,51	52,13	0,07	765,95	28,40	7,65
PROMEDIO	41,34	51,03	38,39	57,42	57,28	0,08	726,03	26,11	7,31

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

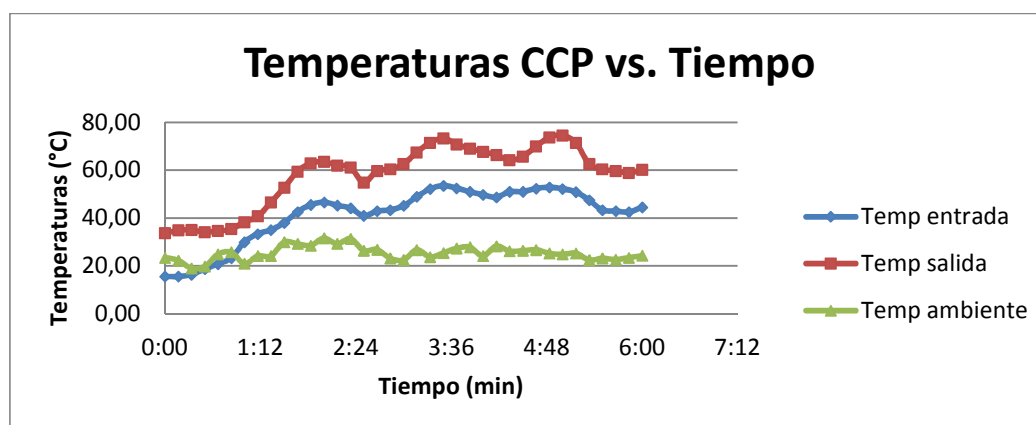


Figura 39: Temperatura de entrada y salida del aceite térmico

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

En la figura anterior se tiene el diagrama de dispersión de la temperatura de entrada y de salida del aceite térmico, al realizar la diferencia, se tiene un ΔT de 7,94°C, con lo cual se conseguiría un incremento de 1,32°C/m.

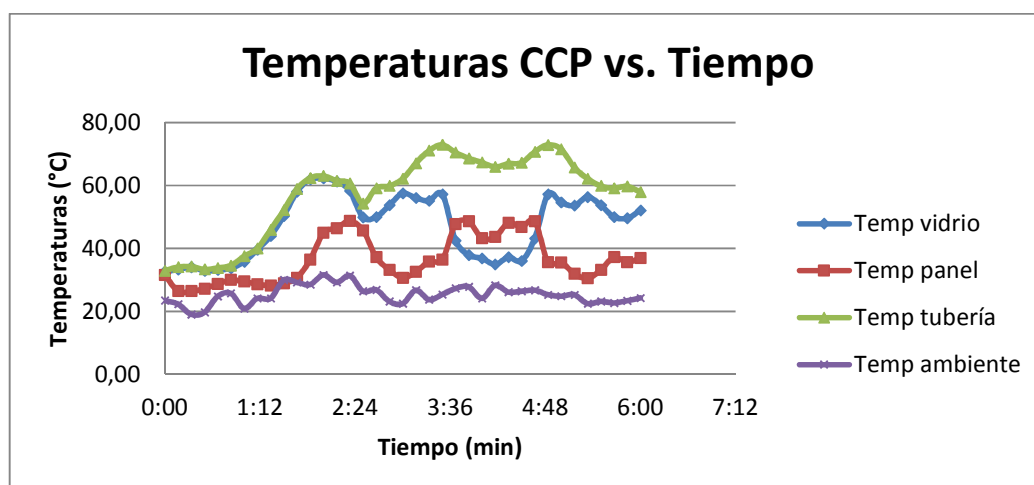


Figura 40: Temperaturas del absorbedor

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

Aquí se puede observar que los mayores valores de temperatura se consiguen en el absorbedor, pudiendo alcanzar un promedio de $57,42^{\circ}\text{C}$ en el tubo; para el caso de la cubierta su temperatura es de $51,03^{\circ}\text{C}$. El gradiente de temperatura es de $6,39^{\circ}\text{C}$.

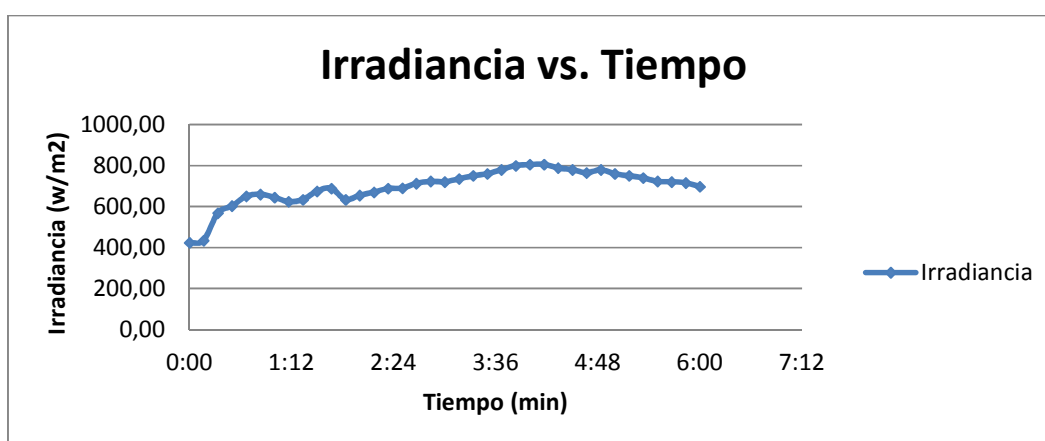


Figura 41: Irradiancia solar local

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

El valor máximo de irradiancia alcanza los 800 W/M^2 y el mínimo de 400 W/m^2 , para los 8 ensayos se dispone de una irradiancia promedio de $726,03\text{ W/M}^2$.

Este valor es superior a los 600 W/m² que se considera como un valor mínimo de irradiancia para aplicaciones de media temperatura.

- Intercambiador de Calor

Tabla 14: Promedio de datos del Concentrador Cilíndrico Parabólico (Intercambiador de Calor)

	Tic1	Tic2	Tb1	Ti	Te	\dot{m}	radiación	Ta	Vv
ENSAYO	°C	°C	°C	°C	°C	kg/s	w/m ²	°C	m/s
1	56,01	48,90	38,57	30,75	23,68	0,08	696,14	25,35	7,78
2	54,54	47,55	38,93	31,29	23,83	0,07	701,11	27,59	7,14
3	61,68	53,29	42,94	32,54	22,82	0,07	801,00	25,01	7,00
4	55,89	48,75	38,06	30,54	23,35	0,08	696,14	25,04	7,78
5	56,96	48,82	39,05	30,88	23,73	0,08	701,11	24,62	7,14
6	62,78	54,36	43,92	33,58	23,31	0,08	696,14	26,10	7,78
7	49,33	43,17	35,86	33,92	25,65	0,07	750,70	26,78	6,22
8	50,95	44,76	37,31	35,45	26,77	0,07	765,95	28,40	7,65
Promedio	56,02	48,70	39,33	32,37	24,14	0,08	726,03	26,11	7,31

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

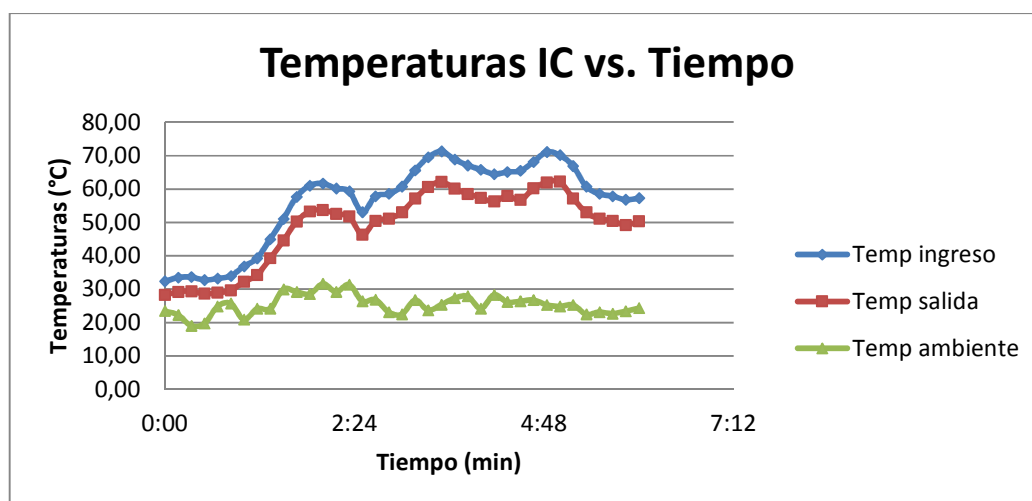


Figura 42: Temperaturas de entrada y salida del IC

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

Para este caso, al utilizar el IC de tubos en paralelo, la temperatura de entrada es de 56,02°C y de salida 48,70°C dando un ΔT de 7,32°C

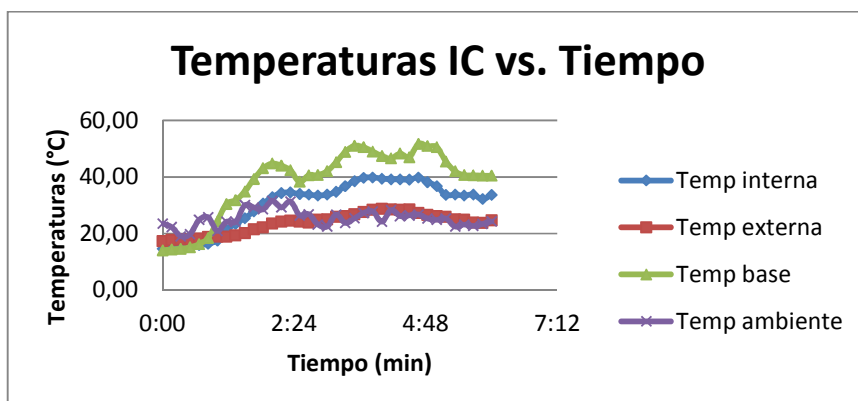


Figura 43: Temperaturas en la cámara del IC

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

Las temperaturas promedio en el interior de la cámara del IC es en la base Tb1 39,33°C, temperatura interna Ti es 32,37°C y la externa Te es 24,14°C.

- Lente de Fresnel

Tabla 15: Promedio de datos del Lente de Fresnel

	Taceite	Tagua	Radiación	Tambiente	Tplaca
ENSAYO	(°C)	(°C)	(W/m ²)	(°C)	(°C)
1	45,21	32,77	841,76	25,85	79,73
2	43,16	35,07	746,43	25,97	69,07
3	39,11	31,15	590,95	27,63	61,46
4	48,74	38,26	773,26	25,67	75,52
5	40,14	31,47	674,41	26,34	65,76
6	44,05	35,26	722,80	25,25	69,91
7	39,32	31,54	603,58	27,93	58,01
8	38,42	30,84	616,00	28,12	53,72
9	47,65	38,53	762,50	25,86	72,85
10	54,00	43,53	884,30	27,62	87,56
11	44,59	37,13	699,24	27,12	65,41
12	39,90	31,80	556,45	26,46	54,84
13	44,29	37,00	690,79	26,21	66,26
14	30,22	22,87	483,56	19,86	37,61
15	44,86	35,98	771,95	25,31	73,71
Promedio	42,91	34,21	694,53	26,08	66,09

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

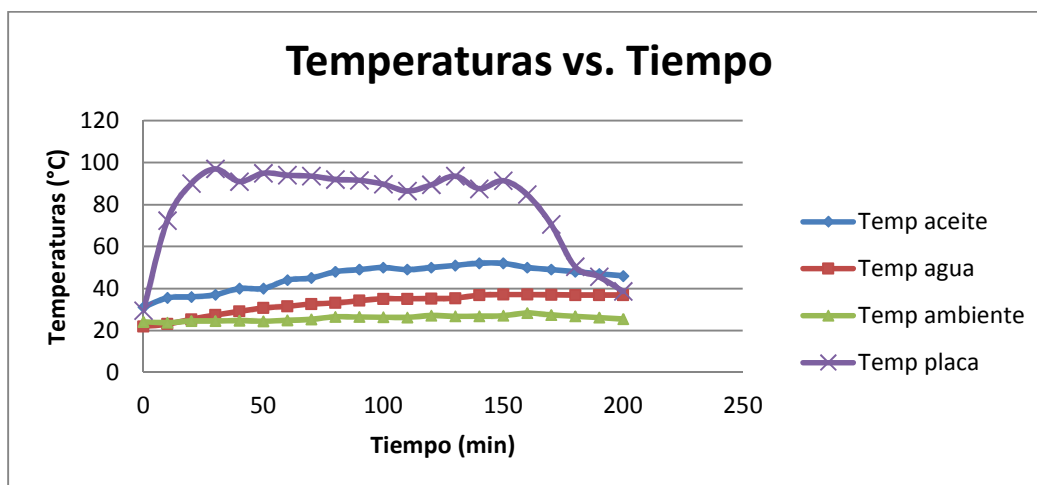


Figura 44: Temperaturas en el Lente de Fresnel

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

En la figura anterior se tiene el diagrama de dispersión de temperaturas: Del aceite Taceite es 30,41°C, Tagua es 21,31°C, Tambiente de 26,08°C y Tplaca 66,09°C.

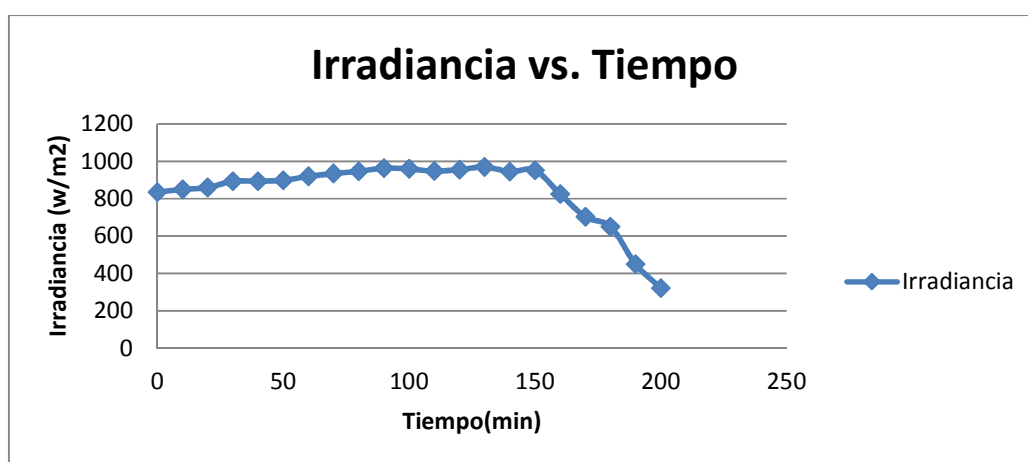


Figura 45: Irradiancia solar local

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

El valor máximo de irradiancia alcanza los 842 W/m² y el mínimo de 300 W/m², para los 15 ensayos se dispone de una irradiancia promedio de 649,37 W/m².

Este valor es superior a los 600 W/m² que se considera como un valor mínimo de irradiancia para aplicaciones de media temperatura

5.4. Eficiencias del sistema

El resumen de los parámetros más importantes del sistema, ya calculados en el punto 5.1 son:

Tabla 16: Resumen de caracterización de datos

Parámetros	Fresnel	CCP
Temperatura focal; Tf (°C)	546,67	344,29
Eficiencia óptica η_o (%)	50,2	47,2
Potencia (W)	279,69	2457,25

Fuente: Calvopiña, P; Lentes y Espejos Parabólicos, 2015

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- En el Concentrador Cilíndrico Parabólico (CCP), la temperatura promedio del tubo absorbedor T_{p1} es de $57,42^{\circ}\text{C}$ y la de la cubierta de vidrio T_{g1} es $51,03^{\circ}\text{C}$, generando un ΔT de $6,39^{\circ}\text{C}$, lo que confirma que el fenómeno estudiado es el correcto, se produce un calentamiento en el tubo de cobre pintado de negro mate, debido a la concentración de la radiación solar, por lo que existe una ganancia de calor de $1,05^{\circ}\text{C}/\text{m}$, con una razón de concentración de 429. El fluido que circula por el tubo se calienta por conducción, en la cubierta se produce calentamiento por radiación térmica y convección del aire estancado.
- En el intercambiador del CCP la temperatura promedio de entrada al Intercambiador de Calor T_{ic1} es $56,02^{\circ}\text{C}$ y en la salida T_{ic2} es $48,7^{\circ}\text{C}$ produciendo un ΔT de $7,32^{\circ}\text{C}$, lo que muestra que el calor está siendo entregado dentro del Intercambiador por medio de radiación térmica.
- Por otra parte, en el lente de Fresnel la temperatura ambiental $T_{ambiente}$ es $26,08^{\circ}\text{C}$ y en la placa T_{placa} es $66,09^{\circ}\text{C}$ generando un ΔT de $40,01^{\circ}\text{C}$, producto de la concentración de la radiación solar en una superficie de menor tamaño, debido a una razón de concentración de 89.

- Las temperaturas focales son elevadas, por las altas razones de concentración (429 para el CCP y 89 para el Lente de Fresnel), registrando valores de 344,29°C para el CCP y 139,82°C para el Lente de Fresnel, lo que garantiza la elevación de la temperatura de los fluidos, en este caso aceite térmico, que se ubiquen en los focos de concentración de ambos dispositivos.

6.2. Recomendaciones

- Se debe insistir en la participación de proyectos sobre aplicaciones de la Energía Solar Térmica, de alta temperatura como la lente de agua, que provee una nueva tecnología para aprovechar de mejor manera la radiación solar, siendo más barata que un lente de cuarzo, se reduce el peso de la misma y presenta características energéticas muy similares a la lente de agua, que en la actualidad se encuentra en fase de experimentación con resultados muy alentadores.
- Se debe continuar con el desarrollo de proyectos de media y alta temperatura, ya que, con este estudio se demuestra que hay un gran potencial para la utilización de esta tecnología.
- Con este estudio se logró determinar que el Lente de Fresnel es una buena opción para la concentración de calor, se debe investigar en la manera de acumular el calor producido para un mejor aprovechamiento, se debe desarrollar y profundizar proyectos de investigación con Lentes de Fresnel y acumuladores de calor [16].
- Se debe aprovechar la alta radiación presente en el país para la instalación de una Planta de Generación de Energía utilizando Concentradores Cilíndrico Parabólicos.

- Se debe investigar la utilización de líquidos alternos al agua en lupas para evitar el crecimiento de algas, lo que impide la utilización prolongada de las mismas, puede utilizarse desechos orgánicos (orina por ejemplo) su pH es ligeramente ácido, lo que elimina la proliferación de flora bacteriana en el interior de la lupa.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] González, José, et al., Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables., Pág. 27.
- [2] Almanza, Rafael, et al., Ingeniería de la Energía Solar, El Colegio Nacional, México, 1994, pag. 81.
- [3] Duffie, Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley-Interscience Publication, 1980.
- [4] Almanza, Rafael, et al., Ingeniería de la Energía Solar, El Colegio Nacional, México, 1994, pag. 91-92.
- [5] Schaum, D., Física General, McGraw Hill, 199, pag 222.
- [6] Perkins, H., Física General, Tercera Edición, Editorial Hispano Americana, México, 1960.
- [7] Zemansky, et al., Física Universitaria Vol 2, Undécima Edición, 2001.
- [8] Jones, E, et al., Física Contemporánea, Tercera Edición, 2001.
- [9] Lea, S, et al., Física: La naturaleza de las cosas, International Thomson Editores, 1999
- [10] Pitts,D, et al; Transferencia de calor; McGraw-Hill; Primera Edición; 1980
- [11] Madrid, A; Energía Solar Térmica Manual Práctico de Diseño, Instalación y Mantenimiento; Mundi-Prensa; Primera Edición; 2009
- [12] Wilson, J; La Energía Solar; Editorial Alhambra; Primera edición; 1982
- [13] Naranjo, C; Román,L; Diseño y Construcción de Cámaras de Reacción para Ensayos Térmicos con y sin Cambio de Fase con un Concentrador Solar Tipo Lente de Fresnel de 500W; 2015.
- [14] Orbea, E; Silva, J; Ingeniería Inversa y Repotenciación para la Optimización, Toma de Datos y Control del Colector Cilíndrico Parabólico de 7,2m²; 2015.

- [15] Benavides, E; Diseño y construcción de Una Cocina Solar Experimental, de Tipo Cilíndrico Parabólico con Aplicación al Sector Rural Marginal; 2006.
- [16] Toro, M; Modelación Matemática y Energética del Tubo Absorbedor de una Central Solaar Térmica con Concentradores Cilíndrico Parabólicos; 2015.

WEBGRAFÍA

- [17] <http://iluminet.com/rawlemon-generador-solar-esferico/>
- [18] <http://www.experimenta.es/noticias/industrial/rawlemon-futuro-energia-solar-esfera-4424>
- [19] <http://www.ison21.es/2012/08/29/generador-de-concentracion-solar-con-lente-esferica/>
- [20] <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2009/2009-t003-a016.pdf>
- [21] <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/11/04/lentes-fresnel/>
- [22] <http://www.sitiosolar.com/la-energia-solar-fotovoltaica-de-alta-concentracion-hcpv/>
- [23] <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/09/19/espejos-arquimedes/>
- [24] <http://vilssa.com/sistemas-para-captar-la-luz-natural>

ANEXOS