# Diseño de un prototipo para un micro - concentrador solar

René Alberto Valenzuela Nájera<sup>1</sup>, Jesús Rodarte Dávila<sup>1</sup>, Carlos Ponce Corral<sup>1</sup>, Nestor Ramírez Morales<sup>1</sup> Jaime Romero González<sup>1</sup>, José Fernando Estrada Saldaña<sup>1</sup>, Héctor Garcés Guzmán<sup>1</sup>

### Resumen

En éste trabajo aborda el diseño de un concentrador solar usado para micro generación eléctrica, considerando los aspectos teóricos y prácticos necesarios para su construcción. Los Sistemas de Concentración Solar permiten explotar el recurso solar a un menor costo/eficiencia que los paneles fotovoltaicos, además de ocupar un área menor para su funcionamiento. Entre algunas de sus aplicaciones destacan la generación de energía para la operación de motores solares, funcionando bajo el principio de apertura parabólica y concentración de calor en un punto focal. La electricidad se obtiene por generación directa de vapor, usando un fluido a alta presión y presión para impulsar turbinas generadoras, como en una central termoeléctrica a escala. La investigación en tecnologías de generación solar térmica, permite la existencia de prototipos ligeros y resistentes, capaces de funcionar a temperaturas sobre los 400 °C (Fernandez-Garcia et al., 2010). Se consideran dos aspectos que más influencia tienen para la generación eléctrica solar: concentración de la radiación solar y seguimiento de la trayectoria solar. La metodología utilizada para el diseño y construcción del prototipo es el método propuesto por (Ullman, 2010), en el cual primero se identificarán las necesidades del diseño propuesto, después se desarrollarán especificaciones del prototipo, posteriormente se realizará un modelado matemático con la ayuda de los softwares: Catia V5R18, Dassault Systems, MPLAB IDE v 8.83, Microchip, Proteus Design Suite Labcenter Electronics, Matlab R2010, enseguida se realizará una caracterización del modelo.

Palabras clave: Concentrador solar, micro generación eléctrica, radiación solar, trayectoria solar.

### Introducción

Durante el último siglo, la población mundial aumento en más de un 100 % en un periodo de tiempo relativamente corto, pues en 50 años se pasó de 3 mil millones a 7 mil millones de personas (Banco Mundial, S.F.) cada una de ellas con las mismas necesidades energéticas de Iluminación y Calor. Considerando la cantidad de combustibles fósiles necesarias para cubrir necesidad consecuente esta y la contaminación generada por su uso, se deben considerar alternativas para satisfacer esta demanda energética, causando el menor daño posible al medio ambiente.

CULCyT//Septiembre-Diciembre, 2014

prueban la viabilidad de cubrir la demanda energética global mediante el uso de energías renovables, utilizando solo el 1 % de la superficie terrestre no ocupada hasta hoy, siendo las principales la energía solar, eólica y marina, (conocidas por sus siglas en inglés WWS wind, water, solar) (Jacobson & Delucchi, 2011).

Se han realizado estudios

aue

Las líneas de investigación en las áreas de energía solar térmica se mantienen actuales y evolucionan día con día. Se consideran dos aspectos que más influencia tienen para la generación eléctrica solar:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

concentración de la radiación solar y seguimiento de la trayectoria solar.

## 1. Concentración de la Radiación solar

Las plantas de concentración de energía solar producen energía eléctrica a través de la conversión de la energía del sol a calor de alta temperatura usando varias configuraciones de espejo. El calor es luego canalizado a través de un generador convencional. Las plantas generalmente consisten en dos partes: una que colecta la energía solar y la convierte en calor, y otra que convierte esta energía en forma de calor a electricidad. La cantidad de potencia generada por una planta de concentración de energía solar depende de la cantidad de luz directa del sol. Como los concentradores fotovoltaicos. estas tecnologías usan solamente el rayo directo de la luz del sol, más que la radiación solar difusa (Peña-Díaz. S.F.).

En nuestro estudio nos enfocaremos a analizar los diferentes dispositivos de concentración solar.

Ibáñez Plana et al. definen una geometría alternativa a los grandes discos parabólicos, que además de costosos, resultan muy pesados. Utilizando una tecnología de bandas elásticas, la resistencia a la flexión se modifica al variar el ancho de las mismas, controlando la curvatura de 12 hojas delgadas de acero pulido usadas como material reflejante. En la figura 1 se muestra el resultado de la investigación.



Figura 1. Geometría de pétalos flexibles.

Un acercamiento similar es presentado en Mlatho et al., (2010), donde se utiliza una estructura rígida, con 24 pétalos de aluminio anodizado como material reflejante. La Figura 2 muestra la geometría de una de las secciones y el ensamble final de los mismos.

En 2011, en la Universidad Autónoma de Baja California (Philippen, S.F.), se desarrolló una investigación, utilizando un nuevo modelo geométrico de concentrador solar de foco fijo (CSFF), previsto a ser usado junto a un motor Stirling de 3 kW para la producción de energía eléctrica. (Fig. 3)



Figura 2. Geometría y ensamble.

Este modelo presenta la particularidad de mantener el punto o área focal fija, a pesar del movimiento del reflector. El modelo geométrico utilizado, consiste en interceptar una parábola por un cilindro, desde su borde externo y hasta una distancia cercana a la línea media. Resulta en un reflector de sección parabólica, con las características ópticas de la misma, logrando una eficiencia térmica calculada del 88 %, alcanzando temperaturas de hasta 700 °C.



Figura 3. Concentrador solar de foco fijo.

### 2. Seguimiento de la trayectoria solar

Se ha comprobado que un sistema seguidor solar aporta aumentos del 30 al 50 % (Kelly & Gibson, 2009; Zheng-ming et al., 2011) de eficiencia en paneles fotovoltaicos VS. Sistemas fijos. En aplicaciones térmicas, el seguimiento solar permite alcanzar temperaturas sobre los 2000 °C (Almanza y Muñoz, 2003) en concentradores de torre central.

En 2008, un grupo de investigadores en México, desarrolló un sistema controlado por un micro controlador dsPIC30F40011. (Tecpoyotl-Torres et al., 2008), el cual consistía en una estructura con una barra central con movimiento circular de 360 grados para controlar el ángulo horario. Para controlar el ángulo de declinación se usó una estructura semicircular, con un tornillo sin fin acoplado a la misma como se muestra en la figura 4.

Un par de motores son controlados por el dsPIC30F40011 y una interfaz de display LCD y push buttons permite la puesta en marcha del sistema. El algoritmo de control funciona en base a 3 bloques principales: un reloj de tiempo real (RTC), Movimiento Horario Movimiento y Declinación. Estos últimos se sincronizan para RTC determinar con el los movimientos necesarios. Programando el

año, el mes, y el día, el sistema determina los movimientos requeridos para un posicionamiento óptimo.



Figura 4. Sistema controlado por dsPIC.

Otra investigación realizada en Jordania, considera la utilización de un PLC para controlar la orientación de un sistema electromecánico a 2 ejes (Abdallah & Nijmeh, 2004). Este sistema utiliza un sistema de control en lazo abierto para ubicar un panel fotovoltaico en dirección perpendicular al sol y logra una eficiencia de 41.34 % respecto a un panel fotovoltaico fijo a 32° de inclinación. El control con PLC circuitos simplifica los electrónicos. reduciendo la posibilidad de falla y el costo de mantenimiento se reduce. El circuito de control puede apreciarse en la figura 5.



Figura 5. Circuito de control para PLC.

Calculando matemáticamente los ángulos solares, se dividen los periodos de luz diurna en 4, cada uno con una velocidad predeterminada. Usando temporizadores internos se logra el movimiento angular, requerido en cada período de tiempo, permitiendo el ahorro de energía al accionar los motores por pocas segundos cada 10 minutos.

investigación En una reciente. realizada en Malasia Ponniran et al., 2011), se utilizaron LDR's como sensores y un motor DC bidireccional, ambos controlados PIC16F877A. por un Las señales provenientes de las LDR son convertidas de análogo a digital y comparadas entre sí. Si existe una diferencia entre ambas señales, se envía una señal que activa el motor correspondiente hasta que ambas señales sean igualadas. Es un sistema simple, que al utilizar motores DC con transmisión, logra velocidades de trabajo lentas, evitando así la conmutación constante entre estados. (Fig. 6)

Un caso especial es el de la compañía israelí Zenith Solar. Usando tecnología desarrollada por la universidad de Ben Gurion y el Instituto Fraunhoffer, ha logrado una eficiencia 5 veces mayor a la de paneles solares fijos, haciendo la energía solar tan barata como el gas natural. Su principal producto, el Z20 (ZENITH SOLAR S.F.) utiliza 22m<sup>2</sup> de superficie reflejante montados sobre un seguidor a dos ejes. En el receptor se usa una celda fotovoltaica multiunión, acoplada a un intercambiador de calor, alcanzando una eficiencia combinada mayor al 72%. (Fig. 7)



**Figura 6**. Diagrama de flujo y modelo del sistema.



Figura 7. Concentrador Solar Z20.

Se observan ciertas tendencias en la literatura. El seguimiento a dos ejes es más

utilizado en aplicaciones de concentración solar, por su mayor grado de exactitud. Los motores de corriente directa o servomotores son usados como actuadores por su fácil implementación. Los microcontroladores ofrecen una mayor precisión VS el control análogo convencional, usando seguimiento directo o por efemérides astronómicas. Estos aspectos se consideran en los siguientes párrafos para la aplicación de la metodología en el diseño y construcción del concentrador solar.

## Metodología

En el proceso de diseño y construcción del prototipo del concentrador solar se utilizó la metodología establecida por David G. Ullman (Ullman, 2010), la cual nos establece llevar a cabo una serie de actividades, resumida en 6 pasos: Figura 8.



Figura 8. El proceso de diseño.

### 1)Descubrimiento del producto

En este paso nos enfocamos a identificar los requerimientos para la mejora de una tecnología ya existente. La figura 9 nos ayuda a identificar las funciones de los subsistemas y componentes del concentrador solar.



*Figura 9*. Diagrama de sub-sistemas y components.

Se identifica entonces, que los principales subsistemas que conforman el concentrador solar son:

- Radiación solar
- La geometría del concentrador solar
- Tipo y forma de la superficie reflejante
- Dispositivo de la reflexión solar
- Control del movimiento del seguimiento solar

Aquí se establecen las especificaciones de cada subsistema y / o componente.

## 2)Planeación del proyecto

La planeación y seguimiento de las actividades a realizar para complementar el proyecto, garantizan un método de control y seguimiento a las acciones realizadas de manera organizada que podrán conducir al lector a lograr el mejor de los éxitos en un tiempo pre-establecido por el mismo, los planes de cada quien son personales y no es la intención de éste artículo mostrar un método de plan y organización de algún proyecto.

## 3) Definición del producto

En ésta etapa se desarrollan los cálculos matemáticos de cada uno de los subsistemas y componentes basado en las especificaciones del producto que se quiere lograr y se definirán variables de entrada y salida de los subsistemas.

## A. Radiación solar

El sol tiene un diámetro de 1.39 x $10^9 \text{ metros}$ , y se encuentra a 1.5 x  $10^{44} \text{ metros}$  de la tierra, distancia recorrida en cerca de 8 minutos viajando a la velocidad de la luz. La radiación electromagnética emitida por el Sol alcanza a nuestro planeta con una intensidad de 1.73 x  $10^{14} \text{ kW}$  en un punto justo en el exterior de la tierra.

La constante solar **Ss** es la radiación solar incidente sobre un plano exterior a la atmosfera, y se le asigna un valor de 1.353 kW/m<sup>2</sup>. En aplicaciones prácticas solares, el espectro útil esta entre .29 y 2.5 micrómetros, el 95.19% del valor de la constante solar, siendo 1,301 kW/m<sup>2</sup>.

La **Irradiancia** es la potencia de radiación solar que se recibe por unidad de área en un instante determinado. Debido las condiciones atmosféricas, el grado de atenuación es variable, en situaciones ideales en un 25 %. Es por esto que el valor ideal asignado a la irradancia bajo condiciones normales de atenuación, sobre el ecuador y a nivel del mar, es de 1 kW/m<sup>2</sup>. Dependiendo de la nubosidad, el valor de la irradiancia es de entre 20 y 50% para un cielo parcialmente nublado y de entre 5 a 15 % si totalmente nublado.

La **Irradiación (Hs)** es el valor acumulado de Irradiancia en un tiempo determinado. Se mide en base horaria, diaria o mensual. Es este valor el considerado para aplicaciones solares, siendo las regiones con  $6 \text{ kW/m}^2$  consideradas zonas viables para la generación solar.

El Sol describe un arco aparente por la bóveda celeste en una trayectoria elíptica, con excentricidad del 3%, con un ángulo de 23.45 grados, debido a el eje de inclinación terrestre. La **declinación** solar es la variación en la altura solar del Solsticio de Verano al Solsticio de Invierno, tomando valores de -23.45 grados a +23.45 grados. Se calcula mediante la relación aproximada:

$$\partial = 23.45 sin\left\{\frac{284+n}{365}2\pi\right\}$$
 (1)

Dónde:

n = día del año

El **ángulo horario** es el movimiento aparente del Sol a lo largo del día, y se define por

$$h = 15\left(\frac{ts}{2} - \theta\right) \tag{2}$$

Dónde:

ts = tiempo transcurrido entre la salida y la puesta del sol. Es variable a lo largo del año

 $\theta$  = tiempo posterior a la salida del sol que se desea calcular en el ángulo horario (en horas.)

B. Superficie Reflejante

La **Ley de Reflexión Óptica** refiriéndose a un haz de luz que: "el ángulo

de incidencia es igual al ángulo de reflexión" desde el plano reflejante y respecto a la normal del mismo. Este fenómeno se da cuando el rayo incidente no puede atravesar la superficie, siendo reflejado.

$$\theta_i = \theta_r \tag{3}$$

Se conoce como **reflexión especular**, y se define como la cantidad de energía que se refleja directamente de la superficie reflectora con el mismo ángulo que el haz incidente.

La **reflexión difusa** ocurre sobre superficies no planas, provocando que cada rayo incidente se refleje en una dirección distinta, provocando la dispersión de la energía.

Considerando estos principios, y el hecho de que se usaran reflectores especulares, se considera la configuración de espejos donde el material reflejante se coloca sobre la cara anterior o frontal del espejo, que normalmente es una película delgada de material reflejante.

Para que un espejo sea pueda ser usado efectivamente en aplicaciones de energía solar, debe cumplir los siguientes requerimientos (Almanza y Muñoz, 2003):

- Reflejancia no menor de 85%.
- Altamente especular (reflejar en un haz con dispersión menor de 2 miliradianes)
- El grado de reflejancia debe conservarse al menos por 5 años.
- Mantenimiento y/o sustitución sencillos
- Bajo Costo
- Resistencia a la radiación Ultravioleta, degradación ambiental mínima.

Algunos materiales reflejantes son:

- Espejo de Vidrio Plateado (94%)
- Aluminio 9.5 % pureza (86%)
- Espejo Acrílico (96 %)
- Mylar (Papel de envoltura metálico) 2 mm (90%)
- Foylon (90%)

La selección del material reflejante depende del medio y las condiciones ambientales en las que será utilizado.

C. Aspectos Geométricos

La Parábola se define como "el lugar geométrico de los puntos del plano que equidistan de un punto fijo llamado foco y de una recta fija llamada directriz". Es una sección cónica, formada por la intersección de un cono circular y un plano paralelo a uno de sus bordes bidimensionales.

Se denomina **Foco**, un punto dado dentro del área de apertura de la parábola. La **Distancia Focal**, es la distancia entre el foco y el vértice de la parábola. La **Directriz** es una línea perpendicular al eje de la parábola, trazada a una distancia focal del vértice, en sentido opuesto al foco. Los puntos equidistantes al Foco y a la Directriz, forman un locus o lugar de puntos conocido como parábola. La Figura 10 muestra las definiciones espaciales de la parábola.



Figura 10. "Definiciòn de la paràbola"

Obedece la expresión matemática, para una parábola de apertura vertical y vértice en el origen:

$$x^2 = 4py \tag{4}$$

Siendo p la distancia del vértice al foco. Modificándose para un vértice en cualquier punto (h, k).

$$(x-h)^2 = 4p(y-k)$$
 (5)

Para formar un reflector parabólico, se gira una parábola alrededor de su eje, obteniendo un paraboloide elíptico que obedece la ecuación siguiente, donde a y b son las constantes que definen el nivel de curvatura:

$$\frac{z}{c} = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$$
(6)

Cuando a=b, se obtiene un paraboloide de revolución o paraboloide circular, que mantiene su propiedad reflectiva foco-directriz: Los rayos incidentes paralelos al eje del paraboloide son reflejados en el punto focal.

En sistemas de concentración, la relación diámetro/distancia focal, se ubica normalmente entre 0,25 y 0,6 siendo una distancia relativamente corta, limitando el grado de apertura del reflector principal.

## D. Sistema de concentración

Almanza y Muñoz (2003) los definen como dispositivos ópticos que reflejan la radiación solar, puestos en arreglos geométricos efectivos, de manera que concentran el flujo incidente sobre un absorbedor de área mucho menor que la apertura. Ofrecen mayor flujo de energía por unidad de área de absorción, y al concentrar este flujo en un área más pequeña, se reducen las perdidas térmicas, alcanzando temperaturas mayores de 200 y hasta 3,800 grados centígrados.

El **reflector** es la superficie donde inciden los rayos solares directamente. Se determina un orden geométrico para concentrar esos rayos incidentes en un punto. El **receptor** es el dispositivo donde se concentran los haces reflejados, donde se procede a su aprovechamiento térmico o fotovoltaico.

El **área de apertura** es el área expuesta a la radiación solar directa y difusa mientras que el **área de absorción** es el punto de concentración de los haces lumínicos reflejados. En concentradores de disco parabólico, coincide con el punto focal. La **razón de concentración** se define como el cociente entre el área de apertura y el área de absorción:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \tag{7}$$

La configuración de los reflectores es de tipo axial, colocando el receptor en el punto focal, limitando el grado de apertura del dispositivo. Incrementar la distancia focal, conlleva la construcción de soportes más grandes y pesados, dificultando el movimiento del sistema. Una solución configuración consiste en usar una Cassegrain o Gregorian, que utilizan reflectores secundarios convexos o cóncavos ubicados en el punto focal, ubicándose el receptor en el vértice del paraboloide, permitiendo "abrir" el área del reflector sin sacrificar la ligereza de la estructura.

La conversión directa de energía solar a energía eléctrica se logra sin transformaciones intermedias gracias al **Efecto Fotovoltaico**, que consiste en la aparición de voltaje en un dispositivo cuando es iluminado.

La Celda Solar o Célula Solar es básicamente, una unión P-N diseñada de forma que la luz pueda penetrar en el volumen del semiconductor. Castañer, 1994). Para construir estos dispositivos, se usa principalmente Silicio (Si), abundante en la corteza terrestre y cuya manufactura ha alcanzado costos relativamente bajos.

La potencia generada por una celda fotovoltaica depende directamente del área semiconductora expuesta a la luz, la calidad del material y la iluminación incidente. El parámetro de Potencia Pico se define bajo condiciones ideales. (1 atm de presión, 25 °C, 1000 W/m<sup>2</sup>)

Las siguientes son características principales de una celda fotovoltaica:

**Corriente de Corto Circuito**: Es la intensidad de corriente eléctrica que se obtiene en ausencia de cargas externas y con sus terminales en corto circuito (V=0).

**Tensión en Circuito Abierto:** Es la tensión generada cuando no hay un consumo presente, por lo que la corriente presente es nula. En dispositivos de Silicio, es alrededor de ,6 voltios.

**Potencia Máxima**: La potencia es el producto del voltaje por la corriente. Tanto en corto circuito como en circuito abierto, la potencia generada es cero. Existe pues una tensión máxima una intensidad máxima antes de comenzar a caer a cero, siendo estos los puntos de operación pico. La potencia máxima obtenible es el producto de ambas magnitudes. (Figura 11).



Figura 11. Punto de Máxima Potencia

**Factor de Forma:** El rectángulo formado por los puntos de operación máximos es de menor área al que se formaría con los valores de circuito abierto y corto circuito. Es la medida usada para conocer la calidad de la celda solar:

$$FF = \frac{Im * Vm}{Icc * Vcc} \tag{8}$$

**Eficiencia:** La eficiencia de conversión energética, se define como la potencia máxima que puede suministrar a una carga respecto a la potencia de radiación solar incidente o irradiancia (Is) sobre el área de la celda Sc.

$$n_c = \frac{Pm}{Is*Sc} \tag{9}$$

Es importante considerar los efectos de la temperatura sobre el funcionamiento de una celda fotovoltaica. Al igual que otros semiconductores, al aumentar su temperatura la tensión de circuito abierto disminuye unos pocos mili voltios por grado centígrado aumentado (aproximadamente 2,3 mV/°C para el Silicio). Esto provoca cambios en el FF, disminuyendo a su vez la eficiencia de la celda, alrededor de 0,45 % en dispositivos de Silicio.

E. Seguimiento Solar

En este trabajo se se utiliza se muestra un sistema de seguimiento de dos

grados de altitud-azimut, que permite el movimiento rotatorio en dos ejes perpendiculares entre sí, uno vertical y otro horizontal.

El seguimiento directo utiliza sensores fotosensibles en un sistema de control retroalimentado, que bascula entre posiciones hasta alcanzar la posición óptima. En días nublados, esto es una desventaja, pues el sistema cambia su posición continuamente, buscando las regiones más luminosas del cielo, consumiendo potencia innecesaria. Otro inconveniente es la reorientación a la posición inicial cada mañana. (Ibáñez Plana et al., 2004).

Los de sistemas control de orientación utilizan 3 componentes principales: Sensores. Unidad de Procesamiento (Microcontroladores) y Actuadores (Motores). Dada la amplia gama de cada uno de estos, se consideraran los aspectos generales de los mismos.

Controlando la posición angular de los motores se asegura la máxima concentración solar posible, por lo que es necesario considerar la etapa electro mecánica del sistema. Para efectos de esta investigación, se considera el uso de motores de corriente directa o continua

Un motor eléctrico se define como dispositivo electromagnético un aue transforma la energía eléctrica en energía cinética. Al fluir corriente eléctrica a través de un conductor, y someterlo a un campo magnético externo, se presenta una fuerza perpendicular a la dirección del campo eléctrico y a la dirección del flujo de corriente, como se aprecia en la figura 12. La fuerza F que actúa sobre el alambre de longitud L, por el cual fluye una corriente Ia, dentro de un campo magnético con densidad de flujo **B**, está dada por:

$$F = BI_{\infty}L \tag{10}$$

Campo magnético



*Figura 12*. Principio de Funcionamiento de un motor

Para un embobinado de N alambres:

$$F = NBI_{\infty}L \tag{11}$$

Las fuerzas se suman produciendo un par torsional T,

$$T = Fb \tag{12}$$

Donde b es el ancho del embobinado, de forma que se obtiene:

$$T = NBI_{\infty}Lb \tag{13}$$

El par resultante es proporcional a  $BI_{\infty}$ , mientras que el resto de los factores permanece constante:

$$T = K_1 B I_{\infty} \tag{14}$$

Dado que la armadura (conjunto de alambres agrupados) es un embobinado giratorio dentro del campo magnético del estator, su giro inducirá un voltaje resultado de la inducción electromagnética, pero en sentido inverso. Esta es la llamada **fuerza contra electromotriz**  $V_b$  y es proporcional a

la rotación de la armadura  $\omega$  y al flujo *B* de modo que:

$$V_{b=} K_2 B \omega \tag{15}$$

En los motores controlados por armadura, la corriente de campo  $I_f$  se mantiene constante, lo que significa que la densidad de flujo de campo magnético *B* es constante.

$$V_{b=}K_3B\omega \tag{16}$$

La rotación del motor es controlada por el voltaje de armadura  $V_{a}$ , un voltaje de entrada conectado a sus terminales. El circuito de armadura puede considerarse como circuito serie RL acoplado a una fuente de fuerza electromotriz, lo que define la ecuación del sistema como:

$$V_a - V_b = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \qquad (17)$$

El circuito de control equivalente se aprecia en la figura 13.



Figura 13. Lazo de control de un motor controlado por armadura.

La salida del circuito de armadura es la corriente de armadura  $i_a$  y dado que la densidad de campo es constante, la ecuación de torque se redefine como:

$$T = K_4 i_a \tag{18}$$

Este torque es el que moverá la carga final y producirá una rotación  $\omega$ . Al igual que la fuerza contra electromotriz, existe un llamado "par de amortiguamiento" que se opone a la torsión ejercida por *T*, por lo que el par neto de rotación es el valor del par *T* menos el par de amortiguamiento  $c\omega$ . El par neto obtenido produce una aceleración angular  $d\omega/dt$ . Ordenando las ecuaciones respecto a la entrada v<sub>a</sub> la salida  $\omega$ , obtenemos las dos ecuaciones que definen el comportamiento del sistema:

$$I\frac{d\omega}{dt} = k_4 i_4 - c\omega \tag{19}$$

$$v_a - k_3 \omega = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \qquad (20)$$

#### 4) Diseño Conceptual

En esta sección se evalúan y aplican algunas técnicas de modelado matemático y diseño mecánico para la construcción de un sistema de concentración solar

A) Selección del tipo de sistema concentrador

La tabla 1 muestra la comparación básica para la generación eléctrica entre un

sistema fotovoltaico y térmico.

Parámetros	Fotovoltaíco	Térmico
Conversion primaria	Electricidad	Calor
Conversión secundaria	Calor	Electricidad
Dispositivo generador	Celdas Fotovoltaicas	Motor de vapor o Stirling
Factores de perdida	Longitud de línea de transmisión	Aislamiento térmico y longitud de línea de transmisión

Tabla 1. Comparación entre Sistema Fotovoltaico y Térmico.

Los factores expuestos, llevan a considerar como opción del diseño de un sistema de generación fotovoltaico

Para nuestro diseño se seleccionaron celdas fotovoltaicas tipo CF de silicio monocristalico Grado A, con una superficie total de  $0.016 \text{ m}^2$ , tal como se muestra en la tabla de datos técnicos

Tabla 2. Ficha técnica celda solar.

2.72	17.6-	0.523	5.215	0.629	5.585		
W	%	V	Α	$\mathbf{V}$	А		
Pmp	Eff(%)	Vmp	Imp	Uoc	Isc		
Back (+)	Full aluminium back surface field, 2.5mm wide (silver/aluminium) soldering pads						
Front (-)	Silicon nitride anti-reflecting coating, 1.5mm wide front silver bus bars						
Thickness	200µm±20µm						
Format	125mm×125mm±0.5mm, diagonal:165mm						

La CF genera cerca de 3 Watts bajo radiación solar directa. Sin embargo, para iluminar una casa habitación de 4 habitaciones durante la noche, usando focos ahorradores de 25 Watts, se necesita una potencia total de 100 Watts/hora. Un arreglo de 35 Celdas Fotovoltaicas funcionando bajo condiciones ideales seria apenas necesario para generar 100 Watts de potencia. Dado que las condiciones de un sistema nunca serán ideales, es necesario sobredimensionar el arreglo fotovoltaico para asegurar la producción, (50 celdas = 136 Watts).

De acuerdo al efecto fotoeléctrico, la energía eléctrica producida por una CF es proporcional a la cantidad de luz incidente sobre ella, por lo que al poner 10 veces la cantidad luz sobre una CF teóricamente se debería obtener 10 veces la potencia. Siguiendo esta premisa, y observando los altos costos de un panel fotovoltaico, se usara una CF colocada en el punto focal de un concentrador, de manera que la potencia generada por la misma se multiplique de acuerdo al factor de concentración usado. Se pretende alcanzar un costo de generación menor sin sacrificar la eficiencia, logrando la difusión del uso de la energía solar.

Dado que los niveles de irradiación son variables y que la eficiencia de las CF se reduce con temperaturas sobre los 25 °C, debemos considerar un factor de concentración mayor. Se tomara un valor preliminar de 50, siendo requerida un área de apertura de 0.8 m<sup>2</sup>.

### B) Diseño estructural

El bajo costo del sistema es determinante, pues no se cuentan con recursos económicos ilimitados. Además, la difusión del recurso solar reposa sobre el costo de los sistemas, por lo que deben buscarse alternativas para la selección de materiales de construcción, por lo que se buscó y encontró una estructura parabólica que pudiera reducir los costos de fabricación. El uso de una estructura predefinida restringe al proyecto a sus dimensiones, teniendo  $0,67 \text{ m}^2$  de área de apertura. Se tomaron medidas de dicha pieza y se simulo en Catia.



Figura 14. Estructura Parabólica.

Es necesario determinar dos ejes de giro, uno acoplado a la Antena, permitiendo el movimiento horizontal, y el otro acoplado a la base, permitiendo el movimiento vertical. Esta pieza es la que se deberá seguir la trayectoria virtual del sol para asegurar la máxima eficiencia posible. Se consideraron las monturas más usadas en seguimiento solar con 2 grados de libertad: Azimuth-altitud (azimuth-altitude dual axis trackers AADAT) y altitud-inclinación (tiptilt dual axis trackers TTDAT) por tener mayor grado de libertad y menor complejidad de construcción.

Se diseñó una pieza en Catia que une la base con la Antena, permitiendo 2 grados de libertad. Consiste en una pieza central sobre la que se fijan 2 bases para un par de baleros genéricos, mientras que en el otro extremo se coloca 2 bases similares con orientación perpendicular a los primeros y situados a 9 cm uno del otro.



Figura 15. Soporte para ejes.

El siguiente pasó consistió en diseñar una base de soporte central, capaz de soportar el peso de la Antena, aun ante vientos fuertes. Considerando el material disponible, se selección un tubular cuadrado de acero calibre 14, por su resistencia estructural. Se requiere un eje fijo en esta base y acoplado a la pieza anterior. Una altura mínima de la torre central otorga una resistencia menor al viento y menor momento flector sobre la misma (M= F x L).



Figura 16. Columna central.

Para obtener un punto de apoyo que ofrezca solidez y resistencia sin necesidad de practicar grandes trabajos de instalación permanentes, como barrenado, excavación o soldadura, se seleccionó una base tripoidal en estructura tubular, que permitirá la fácil instalación y desinstalación del sistema.



Figura 17. Base tripoidal.

El ensamble final del producto resulto en la estructura mostrada en la figura 18



Figura 18. Concentrador parabólico.

Para simular las cargas mecánicas y los esfuerzos generados dentro de la estructura se lleva a cabo un análisis de elemento finito (**FEA**) considerando dos casos, el primero de ellos sin una carga añadida y el segundo considerando un viento de 35 km/h en dirección normal a la antena.

La fuerza ejercida por el viento sobre la estructura depende directamente de su velocidad, siendo la velocidad máxima registrada en ráfagas de alrededor de 90 km/h. La presión generada por una masa de aire se calcula con:

$$P = k\rho V^2 \tag{21}$$



Figura 19. Análisis por mallas FEA.

Dónde:

 $\rho$  = densidad del aire que tiene un valor promedio de 1.2 kg / m<sup>3</sup>

V = Velocidad del viento

C) Electrónica y control

En la sección anterior se presentó el diseño de una estructura con un par de ejes, dotando al sistema de 2 grados de libertad, por lo que se requiere un actuador, o conjunto de actuadores que sean capaces de mover la estructura en la dirección Se observa una tendencia adecuada. predominante a utilizar motores de corriente directa por sobre otro tipo de actuadores, debido a su sencilla implementación, control de velocidad y torque. El movimiento aparente del sol en el transcurso de una hora es de  $15^{\circ}$  (360°/ 24 hr = 15°) y 0,4° diarios en declinación (-23.54°< < 23.54°). La velocidad de cambio en el ángulo horario es de apenas 0.000694 rpm. Un método para controlar la velocidad de los actuadores es necesario. La revisión literaria y el estado del arte permiten considerar distintos métodos, siendo los principales el uso de una resistencia variable, siendo la velocidad

angular dependiente del voltaje (F= I x B, I= V/R, **control de armadura**) y el uso de la Modulación por Ancho de Pulso o **PWM** (Pulse Wide Modulation).

Es necesario detectar la luz incidente sobre el sistema y posicionarlo donde la irradiación sea mayor, a cada momento del Existen dos métodos día. de posicionamiento que cumplen con esta tarea, el seguimiento cronológico y el seguimiento activo. En el primero, el sistema se mueve a una velocidad constante de 15°/hr y 0,4° diarios, igualando el movimiento de la tierra. Este sistema es inmune a perturbaciones de nubosidad pero requiere una calibración manual para determinar el día del año y la hora del día. Un ejemplo de este sistema fue aplicado por Tecpoyotl-Torres et al. (2008).

El seguimiento activo es un sistema de control de lazo cerrado, con retroalimentación provista por sensores sensibles a la luz, en este caso LDR's. El sistema es vulnerable a variaciones por nubosidad pero se auto calibra al iniciar su funcionamiento.

Un modelo sencillo de un seguidor de luz consiste en un par de LDR's que funciona como divisor de voltaje. Cuando la luz incidente sobre las LDR es igual entre sí, el voltaje es de salida es de la mitad de la fuente. utiliza un amplificador Se operacional configurado como comparador, siendo la entrada positiva la salida del divisor de tensión, y la entrada negativa fija a una fuente secundaria con un valor prefijado de la mitad de la fuente principal. La salida del comparador se envía a la entrada que activa el giro positivo del motor, y a la vez, a una compuerta NOT, que se conecta a la entrada de giro negativo. De esta forma, el motor girara en un sentido bajo la incidencia de luz, y en el sentido opuesto si el valor es distinto.

Por simplicidad de diseño, se utiliza un L298n, circuito integrado que contiene internamente 2 puentes H, con una capacidad máxima de 4 amperes.



Figura 20. Seguidor luminico básico con L298n.

La salida del comparador se envía a la entrada que activa el giro positivo del motor, y a la vez, a una compuerta NOT, que se conecta a la entrada de giro negativo. De esta forma, el motor girara en un sentido bajo la incidencia de luz, y en el sentido opuesto si el valor es distinto.

Por simplicidad de diseño, se utiliza un L298n, circuito integrado que contiene internamente 2 puentes H, con una capacidad máxima de 4 amperes.



*Figura 21*. Seguidor Luminico Dual, con L298n.

El circuito dual presenta la desventaja de un giro continuo de los motores, lo que consume potencia innecesaria, al no contar con un estado intermedio neutral. Es necesario determinar este estado neutro, por lo que una tercera LDR es ensamblada al circuito, formando un doble divisor de voltaje, cuya salida se envía a una segunda etapa comparadora, con un voltaje de referencia de un medio del voltaje de referencia de la etapa anterior. La salida del segundo comparador es negada y conectada a las terminales de giro negativo de los puentes H. Este arreglo permite que en igualdad de valores de incidencia lumínica, ambas entradas de giro sean activadas, provocando un freno

electromagnético del motor. El sentido de giro del motor queda definido por el valor de resistencia que sea menor.



Figura 22. Seguidor Liminico, con estado de frenado electromagnético.

### Conclusiones

Del trabajo mostrado anteriormente, se destaca el esfuerzo en la busqueda de soluciones para la generación de energía alternativa a bajo costo, mediante el uso de los conocimientos aplicados de la diversas ramas de la ingeniería.

principal El objetivo de esta investigación fue generar una propuesta de un sistema de micro - generación de energía eléctrica mediante el diseño de un concentrador solar y proponiendo el uso de materiales reciclados para reducir el costo del dispositivo. Se destaca en el diseño del concentrador solar que puede ser implementado a muy bajo costo y utilizarse en aplicaciones de bajo consumo o en nuestros propios hogares.

El logro del objetivo principal fue soportado por el seguimiento de la metodología de diseño, la cual puede ser aplicada para cualquier tipo de producto.

Deberé entenderse que este diseño fue concebido para determinado consumo de energía y ya que la demanda de energía puede variar en distintas aplicaciones, el lector puede tomar como referencia la propuesta y adaptarlo a sus necesidades y requerimientos

Finalmente se concluye sin antes mencionar que es un excelente proyecto en la búsqueda de soluciones de generación de energía eléctrica alternativa a bajo costo y de alto impacto

#### Referencias

Abdallah, S., & Nijmeh, S. (2004). Two axes sun tracking system with PLC control. Energy conversion and management, 45(11), 1931-1939.

Almanza, R., y Muñoz, F. (2003). Ingenieria de la Energia Solar. México D.F.: Editorial Cromo Color.

Banco Mundial. (S.F.). [monografía en internet]. Consultado 2014 febrero. Disponible en: http://datos.bancomundial.org/.

Castañer Muñoz, L. (1994). Energía solar fotovoltaica. España: Ediciones UPC.

CULCyT//Septiembre-Diciembre, 2014

Fernandez-Garcia, A., Zarza, E., Valenzuela, L., & Pérez, M. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(7), 1695-1721.

Ibáñez Plana, M., Rosell Polo, J., & Rosell Urrutia, J. I. (2004). Tecnología solar. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Energy Policy, 39(3), 1154-1169.

Mlatho, J. S. P., McPherson, M., Mawire, A., & Van den Heetkamp, R. J. J. (2010). Determination of the spatial extent of the focal point of a parabolic dish reflector using a red laser diode. Renewable Energy, 35(9), 1982-1990.

Kelly, N. A., & Gibson, T. L. (2009). Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system. Solar Energy, 83(11), 2092-2102.

Peña-Díaz, A. (S.F.). Sistemas de concentración de energía solar. Universidad de Los Andes Santafé de Bogotá D.C., Colombia [monografía en internet]. Consultado 2014 febrero. Disponible en: http://www.lasenergiasrenovables.com/ downloads/concentradoressolares.pdf Philippen, D., Konrad, A., & Leimgruber, B. (S.F.). Construction manuelle d'un réflecteur cuiseur Scheffler de 2m<sup>2</sup>. [monografía en internet]. Consultado 2014 Marzo. Disponible en: http://www.econologie.com/file/technologie\_energie/ Cuiseur\_solaire.pdf

Ponniran, A., Hashim, A., & Joret, A. (2011). A design of low power single axis solar tracking system regardless of motor speed. International Journal of Integrated Engineering, 3(2): 5-9.

Tecpoyotl-Torres, M., Escobedo-Alatorre, J., Gomez-Vicario, M. A., Campos-Alvarez, J., Espinoza-Mendoza, J., Vera-Dimas, G., & Vargas-Bernal, R. (2008). Dspic control system of a solar follower. In: High and Low Concentration for Solar Electric Applications III, Martha Symko-Davies (ed.), Proc. of SPIE Vol. 7043, 70430L.

Ullman, D. G. (2010). The mechanical design process, 4<sup>th</sup> Edition, New York: McGraw-Hill.

ZENITH SOLAR (S.F.). Consultado 2014 Abril. Disponible en: http://zenithsolar.com/ product.aspx?id=287

Zheng-ming Li, Yan-Yan Yan, Xiao-hui Xia. (2011). The Automatic Solar Tracking system. Energy Procedia 11 (2011) 4661-4667.