



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Diseño, construcción y control de una central didáctica termosolar de alta temperatura mediante el generador Stirling.**

Tesis previa a la obtención de título de:

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

Autor

**Pablo Miguel Mora Robles**

Director

**Ing. Francisco Eugenio Vásquez Calero**

**CUENCA – ECUADOR**

**2016**

## **DEDICATORIA**

Con todo el cariño dedico este trabajo a Tatiana, Romina, Alberto y Olguita.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad; a cada uno de los que son parte de mi familia por siempre haberme dado su amor fuerza y apoyo incondicional que me ha ayudado y llevado hasta donde estoy ahora, y a mi director de tesis Francisco por el apoyo brindado

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CONTENIDOS</b>	<b>Pag.</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	i
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	ii
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	iii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>RESUMEN</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1

### **CAPÍTULO 1: EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR EN EL ECUADOR COMO FUENTE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

1.1. Introducción.....	2
1.2. La radiación solar.....	3
1.2.1. Espectro electromagnético.....	3
1.2.2. Tipos de radiación solar.....	4
1.2.2.1. Radiación solar directa.....	4
1.2.2.2. Radiación solar difusa.....	4
1.2.2.3. Radiación reflejada.....	5
1.2.2.4. Radiación solar total.....	5
1.3. Mapa solar del Ecuador.....	6
1.3.1. Atlas solar del Ecuador.....	8
1.3.2. Mapa solar del Ecuador.....	9
1.4. Conclusiones.....	21

### **CAPÍTULO 2: PRINCIPIOS Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA STIRLING PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA RADIACIÓN SOLAR.**

2.1. Introducción.....	22
2.2. Motores Stirling.....	23
2.2.1. Ciclo de Stirling.....	23
2.3. Descripción del sistema Stirling.....	25
2.4. Componentes del sistema.....	26
2.4.1. Concentradores solares.....	27
2.4.1.2 La parábola.....	28
2.4.1.3. Ecuación Simple de la parábola.....	29
2.4.1.4. Espejos esféricos.....	29
2.4.2. Sistemas de control de seguimiento.....	30
2.4.2.1 El sistema de control de lazo cerrado.....	30
2.4.2.2 Diagramas de flujo del mecanismo de control del seguidor solar .....	31
2.4.3 Receptor.....	32
2.5. Equipos auxiliares.....	33
2.6. Sistemas de almacenamiento.....	33
2.6.1. Las baterías.....	33
2.6.2. Subsistema de regulación.....	34
2.7. Conclusiones.....	36

### **CAPÍTULO 3: CONTROL DEL SISTEMA STIRLING PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA RADIACIÓN SOLAR.**

3.1. Introducción.....	37
3.2. Geometría solar.....	37
3.3. Montea solar.....	39
3.4. Seguidor solar.....	41
3.4.1. Diseño del seguidor solar.....	41
3.4.2. Diseño del circuito electrónico del seguidor solar.....	44
3.4.3. Construcción de la tarjeta de control.....	44
3.5. Sensores y transductores.....	47
3.5.1. Fotoresistores.....	48
3.5.2. Sensor de irradiación.....	48
3.5.2.1. Piranómetro Fotovoltaico.....	49

3.6. Software de control.....	49
3.7. Conclusiones.....	52

#### **CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR DIDÁCTICA MEDIANTE EL GENERADOR STIRLING.**

4.1. Introducción.....	53
4.2. Centrales solares termoeléctricas.....	53
4.2.1. Tecnología Cilindro-parabólica.....	53
4.2.2. Tecnología de torre.....	54
4.2.3. Tecnología de disco Stirling.....	55
4.2.4. Tecnología de Concentradores lineales de Fresnel.....	56
4.3. Criterios de selección del proyecto .....	57
4.4. Diseño de la central didáctica termosolar de alta temperatura mediante el generador de Stirling .....	60
4.4.1. Planteamiento del sistema.....	60
4.4.2. Diseño de la estructura mecánica de seguidor.....	65
4.5. Construcción y montaje de los componentes del sistema.....	71
4.6. Conclusiones.....	75

#### **CAPÍTULO 5: TABULACIÓN DE RESULTADOS Y GUÍA DE PRÁCTICAS PARA LOS ESTUDIANTES.**

5.1. Introducción.....	76
5.2. Pruebas de control.....	78
5.3. Tabulación de resultados.....	79
5.3. Guía práctica para los estudiantes de energías renovables.....	80

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>83</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>84</b>

**INDICE DE FORMULAS Y CUADROS**

Ecuación 1. 1 Densidad de flujo.....	3
Ecuación 1.2: Radiacion Global.....	5
Ecuación 2.1. Ecuación de la parábola.....	29
Tabla 3.1 Tabla de Verdad.....	44
Tabla 4.1. Características de las centrales termoeléctricas.....	58
Tabla 4.2. Tabla comparativa sistemas termoeléctricos.....	59
Tabla 5.1. Tabla de resultados central termosolar de alta temperatura.....	79

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Espectro Electromagnético.....	4
Figura 1.2. Radiación Solar.....	5
Figura 1.3. Insolación Mes de Enero.....	8
Figura 1.4. Insolación Mes de Febrero.....	9
Figura 1.5. Insolación Mes de Marzo.....	10
Figura 1.6. Insolación Mes de Abril.....	11
Figura 1.7. Insolación Mes de Mayo.....	12
Figura 1.8. Insolación Mes de Junio.....	13
Figura 1.9. Insolación Mes de Julio.....	14
Figura 1.10. Insolación Mes de Agosto.....	15
Figura 1.11. Insolación Mes de Septiembre.....	16
Figura 1.12. Insolación Mes de Octubre.....	17
Figura 1.13. Insolación Mes de Noviembre.....	18
Figura 1.14. Insolación Mes de Diciembre.....	19
Figura 1.15. Insolación Global.....	20
Figura 2.1. Ciclos de Stirling.....	24
Figura 2.2. Central Disco Parabólico, Plataforma Solar de Almería.....	26
Figura 2.3. Elementos básicos de un sistema disco Stirling.....	27
Figura 2.4. Elementos de la parábola.....	28
Figura 2.5. Concentrador solar.....	29
Figura 2.6. Sistema de control lazo cerrado.....	30
Figura 2.7. Diagrama de flujo de control Este-Oeste.....	31
Figura 2.8. Diagrama de flujo de control azimutal.....	31
Figura 2.9. Conexión interna una batería.....	33
Figura 2.10. Sistema de regulador de carga en serie y paralelo.....	35
Figura 2.11. Diagrama de bloque de un controlador de carga.....	35
Figura 3.1. Posición de la Tierra con respecto al sol.....	38
Figura 3.2. Esquema de las trayectorias solares.....	38
Figura 3.3. Montea solar Ecuador.....	39
Figura 3.4. Elevación solar en Ecuador.....	40

Figura 3.5. Fotoreceptores.....	41
Figura 3.6. Divisor de tensión LDR.....	41
Figura 3.7. Circuito comparador OPAMS.....	42
Figura 3.8. Circuito de polarización transistores.....	42
Figura 3.9. Circuito de inversión de giro.....	43
Figura 3.10. Circuito electrónico del seguidor un eje.....	43
Figura 3.11. Circuito electrónico del seguidor dos ejes.....	44
Figura 3.12. PCB del seguidor dos ejes.....	44
Figura 3.13. Vista en 3D del circuito impreso.....	45
Figura 3.14. Montaje de componentes electrónicos en el PCB.....	45
Figura 3.15. Símbolo eléctrico y función de transferencia de un LDR.....	47
Figura 3.16. Panel Frontal.....	49
Figura 3.17. Programa Principal.....	50
Figura 3.18. SubVI AddSeñales.....	51
Figura 4.1. Central cilindro parabólica.....	53
Figura 4.2. Central tipo torre.....	53
Figura 4.3. Central Disco Stirling.....	54
Figura 4.4. Central concentradores lineales de Fresnel.....	55
Figura 4.5. Espejo parabólico.....	58
Figura 4.6. Motor Stirling.....	59
Figura 4.6. Generador.....	60
Figura 4.7. Control del seguidor.....	60
Figura 4.8. Base y Estructura soporte.....	61
Figura 4.9. Mecanismo de movimiento azimutal.....	62
Figura 4.10. Estructura soporte del espejo y del motor Stirling.....	63
Figura 4.11. Mecanismo de elevación.....	64
Figura 4.12. Espejo cilindro parabólico.....	65
Figura 4.13. Modelo final de la central de alta temperatura Stirling.....	66
Figura 4.14. Construcción y montaje de la base y estructura soporte.....	67
Figura 4.15. Sistema de seguimiento azimutal.....	68
Figura 4.16. Montaje del sistema de seguimiento de elevación.....	68
Figura 4.17. Construcción y montaje del soporte y espejo parabólico.....	69
Figura 4.18. Acople de ejes motor y generador.....	70

Figura 4.19. Montaje final de todos los componentes del sistema.....	70
Figura 4.20. Componentes de la Central.....	71
Figura 5.1. Central Stirling.....	73
Figura 5.1. Pruebas de control.....	74

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UNA CENTRAL DIDÁCTICA  
TERMOSOLAR DE ALTA TEMPERATURA MEDIANTE EL GENERADOR  
STIRLING.**

**RESUMEN**

En el proyecto se desarrolla el diseño y la construcción de una central termosolar de alta temperatura mediante el generador Stirling, los sistemas solares térmicos de Stirling son equipos de generación de energía que convierten la energía térmica de la radiación solar en energía mecánica y luego en energía eléctrica, los mismos utilizan un espejo para reflejar y concentrar la radiación proveniente del sol en un receptor, dado que la radiación que utilizamos solamente es la directa es necesario que el concentrador siga la trayectoria del sol en sus dos ejes mediante un sistema electromecánico de control y seguimiento con el fin de alcanzar las temperaturas necesarias para convertir eficientemente el calor en trabajo dentro del ciclo del motor Stirling

**Palabras clave:** solar, térmico, central termosolar, Stirling



Francisco Eugenio Vásquez Calero  
**Director de Tesis**



Hugo Marcelo Torres Salamea  
**Director de Escuela**



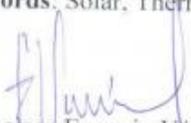
Pablo Miguel Mora Robles  
**Autor**

**DESIGN, CONSTRUCTION AND CONTROL OF HIGH-TEMPERATURE  
SOLAR-THERMAL DIDACTIC ELECTRIC POWER STATION THROUGH  
STIRLING ENGINE**

**ABSTRACT**

This project develops the design and construction of a high-temperature solar thermal power plant through a Stirling engine. Stirling solar thermal systems are power-generation equipment that convert thermal energy of solar radiation into mechanical energy and then into electric energy. These systems use a mirror to reflect and concentrate the radiation from the sun onto an engine, since the radiation we use is direct, it is necessary that the mirror follows the path of the sun in its two axes by an electromechanical control and monitoring system in order to reach the necessary temperatures to efficiently convert heat into work within the Stirling cycle engine.

**Keywords:** Solar, Thermal, Solar Thermal Power Plant, Stirling

  
Francisco Eugenio Vasquez Calero  
**Thesis Director**

  
Hugo Marcelo Torres Salamea  
**School Director**

  
Pablo Miguel Mora Robles  
**Author**

  
UNIVERSIDAD DEL  
AZUAY  
Dpto. Idiomas

  
Translated by,  
Lic. Lourdes Crespo

Pablo Mora

Trabajo de Graduación

Ing. Francisco Eugenio Vázquez Calero

Marzo, 2016.

## **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UNA CENTRAL DIDÁCTICA TERMOSOLAR DE ALTA TEMPERATURA MEDIANTE EL GENERADOR STIRLING.**

### **INTRODUCCIÓN**

Aunque en los últimos años la tecnología solar termoeléctrica se ha relanzado con gran fuerza, todavía es la gran desconocida de las tecnologías solares. Sin duda todos conocemos el funcionamiento de una placa fotovoltaica y hemos visto paneles solares térmicos para la generación de agua caliente, pero en general resultan desconocidas las tecnologías solares de concentración y en especial su aplicación en sistemas termosolares.

El Motor Stirling fue inventado 1816 por Robert Stirling, el objetivo era tener un motor menos peligroso que la máquina de vapor; El ciclo Stirling es similar a un ciclo termodinámico como el de un motor de un coche. El aporte de calor se realiza a través de grandes discos parabólicos que reflejan y concentran la luz solar hacia el llamado motor Stirling, sin que sea necesario quemar ningún combustible en el proceso. El motor produce energía mecánica que, mediante un generador, se transforma en energía eléctrica limpia, libre de emisiones contaminantes.

El reflector sigue la trayectoria del Sol en dos ejes, concentrando la radiación solar en el receptor que es calentado entre 250° C y 700 °C, los sistemas de disco parabólico son los que proporcionan la más alta eficiencia entre las tecnologías de CSP (ingles: Concentrated Solar Power), entre 31% a 32%.

## CAPÍTULO 1

### **EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR EN EL ECUADOR COMO FUENTE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

#### **1.1. Introducción**

Gran parte de las culturas antiguas veneraron al sol como divinidad. En la cultura Inca Inti, en la Shuar Etsa, en mitología griega se le conoce como Helios. De ahí proviene el nombre del gas Helio, que fue descubierto primeramente en el Sol.

El Sol fue utilizado por los primeros astrónomos como referencia para medir el tiempo. Grandes monumentos fueron levantados para marcar el paso del Sol a lo largo del día y a lo largo del año. Las alineaciones de las construcciones megalíticas de hace unos 4700 años en Stonehenge (Inglaterra) muestran que su propósito aparentemente incluía la predicción de las estaciones y determinados sucesos astronómicos.

El Sol es una estrella cuya superficie se encuentra a una temperatura media de 6000°C, en su interior se desarrolla una reacción nuclear de fisión, núcleos de hidrógeno chocan entre sí, y se fusionan dando lugar a un núcleo más pesado de helio liberando una enorme cantidad de energía.

“La radiación en el Sol es de 63.450.720 W/m<sup>2</sup>. La energía que llega al exterior de la atmósfera terrestre sobre una superficie perpendicular a los rayos solares lo hace en una cantidad fija, llamada constante solar (1353 W/m<sup>2</sup> según la NASA) variable durante el año un  $\pm 3\%$  a causa de la elipticidad de la órbita terrestre.”[Mendez (2010)]. Esta energía es una mezcla de radiaciones de longitudes de onda entre 200 y 4000nm, que se distingue entre radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja.

## 1.2. La radiación solar

La radiación solar es el flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. Aproximadamente la mitad de las que recibimos, comprendidas entre  $0.4\mu\text{m}$  y  $0.7\mu\text{m}$ , constituyendo lo que conocemos como luz visible. De la otra mitad, la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y una pequeña parte en la ultravioleta.

La unidad práctica que describe la radiación solar es la irradiación o irradiancia, y se mide en  $[W/m^2]$ .

La radiación media global independiente de la situación geográfica es aproximadamente  $[1375 W/m^2]$ .

La radiación que emite un cuerpo en función de la temperatura, viene dada por la ley de Stefan-Boltzman, la misma que se representa por la Ecuación 1.1.

$$M = \sigma * T^4$$

Dónde:

M= Densidad de flujo radiante total emitido por el cuerpo en

$$[W/m^2].$$

$$\sigma = \text{Constante de Stefan-Boltzman } \sigma = 5,670400 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$$

Ecuación 1. 1 Densidad de flujo

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Constante\\_de\\_Stefan-Boltzmann](https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Stefan-Boltzmann)

### 1.2.1. Espectro electromagnético

El Sol irradia energía en todas las direcciones y parte de este flujo radiante llega a la superficie terrestre a través del espacio vacío, en forma de Radiación Electromagnética, que está formada por la combinación de campos eléctricos y magnéticos, que se propagan a través del espacio en forma de ondas portadoras de energía; estas son los rayos ultravioleta, rayos X, la luz visible, las radiaciones infrarrojas, microondas y las ondas de radio.

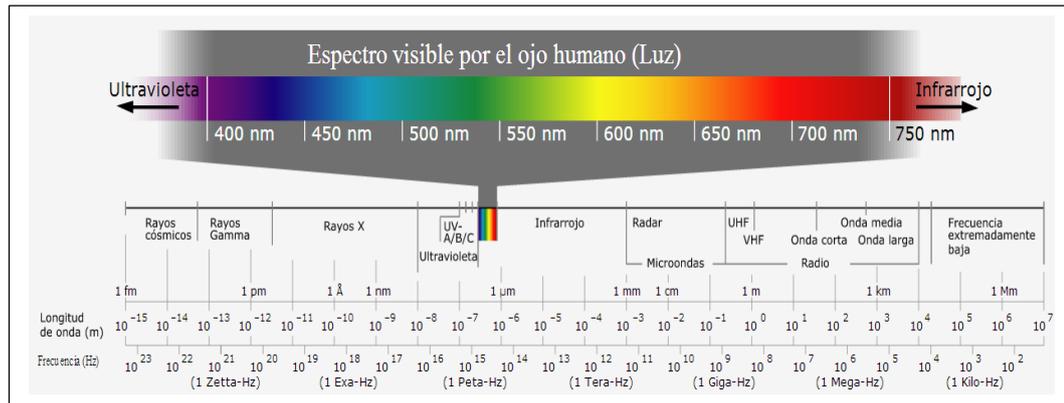


Figura 1.1 Espectro Electromagnético

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagn%C3%A9tico](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico)

### 1.2.2. Tipos de radiación solar

En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se puede distinguir tres componentes de la radiación solar: Directa, Difusa, Reflejada y Total.

#### 1.2.2.1. Radiación solar directa

La radiación directa se mide sobre una superficie orientada directamente hacia el sol, de tal manera que los rayos solares resultan siempre perpendiculares a dicha superficie. Cuando el sol se mueve de manera aparente a través del cielo, dicha superficie también se mueve para mantener la relación normal.

La radiación directa normal generalmente se mide con un pirheliómetro, el cual contiene un sensor termoeléctrico ubicado en el fondo de un tubo relativamente largo que se mueve mecánicamente para orientarse siempre hacia el sol.[sol-arq]

#### 1.2.2.2. Radiación solar difusa

En este caso la radiación proveniente de las partes bajas del cielo llega a la superficie horizontal en forma casi rasante, contribuyendo mucho menos que la radiación proveniente de las partes altas del cielo, las cuales inciden en forma casi perpendicular.

Los valores de radiación difusa se indican asumiendo que no existen elementos en el entorno que obstruyan una parte del cielo, por lo que generalmente se toman a campo abierto o sobre el techo de un edificio alto.

### 1.2.2.3. Radiación reflejada

La radiación reflejada es, como su propio nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo. Por otra parte, las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no "ven" superficie terrestre, mientras que las superficies verticales son las que más reciben.

### 1.2.2.4. Radiación solar total

Otro valor comúnmente empleado es la radiación global, que es la suma de la radiación directa y la radiación difusa. Dicha suma se puede expresar como la Ecuación 1.2:

$$R_{Global} = R_{Directa} + R_{Difusa} + R_{Reflejada}$$

Ecuación 1.2: Radiación Global

La radiación global horizontal se suele medir con un piranómetro, aparato que usa un lente de 180° tipo ojo de pez para conducir toda la radiación disponible hacia un **sensor termoelectrónico** que mide la energía recibida.

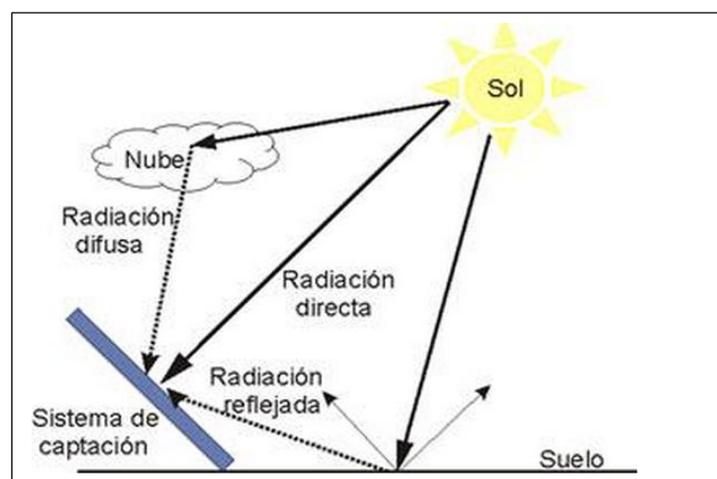


Figura 1.2 Radiación Solar

Fuente: <http://pedrojherandez.com/2014/03/08/radiacion-directa-difusa-y-reflejada/>

## 1.2. Mapa solar del Ecuador

El Ecuador es un país con características topográficas muy variadas, de gran diversidad climática y condiciones únicas que le confieren un elevado potencial de producir energías renovables.

La energía solar que se recibe en la superficie de la tierra se ha calculado equivalente a 178 000 TW-año.

No obstante, cerca del 30% de esta energía es reflejada en el espacio, 50% es absorbida, convertida en calor y reenviada a la superficie terrestre; de este 50%, 49 000 TW-año son reenviados como energía calorífica bajo la forma de radiación electromagnética y 40 000 TW-año como energía calórica propiamente dicha.

Los 20% restantes permiten la formación de los vientos (~350 TW), alimentan de energía los ciclos hidrológicos (~35 000 TW) y tan solo una muy pequeña parte de la energía solar es utilizada por la fotosíntesis, gracias a la cual la biodiversidad planetaria existe (100 TW).

### 1.3.1. Atlas solar del Ecuador

“La información base que se utilizó para el desarrollo del Atlas Solar del Ecuador, fue generada por el Nacional Renewable Energy Laboratory - NREL de los Estados Unidos, cuyas acciones están orientadas a la investigación y desarrollo de energías renovables y eficiencia energética.

Dentro de este marco, el NREL desarrolló el modelo CRS (Climatological Solar Radiation Model), que permite conocer la insolación diaria total sobre una superficie horizontal en celdas de aproximadamente 40 km x 40 km alrededor del mundo y cuyos resultados han sido validados a través de la medición de datos efectuados por estaciones, estableciéndose que el error de los datos es del 10%. Utiliza información sobre traza de gases, vapor de agua atmosférico, nubosidad, cantidad de aerosoles.

Los datos representan la energía solar promedio mensual y anual de los valores diarios de insolación global sobre una superficie horizontal y contiene los promedios mensuales ella, expresados en  $Wh/m^2/día$ .

La Corporación para la Investigación Energética – CIE, utiliza la información generada por el modelos CRS, filtrando en primera instancia el amplio volumen de información proveniente de este modelo, hasta seleccionar aquellos que corresponden únicamente al territorio continental ecuatoriano, y mediante códigos, ser exportados a una base de datos para que sean compatibles con la plataforma de trabajo que se escogió, en este caso, un Sistema de Información Geográfica (SIG). A través del SIG se convirtió las referencias geográficas al sistema de proyección y coordenadas escogidas para el país, en este caso Universal Transverse de Mercator, WGS84, Zona 17 Sur.

La filtración de celdas, dio una cobertura de 472 puntos sobre el territorio continental Ecuatoriano en celdas de 40 Km x 40 Km, que provienen de los datos originales. Esta versión del Atlas contiene al momento información sobre el Ecuador continental.

Los datos así, a través de su base de datos de respaldo, fueron analizados estadísticamente para conocer su comportamiento y de esta manera escoger el interpolador que se asemeje de mejor manera al fenómeno analizado, una vez escogido el interpolador, se obtuvieron celdas de información con una resolución de 1 Km<sup>2</sup>.

Este proceso se repitió para cada mes dentro de las insolaciones directa, difusa y global, obteniéndose un total de 36 mapas mensuales, más 3 que corresponden a los promedios anuales, dando un juego de 39 mapas.

Cada grilla obtenida a través de este proceso, generó una base de datos de aproximadamente 248 000 puntos para cada cobertura en celdas de 1 Km<sup>2</sup>, dando un total de 9 600 000 registros con información de los tres tipos de insolaciones.”[CONELEC (2008)]

1.3.1. Mapa solar del Ecuador

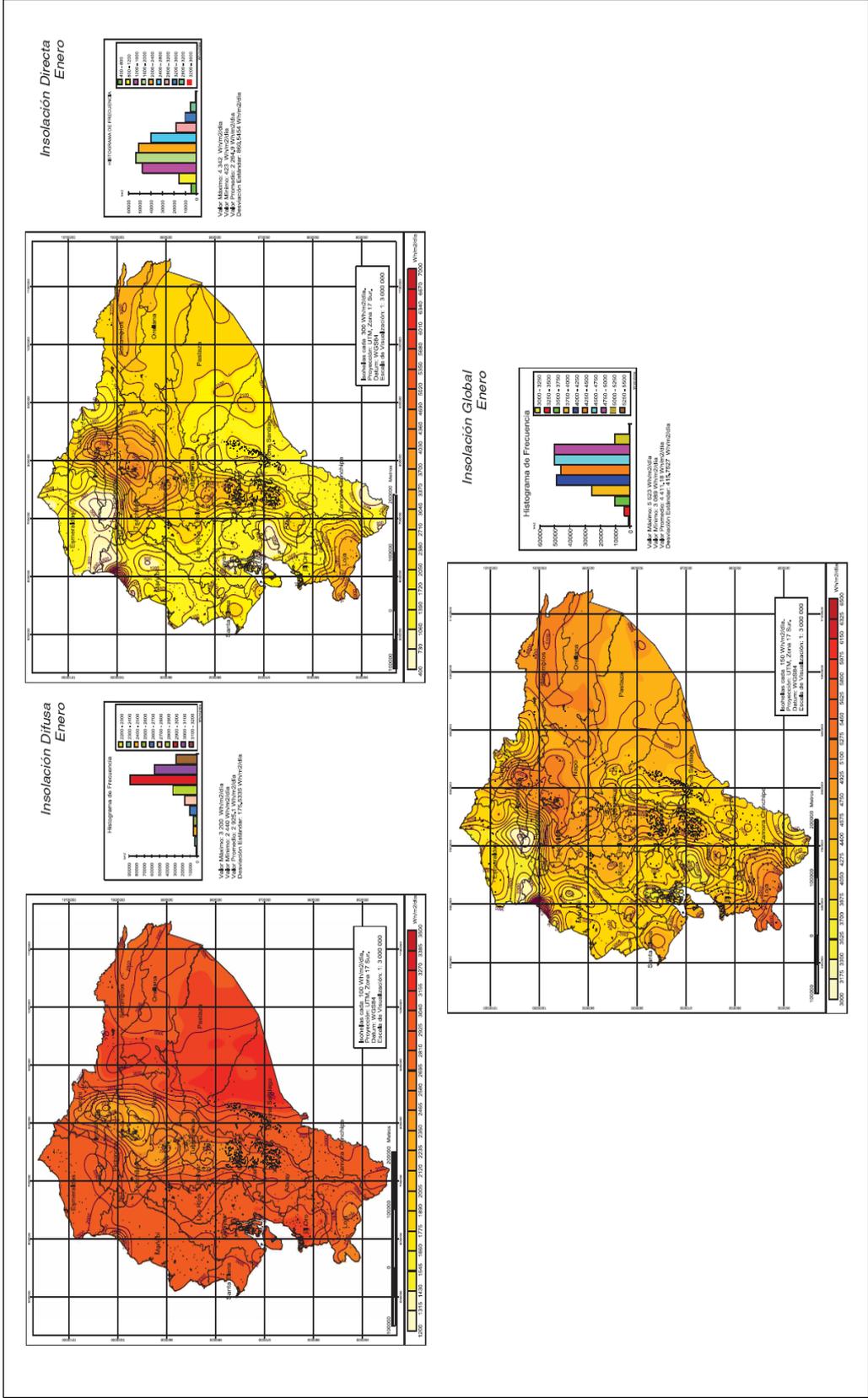


Figura 1.3 Insolación Mes de Enero  
Fuente: CONELEC; (2008);

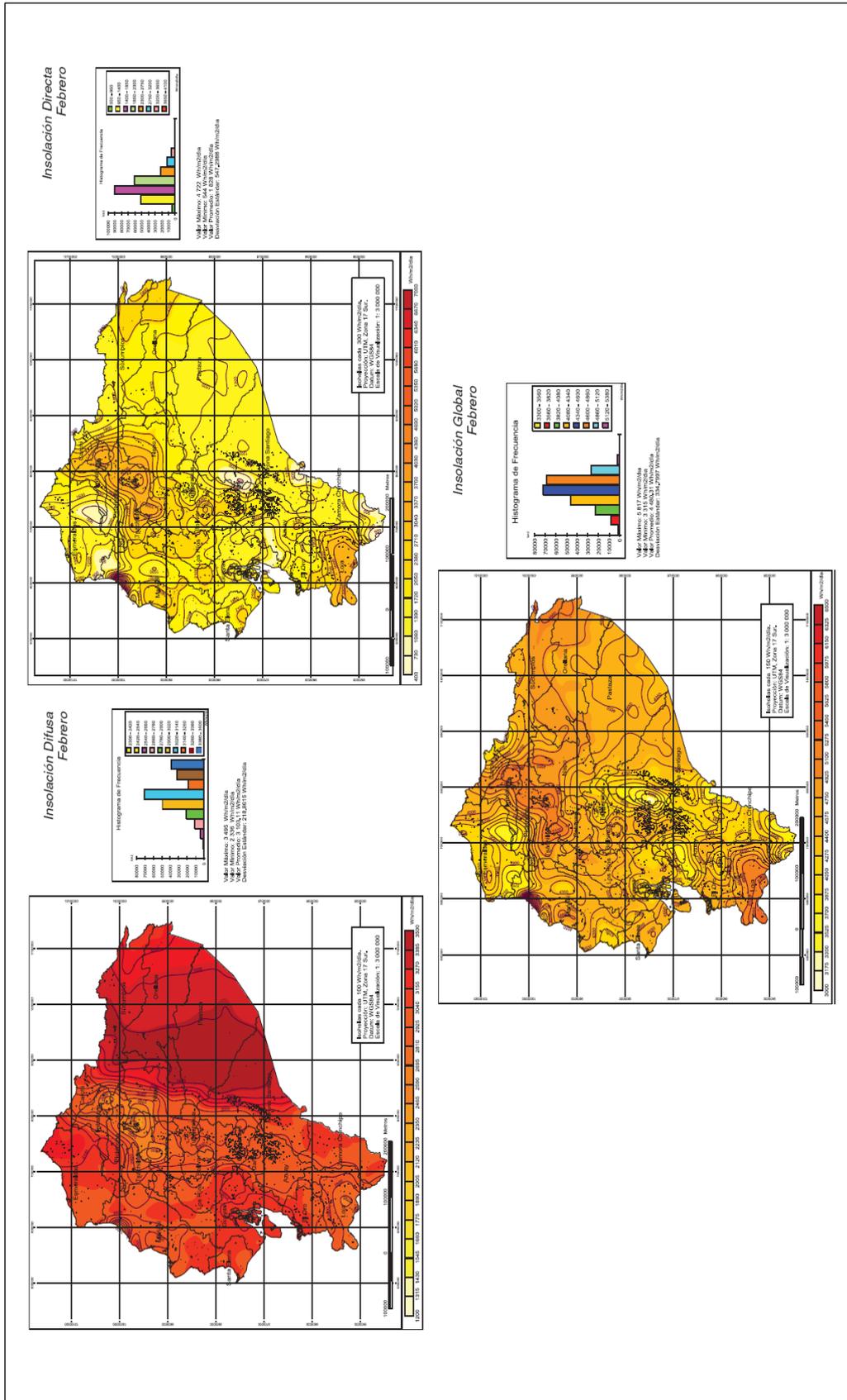


Figura 1.4 Insolación Mes de Febrero  
Fuente: CONELEC; (2008);

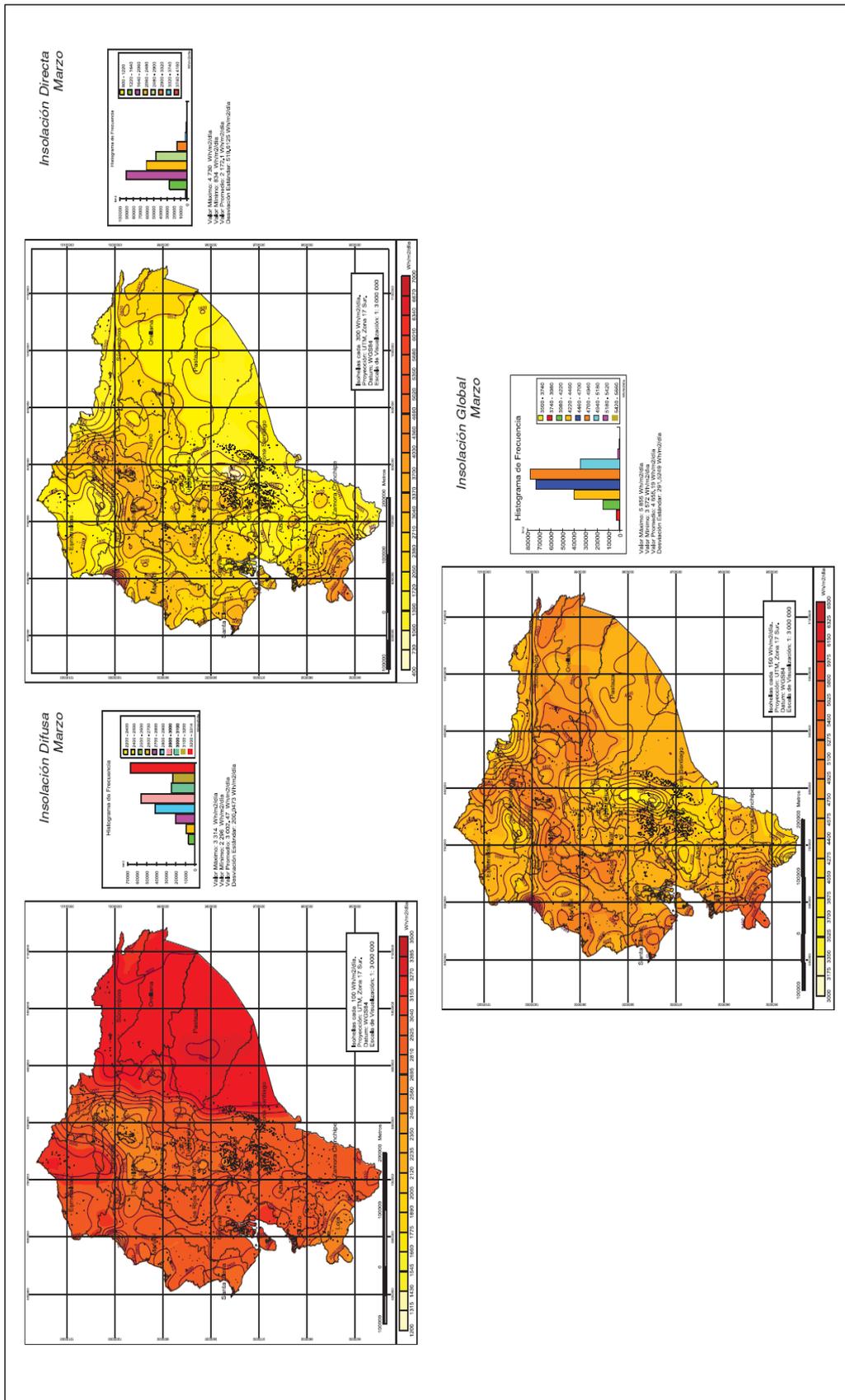


Figura 1.5 Insolación Mes de Marzo  
Fuente: CONELEC; (2008);

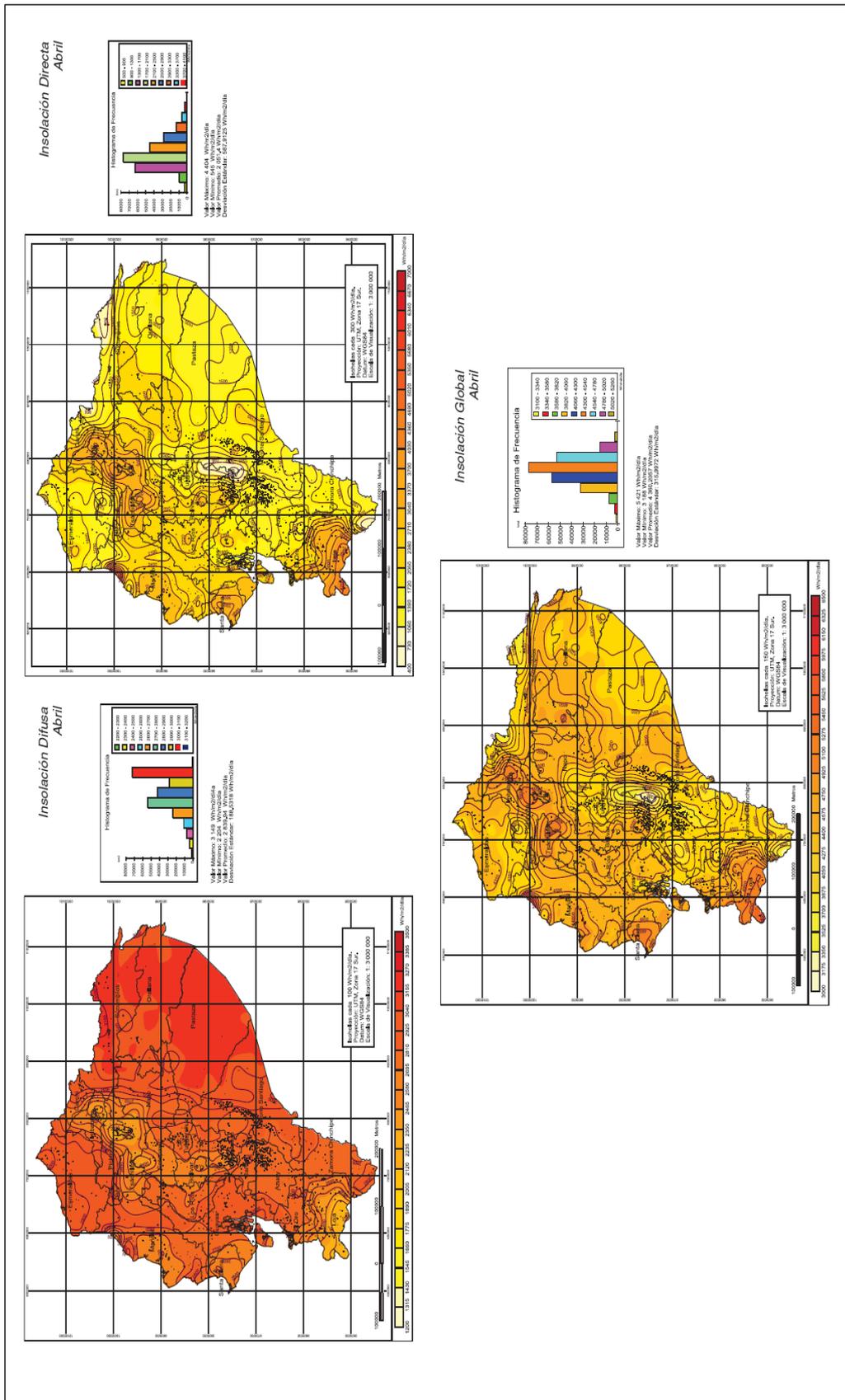


Figura 1.6 Insolación Mes de Abril  
Fuente: CONELEC; (2008);

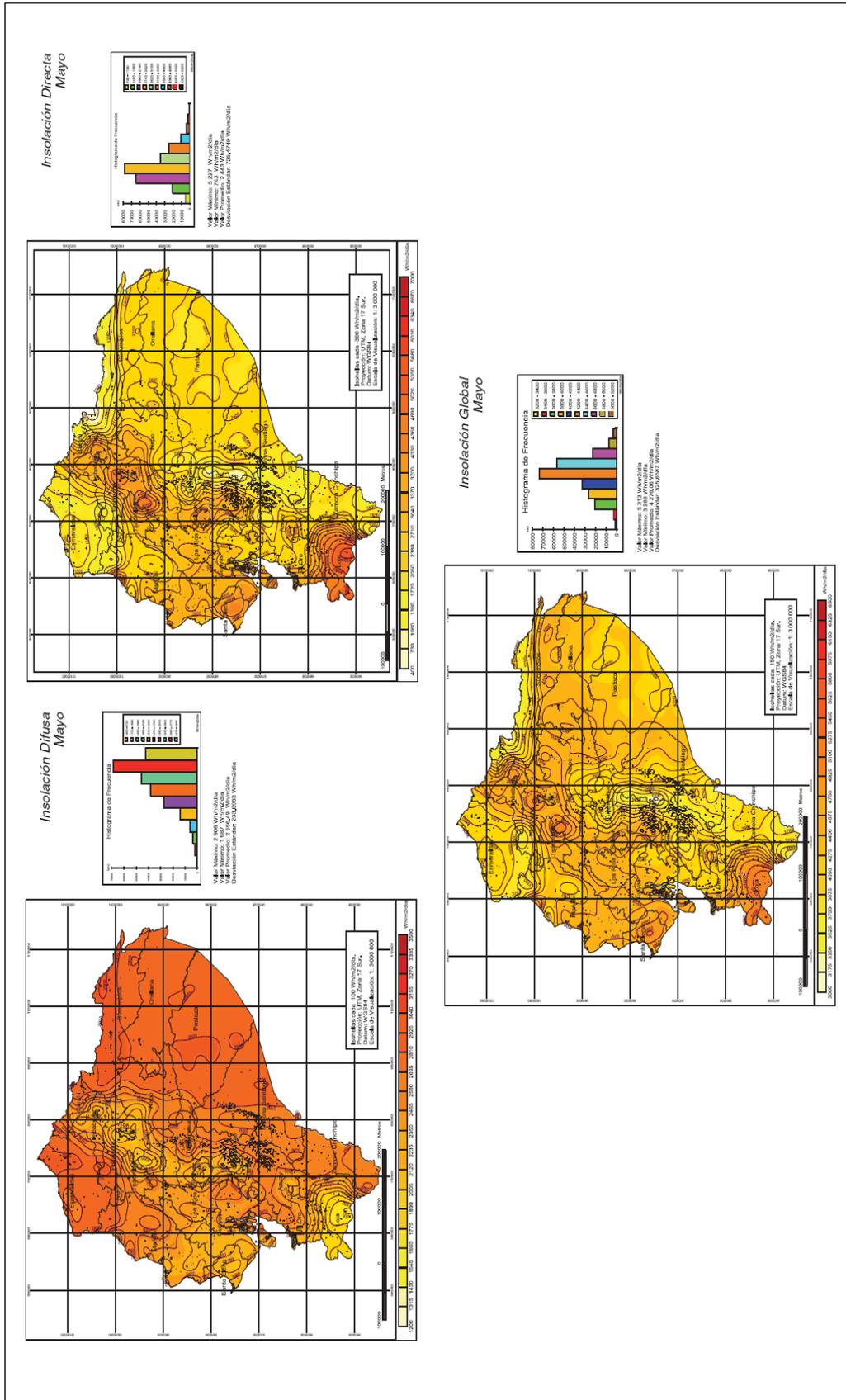


Figura 1.7 Insolación Mes de Mayo  
Fuente: CONELEC; (2008);



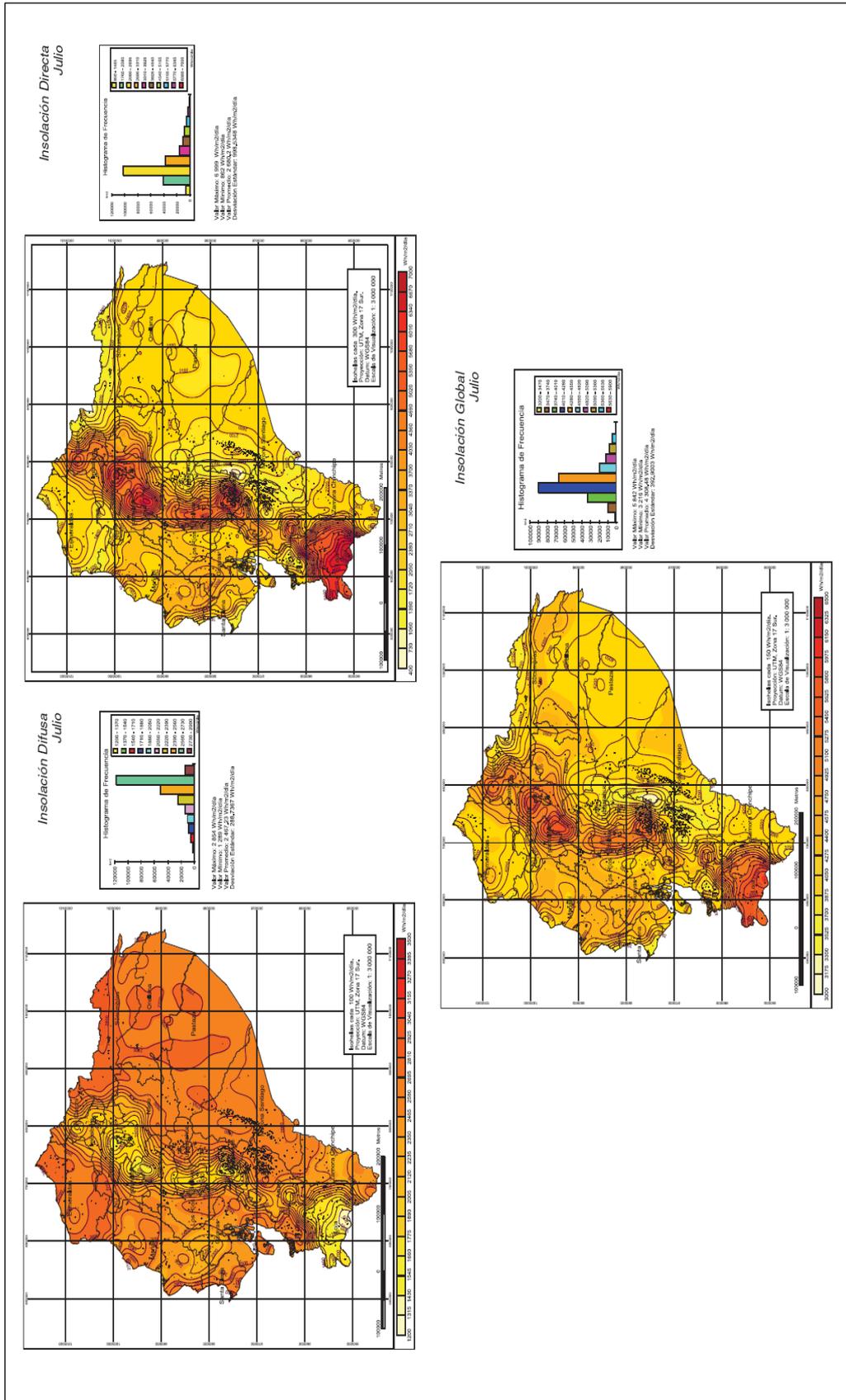


Figura 1.9 Insolación Mes de Julio  
Fuente: CONELEC; (2008);

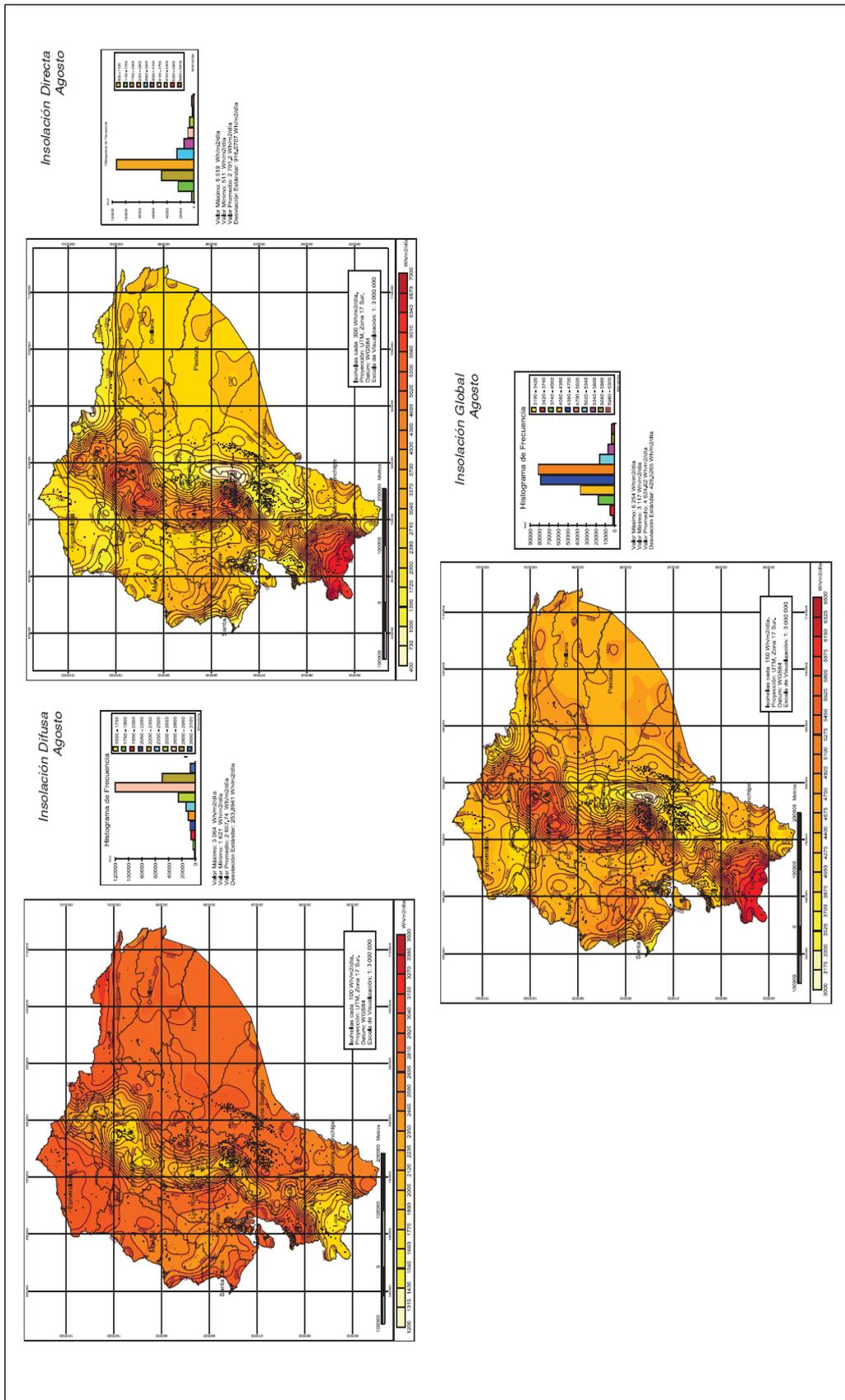


Figura 1.10 Insolación Mes de Agosto  
Fuente: CONELEC; (2008);

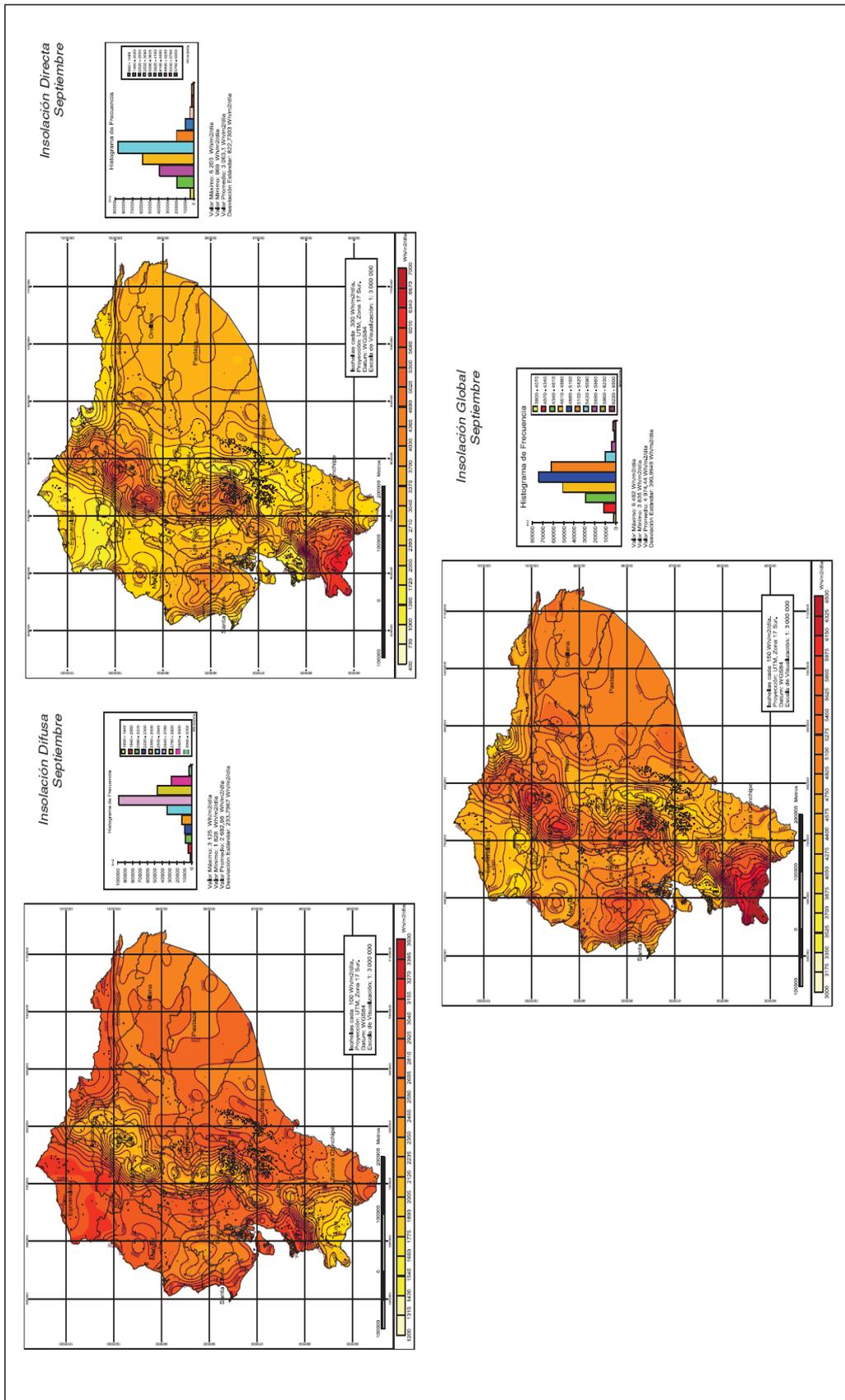


Figura 1.11 Insolación Mes de Septiembre  
Fuente: CONELEC; (2008);

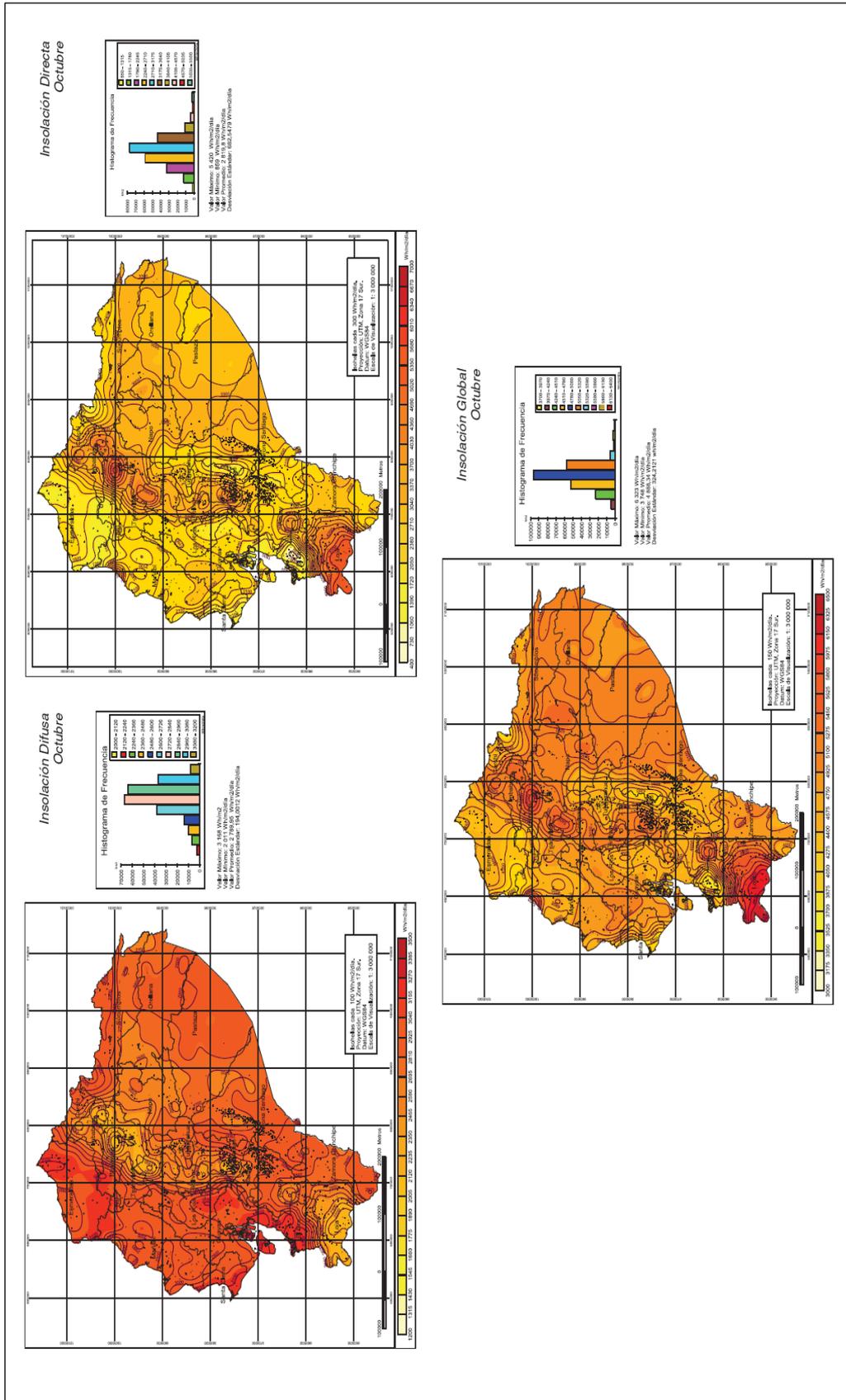


Figura 1.12 Insolación Mes de Octubre  
Fuente: CONELEC; (2008);

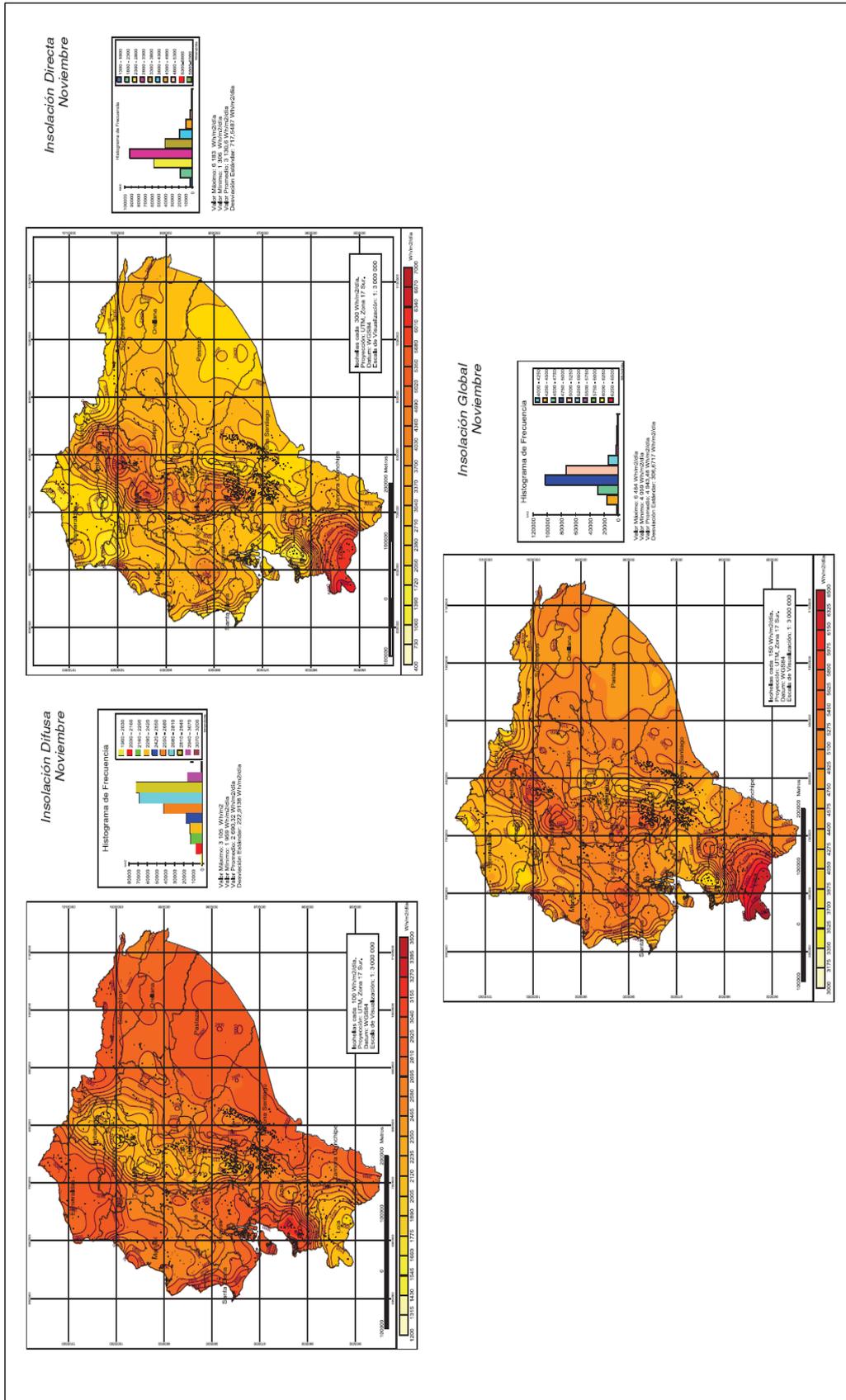


Figura 1.13 Insolación Mes de Noviembre  
Fuente: CONELEC; (2008);

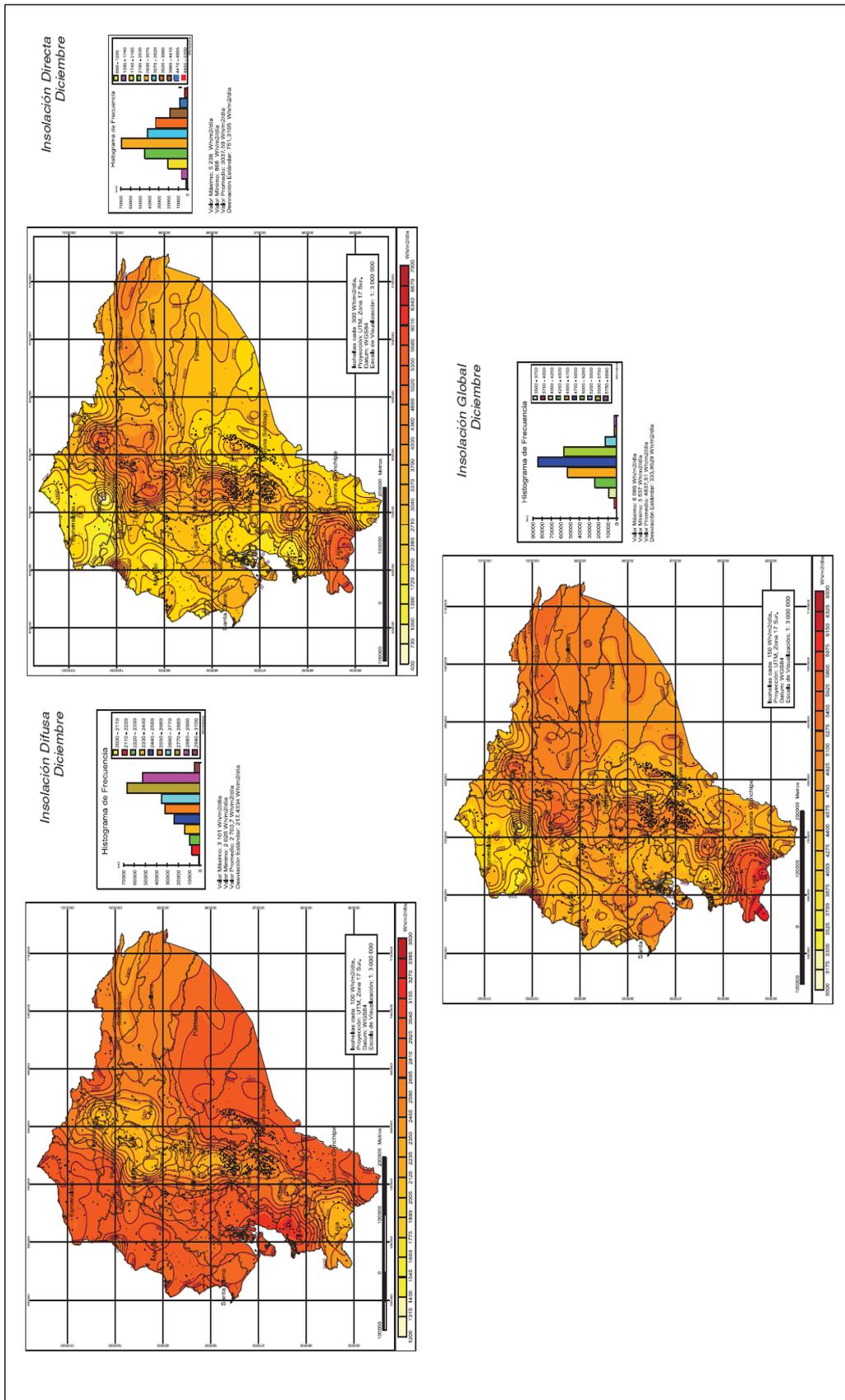


Figura 1.14 Insoleación Mes de Diciembre  
Fuente: CONELEC; (2008).

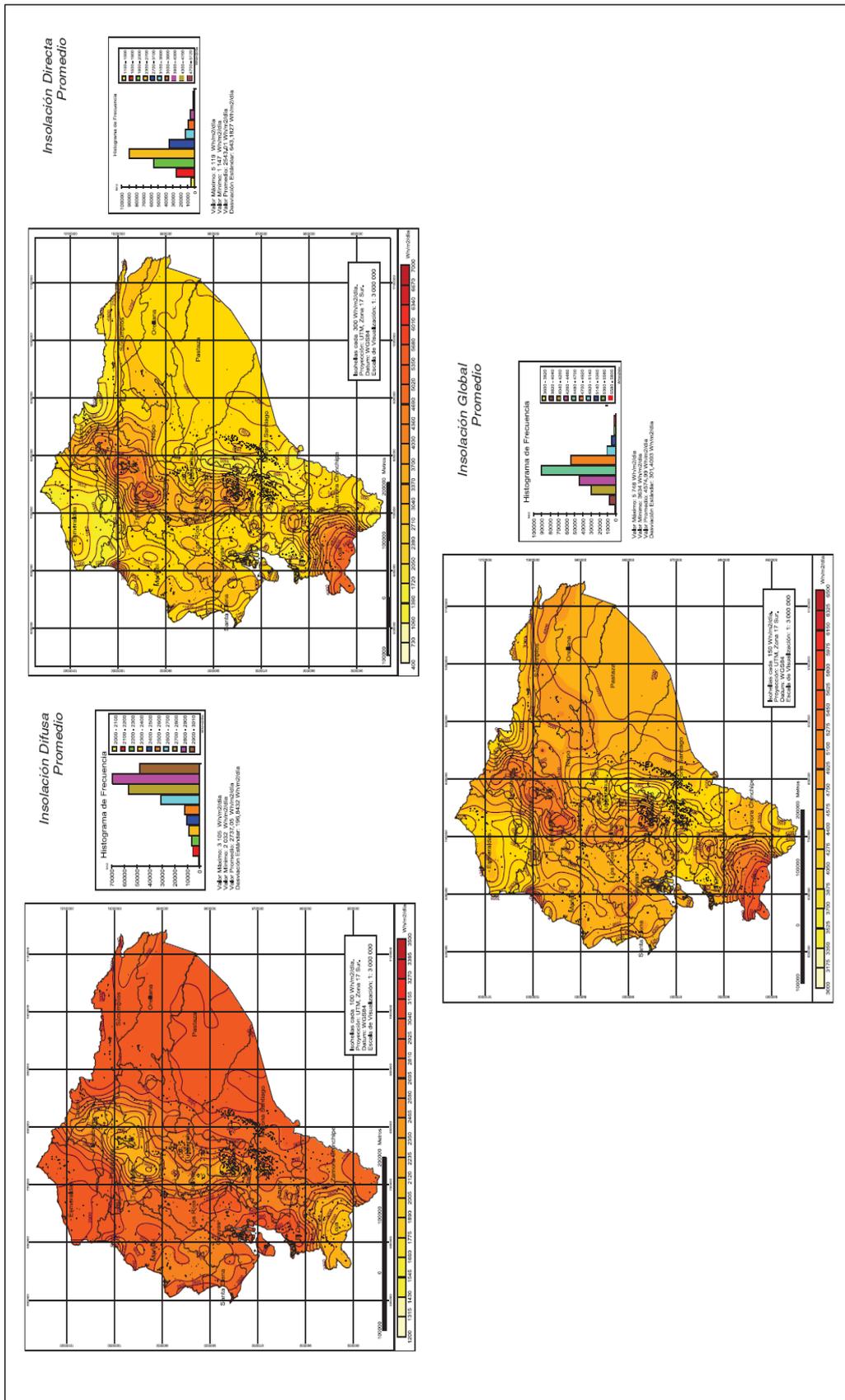


Figura 1.15 Insolución Global  
Fuente: CONELEC; (2008).

#### **1.4. Conclusiones**

El sol es la principal fuente de energía que tiene nuestro planeta, el Ecuador debido a su posición geográfica y características topográficas muy variadas, de gran diversidad climática y condiciones únicas que le brindan un elevado potencial para la generación de energías renovables y limpias.

El Ecuador recibe una inmensa cantidad de energía directa a la largo del año debido a su ubicación.

La información proporcionada por los mapas incluye la cuantificación de la radiación solar que recibe nuestro país durante todo el año, en base a mapas mensuales de insolación directa, global y difusa, con el fin de ubicar proyectos que permitan utilizar esta energía para diversas aplicaciones.

## CAPÍTULO 2

### **PRINCIPIOS Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA STIRLING PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA RADIACIÓN SOLAR**

#### **2.1. INTRODUCCION**

Robert Stirling vivió en los primeros tiempos de las máquinas de vapor, cuando éstas explotaban con cierta frecuencia hiriendo gravemente a quienes trabajaban cerca. Preocupado por la peligrosidad de las máquinas de vapor decidió investigar en máquinas más seguras. Las investigaciones y el trabajo de Stirling dieron el desarrollo del motor que hoy lleva su nombre, por su fundamento el motor inventado por Stirling no podía estallar, además su rendimiento era superior a los motores de vapor, generando más trabajo a partir de la misma cantidad de combustible.

No obstante, el motor Stirling tenía el inconveniente de generar menos potencia que la máquina de vapor y otros motores en igualdad de tamaño y peso, razón por la que no desplazaron a las otras máquinas y motores.

En la actualidad el motor Stirling es objeto de diferentes líneas de investigación y desarrollo un campo abierto es la generación de energía cerca del punto de consumo, es decir, podrían producirse mini centrales adecuadas a un pueblo o distrito. De este modo la generación de electricidad se adaptaría al consumo de la zona y se evitarían las pérdidas ocasionadas como consecuencia del transporte y redes de distribución en largas distancias.

Los sistemas Stirling presentan una alta eficiencia en la conversión de la radiación solar en energía eléctrica, entre 25-30%, en condiciones nominales de operación. Además, se pueden alcanzar temperaturas entre 650° C y 800°C y eficiencias nominales en los motores Stirling entre 30-40%. [Sanzol]

## **2.2. Motores Stirling**

El ciclo Stirling es el ciclo termodinámico más eficiente para transformar calor en energía mecánica o eléctrica. Entre las características de un motor Stirling destaca que es un motor de combustión externa, dependiendo su funcionamiento del aporte de calor externo que se realice, con independencia del modo en que se genere dicho calor. Además, el motor Stirling casi no produce ruido o vibraciones y posee un ciclo de vida potencial extraordinariamente alto, ya que no hay contaminación interna de los pistones, cojinetes, ni degradación del lubricante al no existir combustión de combustibles fósiles.

El motor en un sistema disco Stirling convierte el calor en energía mecánica de una manera similar a los motores convencionales, por la compresión de un fluido de trabajo cuando está frío, el cual se calienta durante la compresión y que, a continuación, se expande a través de una turbina o con un pistón para producir trabajo. Posteriormente, la energía mecánica se convertirá en energía eléctrica gracias a un generador de energía eléctrica o alternador.

Existen diversos ciclos termodinámicos y fluidos de trabajo que pueden funcionar con sistemas disco-motor. Estos incluyen los ciclos de Rankine, utilizando agua o un fluido de trabajo orgánico; Brayton, abierto y ciclos cerrados, y los ciclos de Stirling. Los motores más utilizados son por lo general el Stirling y el ciclo abierto de Brayton. En estos sistemas disco-motor el calor también puede ser suministrado por un quemador de gas suplementario para permitir funcionamiento durante tiempo nublado y por la noche.

### **2.2.1. Ciclo de Stirling**

Los motores de ciclo Stirling utilizados en sistemas solares de alta temperatura utilizan hidrógeno o helio como gas de trabajo. La temperatura de trabajo del gas puede llegar a sobrepasar los 700°C. En el ciclo Stirling, el fluido de trabajo es alternativamente calentado y enfriado en procesos a temperatura constante y a volumen constante. Por lo general los motores Stirling incorporan un regenerador para conseguir una mejora de la eficiencia. El regenerador capta el calor durante la refrigeración a volumen constante y lo suministra cuando el gas se calienta a

volumen constante. La Figura 2.1. se muestra los cuatro procesos básicos de un motor de ciclo Stirling.

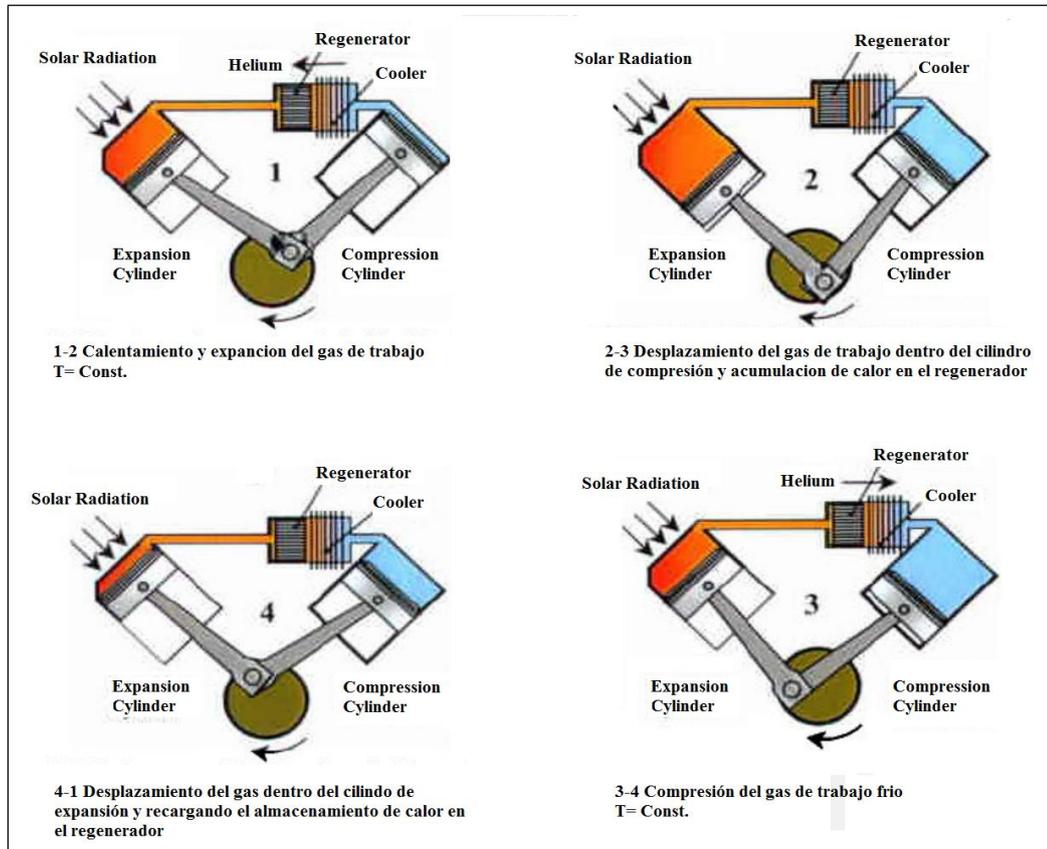


Figura 2.1 Ciclos de Stirling

Fuente: Proyecto de Generación Energía con Disco Parabólico – Stirling  
[http://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/PROYECTO\\_energ%C3%ADa\\_%20solar\\_Zabalza\\_Rev%201.pdf](http://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/PROYECTO_energ%C3%ADa_%20solar_Zabalza_Rev%201.pdf)

Un motor Stirling consiste en un sistema herméticamente cerrado con dos cilindros el de expansión y el de compresión, lleno de un gas de trabajo. Los pistones de esos cilindros están conectados a un cigüeñal. Cuando el gas de trabajo en el cilindro de expansión es calentado por el sol, este se expande debido al aumento de temperatura, empujando el pistón hacia abajo (Figura 2.1. 1-2) induciendo potencia. Parte de esa potencia se utiliza para empujar el fluido de trabajo caliente desde el cilindro de expansión hacia el cilindro de compresión (Figura 2.1. 2-3). En su recorrido, el gas de trabajo atraviesa el regenerador donde la mayor parte de su calor es almacenado. Entonces pasa a través de un enfriador de gases refrigerado donde se enfriará (Figura 2.1. 2-3). Una vez que el gas de trabajo se encuentre completamente en el cilindro de

compresión, este pistón sube debido a la inercia del cigüeñal, comprimiendo el gas de trabajo a baja temperatura (Figura 2.1. 3-4).

El gas vuelve al cilindro de trabajo reabsorbiendo el calor cedido en el regenerador (Figura 2.1. 4-1).

La expansión total del gas caliente en el cilindro de trabajo entrega más energía de la necesaria para la compresión del gas frío en el cilindro de compresión. Este excedente de energía puede ser utilizado para hacer funcionar un generador eléctrico conectando su eje directamente al cigüeñal del motor.[Universidad Carlos III de Madrid (2009)]

### **2.3. Descripción del sistema Stirling**

Los sistemas de disco parabólico son pequeños equipos de generación de energía que convierten la energía térmica de la radiación solar en energía mecánica y luego en energía eléctrica. Como se indica en la Figura 2.2, los sistemas disco parabólico utilizan un espejo para reflejar y concentrar la radiación proveniente de los rayos del sol en un receptor, con el fin de alcanzar las temperaturas necesarias para convertir eficientemente el calor en trabajo. La radiación solar concentrada es absorbida por el receptor y transferida a un motor. Esto exige que el plato siga la trayectoria del sol en dos ejes.

Los sistemas disco motor se caracterizan por una gran eficacia, modularidad, funcionamiento autónomo, y una inherente capacidad híbrida la capacidad para operar o con energía solar o con combustible fósil, o ambas cosas. De todas las tecnologías solares, los sistemas disco Stirling han demostrado el más alto potencial para convertirse en una de las menos costosas fuentes de energía renovables.



Figura 2.2 Central Disco Parabólico, Plataforma Solar de Almería

Fuente: <https://www.psa.es/webesp/instalaciones/discos.php>

La modularidad del sistema le permite operar de manera individual para aplicaciones remotas, o agruparse en pequeños grupos y conectarse a la red.

Esta tecnología se encuentra en la etapa de desarrollo y los técnicos siguen enfrentándose con desafíos en relación con los componentes más idóneos para trabajar con energía solar y con la capacidad comercial de un motor capaz de funcionar con la energía del sol. A continuación se describen los componentes del sistema disco Stirling.

#### 2.4. Componentes del sistema

Básicamente un sistema disco Stirling consta de los componentes que se pueden observar en la Figura 2.3:

- Concentrador solar parabólico.
- Sistema de seguimiento del sol.
- Receptor de calor.
- Motor Stirling con generador.
- Equipos auxiliares

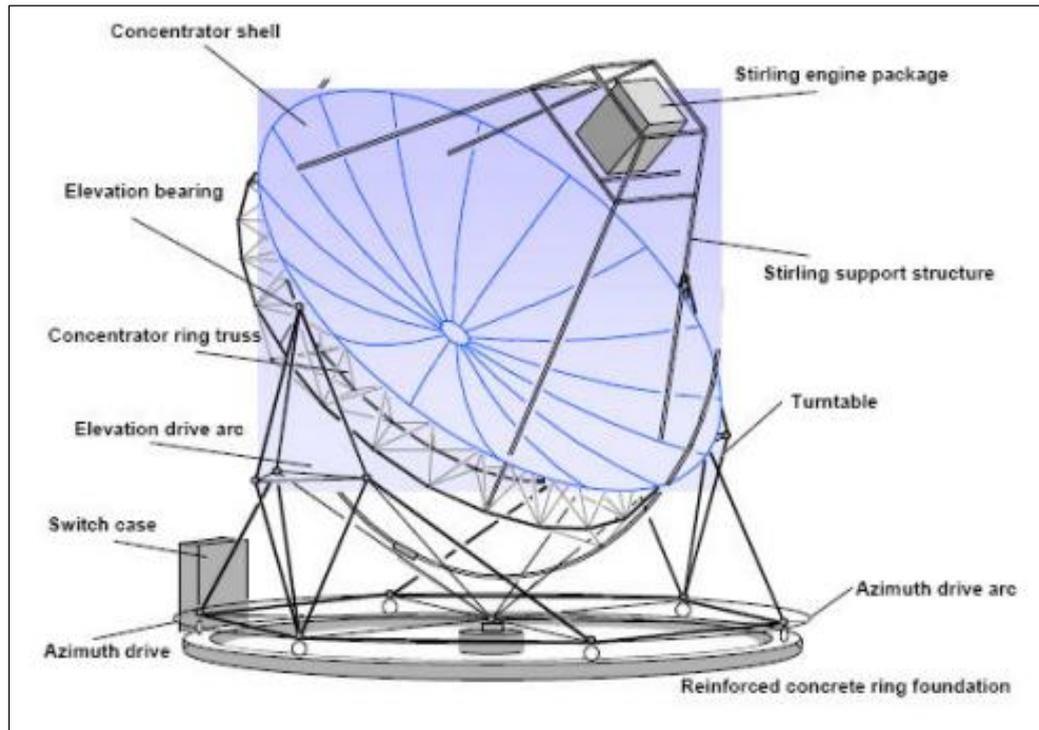


Figura 2.3 Elementos básicos de un sistema disco Stirling. Prototipo Eurodish.

Fuente: <http://osservamondo.com/2010/04/18/200-anni-di-sviluppo-per-stirling/>

#### 2.4.1. Concentradores solares

Los concentradores utilizan superficies reflectantes de diversos materiales, las superficies de reflexión más duraderas han sido espejos de plata y vidrio, similares a los espejos decorativos utilizados en el hogar. Los intentos de desarrollar a bajo coste películas reflectantes poliméricas han tenido un éxito limitado debido a su rápida degradación, el concentrador ideal es un paraboloide de revolución pues estos concentradores reflejan la radiación solar incidente en un pequeño punto llamado foco.

##### 2.4.1.2 La parábola

Se llama parábola al lugar geométrico de los puntos del plano que equidistan de un punto fijo, llamado foco, y de una recta fija llamada directriz.

## Elementos de la parábola

### Directriz

La Directriz es la recta sobre la cual si medimos su distancia hasta un punto cualquiera de la parábola, esta debe ser igual a la distancia de este mismo punto al Foco.

### Eje Focal

El eje focal es la recta perpendicular a la directriz que pasa por el foco.

### Vértice

Es el punto en el cual la parábola corta el eje focal.

### Lado Recto o Ancho Focal

Es un segmento paralelo a la directriz, que pasa por el foco y es perpendicular al eje focal y sus extremos son puntos de la parábola(A, B).

### Parámetro

La distancia entre el vértice y la directriz que es la misma desde el vértice hasta el foco de una parábola recibe el nombre de parámetro de la parábola (suele denotarse por P).

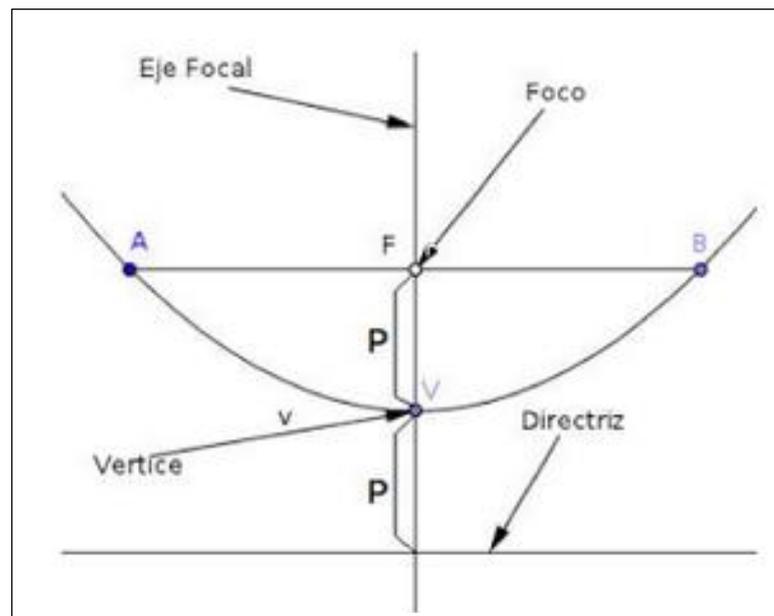


Figura 2.4. Elementos de la parábola.

Fuente: <http://eljavismr.blogspot.com/2011/11/forma-simple-de-la-parabola.html>

### 2.4.1.3. Ecuación Simple de la parábola

Obtenemos una ecuación simplificada para una parábola, si colocamos su vértice en el origen y su directriz paralela al eje x.

Si sabemos que su diámetro es 60 cm y foco se encuentra a 20 cm del centro entonces obtenemos:

$$x^2 = 80y$$

Ecuación 2.1. Ecuación de la parábola.

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Par%C3%A1bola\\_\(matem%C3%A1tica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Par%C3%A1bola_(matem%C3%A1tica))

### 2.4.1.4. Espejos esféricos

Entre los elementos de un espejo esféricos se pueden destacar las siguientes leyes:

- Todo rayo que incide de paralelo al eje principal se refleja por el foco
- Todo rayo que incide por el foco se refleja paralelo al eje vertical
- Todo rayo que incide por el eje de curvatura se refleja en la misma dirección
- Si dos rayos de luz son paralelos se interceptan el eje focal

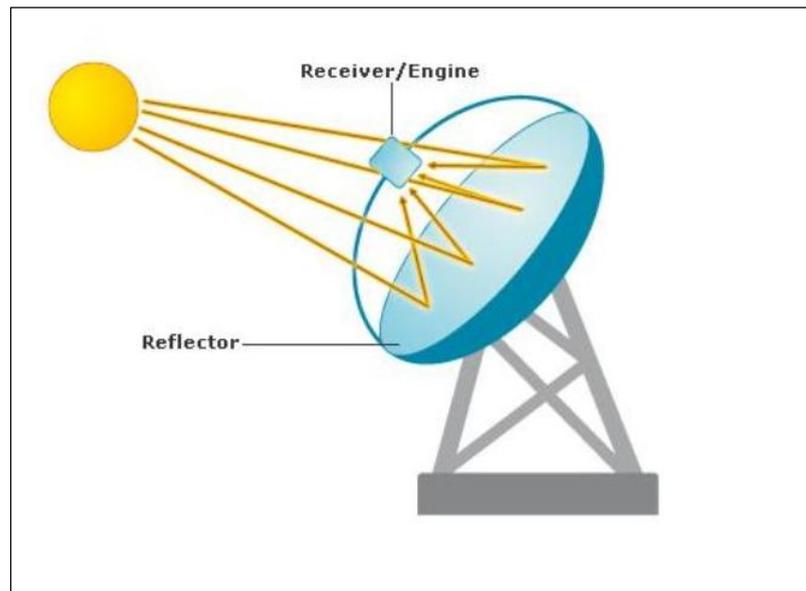


Figura 2.5. Concentrador solar.

Fuente: <http://eljavismr.blogspot.com/2011/11/forma-simple-de-la-parabola.html>

### 2.4.2. Sistemas de control de seguimiento.

El seguimiento en dos ejes se puede realizar de dos maneras:

- Seguidores de un eje: Se denomina de esta forma a seguidores que solo gozan de un grado de libertad en su movimiento, son sistemas simples, de bajo costo ideales para instalarlos en cubiertas.
- Seguidores a dos ejes: Se trata de seguidores con dos grados de libertad, capaces de hacer un seguimiento solar mas Preciso, incrementos de producción en torno al 35% con respecto a una planta fija.

#### 2.4.2.1. El sistema de control de lazo cerrado

Los sistemas de control de lazo cerrado proporcionan soluciones a problemas que dependen de condiciones ambientales El nombre de lazo cerrado proviene de la señal del sensor que vuelve al controlador, cerrando el lazo de control.

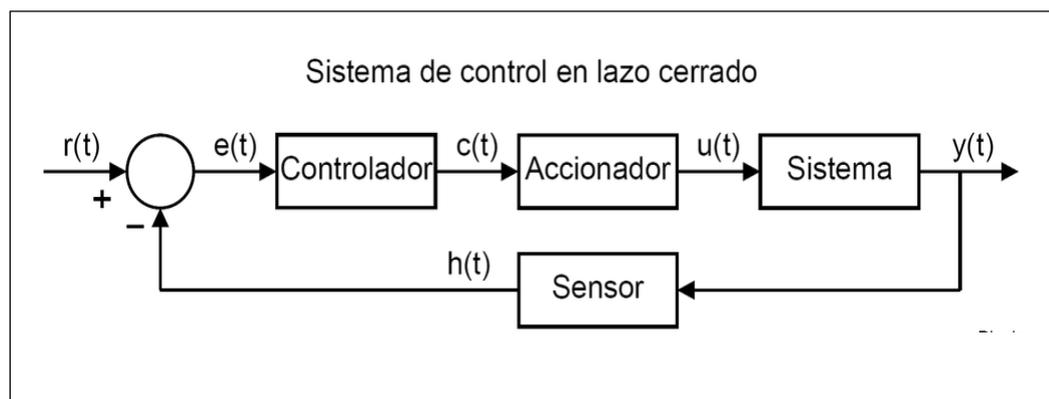


Figura 2.6. Sistema de control lazo cerrado

Fuente: [https://sites.google.com/site/picuinopid\\_controller](https://sites.google.com/site/picuinopid_controller)

**El sistema**, también llamado en ocasiones planta, es aquello que se desea controlar. En la central el sistema será el motor y la posición se desea controlar.

**El accionador** es el encargado de convertir la señal de control, que tiene poca potencia, en una acción sobre el sistema, que tiene mayor potencia. El accionador será el conjunto de transistores, relés y el motor que mueve el mecanismo.

**El controlador** está encargado de recibir una señal de entrada o señal de referencia y convertirla en una señal que consiga que el sistema alcance la referencia deseada.

**El sensor** mide el estado o variable a controlar en el sistema, Esto permite conocer el estado del sistema y corregir las desviaciones para que se pueda conseguir la respuesta deseada.

Por lo tanto tendríamos dos sistemas de control iguales integrados uno para el seguimiento Este-Oeste y otro para el control de la elevación asimutal, los sistemas tienen como entradas los valores de los sensores LDR y como salida los motores del seguidor.

#### 2.4.2.2. Diagramas de flujo del mecanismo de control del seguidor solar.

##### Diagrama de control Este-Oeste

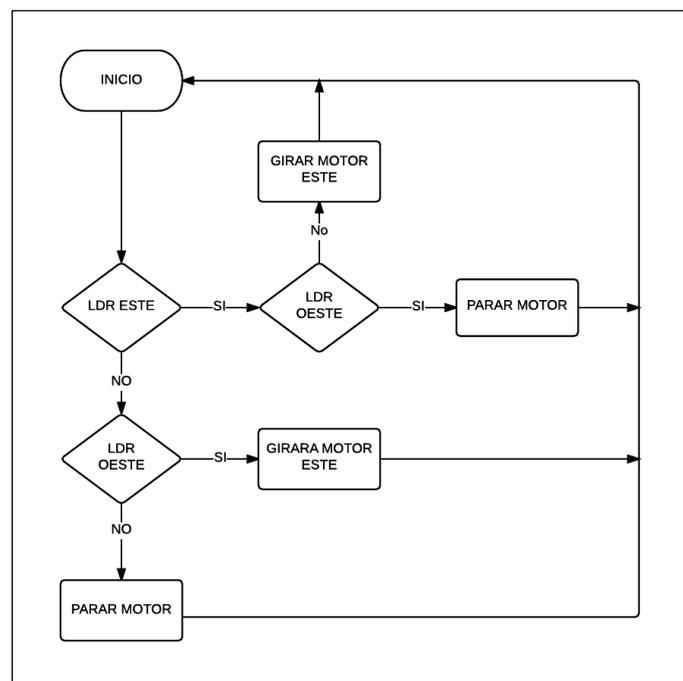


Figura 2.7. Diagrama de flujo de control Este-Oeste

### Diagrama de control azimuthal

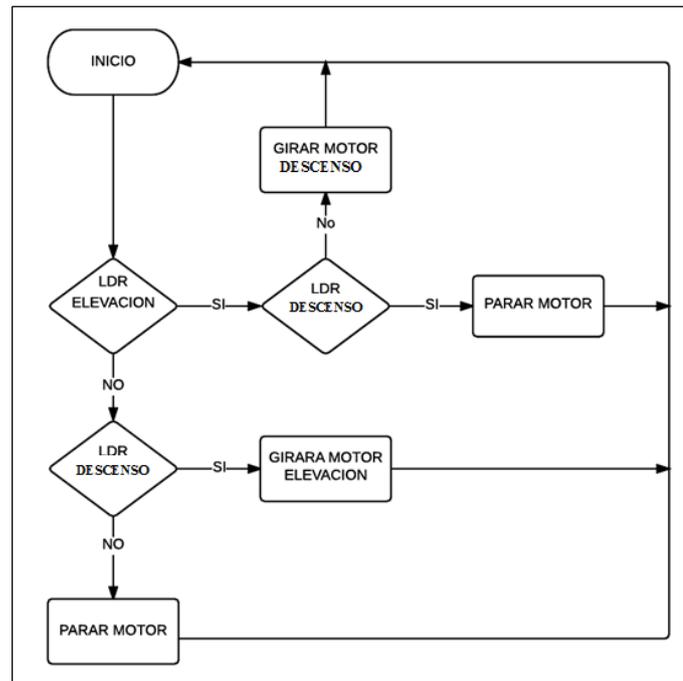


Figura 2.8. Diagrama de flujo de control azimuthal

#### 2.4.3. Receptor

El receptor es el enlace entre el concentrador y el motor Stirling. Tiene dos tareas fundamentales:

- Absorber la radiación solar reflejada por el concentrador.
- Transmitir esta energía absorbida al motor Stirling en forma de calor con las mínimas pérdidas.

Los receptores empleados en los discos parabólicos son receptores de cavidad, aunque el empleo de receptores externos presenta algunas ventajas para sistemas de baja temperatura, en los que la radiación concentrada entra por una apertura situada en el foco del paraboloide, incidiendo posteriormente sobre el absorbedor.

De esta forma se consiguen disminuir las pérdidas radiativas y convectivas, así como homogeneizar el flujo radiante incidente sobre el absorbedor y reducir su valor máximo.

## **2.5. Equipos auxiliares**

### **Alternador**

El alternador es el dispositivo de conversión de la energía mecánica en eléctrica utilizado en los sistemas disco Stirling. Los motores Stirling utilizan generadores de inducción para poder acoplarse a la red. Al sincronizarse los generadores con la red estos pueden suministrar potencia trifásica, ya sea a 230 o a 460 voltios. Estos generadores son capaces de convertir la energía mecánica en electricidad con una eficiencia de alrededor del 94%. El sistema dispone de unos inversores que convierten la corriente continua en alterna. Ello permite emplear máquinas de corriente continua como generadores, pudiendo funcionar a régimen de giro variable, teniendo con ello más flexibilidad para adaptarse a la demanda de electricidad instantánea.

### **Controladores**

El modo de funcionamiento autónomo se logra mediante el uso de controladores electrónicos situados en el plato para el control de la función de seguimiento y para regular el funcionamiento del motor. Algunos sistemas utilizan un controlador de motor por separado. En las grandes instalaciones existe un Sistema de Control y de Adquisición de Datos, que se utiliza para poder monitorizar y supervisar el funcionamiento del sistema, y para recoger sus principales datos de funcionamiento, de manera sincronizada con otras instalaciones de producción de energía eléctrica.

## **2.6. Sistemas de almacenamiento**

El subsistema de acumulación o banco de baterías, está formado una o varias baterías interconectadas en serie/paralelo, dependiendo del nivel de voltaje o de la máxima corriente de circulación.

### **2.6.1. Las baterías**

Las baterías son elementos que permiten el almacenamiento de energía eléctrica, constituyendo de esta forma una fuente de energía eléctrica portable generalmente están formadas por varias celdas de almacenamiento, de cada celda se extrae un voltaje nominal de 2Vcc, por lo cual se forman arreglos que suministren 6, 12, 24, 36 o 48 Vcc.

### Conexión interna de las celdas

Las placas de igual polaridad dentro de una celda están conectadas en paralelo mediante las barras de conexión entre placas. La conexión entre celdas se realiza al interconectar dos placas de polaridad opuesta a la barra de conexión entre celdas, de esta forma se establece una conexión serie entre celdas.

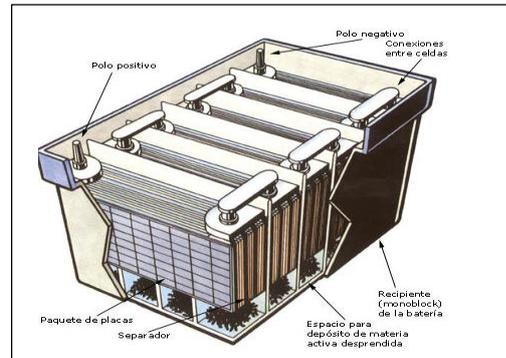


Figura 2.9. Conexión interna una batería.

Fuente: <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/16477597/Carga-de-Bateria-Gel-VS-Acido-a-la-hora-de-comprar.html>

### 2.6.2. Subsistema de regulación

El controlador de carga es el cerebro del sistema, sin la utilización de un controlador de carga no es posible proporcionar energía eléctrica de forma confiable y eficiente.

La misión del regulador de carga es de suma importancia, ya que se trabaja con una fuente de energía totalmente variable a lo largo del día y durante todo el año. Al no existir un sistema regulador, se pueden generar corrientes superiores a las corrientes de carga permitidas por el banco de baterías, esto ocasionaría que el electrolito pierda agua y cause el deterioro de los acumuladores.

Generalmente el control del estado de carga de las baterías se realiza por la medición del voltaje en bornes, usando los datos proporcionados por los diferentes fabricantes de baterías, ya que existe una relación entre estos parámetros. De esta forma, el circuito de control del regulador de carga sabe en qué momento debe empezar a actuar, limitando el voltaje y la corriente proporcionada por el generador.

El regulador controla constantemente el voltaje de los acumuladores durante el proceso de carga y descarga. Una vez que se ha completado la carga del acumulador,

el regulador interrumpe el paso de corriente, evitando de esta forma la pérdida del electrolito y un posible calentamiento de los acumuladores. Cuando el voltaje del acumulador desciende, el regulador vuelve a permitir el paso de corriente, recargando el acumulador.

La descarga excesiva de los acumuladores puede producir daños irreparables en su capacidad útil. Entonces el regulador emite una señal, indicando que se ha alcanzado el máximo nivel de descarga permitido, de esta forma el usuario puede evitar las descargas profundas preservando por tanto la vida útil de las baterías. Una vez que se llega al límite de descarga, el regulador desconecta automáticamente la carga, hasta que el banco de acumuladores recargue la suficiente energía, luego el regulador conecta la automáticamente la carga.

Ciertos reguladores informan del estado de carga de los acumuladores de forma continua para que el usuario pueda planificar y gestionar mejor el consumo, en función de la energía útil disponible.

Existen dos formas de realizar el control de carga: control en serie y control en paralelo. La figura 2.8 presenta como las dos versiones varían el valor de la corriente de carga.[Universidad de Cuenca (2012)]

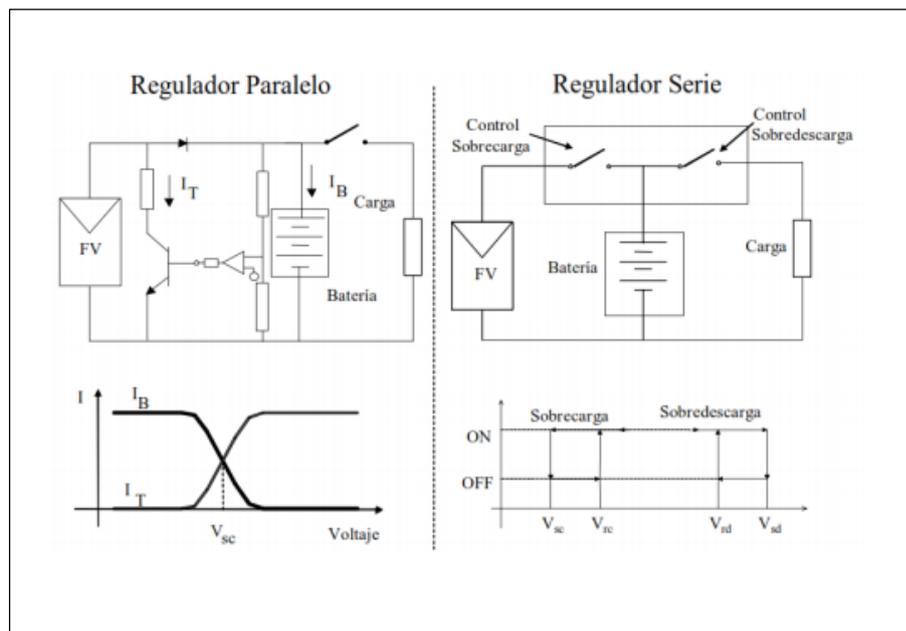


Figura 2.10. Sistema de regulador de carga en serie y paralelo

Fuente: <http://dSPACE.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/689/1/te321.pdf>

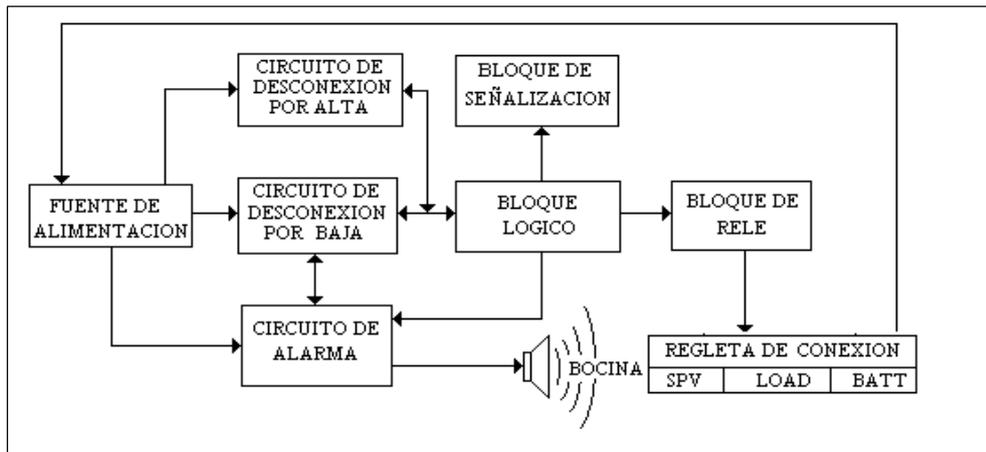


Figura 2.11. Diagrama de bloque de un controlador de carga

Fuente: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar04/images/2-1.gif>

## 2.7. Conclusiones

Un sistema disco Stirling convierte radiación del sol en energía mecánica de una manera similar a los motores convencionales, con la ayuda de sistemas complementarios como un generador y un regulador de carga podemos convertir esta energía mecánica en eléctrica de forma confiable y eficiente ya sea en sistemas aislados o interconectados a la red primaria.

Una parte en la que se debe tener especial cuidado es el control, el uso de sistemas electrónicos para cada subsistema es fundamental en este tipo de centrales termoeléctricas.

## CAPÍTULO 3

### CONTROL DEL SISTEMA STIRLING PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA RADIACIÓN SOLAR.

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de su historia el hombre ha observado el sol para realizar las construcciones más magníficas de la Tierra; el sistema del seguidor solar es un conjunto electromecánico articulado con partes fijas y móviles que interactúan en conjunto como una unidad buscando el objetivo de maximizar el rendimiento del sistema Stirling.

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados.

#### 3.2. Geometría solar

Los movimientos de rotación y traslación terrestres son responsables de los cambios climáticos y estaciones las cuales presentan rasgos particulares según la altitud y coordenadas terrestres.

Las estaciones son consecuencia del eje de rotación de la Tierra, ya que éste no es perpendicular respecto al plano de la eclíptica, sino que tiene una inclinación de  $23^{\circ} 27'$ . En el Solsticio de Verano, 21 de junio, el Hemisferio Norte se inclina hacia el Sol. Los días son más largos que las noches y los rayos del Sol inciden de forma más perpendicular, al situarse el Sol en la vertical del Trópico de Cáncer, en el equinoccio de Primavera, 21 de marzo, los días y las noches tienen igual duración en todo el planeta, al situarse de nuevo el Sol en la vertical del Ecuador.

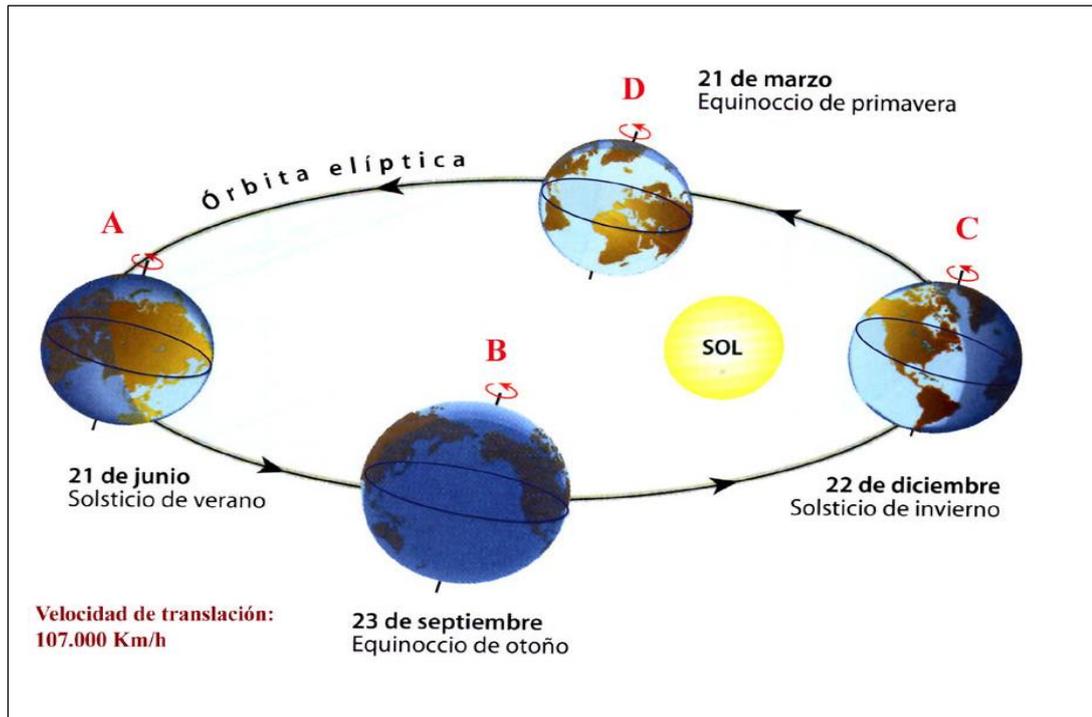


Figura 3.1. Posición de la Tierra con respecto al sol

Fuente: <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/Astrof/users/ncl/lucia-crespo/Latierra.html>

Dependiendo de la estación del año y de las coordenadas en las que el colector solar se encuentre, variará su elevación.

La elevación es el ángulo que forma la dirección del Sol, su vector unitario  $\bar{s}$ , con el plano horizontal del lugar, que equivaldrá en este caso al vector unitario  $\bar{n}$  normal a la superficie de abertura del concentrador solar.

El sol sigue un movimiento de este a oeste respecto a la tierra. La posición del sol viene definida por su altitud sobre el horizonte, y por su azimut que es ángulo formado entre la proyección en el plano horizontal de la línea que une el Sol a la Tierra y el eje norte-sur en el mismo plano.

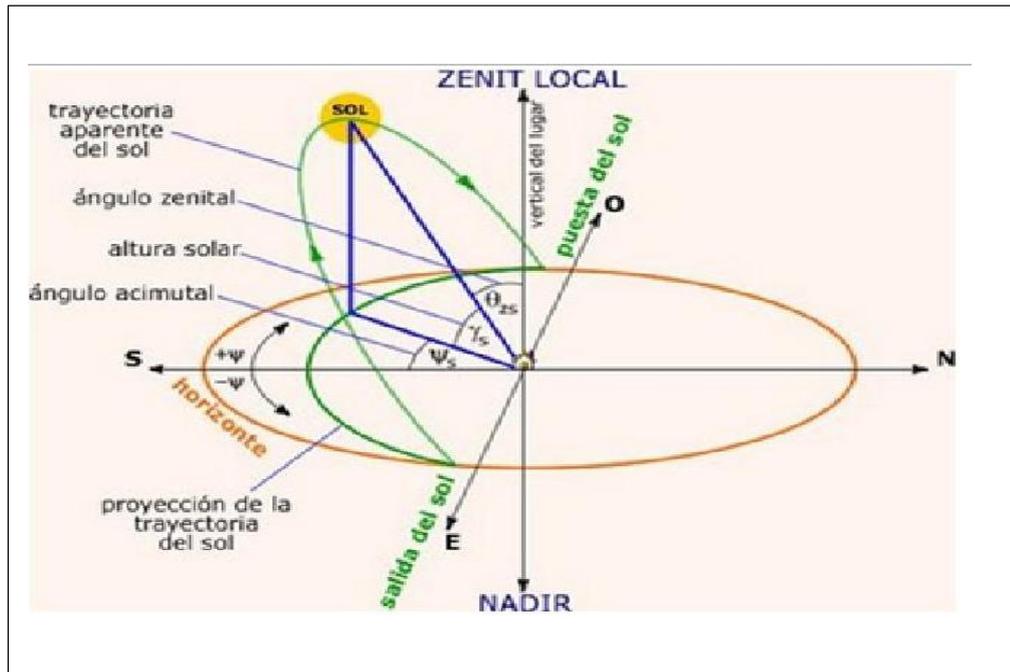


Figura 3.2. Esquema de las trayectorias solares

Fuente:[http://www.eoi.es/wiki/index.php/Conceptos\\_F%C3%ADsicos\\_en\\_Construcci%C3%B3n\\_sostenible\\_3](http://www.eoi.es/wiki/index.php/Conceptos_F%C3%ADsicos_en_Construcci%C3%B3n_sostenible_3)

### 3.3. Montea solar

La montea solar es el cálculo de la posición del sol en el cielo para cada lugar de la tierra en cualquier momento del día, este cálculo se lo puede realizar de una manera muy sencilla utilizando software específicos para dicho trabajo, en los que se debe ingresar las coordenadas geográficas del lugar para obtener las gráficas de trayectoria solar anual, semestral o diaria.

En la Figura 3.4 se muestra la trayectoria que describirá el sol durante todo el año sobre la ciudad de Cuenca Ecuador

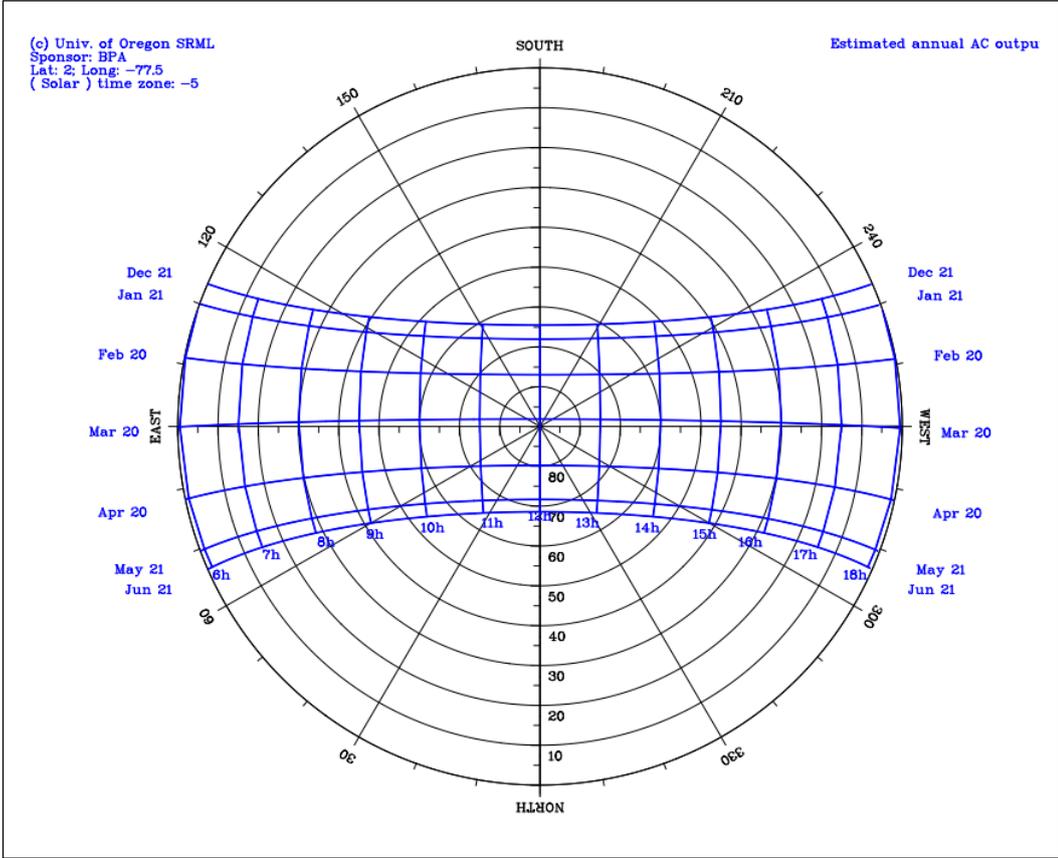


Figura 3.3. Montea solar Ecuador

Fuente: <http://solar.dat.uoregon.edu/download/temp/44891403.pdf>

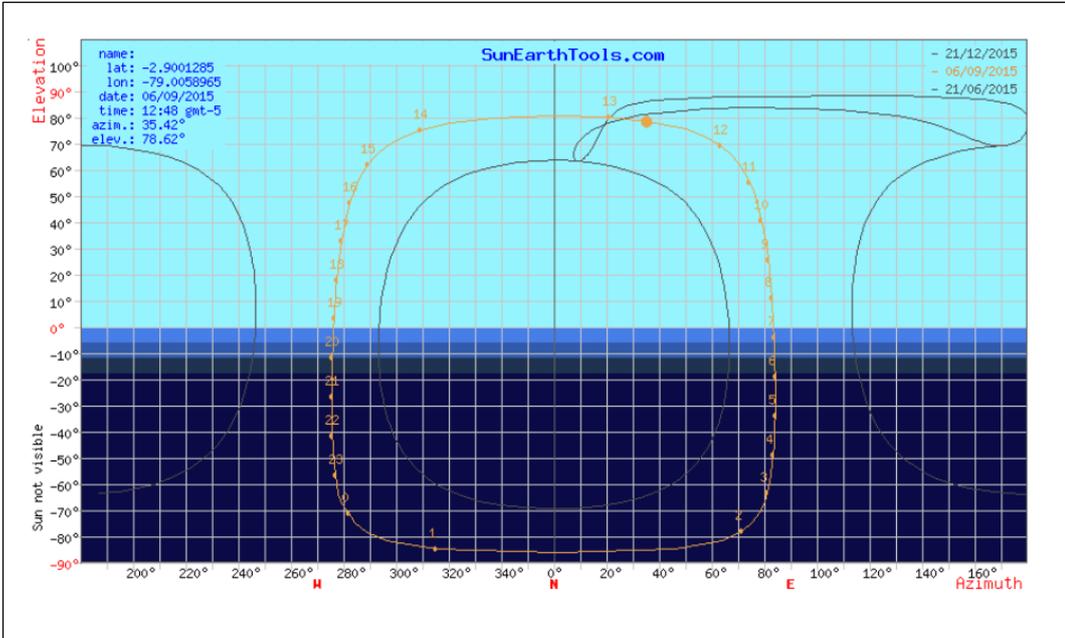


Figura 3.4. Elevación solar en Ecuador

Fuente: [http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=es](http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es)

### 3.4. Seguidor solar

Seguidor Solar de 2 ejes es un equipo mecánico que en su parte superior lleva fijado el concentrador solar y es capaz de orientarlo de manera perpendicular a los rayos solares, consigue que la insolación sobre los mismos sea la máxima al recibir la radiación directa.

Gracias a estos equipos, el sistema se orienta de forma que siempre está dirigido hacia el sol de forma perpendicular y así aumenta su rendimiento, buscando el objetivo de maximizar la producción de energía.

#### 3.4.1. Diseño del seguidor solar

El eje primario es el que está fijo respecto a La Tierra, y el otro eje, que está referenciado al eje primario se llama eje secundario. Hay varios tipos de seguidores de dos ejes. Estos son los más comunes: Seguidor de dos ejes de inclinación (Elevación e Inclinación). Este tipo de seguidores tienen su eje primario horizontal respecto a la tierra. El eje secundario es perpendicular al primario. Los ejes de rotación de este tipo de seguidor están típicamente alineados con el Norte magnético o con algún paralelo Este-Oeste. Uno de los ejes permite orientar al panel en su posición Norte-Sur y el otro en la posición Este-Oeste que se encuentre el Sol en el cielo. [Universidad de el Salvador (2012)].

El Seguidor solar funciona mediante el uso de dos fotoreceptores en cada eje de movimiento. Estos sensores captan la radiación solar, por lo que una diferencia entre ellos sobre un plano será indicio de que el sol no está ubicado de manera perpendicular al plano de referencia.

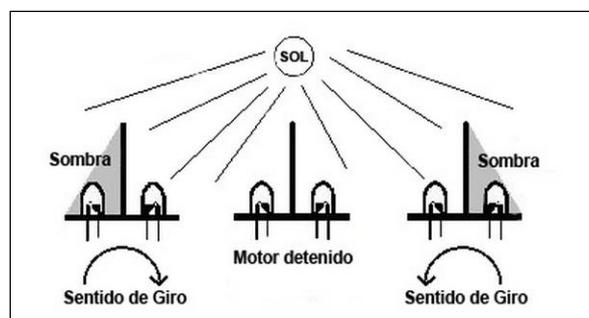


Figura 3.5. Fotoreceptores.

Fuente:[http://www.energizar.org.ar/energizar\\_desarrollo\\_tecnologico\\_seguidor\\_solar\\_como\\_funciona.html](http://www.energizar.org.ar/energizar_desarrollo_tecnologico_seguidor_solar_como_funciona.html)

Por medio de un sistema de control electrónico, esta diferencia es traducida a movimientos de los motores que regulan la posición del seguidor solar.

El funcionamiento se basa en detectar la diferencia de luz entre dos sensores LDR del mismo tipo que forman un divisor de tensión resistivo.

Las LDR se deben dirigir de forma perpendicular al sol por lo que reciben la misma cantidad de luz y por lo tanto el valor resistivo en las dos es el mismo.

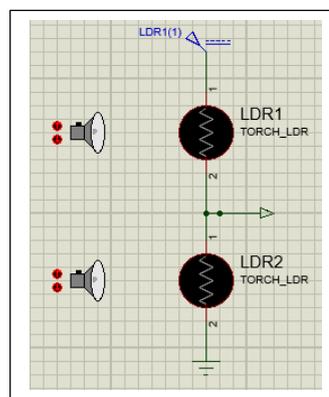


Figura 3.6. Divisor de tensión LDR

En el momento que una de las dos LDR recibe más cantidad de luz que la otra el divisor empezará a variar haciendo que la tensión en el punto de unión de las dos resistencias aumente hacia VCC o disminuya hacia GND

El voltaje del punto medio es comparado con los amplificadores operacionales configurados como comparadores, el valor se compara con el voltaje entregado por los potenciómetros RV1 y RV2 utilizamos dos potenciómetros pues debemos darle un margen a la lectura para que no esté continuamente en movimiento, oscilando de izquierda a derecha unos grados.

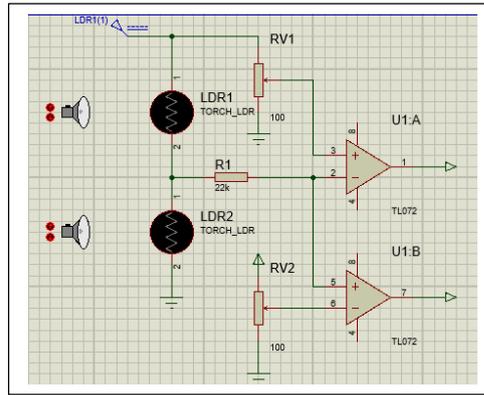


Figura 3.7. Circuito comparador OPAMS

Las salidas de los comparadores polarizan los transistores que funcionan como interruptores que comandan los relés que son la etapa de potencia y controlan el sentido de giro de los motores

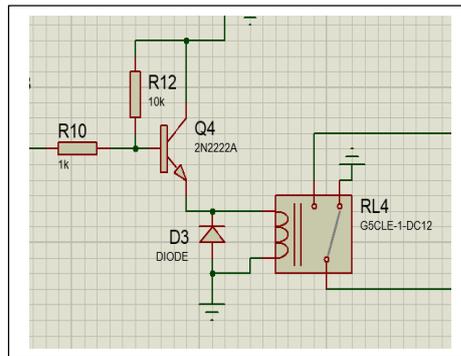


Figura 3.8. Circuito de polarización transistores

La inversión de giro se realiza de manera sencilla mediante dos relés de estado sólido comandados por Q1 y Q2, el motor gira en cierto sentido cuando el estado uno de los transistores cambia con respecto al otro.

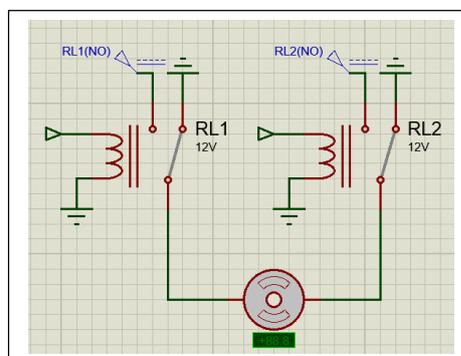


Figura 3.9. Circuito de inversión de giro

Q1	Q2	Sentido de Giro
0	0	Detenido
0	1	Horario
1	0	Anti horario
1	1	Detenido

Tabla 3.1 Tabla de Verdad

### 3.4.2. Diseño del circuito electrónico del seguidor solar

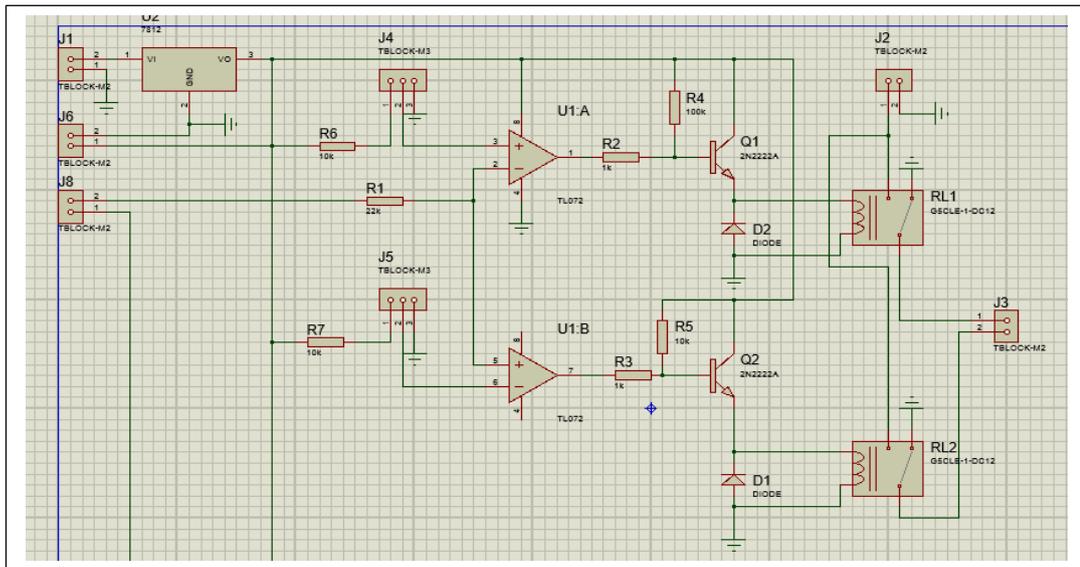


Figura 3.10. Circuito electrónico del seguidor un eje.

Se debe duplicar el circuito de manera idéntica en su construcción y configuración para tener un circuito de control por cada eje de movimiento que debemos controlar.

### 3.4.3. Construcción de la tarjeta de control

Para la construcción de la tarjeta PCB utilizamos herramientas de software especializadas para este trabajo que a partir del circuito previamente diseñado construye el PCB virtual.

Primero duplicamos el circuito antes descrito y cambiamos los elementos de entradas y salidas por borneras de conexión que nos permitan un fácil acceso y conexión de motores y sensores a la tarjeta.

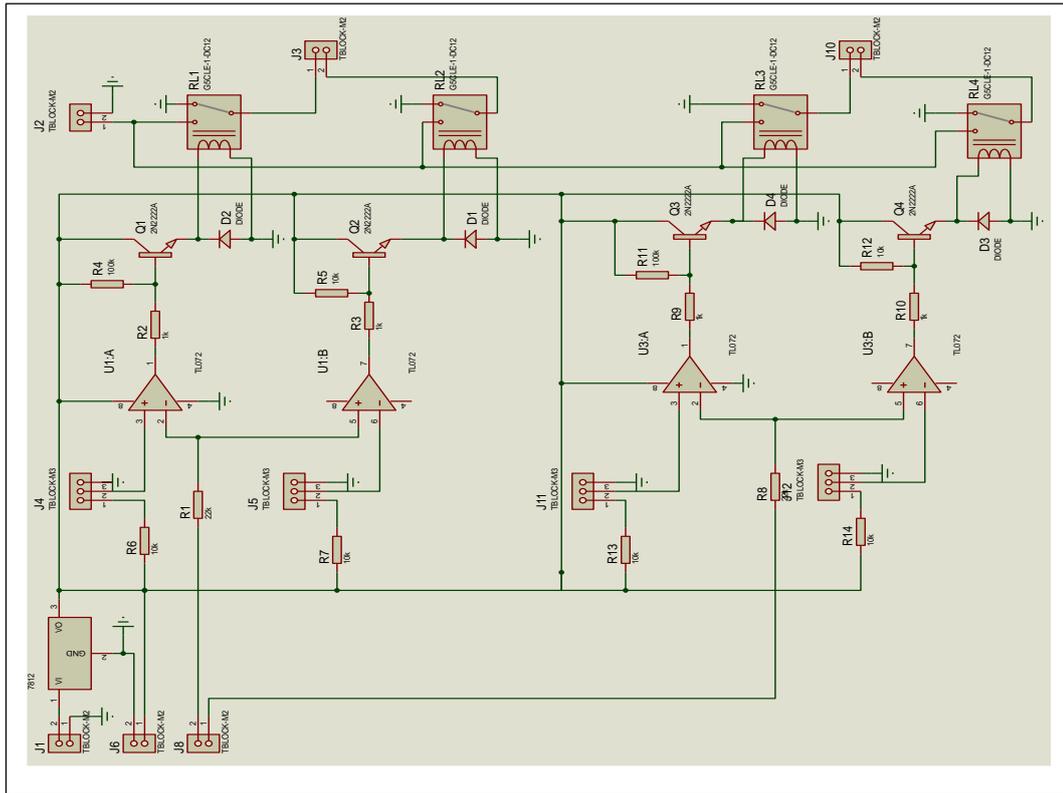


Figura 3.11. Circuito electrónico del seguidor dos ejes.

Ingresamos las medidas estimadas del PCB y el tipo de ruteo que vamos a utilizar, en nuestro caso sería rutas por una sola cara, el programa ubica los componentes dentro de la tarjeta y rutea las conexiones físicas.

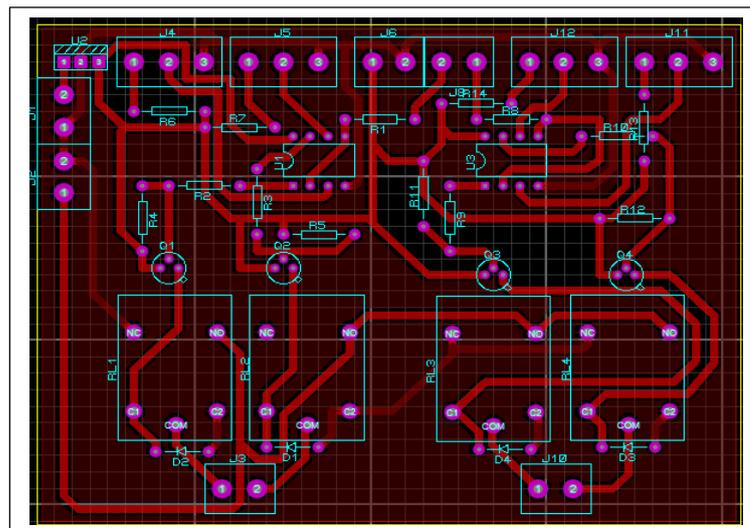


Figura 3.12. PCB del seguidor dos ejes.

Obtenemos la vista en 3D del diseño generado para tener una idea más clara como se va a ver nuestra tarjeta terminada

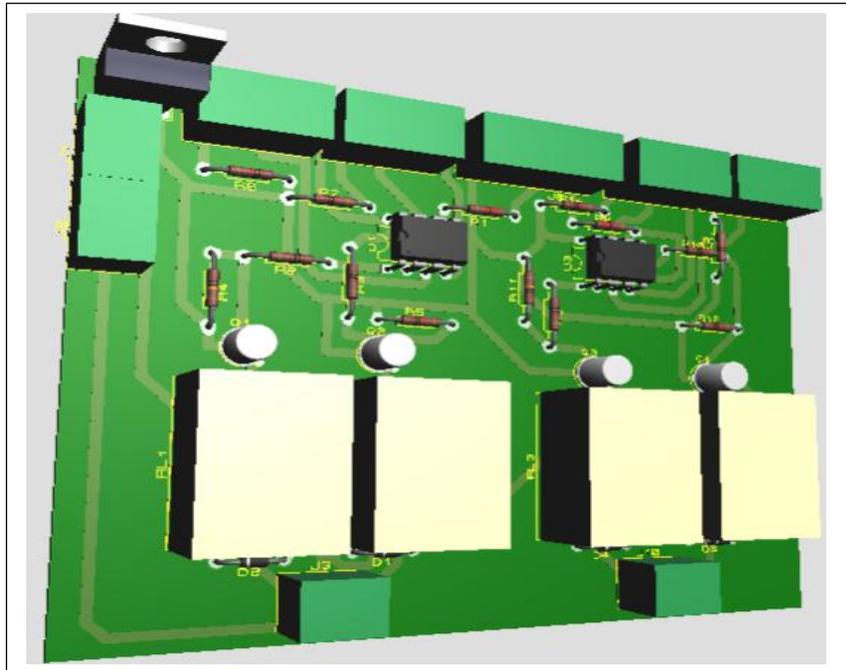


Figura 3.13. Vista en 3D del circuito impreso.

Se procede a la fabricación de la placa PCB diseñada y al montaje de los componentes electrónicos en la tarjeta.

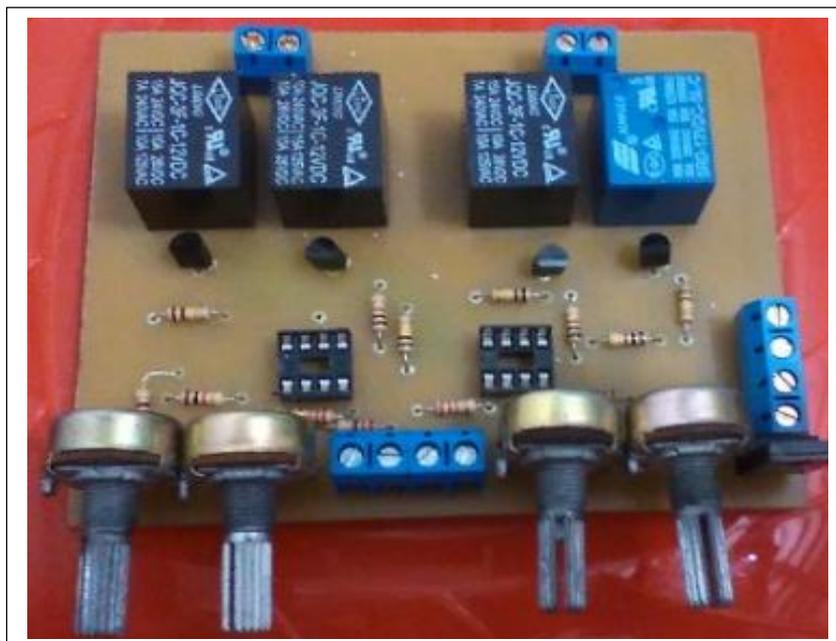


Figura 3.14. Montaje de componentes electrónicos en el PCB

### 3.5. Sensores y transductores

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar diferentes tipos de materiales, con el objetivo de mandar una señal y permitir que continúe un proceso, o bien detectar un cambio; dependiendo del caso que éste sea. Es un dispositivo que a partir de la energía del medio, proporciona una señal de salida que es función de la magnitud que se pretende medir. Dentro de la selección de un sensor, se deben considerar diferentes factores, tales como: la forma de la carcasa, distancia operativa, datos eléctricos y conexiones.

De igual forma, existen otros dispositivos llamados transductores, que son elementos que cambian señales, para la mejor medición de variables en un determinado fenómeno. Un transductor es el dispositivo que transforma una magnitud física (mecánica, térmica, magnética, eléctrica, óptica, etc.) en otra magnitud, normalmente eléctrica.

Un sensor es un transductor que se utiliza para medir una variable física de interés. Cualquier sensor o transductor necesita estar calibrado para ser útil como dispositivos de medida. La calibración es el procedimiento mediante el cual se establece la relación entre la variable medida y la señal de salida convertida.

Los transductores y los sensores pueden clasificarse en dos tipos básicos, dependiendo de la forma de la señal convertida.

Los dos tipos son: Transductores analógicos y transductores digitales.

Los **transductores analógicos** proporcionan una señal analógica continua ya sea voltaje, corriente eléctrica o resistencia. Esta señal puede ser tomada como el valor de la variable física que se mide.

Los **transductores digitales** producen una señal de salida digital, en la forma de un conjunto de bits de estado en paralelo o formando una serie de pulsaciones que pueden ser contadas. En una u otra forma, las señales digitales representan el valor de la variable medida. Los transductores digitales suelen ofrecer la ventaja de ser más compatibles con las computadoras digitales que los sensores analógicos en la automatización y en el control de procesos.

### 3.5.1. Fotorresistores

Un fotorresistor o LDR (inglés: "*light-dependent resistor*") es un componente electrónico cuya resistencia varía en función de la luz.

El LDR es un tipo de sensor foto resistivo formado por un área sensible a la luz o luminosidad, contiene una pista de Sulfuro de Cadmio, y dos terminales de conexión, cuya resistencia óhmica entre estas terminales cambia dependiendo de la intensidad de luz o luminosidad incidente sobre el área sensible que la percibe.

La resistencia del LDR varía de forma inversamente a la cantidad de luz incidente que cae sobre ella, en la parte inferior de la figura 3.15 se puede ver de forma gráfica esta relación, en el eje vertical de la Resistencia entre sus terminales y en el eje Horizontal la cantidad de luz incidente.

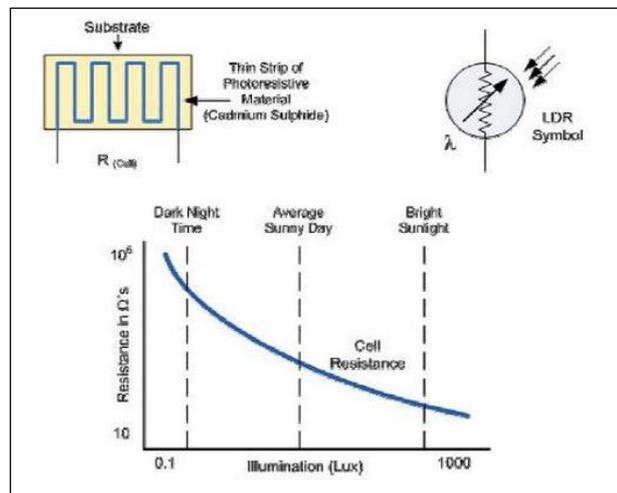


Figura 3.15. Símbolo eléctrico y función de transferencia de un LDR

Fuente: <http://es.slideshare.net/karaul/marcelino-24432562>

### 3.5.2. Sensor de irradiación

Un piranómetro es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar en kilovatios por metro cuadrado en un campo de 180 grados. [INEC (2012)]

Estos dispositivos utilizan el principio de detección termoeléctrica, por el que la radiación entrante es absorbida casi en su totalidad por una superficie horizontal ennegrecida, para una gama de longitudes de onda muy amplia. El incremento de la

temperatura resultante se mide a través de termopares conectados en serie o en serie/paralelo para conformar la termopila.

Las uniones activas (calientes) se sitúan por debajo de la superficie ennegrecida del receptor y utilizan la radiación absorbida por el revestimiento negro para calentarse. Las uniones pasivas (frías) de la termopila mantienen un contacto térmico con la carcasa del piranómetro, que actúa como disipador térmico.

### **3.5.2.1. Piranómetro Fotovoltaico**

En ellos, el principio de funcionamiento es el efecto fotoeléctrico. La radiación incide sobre un fotodiodo que es capaz de diferenciar el espectro solar por la frecuencia de la onda electromagnética, y de ese modo, mediante la lectura de voltaje, conocer los datos de radiación.

Dada su naturaleza, en este tipo de piranómetros es posible adosar filtros de ciertas bandas del espectro solar, por medio de algún domo de vidrio impregnado con el filtro deseado. Por otro lado, son más sensibles a pequeñas irregularidades y cambios debido a que no tienen la inercia térmica que sí tienen los térmicos [**EcuRed (2011)**].

## **3.6. Software de control**

El programa de control se desarrollara en la plataforma de diseño LabVIEW que es una herramienta gráfica de programación, esto significa que los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando su comprensión. Los programas en LabView son llamados instrumentos virtuales (VIs). Cada VI consta de dos partes diferenciadas:

**Panel Frontal:** El Panel Frontal es la interfaz con el usuario, la utilizamos para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. Los usuarios podrán observar los datos del programa actualizados en tiempo real. En esta interfaz se definen los controles e indicadores.

Indicadores de corriente, voltaje y potencia generada, un waveform chart para graficar la radiación absorbida por el concentrador así como su posición norte sur y su elevación este oeste, un termómetro para temperatura en el concentrador y un botón para salir.

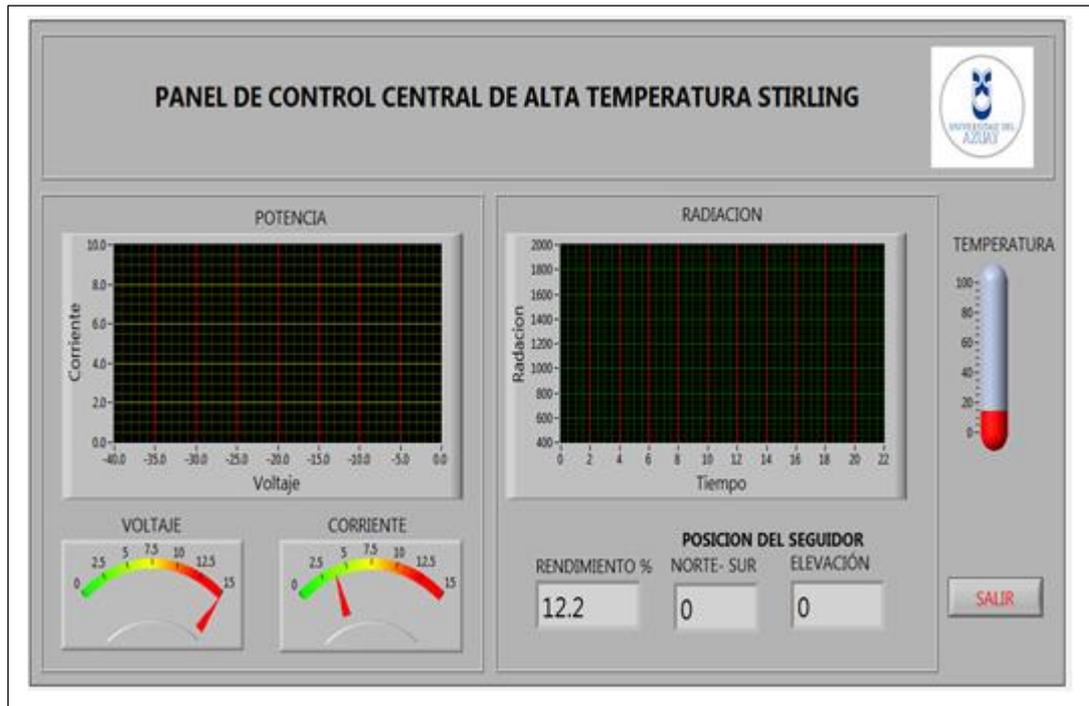


Figura 3.16. Panel Frontal

**Diagrama de Bloques:** es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan íconos que realizan una determinada función y se interconectan entre sí, se diseñó un programa principal con subVIs que realizan diferentes funciones del programa final.

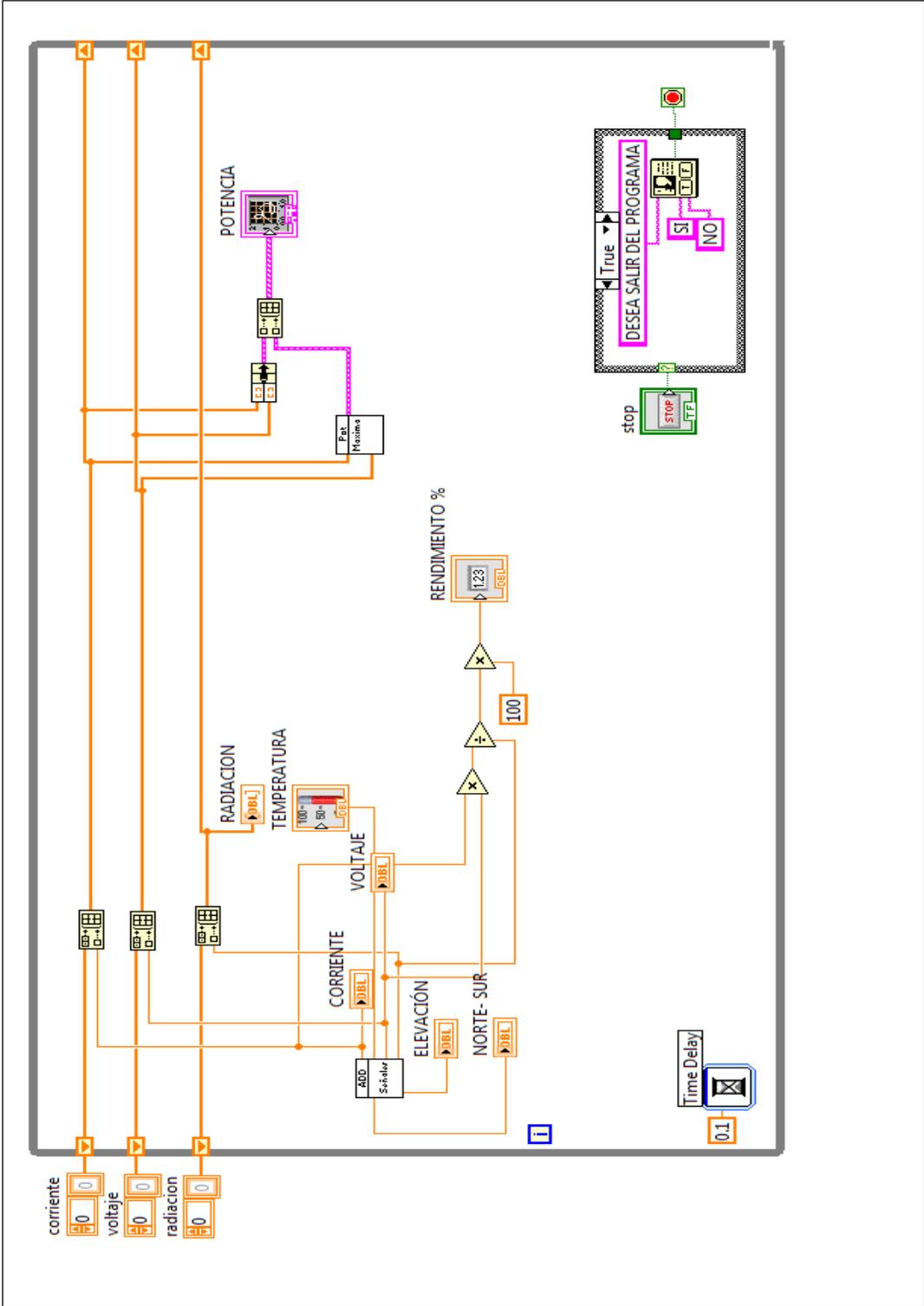
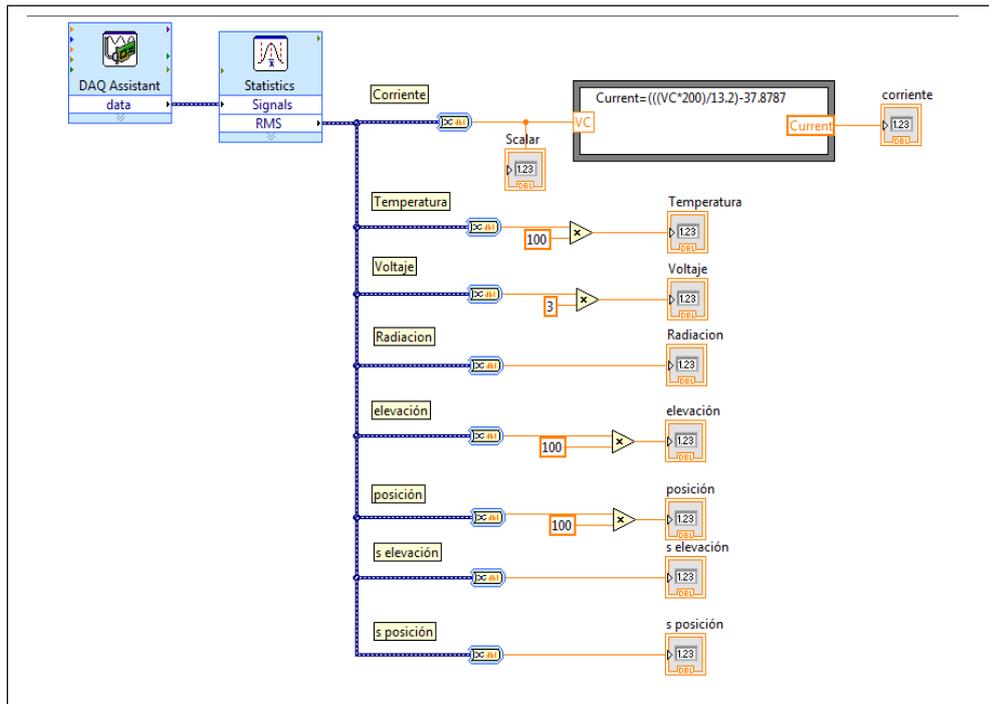


Figura 3.17. Programa Principal



3.18. SubVI AddSeñales

### 3.7. Conclusiones

El sistema de control consta de dos partes una electrónica que es bastante robusta y confiable sin encarecer los costos de producción con elementos electrónicos complejos y costosos y una virtual, que con una plataforma amigable para la interacción con los usuarios es bastante informativa y gráfica.

Es posible profundizar más en el control, aislando este capítulo como un tema único de estudio, si nos enfocáramos solo en control de una central termosolar podríamos estudiar y realizar varios diseños y prototipos con el fin de encontrar el más eficiente y económico.

## CAPÍTULO 4

### CONSTRUCCIÓN DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR DIDÁCTICA MEDIANTE EL GENERADOR STIRLING

#### 4.1. INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones más llamativas de la energía solar es su conversión directa en fuerza motriz, por sistemas termodinámicos, en vez de fotoeléctricos, la aplicación que proponemos es una central didáctica apta para prácticas y demostraciones en ferias, puede construirse en gran escala y alcanzar potencias útiles en el ámbito doméstico.

Un sistema de concentrador disco Stirling está compuesto por un concentrador solar, un receptor solar, y por un motor Stirling que se acopla a un alternador, para óptimo funcionamiento, el sistema debe estar provisto de los mecanismos necesarios para poder realizar un seguimiento de la posición del sol en dos ejes.

#### 4.2. Centrales solares termoeléctricas

Los sistemas tecnológicos de concentración solar usando espejos o lentes con sistemas de seguimiento del sol para enfocar una gran área de incidencia de radiación solar sobre una pequeña superficie. Luego la luz concentrada es usada como fuente de calor para una central de energía, existen cuatro tipos principales de centrales que utilizan esta tecnología.

##### 4.2.1. Tecnología Cilindro-parabólica

Unos espejos de forma parabólica, dispuestos en largas hileras en los campos solares de la central, reflejan la radiación solar incidente concentrándola en un punto hasta 80 veces, sobre un tubo absorbedor, en el que un fluido caloportador es calentado a alta temperatura. A continuación, en un intercambiador de calor alojado en bloque central de la instalación, se produce el vapor que impulsa las turbinas convencionales y genera la electricidad. [ENESTAR ]

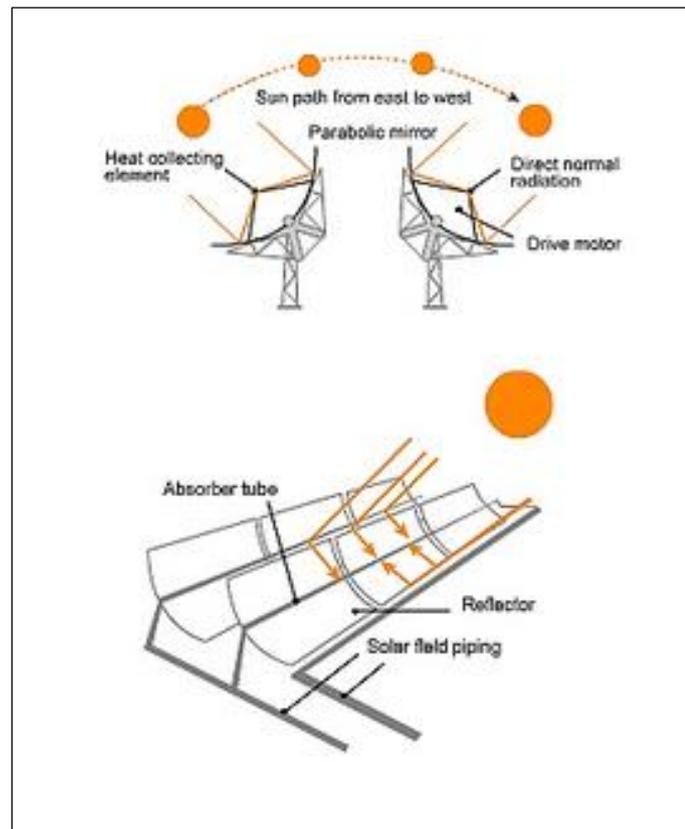


Figura 4.1. Central cilindro parabólica

Fuente: <http://www.enerstar.es/ver/179/Centrales-Solares-Termoel%C3%A9ctricas-CSP.html>

#### 4.2.2. Tecnología de torre

Consiste en un campo solar integrado por helióstatos que se utilizan para concentrar la luz solar en un receptor central situado en la parte superior de una torre. Un medio de transmisión de calor situado en este receptor central absorbe la radiación muy concentrada reflejada por los helióstatos y la transforma en energía térmica con objeto de generar vapor, el cual se expande en una turbina acoplada a un generador para la producción de electricidad.

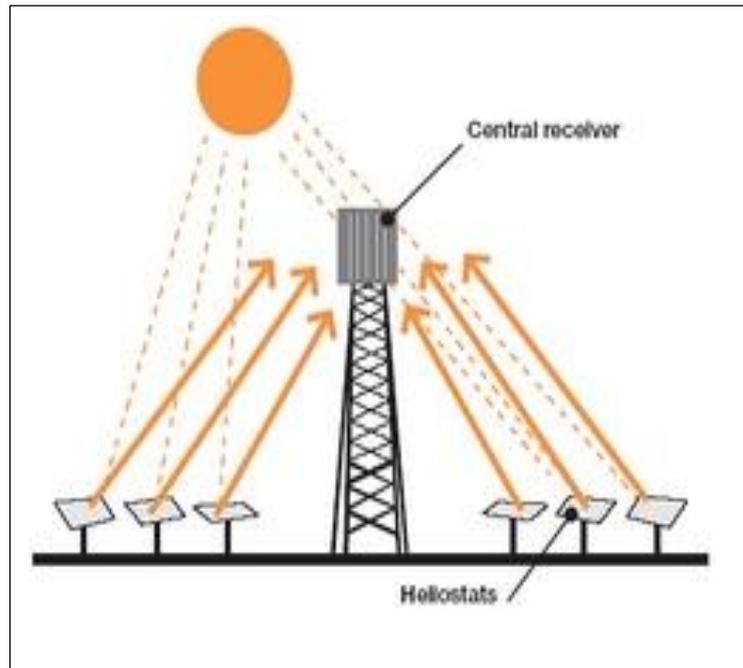


Figura. 4.2. Central tipo torre

Fuente: <http://www.enerstar.es/ver/179/Centrales-Solares-Termoel%C3%A9ctricas-CSP.html>

### 4.2.3. Tecnología de disco Stirling

Un reflector con forma de antena parabólica se utiliza para concentrar la luz solar en un receptor situado en el punto focal del plato.

Este absorbe la energía reflejada por los concentradores, lo que permite que el fluido en el recipiente se caliente a muy alta temperatura. Esto se utiliza para generar electricidad en un pequeño motor, por ejemplo el motor Stirling o una micro turbina, conectado al receptor.

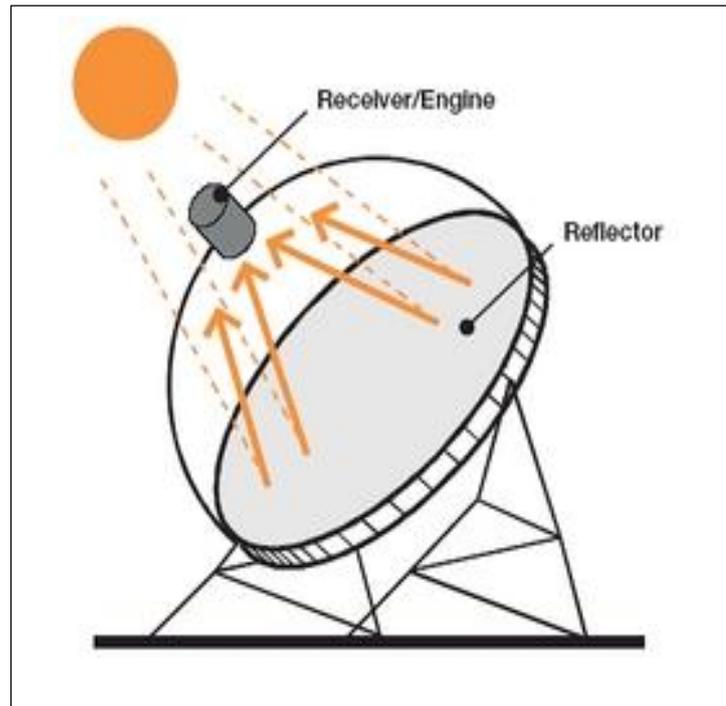


Figura. 4.3. Central Disco Stirling

Fuente: <http://www.enerstar.es/ver/179/Centrales-Solares-Termoel%C3%A9ctricas-CSP.html>

#### 4.2.4. Tecnología de Concentradores lineales de Fresnel

Consiste en la utilización de una serie de espejos lineales que pueden rotar alrededor de su eje para dirigir los rayos reflejados hacia un receptor lineal situado por encima de ellos. Los espejos suelen ser planos o de una ligera curvatura. Generalmente, estos sistemas se están proponiendo para la generación directa de vapor de baja temperatura, acoplados directamente a turbinas de vapor o para el precalentamiento de agua de alimentación a la caldera de centrales térmicas convencionales. La temperatura de operación de los primeros proyectos ronda habitualmente los 300°C, lo que permite utilizar receptores eficaces y fiables, aunque, algunos promotores de esta tecnología trabajan a temperaturas próximas a los 500°C, para poder acoplar estos sistemas a turbinas de alto rendimiento.<sup>7</sup>

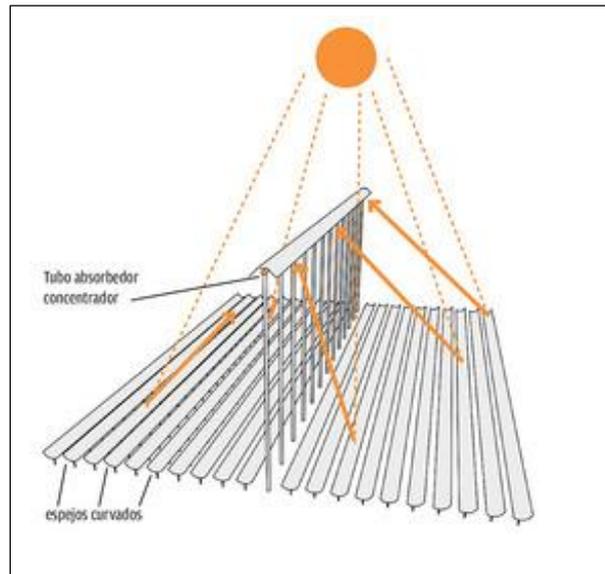


Figura. 4.4. Central concentradores lineales de Fresnel

Fuente: <http://www.enerstar.es/ver/179/Centrales-Solares-Termoel%C3%A9ctricas-CSP.html>

### 4.3. Criterios de selección del proyecto

Como se indicó anteriormente, las tecnologías termosolares más utilizadas son los colectores cilíndrico-parabólicos, las centrales de torre y los sistemas disco-parabólicos, para realizar una correcta selección se enlistan los criterios que permitan seleccionar la mejor opción tecnológica.

**Características de las centrales termoelectricas**

	<b>Cilindro parabólicos</b>	<b>Receptor central</b>	<b>Discos parabólicos</b>
Potencia	30-80 MW	10-200 MW	5-25 kW
Temperatura operación	390°C	565°C	750°C
Factor capacidad anual	23-50%	20-77%	25%
Eficiencia pico	20%	23%	29,40%
Estado comercial	Disponible	Demostración	Prototipos- demostración
Almacenamiento	Limitado	Sí	Baterías

Tabla 4.1. Características de las centrales termoelectricas

**Cuadro comparativo entre los diferentes tipos de centrales termoelectricas**

	<b>CCP</b>	<b>Torre</b>	<b>Disco Parabólico</b>
<b>Aplicaciones</b>	Centrales conectadas a red. Generación de calor para procesos.	Centrales conectadas a red. Generación de calor para procesos a alta temperatura.	Aplicaciones independientes Pequeños sistemas aislados.
<b>Ventajas</b>	Comercialmente disponible, aplicaciones instaladas, experiencia previa, rendimiento anual comercialmente probado de 14 %, modularidad, demanda de terreno baja, capacidad de almacenamiento.	Altas eficiencias de conversión con colector solar, operan a temperaturas de hasta 1000°C, almacenamiento de altas temperaturas	Eficiencia de conversión muy alta solar a eléctrica 30% aproximadamente, modularidad, experiencia de prototipos instalados.
<b>Desventajas</b>	Uso de aceite como medio de transferencia de calor, limitación de funcionamiento a 400°C, mucho espacio físico y agua.	Uso de sales como medio de transferencia de calor, mucho espacio físico y agua.	Poca fiabilidad.

Tabla 4.2. Tabla comparativa sistemas termoelectricos

**Criterios técnicos:** Cantidad de radiación requerida, dimensión de terreno requerido, rango de potencia de operación, temperatura de operación, eficiencia, posibilidad de almacenamiento térmico, madurez tecnológica.

**Criterios económicos y ambientales:** Experiencia comercial, costos de operación y mantenimiento, contaminación y consumo de agua, ocupación de suelo, impacto visual y acústico, cantidad de emisiones y producción de residuos.

De los criterios mencionados determinamos que las centrales de torre y los colectores cilíndrico-parabólicos son más apropiados para proyectos de gran tamaño conectados a la red, mientras que los sistemas disco-parabólicos son modulares y pueden ser usados en aplicaciones individuales o en grandes proyectos.

Por lo descrito la tecnología de las plantas termosolares del tipo Stirling es la elegida para la construcción ya que este tipo de tecnología están totalmente disponibles a nivel comercial a pequeña escala, su diseño modular permite que el sistema disco Stirling sea adecuado para la generación energética, al producir energía de manera directa sin la necesidad de tener un almacenador térmico.

#### **4.4. Diseño de la central didáctica termosolar de alta temperatura mediante el generador de Stirling**

Al ser un prototipo didáctico es importante el diseño pues estamos impulsando el estudio de los sistemas Stirling, para la fabricación del conjunto vamos a utilizar diferentes materiales como son el acero, el aluminio y policarbonatos por ser resistentes maleables y de fácil adquisición.

Existen elementos del sistema que se compraron como son los motores el primero el motor Stirling que se va a acoplar con un motor de DC en forma de generador, el concentrador cilindro parabólico y los motores del seguidor solar.

##### **4.4.1. Planteamiento del sistema**

El sistema disco Stirling que vamos a diseñar consta de:

- Concentrador solar parabólico
- Sistema de seguimiento solar
- Motor Stirling
- Generador
- Sistema de control electrónico

### **Concentrador solar parabólico**

El concentrador está construido en acrílico transparente espejado, en general, el vidrio es más barato que el acrílico, es más resistente a los arañazos y es más fácil de reciclar. El acrílico, por otro lado, es más fuerte, más resistente a los golpes, la intemperie y la erosión



Figura 4.5. Espejo parabólico

#### **Datos del concentrador**

Diámetro 60 cm

Distancia focal 12 cm del anillo exterior y 20 cm del centro de la base

Peso 3 libras

Temperatura máxima de captación en el foco 650 °C

#### **Sistema de seguimiento del sol**

El sistema de seguimiento está estrechamente conectado a la estructura física de la central, esta tendrá una base fija que sostendrá el peso y una móvil que asegura la trayectoria del sol, el diseño de la estructura y sistema de seguimiento será de manera paralela.

Los sistemas de movimiento azimutal y de elevación se diseñan en base a dos motores de DC de 12V controlados por el sistema previamente diseñado para manejar dos motores de CC con un potencia de 25W , por disponibilidad local se

consiguen motores acoplados a tornillos sin fin, por lo que se debe convertir el movimiento de los mismos de desplazamiento lineal en rotación y elevación del sistema, se logra lo descrito mediante el empleo de sistemas interconectados con articulaciones móviles, brazos y palancas.

Se realizará un diseño y modelado del sistema utilizando software especial para el procedimiento, con el fin de tener un modelo a seguir para la fabricación de nuestro proyecto.

### **Motor Stirling**

El motor Stirling que utilizaremos es fabricado por la empresa SOLAR Green Power Science de EE.UU. empresa dedica a la investigación y desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar con fines investigativos y didácticos a pequeña escala.



Figura 4.6. Motor Stirling

### **Datos del motor**

Peso 5 libras.

Velocidad de giro máxima 600 rpm.

Mínimo diferencial de temperatura de funcionamiento 125°C.

Rueda de inercia de 8,5 cm de diámetro, 0,5 lb.

Diámetro de eje para acople de generador 0,825 cm.

## Generador

El generador será un motor de DC de 12V, 0.5A conectado como dínamo.

El rendimiento de un motor conectado como dínamo no es lineal en el banco de pruebas logramos producir 6,5VAC, 0,5A a 400rpm



Figura 4.6. Generador

## Control

El sistema de control consta de una tarjeta electrónica para el seguimiento solar y el software de control virtual para el funcionamiento de la central.

La tarjeta de control junto con la fuente de poder se encuentran en un control box para protegerlos de la intemperie, se conecta a los motores y sensores mediante las borneras de conexión.

En el sistema de control se deben calibrar los potenciómetros de modo que los voltajes cumplan con lo siguiente  $V_{P1} < V/2 < V_{P2}$ , se debe considerar un delta de voltaje para que los motores no se activen voltaje constantemente, si los motores giran en sentido contrario al movimiento descrito por el sol hay que invertir la conexión en las borneras.

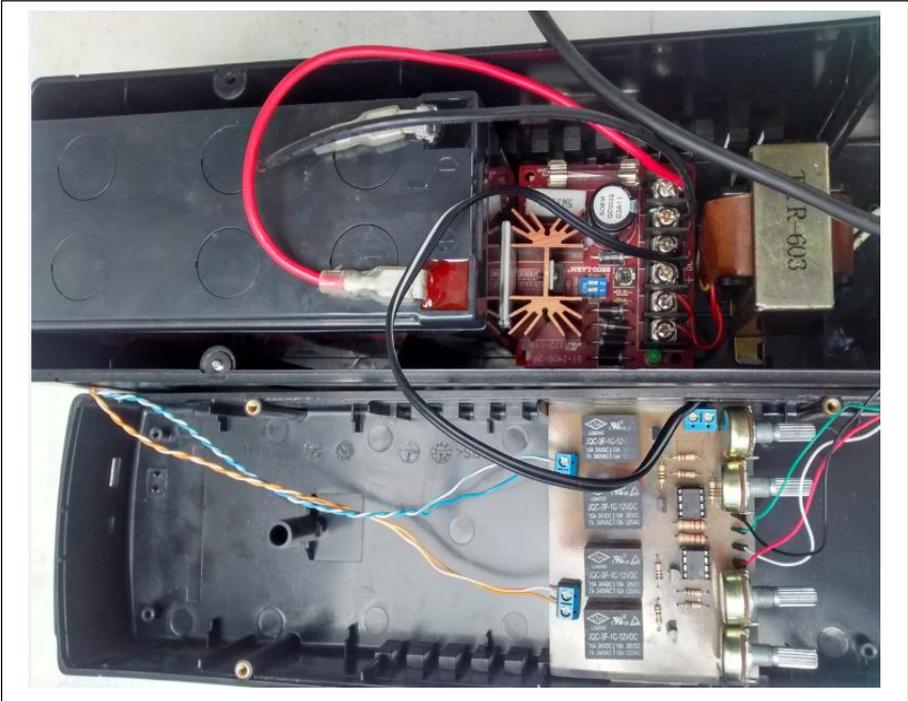


Figura 4.7. Control box

4.4.2. Diseño de la estructura mecánica de seguidor

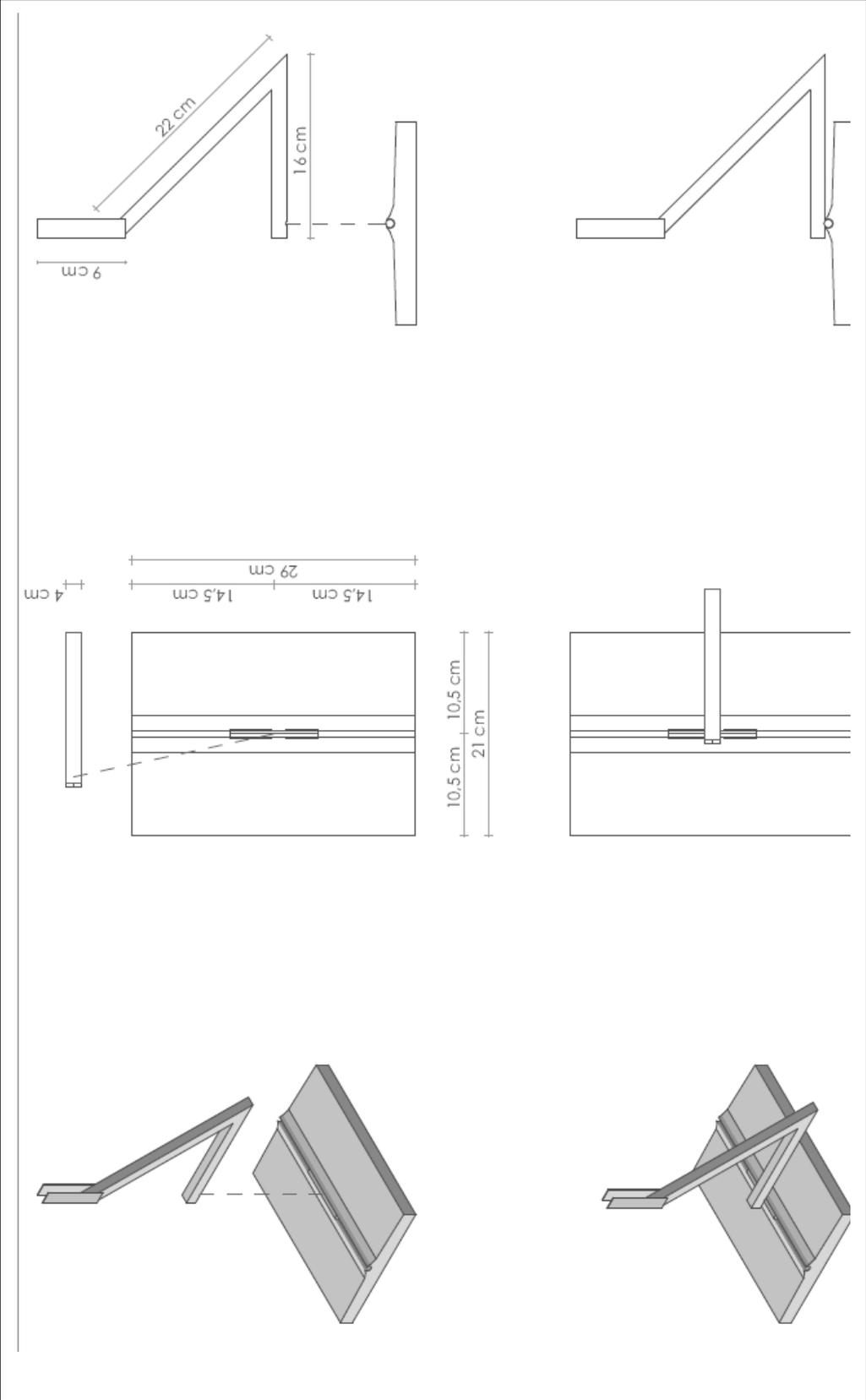


Figura 4.8. Base y Estructura soporte

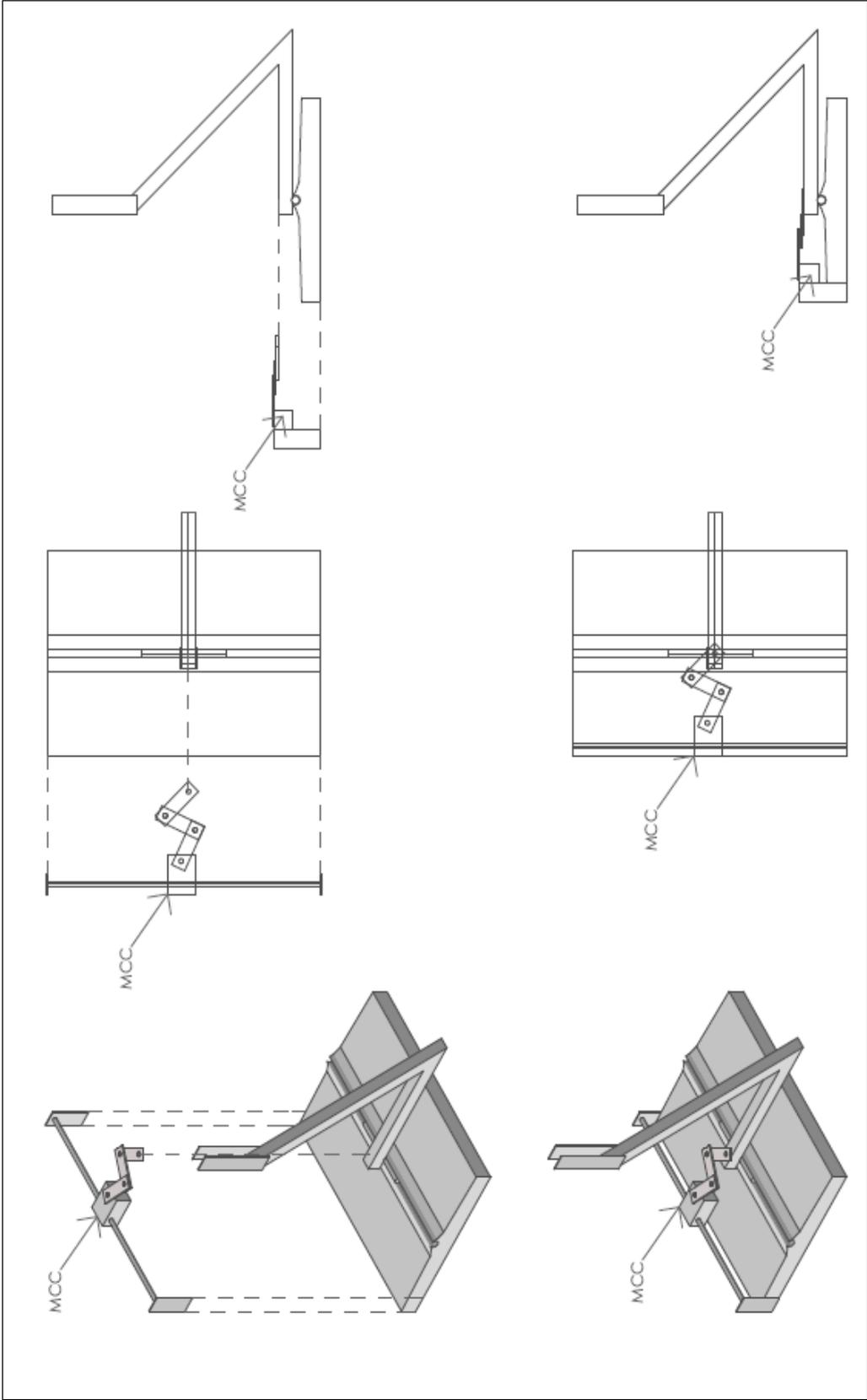


Figura 4.9. Mecanismo de movimiento azimutal

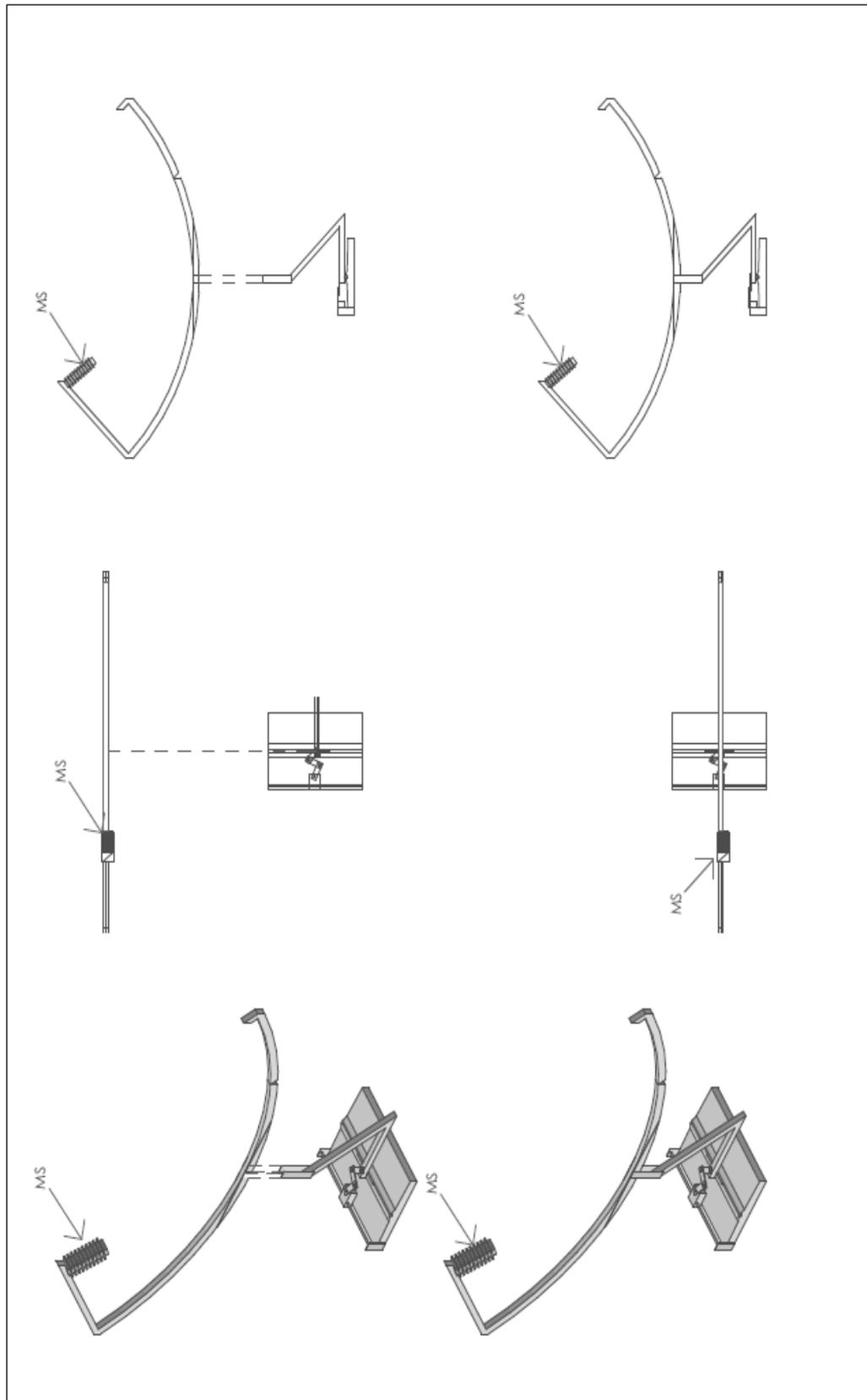


Figura 4.10. Estructura soporte del espejo y del motor Stirling

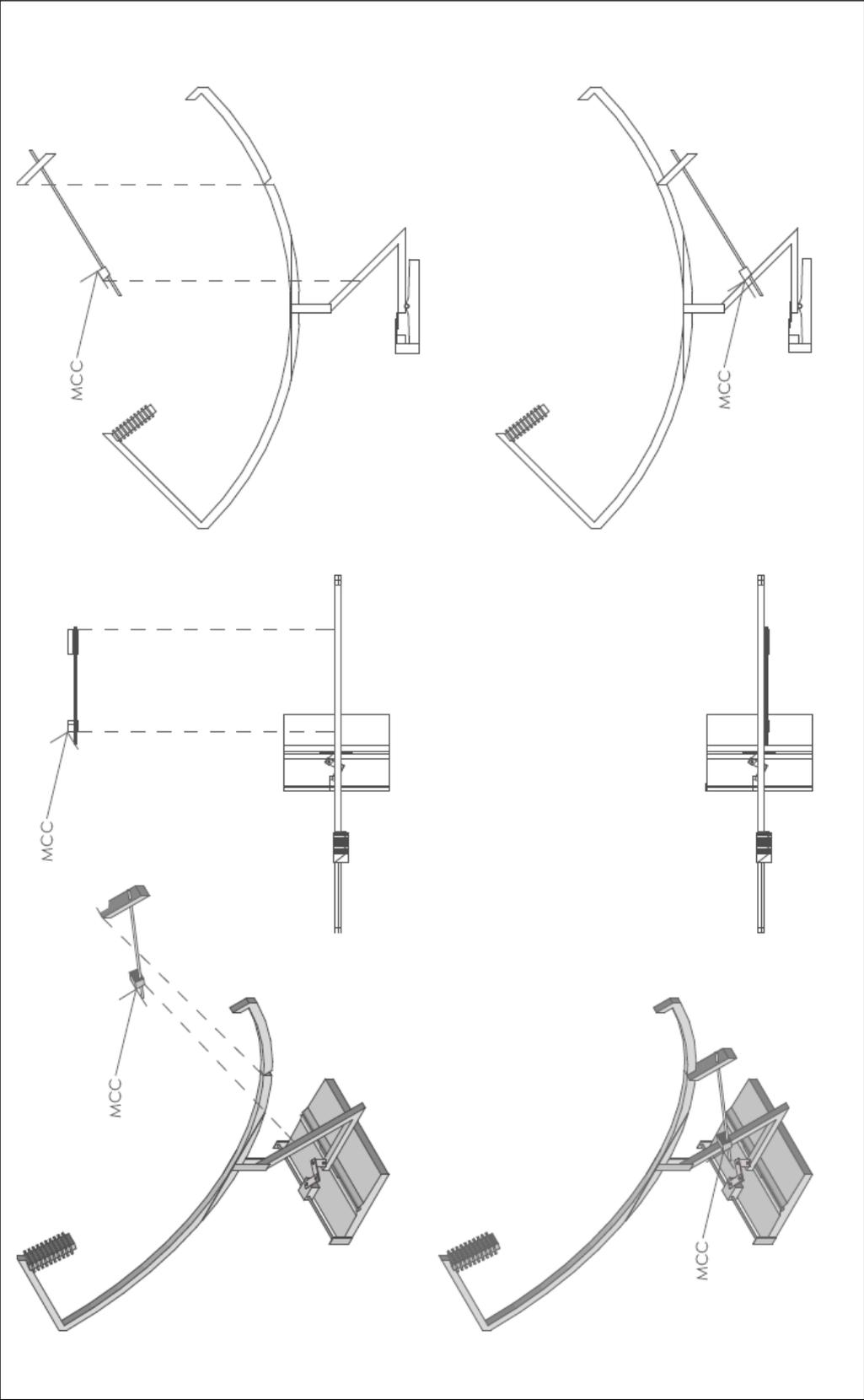


Figura 4.11. Mecanismo de elevación

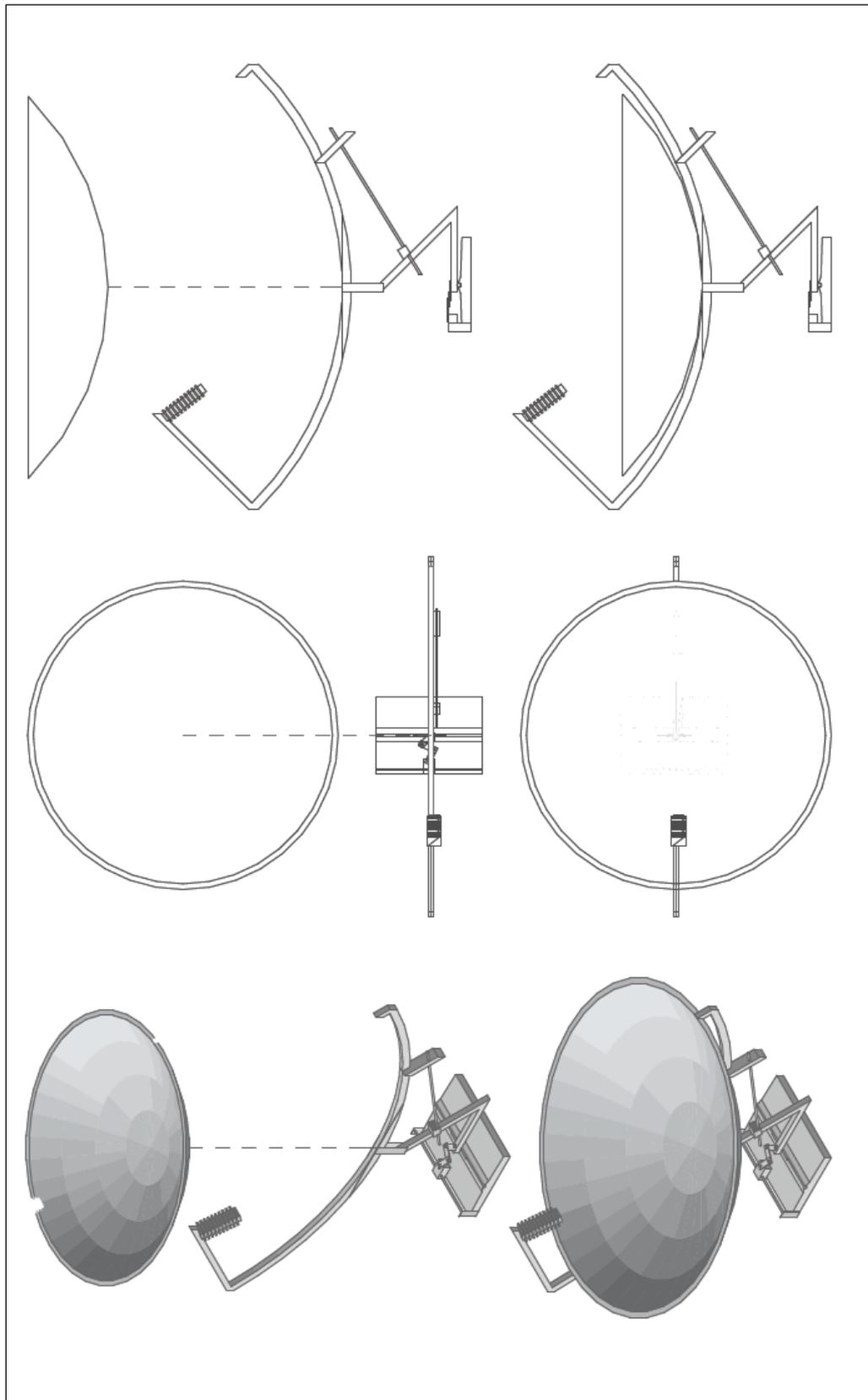


Figura 4.12. Espejo cilindro parabólico

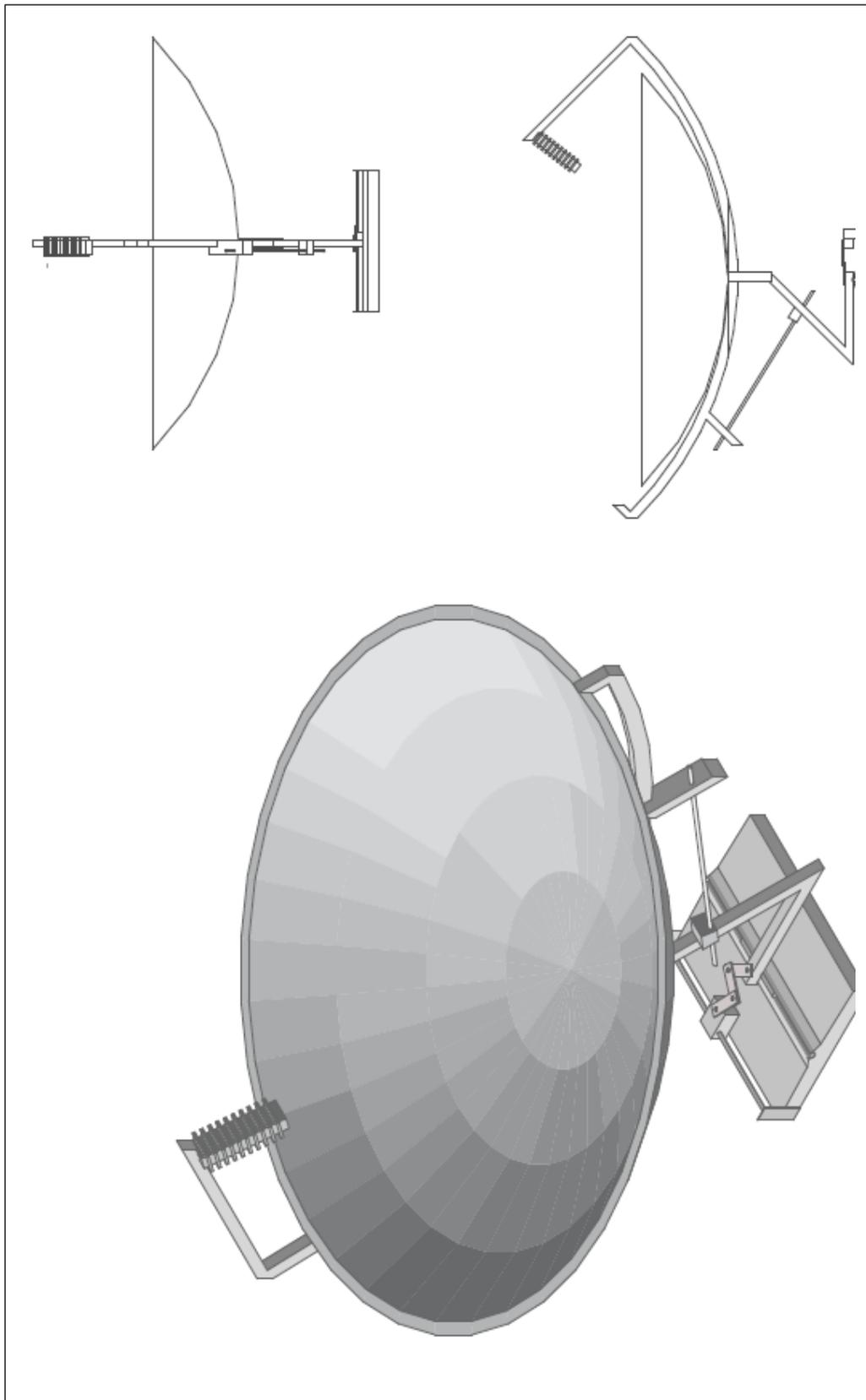


Figura 4.13. Modelo final de la central de alta temperatura Stirling

#### 4.5. Construcción y montaje de los componentes del sistema

Tenemos como base el modelado 3D para la construcción de las diferentes piezas de la central que serán elaboradas en aluminio, debido a que es un metal resistente a las condiciones climáticas, ligero y maleable, se consigue localmente perfilaría de aluminio en diferentes formas y medidas solo se debe realizar una selección de las más adecuadas para la fabricación de la estructura, utilizaremos perfiles de aluminio de 4x2cm para la base y 2x2cm para la estructura soporte del conjunto concentrador, motor y generador.

Como se observa en la Figura 4.14. La estructura de la base se ensambla al soporte del concentrador mediante un eje vertical que le permite un giro de 180° de libertad, este movimiento será utilizado por el sistema de seguimiento solar para seguir la trayectoria azimutal del sol.



Figura 4.14. Construcción y montaje de la base y estructura soporte

El sistema de seguimiento azimutal se muestra en la Figura 4.15. Se convierte el desplazamiento lineal en giro de la estructura soporte, el motor DC 12V está fijado a la base y desplaza la turca en sentido horizontal a lo largo del tornillo sin fin que actúa como eje, este desplazamiento se transfiere al eje de rotación de la base el movimiento mediante dos piezas articuladas entre si éstas convierten el

desplazamiento lineal en rotación al estar conectados a la articulación de rotación de la estructura.

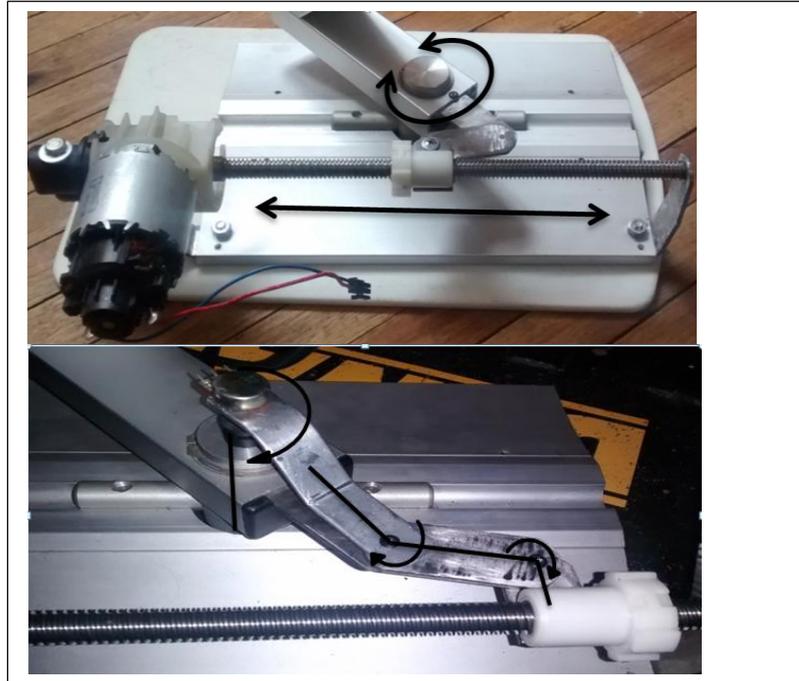


Figura 4.15. Sistema de seguimiento azimutal



Figura 4.16. Montaje del sistema de seguimiento de elevación

La estructura soporte del conjunto espejo, motor y generador tienen que seguir el movimiento de elevación del sol en el transcurso del día, como se muestra en la Figura 4.16. La unión entre el soporte de la estructura principal con la estructura del espejo se realiza mediante un eje fijo que actuará como punto pivote del mecanismo, este permite el movimiento del sistema, el mecanismo de seguimiento utiliza un motor de 12V CC igual al que realiza el movimiento azimutal y de la misma forma se convierte el desplazamiento lineal de la tuerca a lo largo del eje en movimiento de elevación del sistema, en este caso el movimiento se logra interconectando el motor a la estructura con dos ejes que soportan el peso y actúan como pivotes, uno conecta el motor a la estructura soporte de la central y el otro conecta la estructura soporte del espejo al eje de movimiento del motor.

El motor Stirling estará montado en la estructura soporte del espejo de manera que el punto focal de la parábola quede en el receptor de calor del motor, por construcción del motor este trae un base de montaje que nos permite acoplarlo mediante tornillos M8, en la Figura 4.18. Se muestra el montaje motor, se fabricó un soporte en forma de U para conectar la base del motor con la estructura soporte del colector, esta se conecta mediante un eje que nos permite realizar pequeños ajustes el ángulo de elevación del motor para que su ubicación sea la correcta



Figura 4.17. Construcción y montaje del soporte y espejo parabólico

El montaje del generador se realiza mediante un acople que conecta el eje del motor Stirling y el eje del generador, este mecanismo reduce las pérdidas en la transferencia de movimiento mecánico pero tiene que estar perfectamente alineado para que funcione correctamente y no genere un desbalanceo en el eje de giro del motor

Stirling, se construyó un acople en cobre con reducción de diámetro de 0,85cm a 0,41cm para el eje del motor Stirling y del generador que tiene diferentes medidas.

La figura 4. 18 muestra el acople entre los ejes y el soporte del generador.



Figura 4.18. Acople de ejes motor y generador

La central se va ensamblando a medida que se van fabricando las piezas, siguiendo los diseños previamente realizados para el montaje de todos los componentes obtenemos el ensamblaje final de la central termosolar como podemos observar en la Figura 4.19



Figura 4.19. Montaje final de todos los componentes del sistema

En la figura 4.20 se observa el montaje final del equipo con la descripción de sus componentes principales

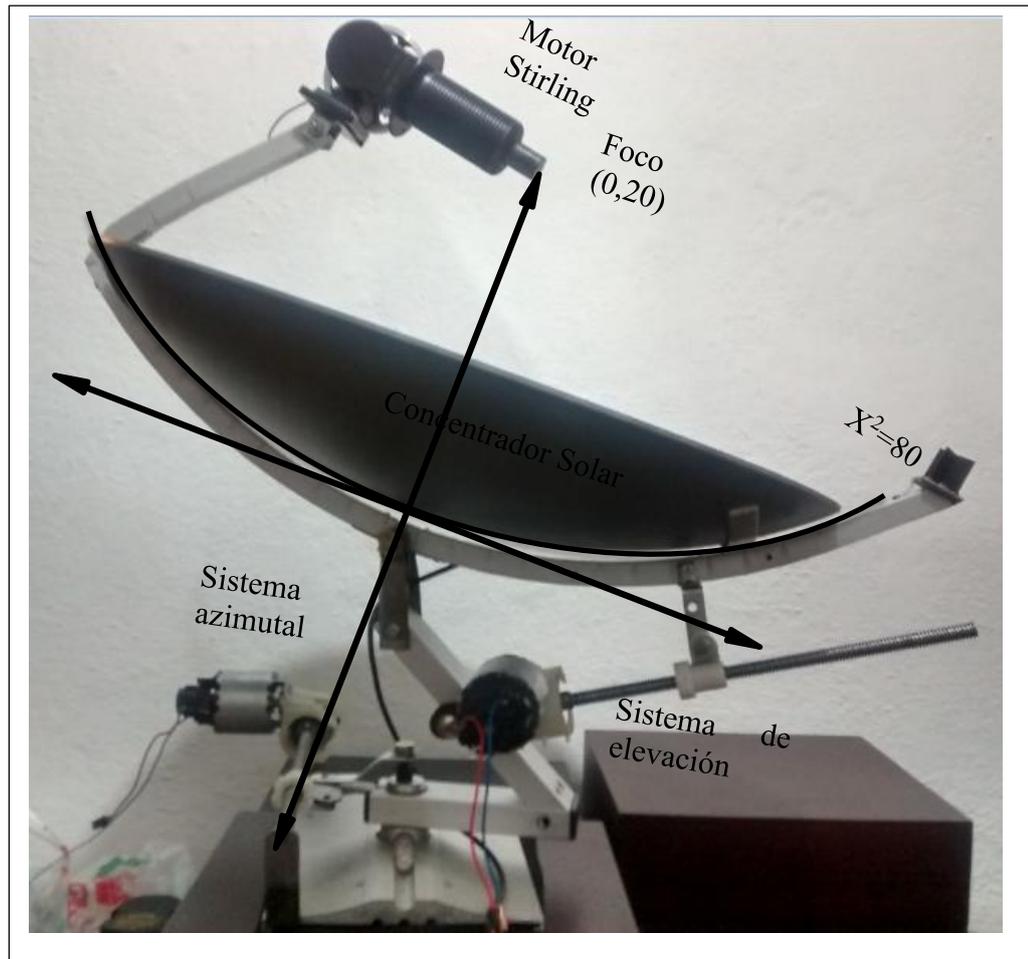


Figura 4.20. Componentes de la Central

#### 4.6. Conclusiones

La construcción de una central termosolar puede realizarse de manera artesanal sin sacrificar la calidad y encarecer excesivamente el costo, a nivel estructural existen problemas de ingeniería a la hora de soportar el peso del disco y la vibración del motor.

Para tener un mejor desarrollo de ingeniería en el sistema mecánico se debe tener mayor preparación y práctica en el diseño y construcción de estas estructuras, el diseño puede ser mejorado por un ingeniero mecánico.

Se debe tener un buen sistema de seguimiento solar para que el equipo capte la radiación solar directa.

El proyecto resulta viable y sólo es necesario realizar la correcta selección de los materiales, y piezas de la central, analizar que se compra y que se fabrica con el fin de conseguir un diseño funcional.

## **CAPÍTULO 5**

### **TABULACIÓN DE RESULTADOS Y GUÍA DE PRÁCTICAS PARA LOS ESTUDIANTES**

#### **5.1. INTRODUCCIÓN**

Una prueba de funcionamiento es una prueba basada en: la puesta en operación, revisión, calibración y ajustes de los sistemas previamente diseñados para el sistema.

Una vez que se ha completado el montaje total de la máquina, está lista para trabajar y comprobar sus diferentes sistemas, en el caso del sistema mecánico, es decir el sistema motriz que incluyen motores, eje motriz, articulaciones, en el caso del sistema de control la correcta ubicación de sensores y además la estructura soporte

Se ha realizado las correspondientes pruebas de funcionamiento de los componentes del sistema de la central disco Stirling aislados y en conjunto.

#### **5.2. Pruebas de Control**

El software de control es gráfico y solamente informativo, nos permite conocer el funcionamiento de los sistemas en conjunto como una central de generación eléctrica.

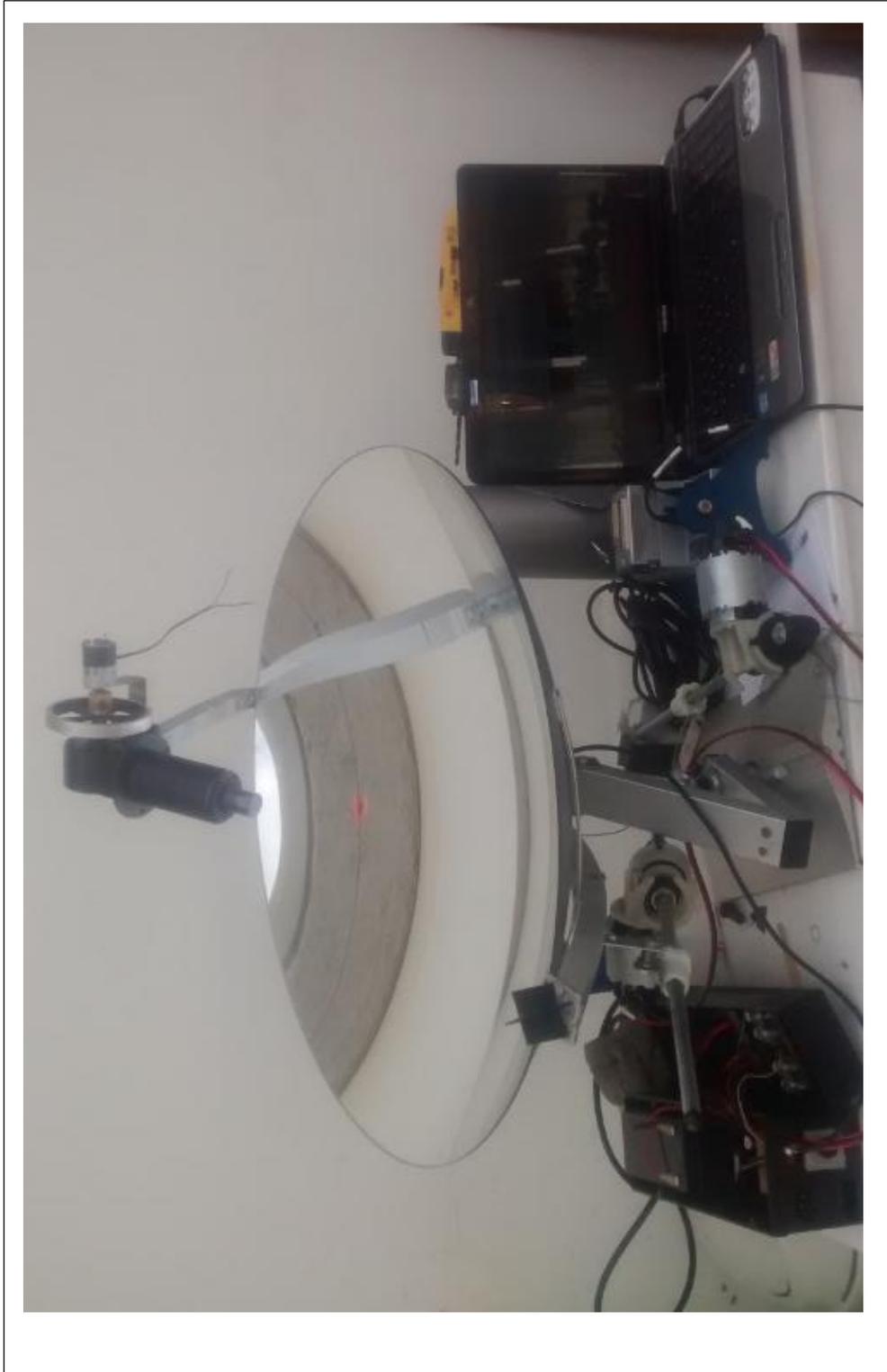


Figura 5.1. Central Stirling

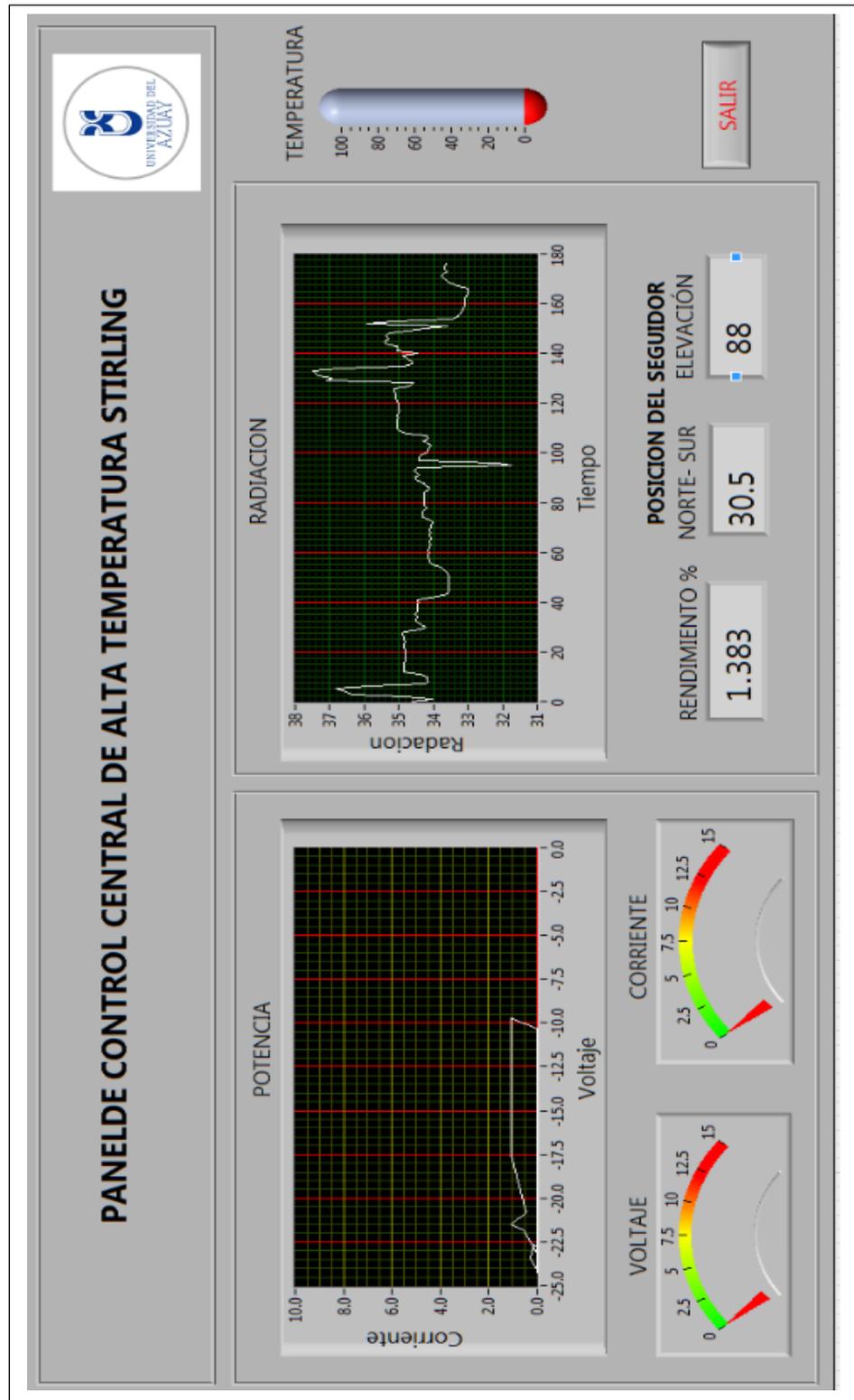


Figura 5.2. Pruebas de control

### 5.3. Tabulación de resultados

La siguiente tabla muestra los datos colectados del funcionamiento de la central de alta temperatura, actualizados cada media hora.

Central termosolar de alta temperatura							
Fecha:	18/09/2015	Ubicación		Generador			
Hora	Temp. °c	N – S	E – O	Voltaje	Corriente	Potencia	Radiación
10H00	12	30,5	48	0 V	0 A	0 W	140Wm <sup>2</sup>
10H30	13	30	55	0 V	0 A	0 W	165Wm <sup>2</sup>
11H00	15	30,5	64	1,89 V	0,5 A	0,94 W	235Wm <sup>2</sup>
11H30	14	31	75	2 V	0,5 A	1 W	285Wm <sup>2</sup>
12H00	17	30,5	89	2,2 V	0,5 A	1,1 W	385Wm <sup>2</sup>
12H30	18	30,5	95	1,98 V	0,5 A	0,99 W	370Wm <sup>2</sup>
13H00	17	30	105	2,1 V	0,5 A	1,05 W	380Wm <sup>2</sup>
13H30	16	30	112	0 V	0,5 A	0 W	185Wm <sup>2</sup>
14H00	16	30,5	119	1,89 V	0,5 A	0,94 W	290Wm <sup>2</sup>
14H30	17	31	124	1,78 V	0,5 A	0,89 W	328Wm <sup>2</sup>
15H00	14	30,5	130	2,1 V	0,5 A	1,04 W	335Wm <sup>2</sup>
15H30	15	30,5	136	0 V	0 A	0 W	185Wm <sup>2</sup>
16H00	17	30	138	0 V	0 A	0 W	160Wm <sup>2</sup>
16H30	14	30,5	145	0 V	0 A	0 W	225Wm <sup>2</sup>

Tabla 5.1. Tabla de resultados central termosolar de alta temperatura

### **5.3. Guía práctica para los estudiantes de energías renovables**

Al desarrollar un proyecto didáctico el principal objetivo es que sea útil para que los estudiantes de la materia de energías renovables conozcan las tecnologías en desarrollo y se familiaricen con formas de producir energía mecánica a partir de la energía solar.

#### **Tema:**

Central termosolar de alta temperatura mediante el generador Stirling.

#### **Objetivo:**

Estudiar y analizar el rendimiento de una central termosolar de alta temperatura mediante el generador Stirling.

#### **Desarrollo:**

La primera cercanía a fuentes de calor térmico es el concentrador solar, que nos permite enfocar los rayos luminosos en un punto en donde estará el punto de mayor temperatura del motor Stirling. El propósito de la experiencia es poder obtener los datos necesarios y luego inferir algunas conclusiones relevantes.

#### **Materiales**

Central didáctica termosolar de alta temperatura mediante el generador Stirling.

Software de control

#### **Instrucciones**

Ubicar la central termosolar de alta temperatura en un lugar óptimo para su funcionamiento, este debe estar asentado sobre una base estable recibir la luz solar de manera directa.

Encender el sistema de seguimiento y comprobar su funcionamiento.

Iniciar el software de control y tomar los datos obtenidos.

Tabular los datos obtenidos.

Analizar los resultados obtenidos.

Calcular el rendimiento del sistema

$$\eta\% = \frac{\text{Energía de entrada}}{\text{Energía de salida}} * 100$$

Fuente: <http://espacientifico.weebly.com/tema-4---bloque-vii.html>

Calcular el costo de la producción energética Kw H

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones:

- En el desarrollo del proyecto de investigación se logró el diseño, construcción y control de una central didáctica termosolar de alta temperatura mediante el generador Stirling, con el cual se pueden realizar prácticas y tener un acercamiento a nuevas fuentes de generación de energía.
- El componente electrónico se escogió de tal manera que se logre un control eficiente y a bajo costo de producción con componentes que se consiguen en distribución local.
- La construcción y control del sistema mecánico del seguidor solar se logró con fiabilidad y exactitud, el proyecto resulta viable sólo es necesario realizar la correcta selección de los materiales y componentes a ser fabricados y comprados
- El software de control es muy gráfico haciendo amigable con el usuario de modo que pueda saber cómo se está comportando el sistema a cada momento.
- Este sistema puede ser implementado en un laboratorio con fines didácticos.

**Recomendaciones:**

- Hacer pruebas del hardware diseñado para corregir errores y seguir las normas de diseño para lograr un ahorro en espacio en las tarjetas electrónicas.
- Hacer el software de control lo más gráfico posible de modo que las lecturas de las mediciones sean fáciles de interpretar para los usuarios.
- Realizar diseños a escala real antes de la construcción de piezas y que estén sean de fácil acceso en caso de tener que realizar ajustes o modificaciones posteriores.
- Trabajar con materiales maleables y con los equipos de protección con el fin de minimizar el riesgo de generar lesiones durante la construcción de las partes móviles.

## BIBLIOGRAFÍA

**CONELEC** (2008); Atlas Solar Del Ecuador Con Fines De Generación Eléctrica.

[Consulta: 10 de mayo del 2014 ]

**Bellows** Felicia. (2009). Concentrated Solar Power. [Consulta: 20 de junio 2014]

**Gomes** Fontanil David. (2012). Ecomateriales y Construcción Sostenible [En línea]:

<[http://www.eoi.es/wiki/index.php/Radiaci%C3%B3n\\_directa,\\_difusa\\_y\\_reflejada\\_en\\_Ecomateriales\\_y\\_construcci%C3%B3n\\_sostenible](http://www.eoi.es/wiki/index.php/Radiaci%C3%B3n_directa,_difusa_y_reflejada_en_Ecomateriales_y_construcci%C3%B3n_sostenible)>. [Consulta:10 de junio 2014]

**INEC**. [s.a.] Sistema Integrado De Clasificaciones Y Consulta. En línea. Disponible:

[http://www.inec.gob.ec/estadisticas/SIN/co\\_metal.php?id=48219.00.01](http://www.inec.gob.ec/estadisticas/SIN/co_metal.php?id=48219.00.01)

**Wolfgang** Schield. (2011). Built Dish Stirling Central. [En línea]:

<[http://www.sbp.de/en#build/category/100-Dish\\_stirling](http://www.sbp.de/en#build/category/100-Dish_stirling)>.[Consulta: 15 de agosto 2014]

**Sanzol** Moriones Andrés. (2015). Maquinas Stirling. [En Línea]:

<<http://salesianospamplona.info/maquinas/index.htm>>. [Consulta:15 de agosto 2014]

**Roman** Roberto I. (2006). Termotecnia. [En línea]:

<[http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap\\_10/strlng1.htm](http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/strlng1.htm)>. [Consulta:15 de agosto 2014]

**Seguidores Solares**. [En línea]:

<[http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER\\_seguidores\\_solares.pdf](http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER_seguidores_solares.pdf)>. [Consulta:10 de enero 2015]

**Universidad De El Salvador. Sensores Y Transductores**. [En línea]:

<[http://www.oocities.org/iel\\_115/archivos/capitulo3.pdf](http://www.oocities.org/iel_115/archivos/capitulo3.pdf)>. [Consulta:10 de enero 2015]

**Sensores Y Transductores**. [En línea]:

<[http://www.eudim.uta.cl/files/5813/2069/8949/fm\\_Ch03\\_mfuentesm.pdf](http://www.eudim.uta.cl/files/5813/2069/8949/fm_Ch03_mfuentesm.pdf)>.

[Consulta:10 de enero 2015]

**Energía Solar Fotovoltaica.** [En línea]:

[http://www.renova-energia.com/energia\\_renovable/energia\\_solar\\_fotovoltaica.html](http://www.renova-energia.com/energia_renovable/energia_solar_fotovoltaica.html)

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7170/1/MEMORIA%20TECNICA.pdf>>. [Consulta:15 de enero 2015]

**Fernández Salgado José María.** (2010). Guía Completa De La Energía Solar Térmica Y Termoeléctrica. [Consulta:4 de febrero 2015]

**Garrido García Santiago.** (2010). INGENIERÍA DE CENTRALES TERMOSOLARES CCP. Estado del arte en Tecnología Termosolar. [Consulta:18 de marzo 2015]

**Creus Solé Antonio.** (2010). ENERGÍA TERMOSOLAR. [Consulta:25 de mayo 2015]

**Sol-Arq** Soluciones Arquitectónicas [en línea]: <http://www.sol-arq.com/index.php/factores-ambientales/radiacion>. [Consulta:10 de mayo 2015]

**Universidad Carlos III de Madrid** (2009) [en línea]: <http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/7869/Proyecto%20Dish%20Stirling.pdf;jsessionid=6D9167DC3CF747A49A1521DA591BE39E?sequence=1> [Consulta: 5 de enero 2015]

**Universidad de Cuenca** (2012) [en línea]: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/689/1/te321.pdf> [Consulta: 6 de enero 2015]

**ENERSTARS** [s.a.] Centrales Solares Termoeléctricas. En línea. Disponible: <http://www.enerstar.es/ver/179/Centrales-Solares-Termoel%C3%A9ctricas-CSP.html> [Consulta: 10 de enero 2015]

**Sanzol Morrines Andres** Maquinas Stirling (2015). En línea. Disponible: <http://salesianospamplona.info/maquinas/contenido.htm> [Consulta: 24 mayo 2014]