

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE CONVERSION DE ENERGÍA COMPUESTO POR UN CONCENTRADOR SOLAR Y UN MOTOR STIRLING PARA LA REGION PUNO”

TESIS

PRESENTADO POR:

CHAMBI MAMANI, PEDRO
VILCA RODRIGUEZ, EDWIN

**PARA OPTAR EL TITULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PUNO - PERU
2013**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
CONVERSION DE ENERGÍA COMPUESTO POR UN
CONCENTRADOR SOLAR Y UN MOTOR STIRLING
PARA LA REGION PUNO”****TESIS PRESENTADA POR:**CHAMBI MAMANI, PEDRO
VILCA RODRIGUEZ, EDWIN**PARA OPTAR EL TITULO DE: INGENIERO ELECTRÓNICO**

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE

:

Mg. Teobaldo Raúl Basurco Chambilla

PRIMER MIEMBRO

:

M.Sc. Ivan Delgado Huayta

SEGUNDO MIEMBRO

:

Ing. Crispin Pally Cari

DIRECTOR DE TESIS

:

Mg. Marco Antonio Quispe Barra

ASESOR DE TESIS

:

M.Sc. David Salinas Mendoza

ÁREA: Electrónica general**TEMA: Electrónica de potencia****PUNO – PERÚ
2013**

DEDICATORIA

La presente tesis la dedico a Dios, a mis padres y a mi hermana. Quienes han sido mi inspiración en el pasar del tiempo.

A mi madre, por ser la persona más emprendedora que he conocido, que me ha enseñado a ser el mejor, cada día de mi vida.

A mi padre, el hombre más trabajador, que admiro y que siempre me han enseñado excelentes valores, como estar unidos en familia y luchar por nuestra metas.

Pedro Chambi Mamani

La presente la dedico en memoria de mi hermana Madeleine, que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado; por ello, con toda la humildad que de mi corazón puede emanar.

De igual forma, a mis padres, a quien debo toda mi vida, les agradezco el cariño y su comprensión, a ustedes quienes han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante buscando siempre el mejor camino.

A los Ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica que con tanta paciencia y dedicación, han entendido y atendido cada una de mis necesidades como alumno de esta Universidad.

Edwin Vilca Rodriguez

AGRADECIMIENTO

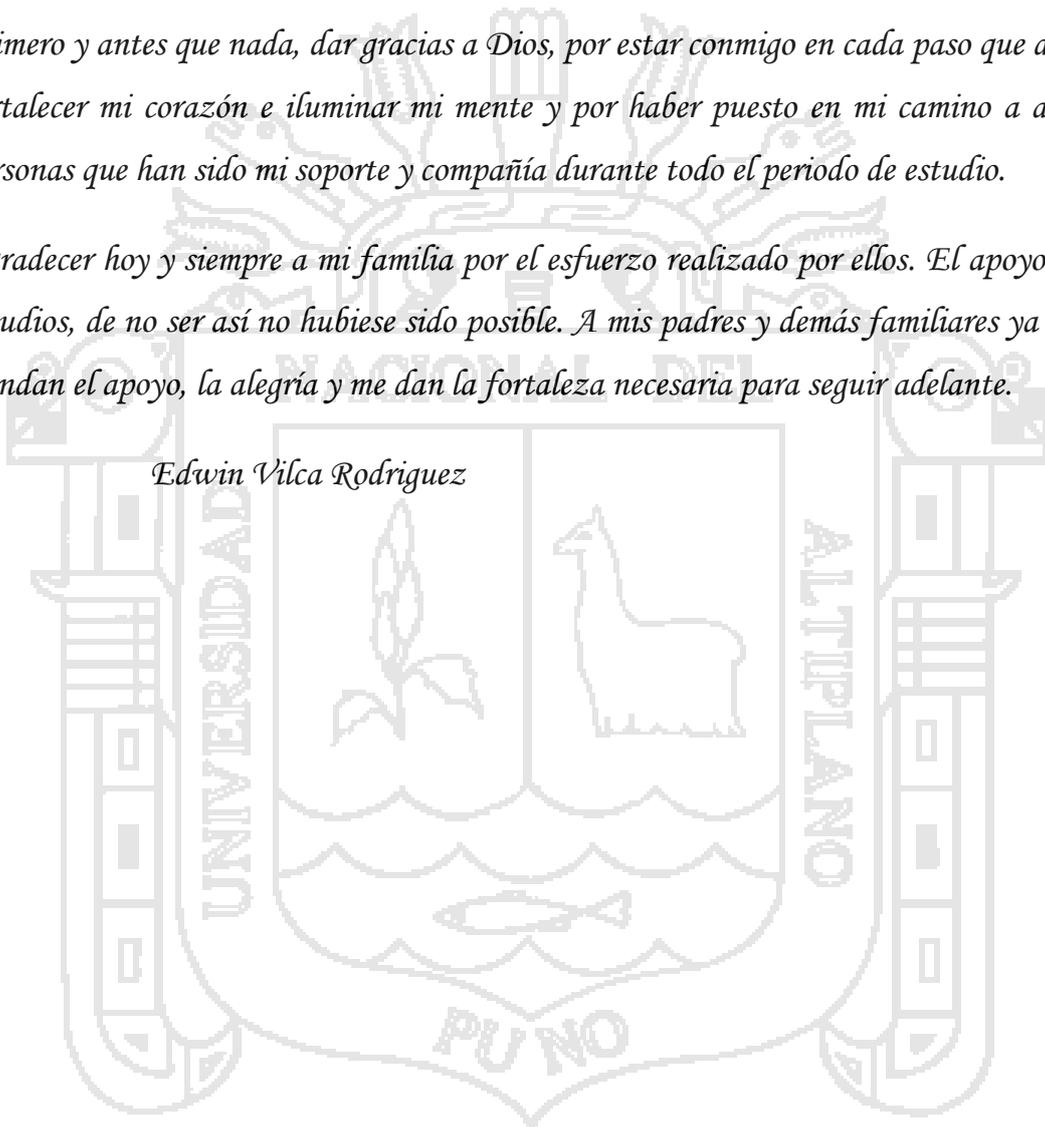
Con todo mi cariño a Dios y para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento a mi papá y mi mamá.

Pedro Chambi Mamani

Primero y antes que nada, dar gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a mi familia por el esfuerzo realizado por ellos. El apoyo en mis estudios, de no ser así no hubiese sido posible. A mis padres y demás familiares ya que me brindan el apoyo, la alegría y me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

Edwin Vilca Rodriguez



INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLASXI

RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	14
CAPITULO V VIENE A SER LA PARTE MÁS IMPORTANTE DE LA INVESTIGACIÓN, SE PRESENTAN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CADA UNA DE LAS COMPONENTES COMO EL CONCENTRADOR SOLAR, SEGUIDOR SOLAR Y EL MOTOR STIRLING, LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA INVESTIGACIÓN, Y LAS DIFICULTADES QUE SE TUVIERON DURANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.....	15
CAPITULO I.....	16
I. PLANTENAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.....	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1.1. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	17
1.1.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.1.1.2 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION.....	18
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
1.3.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA.....	20
1.3.2. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	20
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.....	21
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	21
1.3.2. OBJETIVO ESPECIFICO.....	21
CAPITULO II.....	22
II. MARCO TEORICO, MARCO CONCEPTUAL E HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION .22	
2.1. MARCO TEORICO.....	23
2.2.1 CONCENTRADOR SOLAR.....	23
2.2.1.1 ENERGÍA SOLAR.....	23
2.2.1.2 ENERGIA SOLAR EN EL PERÚ.....	23
2.2.1.3 ENERGIA SOLAR EN LA REGION PUNO.....	23
2.2.1.4 EL SOL.....	25
2.2.1.5 RADIACIÓN EXTRATERRESTRE, Gsc.....	26
2.2.1.6 DISTRIBUCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE.....	27
2.2.1.7 VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN EXTRATERRESTRE.....	28
2.2.1.8 COMPONENTES DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	29

2.2.1.9 DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR RESPECTO AL PLANO TERRESTRE.....	30
2.2.1.10 DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR RESPECTO A LA SUPERFICIE DEL COLECTOR.	32
2.2.1.11 COLECTOR SOLAR	34
2.2.1.12 TIPOS DE COLECTORES	34
2.2.1.13 PARTES DEL COLECTOR SOLAR PDR.....	37
2.2.1.14 IMPLEMENTACION DE CONCENTRADOR SOLAR DE DISCO PARABOLICO REFLECTOR.....	38
2.2.2 SEGUIDOR SOLAR.....	39
2.2.2.1 MOVIMIENTOS DEL PLANETA CON RESPECTO AL SOL	40
2.2.2.2 LA HORA SOLAR.....	41
2.2.2.3 UBICACIÓN DE LA TRAYECTORIA SOLAR.....	42
2.2.2.4 TIPOS DE SEGUIDORES SOLARES	44
2.2.2.4.1 SEGUIDOR SOLAR PASIVO	44
2.2.2.4.2 SEGUIDOR SOLAR ACTIVO	45
2.2.2.4.3 SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE AZIMUTAL.....	45
2.2.2.4.4 SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE, HORIZONTAL	45
2.2.2.4.5 SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE, POLAR.....	46
2.2.2.4.6 SEGUIDORES DE DOS EJES.....	47
2.2.2.4.7 SEGUIDOR DE DOS EJES DE INCLINACIÓN (TIP-TILT).....	47
2.2.2.4.8 SEGUIDOR DE ACIMUT-ALTITUD	47
2.2.3 MOTOR STIRLING.....	48
2.2.3.1 HISTORIA DEL MOTOR STIRLING.....	48
2.2.3.2 CICLO TÉRMICO	49
2.2.3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL CICLO STIRLING.....	50
2.2.3.4 VENTAJAS DEL MOTOR STIRLING	51
2.2.3.5 TIPOS DE CONFIGURACIÓN CONSTRUCTIVA DE LOS MOTORES STIRLING	52
2.2.3.5.1 CONFIGURACIÓN ALFA	52
2.2.3.5.2 CONFIGURACIÓN BETA	52
2.2.3.5.3 CONFIGURACIÓN GAMMA	53
2.2.3.6 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN MOTOR STIRLING.....	54
2.2.3.6.1 ZONA CALIENTE.....	54
2.2.3.6.2 ZONA FRÍA.....	55
2.2.3.6.3 REGENERADOR.....	57
2.2.3.6.4 PISTÓN	60
2.2.3.6.5 DESPLAZADOR.....	61

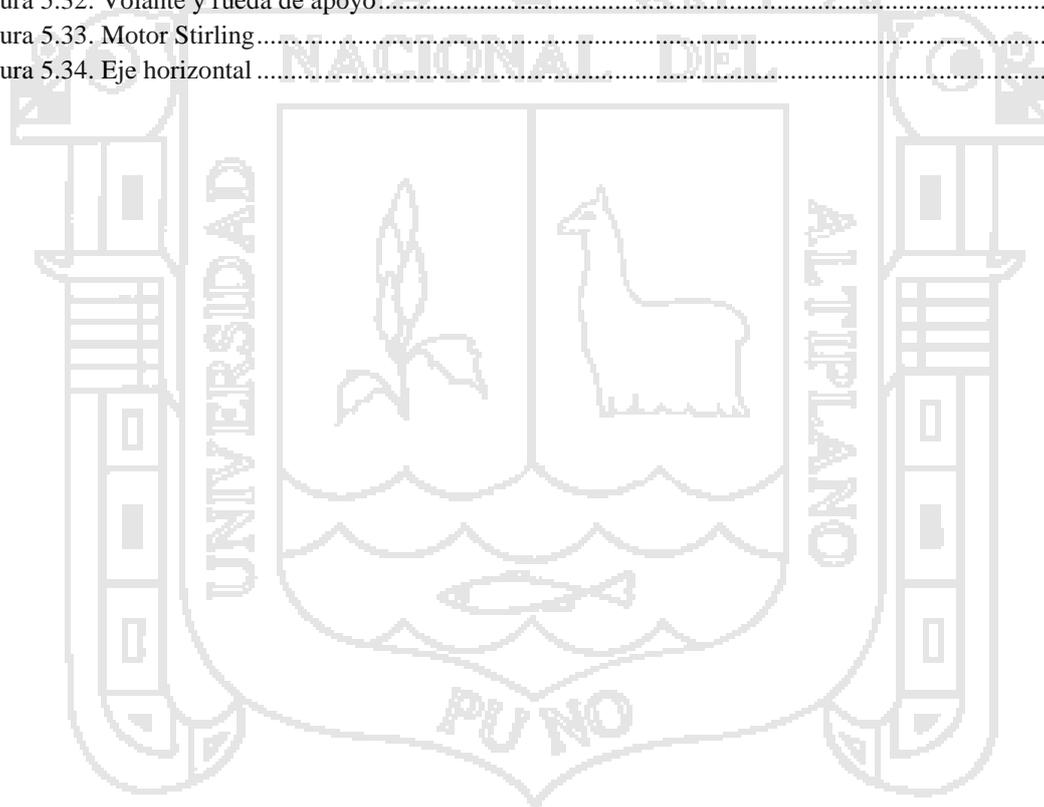
2.2.3.6.6	LA VOLANTE.....	62
2.2.	MARCO CONCEPTUAL	63
2.2.1	SEGUIDOR SOLAR:	63
2.2.2	COLECTOR SOLAR:.....	63
2.2.3	PUNTO FOCAL:	63
2.2.4	COMPARADORES:.....	64
2.2.5	FOTOTERMICA:.....	64
2.2.6	FOTOVOLTAICA:	64
2.2.7	PDR: 65	
2.2.8	COMBUSTION EXTERNA:.....	65
2.2.9	RADIACION ELECTROMAGNETICA:	66
2.2.10	MOTOR STIRLING:	66
2.2.11	LDR (FOTORRESISTENCIA):	67
2.2.12	LAZO ABIERTO:.....	67
2.2.13	MYLAR:.....	68
2.3.	HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION.....	68
2.3.1.	HIPOTESIS GENERAL	68
2.3.2.	HIPOTESIS ESPECÍFICO	68
III.	METODO DE INVESTIGACION	69
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	70
3.1.1	DISEÑO DE INVESTIGACION	70
3.2.	METODOLOGÍA.....	70
3.3.	TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS	70
3.3.1	TECNICAS	70
3.3.2	MEDICION	71
3.3.3	REVISION DE HOJA DE DATOS	71
3.3.4	INSTRUMENTOS	71
3.4.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	71
3.5.	RECURSOS HUMANOS	71
CAPITULO IV	72
IV.	CARACTERIZACION DEL ÁREA DE INVESTIGACION.....	72
4.1.	ÁREA DE ESTUDIO.....	73
CAPITULO V	75
V.	EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS	75

5.1	CONCENTRADOR SOLAR	76
5.1.1	CONSTRUCCION DEL COLECTOR PDR.....	76
5.1.2	DESCRIPCION DE CONSTRUCCION DE UN COLECTOR PDR CON UNA ANTENA DE TV (OFFSET).....	76
5.1.3	TEMPERATURAS ALCANZADAS:	77
5.1.4	REFLECTIVIDAD:	78
5.2	SEGUIDOR SOLAR	79
5.2.1	DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR	79
5.2.1.1	SELECCIÓN DEL TIPO DE SEGUIDOR	79
5.2.2	DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES	80
5.2.2.1	SENSORES	81
5.2.2.2	CIRCUITO ELECTRÓNICO	83
5.2.2.3	PUENTE H	83
5.2.2.4	CIRCUITO DE POSICIONAMIENTO INICIAL	84
5.2.2.5	REGULADOR DE TENSIÓN	85
5.2.2.6	CIRCUITO COMPLETO	85
5.2.2.7	MATERIALES UTILIZADOS	86
5.2.3	CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO	87
5.2.3.1	CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE MECÁNICA	88
5.2.3.2	REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....	88
5.2.3.3	DISEÑO DEL EJE VERTICAL	90
5.2.3.4	DISEÑO DEL EJE HORIZONTAL	90
5.3	MOTOR STIRLING	92
5.1.1	DISEÑO DEL PROTOTIPO	92
5.1.2	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	92
5.1.2.1	CILINDRO	92
5.1.2.2	ENFRIADOR	93
5.1.2.3	PISTON	94
5.1.2.4	DESPLAZADOR	94
5.1.2.5	SOPORTE DEL CIGÜEÑAL	95
5.1.2.6	VOLANTE.....	95
5.1.3	FUNCIONALIDAD:	96
CONCLUSIONES		98
RECOMENDACIONES		100
BIBLIOGRAFIA		102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Energía solar incidente diaria	25
Figura 2.2. Relación geométrica entre el sol y la tierra	26
Figura 2.3. Curva de irradiación espectral normalizada por la ASTM E-490	28
Figura 2.4. Componentes de la radiación solar.....	30
Figura 2.5. Definición esquemática del ángulo cenit θ_z	31
Figura 2.6. Definición esquemática del ángulo de altitud solar α	31
Figura 2.7. Vista superior del plano terrestre definiendo el ángulo acimutal solar γ_s	32
Figura 2.8. Definición de la inclinación β y el ángulo acimutal γ	33
Figura 2.9. Definición esquemática del ángulo de incidencia θ	33
Figura 2.10. Diagrama esquemático de las partes que componen al colector PDR.....	37
Figura 2.11. Infinita motores Stirling con el colector térmica.....	39
Figura 2.12. Movimiento de Rotación de la Tierra.....	40
Figura 2.13. Movimiento de Traslación de la Tierra.....	41
Figura 2.14. Variación en la Declinación por Efecto del movimiento de traslación	41
Figura 2.15. Hora Solar	42
Figura 2.16. Ubicación de un punto en la tierra	43
Figura 2.17. Ubicación del sol.....	43
Figura 2.18. Seguidor solar de un eje azimutal	45
Figura 2.19. Seguidor solar de un eje horizontal	46
Figura 2.20. Seguidor solar de un eje polar	46
Figura 2.21. Seguidor solar de dos ejes.....	47
Figura 2.22. Sir Robert Stirling	48
Figura 2.23. Comportamiento de cada del motor Stirling tipo gamma.....	50
Figura 2.24. Motor Stirling de configuración alfa.....	52
Figura 2.25. Motor Stirling de configuración beta.....	53
Figura 2.26. Motor Stirling de configuración gamma.....	53
Figura 2.27. Componentes de un motor Stirling.....	54
Figura 2.28. Fotografía de la zona caliente de un motor no presurizado.....	55
Figura 2.29. Esquema de la zona fría del motor Stirling construido.....	57
Figura 2.30. Regeneradores anulares.....	58
Figura 2.31. Regeneradores móviles.....	58
Figura 2.32. Capacidad térmica volumétrica para diferentes materiales.....	59
Figura 2.33. Difusividad térmica volumétrica para diferentes materiales.....	59
Figura 2.34. Desplazador regenerador (NASA).....	60
Figura 2.35. Pistón (NASA).....	60
Figura 2.36. Desplazador.....	62
Figura 2.37. Volante.....	62
Figura 4.1. Ubicación de la Región Puno	73
Figura 4.2. Temperaturas Máximas y Mínimas.....	74
Figura 5.1. Antena parabólica tipo disco de TV (Offset)	76
Figura 5.2. Manera de pegar Mylar	77
Figura 5.3. Antena parabólica Forrado de Mylar	77
Figura 5.4. Concentrador de metal pulido	78
Figura 5.5. Concentrador de alta reflectividad	79
Figura 5.6. Esquema básico del seguidor solar.....	80
Figura 5.7. Disposición y Desviación de los LDR's.....	81
Figura 5.8. Respuesta de los sensores LDR's.....	82
Figura 5.9. Circuito comparador.....	83
Figura 5.10. Integrado L298 Puente H	84
Figura 5.11. Circuito Posición Inicial.....	84
Figura 5.12. Regular de tensión.....	85

Figura 5.13. Circuito completo del seguidor solar.....	85
Figura 5.14. Cara Transversal de la Placa del Seguidor	86
Figura 5.15. Diseño del prototipo	87
Figura 5.16. Movimiento Vertical	88
Figura 5.17. Movimiento horizontal.....	89
Figura 5.18. Sistema de concentrado.....	89
Figura 5.19. Aleta de soporte del concentrador solar	90
Figura 5.20. Eje vertical	90
Figura 5.21. Eje horizontal	91
Figura 5.22. Estructura de seguidor solar	91
Figura 5.23. Concentrador solar acoplado al seguidor solar.....	92
Figura 5.24. Diseño 3D Cilindro	92
Figura 5.25. Tubo de ensayo (Cilindro).....	93
Figura 5.26. Diseño 3D Enfriador	93
Figura 5.27. Enfriador	94
Figura 5.28. Diseño 3D Pistón	94
Figura 5.29. Diseño 3D Desplazador.....	95
Figura 5.30. Diseño 3D Eje del Cigüeñal	95
Figura 5.31. Diseño 3D volante.....	95
Figura 5.32. Volante y rueda de apoyo.....	96
Figura 5.33. Motor Stirling.....	97
Figura 5.34. Eje horizontal	97



INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Días promedios de los meses y valores de n para cada mes.....	14
Tabla 2.2 Clasificación de colectores solar.....	20
Tabla 5.1 Temperaturas alcanzadas.....	63
Tabla 5.2 Materiales.....	71



RESUMEN

En la presente tesis se desarrolló el **diseño e implementación de un prototipo de conversión de energía compuesto por un concentrador solar y un motor Stirling para la región Puno** de pequeña modularidad, así como las pruebas de su funcionamiento y comportamiento térmico, los cuales dependen de la capacidad del colector de mantenerse siempre en orientación directa al Sol por lo que fue necesaria la implementación de un sistema de seguimiento solar en dos ejes.

El diseño del colector se dividió en tres partes; la primera de ellas trata de la construcción de un concentrador solar, el cual está constituido por una antena parabólica de TV, recubierta con material reflectante (Mylar), para que refleje la luz solar y la concentre en el punto focal; la segunda parte consistió en el diseño del sistema de control de circuito analógico, que se basa en el funcionamiento de comparadores y las fotorresistencias (LDR's) que determinan el movimiento aparente del sol a lo largo del día después accionar los dos ejes de movimiento, uno para la elevación (0 a 90°) y otro para el acimut (0 a 180°); la tercera, la parte mecánica, que a su vez se dividió en dos secciones, la primera es la ubicación de los motores para los dos ejes que permiten al colector moverse a una velocidad baja y torque elevado con una precisión aproximada de un grado, la segunda el diseño y construcción de la estructura de soporte sobre la cual se sostienen las dos cajas de engranes, los ejes de rotación y el disco parabólico.

ABSTRACT

In this thesis the design and implementation of a prototype power conversion comprises a solar concentrator and a Stirling engine for the Puno region of small modular and testing its performance and thermal behavior was developed, which depend on the collector capacity always stay in direct orientation to the sun so that the implementation of a system of two-axis solar tracking was required.

The design of the collector is divided into three parts, the first of which is the construction of a solar concentrator, which is constituted by a TV satellite dish coated with reflective material (Mylar), to reflect the sunlight and concentrate on the focal point, the second part consisted of the design of the control system of analog circuit, which is based on the operation of comparators and photoresistors (LDR 's) that determine the apparent movement of sun throughout the day after actuating the two movement axes, one for elevation (0 to 90°) and another for the azimuth (0 to 180°), the third, the mechanical part which in turn is divided into two sections, the first is the location of the motors for the axes to allow the collector to move at a low speed and high torque with an accuracy of approximately one degree, the second the design and construction of the support structure on which hold the two gearboxes, the axes of rotation and the parabolic dish.

INTRODUCCIÓN

La energía solar resulta una alternativa viable para solucionar los problemas energéticos que el uso de los combustibles fósiles conlleva. En la actualidad existe mucha información acerca del comportamiento de esta energía, en que magnitud se recibe en nuestro planeta y especialmente en la Región - Puno. Actualmente se siguen generando conocimientos y avances tecnológicos con el objetivo de lograr una mejor captación de la energía solar de forma cada vez más económica y eficiente, para esto se han desarrollado una serie de modelos experimentales y a partir de ellos se ha pretendido mejorarlos cada vez más, sin embargo, estas mejoras llevan consigo un inevitable incremento en los costos de fabricación.

Existen diversas tecnologías de colectores solares cuyas eficiencias dependen de la capacidad de captación de radiación solar, siendo la más usada la del tipo colector plano, como los paneles solares sin embargo, su concentración es relativamente baja comparada con otras tecnologías utilizadas a niveles industriales gigantescos, tal es el caso de los colectores de concentración, específicamente la de disco parabólico reflector. Hasta ahora la tecnología de concentración sólo se ha manejado a gran escala (de 5 a 7 m de diámetro) justificando así la demanda de energía eléctrica necesaria para mover el colector en dos ejes de rotación lo que precisamente le da la posibilidad de alcanzar elevados niveles de concentración.

El objetivo de esta tesis es diseñar y construir un prototipo de un concentrador solar parabólico de disco reflector con dos ejes de seguimiento y de un diámetro de 0.6m, que proporcione energía térmica de alta calidad (elevada temperatura). La razón de proporcionar un disco de este diámetro radica en hacer que la tecnología solar de concentración sea aplicable tanto a satisfacer las necesidades de energía térmica para servicios y usos industriales de la pequeña y mediana industria así como de casa habitación, y deje de ser exclusiva de la producción de vapor para generación de potencia.

Para cumplir el objetivo de este trabajo de tesis la información se presenta en cinco capítulos, como se describe a continuación.

- CAPITULO I** Planteamiento del problema, antecedentes y objetivos de la investigación, se presenta el problema, justificación, y los objetivos de la investigación.
- CAPITULO II** Este capítulo pretende situar en un contexto actual la aplicación de la energía solar fototérmica como alternativa de solución a la demanda energética en los hogares e incluso en la pequeña y mediana industria. Se dan a conocer las diferentes tecnologías de colectores solares, haciendo énfasis en los de disco parabólico reflector (PDR por sus siglas en inglés), seguidores solares y el funcionamiento de un motor de combustión externa como el motor Stirling.
- CAPITULO III** Esta parte está destinado a dar cuenta del métodos de investigación que adoptamos para realizar el proyecto de tesis, el cual comprende el tipo y diseño de investigación, técnicas e instrumentos.
- CAPITULO IV** En forma breve, se resalta las características más importantes del lugar donde se realizó la investigación, se detalla aspectos técnicos sobre el clima como la radiación solar, precipitaciones pluviales, temperaturas mínimas y máximas alcanzadas en la región de Puno.
- CAPITULO V** Viene a ser la parte más importante de la investigación, se presentan el diseño y construcción de cada una de las componentes como el concentrador solar, seguidor solar y el motor Stirling, los resultados obtenidos en la investigación, y las dificultades que se tuvieron durante la implementación del prototipo.

CAPITULO I

I. PLANTENAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La electricidad es una de las fuentes de energía más útiles y versátiles que existe, por ello, día a día, se incrementa la dependencia del hombre a su uso, llegando a medirse el grado de desarrollo y modernización de un país, en función del nivel de electrificación que posee.

En la actualidad el desarrollo de las energías renovables en nuestro país, específicamente en el área de sistemas de concentración solar esta pre incipiente, a diferencia de otros países en los cuales utilizan esta tecnología para la generación de electricidad a gran escala a través de plantas termoeléctricas. Esta tecnología tiene un gran interés socioeconómico y ambiental, al encontrar la viabilidad de la misma por el gran potencial solar que existe en nuestra región.

Para que en nuestro país esta alternativa energética también esté a nuestro alcance es necesario contribuir y profundizar las investigaciones en el campo de la concentración de la energía solar ante esto es necesario dar el primer paso en el diseño y construcción o mejora de los prototipos que deben estar orientadas a la obtención de vapor de agua u otro líquido a altas temperaturas, para así poder generar vapor y pensando en un futuro próximo en la generación de energía eléctrica ya que esta siempre será una necesidad en este mundo moderno que cada día requiere de mayor energía para mejorar su calidad de vida, y sobre todo para los gases de efecto invernadero emitidas en la combustión de energías tradicionales como el petróleo, gas y el carbón, y así mitigar el Cambio Climático que hoy enfrenta nuestro planeta, y que cada día se intensifica.

1.1.1. FORMULACION DEL PROBLEMA

1.1.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿El diseño e implementación de un prototipo de conversión de energía compuesto por un concentrador solar y un motor Stirling que tan eficiente será respecto a la generación de energía mediante paneles solares?

1.1.1.2 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿En qué medida es posible realizar el diseño e implementación de un concentrador solar para la región Puno?
- ¿Cuál es el estado de arte de un seguidor solar PDR de dos ejes?
- ¿Cuáles son las características técnicas del motor Stirling y que tipo de configuración es el idóneo la conversión de energía?

1.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

Entre los antecedentes del problema a citar:

- “Powering Solar Energy Solutions For The World PowerDish™” Realizado por Infinia Corp. En Ogden, Utah, USA. PowerDish es un innovador sistema de generación eléctrica solar que convierte el calor del sol en electricidad. El PowerDish se constituye de la patente de bajo costo y sin mantenimiento del generador Stirling de Infinia además del disco concentrador solar parabólico que genera electricidad lista para ser conectada a la red eléctrica.
El PowerDish es un sistema automático y autónomo, “plug-n-play” que genera corriente alterna limpia y sin el uso de agua. El sistema produce más electricidad en condiciones de alta irradiación solar, por menos capital instalado y requiriendo menor espacio que las tecnologías competidoras.
- “Diseño y Construcción de un Motor Stirling Para La Generación De Energía Eléctrica”; Realizado por Víctor Raúl Agüero Zamora, en Lima Perú en el 2006; en donde el objetivo principal de este proyecto es generar energía eléctrica con un motor Stirling, tipo beta, con mecanismo rómbico, utilizando para ello un generador eléctrico, y determinar los parámetros que influyen en su funcionamiento, así como también realizar

un estudio teórico y experimental para el diseño, y construcción de este motor.

- “Análisis y Diseño de un sistema de automatización aplicado a la generación de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos autónomos para la electrificación Rural” Realizado por David Rodolfo Paricahua Zapana, en Puno Perú en el 2009; Siendo el objetivo principal la generación de energía eléctrica en la zona rural del altiplano peruano, para tal fin se diseñó un sistema autónomo de generación eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos, utilizando la tecnología de los autómatas programables (PLC) y sistemas de supervisión y control (HMI). Todo ello estructurado con sensores medidor de radiación y velocidad de viento, así mismo el panel fotovoltaico cuenta con modulo seguidor solar de 2 ejes que son accionados por medio de un motor asíncrono trifásico.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El motor de combustión externa diseño original de Robert Stirling, es una máquina térmica, de pistón, que fue perfeccionada más tarde por su hermano ingeniero, James Stirling. Con la quinta ventaja de que sus partes internas no se deterioran con la combustión. No es necesaria la combustión, por ejemplo la energía solar también sirve. Hay algunos equipos hechos con motor de combustión externa en que el calor de la llama de una vela basta para poner en marcha un ventilador casero. Solo 15°C de diferencia de temperatura entre el foco caliente y el frío ya bastan. El sistema tiene menos partes móviles que el motor diesel. Es relativamente silencioso, con menos de 66 dB a plena carga.

Una circunstancia que no se da en automoción es que el motor Stirling funciona muy bien a ritmo constante, mientras calienta el sol.

Inicialmente este principio de combustión externa dejó de usarse con el invento de los motores diesel, hasta renacer al inicio del siglo 20. La segunda guerra mundial puso fin a una serie de nuevos desarrollos y solo hace 25 años volvieron a iniciar nuevas iniciativas y diseños. Este tipo de motor permite,

teóricamente, alcanzar el límite máximo de rendimiento. Intercambia el calor con el exterior, por lo tanto es adaptable a una gran gama de fuentes de calor para su operación. Se han construido motores Stirling que usan como fuente de calor la energía solar, combustibles fósiles, calor de desecho de procesos, etc. Al ser de combustión externa, el proceso de combustión se puede controlar muy bien, por lo cual se reducen las emisiones. Este trabajo de grado pretende mostrar el principio de funcionamiento de este motor, analizarlo y presentar un prototipo funcional para futuras demostraciones. Una de las justificaciones más grandes de este prototipo es de poder mostrar que es posible generar energía no convencional a partir de un motor de combustión externa con cero emisiones de CO₂, esto aporta en la generación de energía limpia.

1.3.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

Permite un desarrollo científico por ende académico, además todos somos conscientes que en nuestro país está en desarrollo de energías renovables, específicamente en el área de sistemas de concentración solar.

1.3.2. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

Los recursos económicos para la implementación del prototipo serán de regular gasto, puesto que la construcción del motor Stirling, concentrador solar y seguidor solar serán construidos de material reciclado.

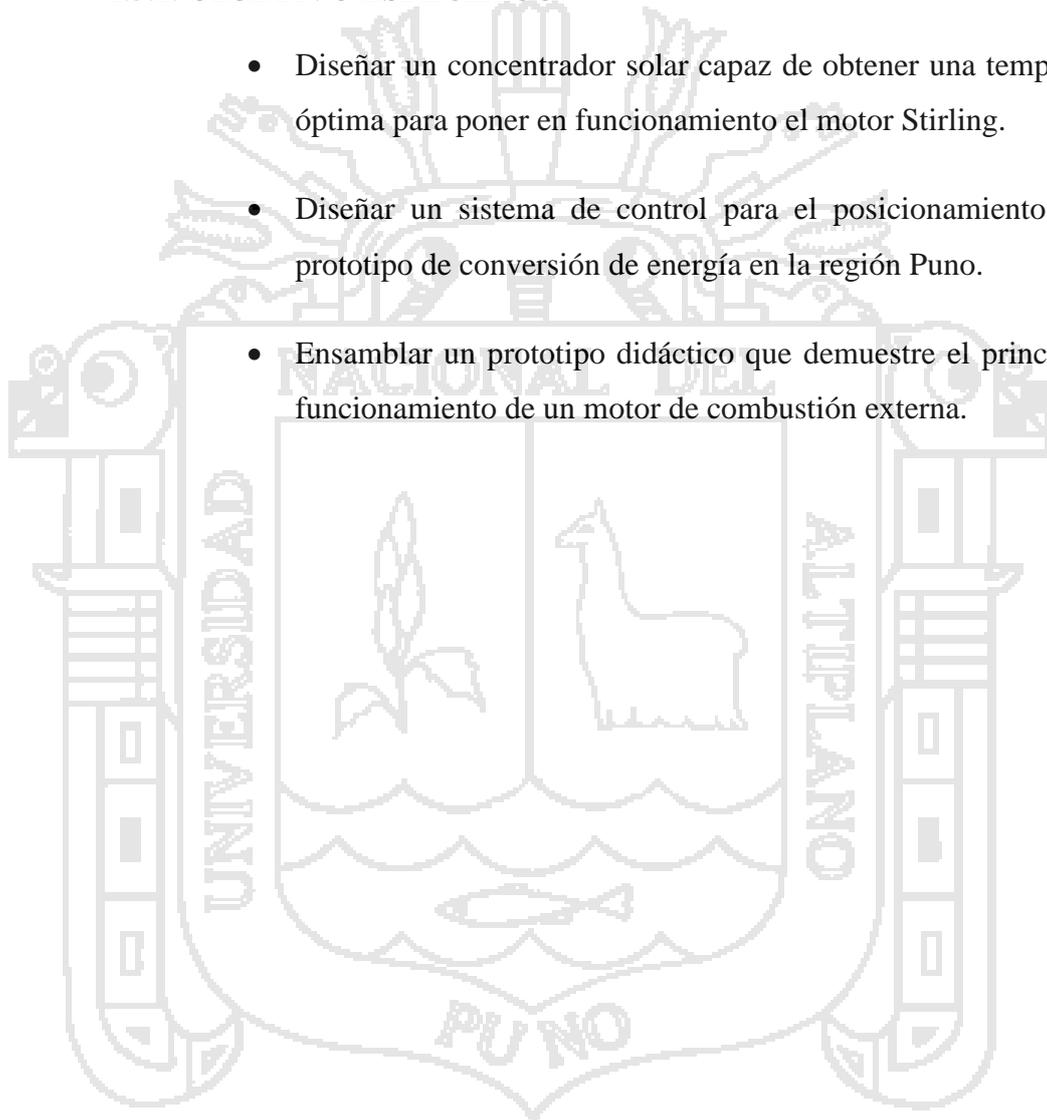
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un prototipo de conversión de energía compuesto por un concentrador solar y un motor Stirling para la región Puno.

1.3.2. OBJETIVO ESPECIFICO

- Diseñar un concentrador solar capaz de obtener una temperatura óptima para poner en funcionamiento el motor Stirling.
- Diseñar un sistema de control para el posicionamiento de un prototipo de conversión de energía en la región Puno.
- Ensamblar un prototipo didáctico que demuestre el principio de funcionamiento de un motor de combustión externa.





CAPITULO II

II. MARCO TEORICO, MARCO CONCEPTUAL E HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION

2.1. MARCO TEORICO

2.2.1 CONCENTRADOR SOLAR

2.2.1.1 ENERGÍA SOLAR

La energía solar obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol, se constituye como una de las alternativas para promover la industria energética renovable y limpia, desde su uso doméstico, como calentar comida o agua y la generación de energía eléctrica.

2.2.1.2 ENERGÍA SOLAR EN EL PERÚ

La energía solar es el recurso energético con mayor disponibilidad en casi todo el territorio peruano. En la gran mayoría de localidades del Perú, la disponibilidad de la energía solar es grande y uniforme durante todo el año, comparado con otros países, lo que hace atractivo su uso. En términos generales, se dispone, en promedio anual, de 4-5 kWh/m^2 día, en la costa y selva y de 5-6 kWh/m^2 día, aumentado de norte a sur de la sierra peruana. Esto implica que la energía solar incidente en pocos metros cuadrados es, en principio, suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de una familia. El problema es transformar esta energía solar en energía útil y con un costo aceptable.

2.2.1.3 ENERGÍA SOLAR EN LA REGIÓN PUNO

En la región Puno se dispone un promedio de 5-6 kWh/m^2 día, aumentado de norte a sur de la sierra peruana.

Evidentemente, el sol como fuente de energía ayuda a la preservación del medio ambiente y por eso se busca masificar este proyecto.

Esta energía puede ser aprovechada por el ser humano por medio de dos tecnologías de conversión que son la **fotovoltaica** y la **fototérmica**, de las cuales se da una breve descripción en los siguientes párrafos.

1) **Sistemas Fotovoltaicos:** Funcionan por medio del efecto fotoeléctrico (también conocido como efecto fotovoltaico) a través del cual la luz solar se convierte en electricidad sin usar ningún proceso intermedio. Los dispositivos donde se lleva a cabo la transformación de luz solar en electricidad se llama generadores fotovoltaicos conformados por celdas solares que al conectarse en serie y/o paralelo dan lugar a los paneles solares.

2) **Sistemas Fototérmicos:** Se fundamentan en la conversión de la energía radiante del Sol en energía térmica la cual es transferida a fluidos de trabajo para producción de calor de proceso. Esto se puede conseguir por medio de dispositivos planos con superficies selectivas o por medio de dispositivos de concentración de radiación con forma de paraboloide de revolución. La energía solar térmica puede aprovecharse para la producción de agua caliente destinada al consumo doméstico, calefacción de hogares, alumbrado de hogares, etc.

En la Figura 2.1 se muestra un mapa de insolación solar de la **Región Puno** – Perú, donde se aprecia la zona con promedio de insolación global de 6.0 a 6.5 kWh/m^2 - día, que los sitúan entre los niveles de radiación más altos del planeta. Tal nivel de radiación indica que el recurso solar es de un elevado índice teniéndose por tanto una alternativa real del recurso energético que puede utilizarse para construir plantas solares de varias decenas de MW de potencia para satisfacer la demanda energética que requiere nuestra Región Puno .

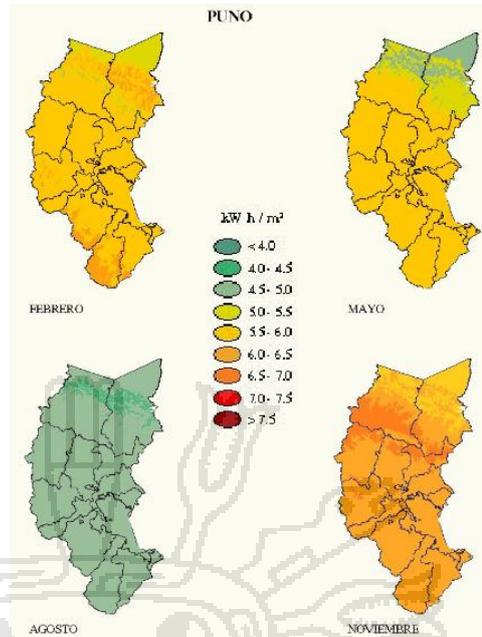


Figura 2.1. Energía solar incidente diaria

Datos del balance nacional de energía, elaborado por Servicio Nacional De Meteorología E Hidrología Senamhi - Puno (energía solar incidente diaria 1975 - 1990).

2.2.1.4 EL SOL

El Sol, es una esfera compuesta de materia gaseosa incandescente con un diámetro de 1.39×10^9 m y localizada a 1.5×10^8 km de la Tierra, su energía radiativa viaja a la velocidad de la luz en el vacío alcanzando el planeta Tierra en 8 min y 20 s.

Para cuestiones de cálculo se considera que el Sol tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de **5760 K**, su temperatura en la región central es mucho mayor variando de 8×10^6 a 40×10^6 K. La energía total proveniente del Sol es de 3.8×10^{20} MWequivalente a 63 MW/m^2 sobre la superficie solar y que es radiada hacia todas direcciones. De toda esta energía la Tierra solo recibe una parte equivalente a 1.7×10^{14} kW. Se estima que esta pequeña fracción de energía incidente sobre la Tierra durante 84 min es igual a la demanda energética mundial durante un año. Como se observa en la Figura 2.2, desde la Tierra, el disco del Sol forma un ángulo de 0.53° , esto es importante para diversas

aplicaciones, especialmente en concentradores ópticos donde el Sol no puede ser considerado como una fuente puntual. Inclusive este pequeño ángulo es significativo en el análisis del desempeño óptico del colector.

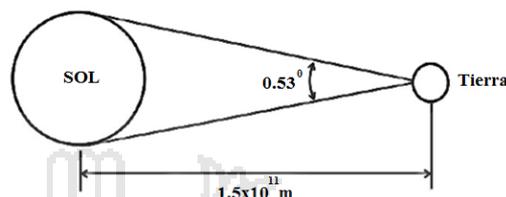


Figura 2.2. Relación geométrica entre el sol y la tierra

La radiación solar recibida sobre la superficie terrestre toma diferentes nombres de acuerdo al intervalo de tiempo en el cual es estimada como se describe a continuación:

Irradiancia.- Es la tasa a la cual la energía radiante es incidente sobre una superficie en un instante dado, se da en W/m^2 , el símbolo G es usado para irradiancia solar.

Irradiación o exposición radiante.- Es la energía incidente por unidad de área de superficie, se encuentra integrando la irradiancia sobre un período de tiempo específico, sus unidades en el S. I. son J/m^2 .

Insolación.- Es el término aplicado específicamente a la irradiación de energía solar acumulada en un período de tiempo. El símbolo H es utilizado para insolación acumulada durante un día, mientras que el símbolo I se utiliza para insolación acumulada durante una hora u otro período de tiempo especificado.

2.2.1.5 RADIACIÓN EXTRATERRESTRE, G_{sc} .

La radiación emitida por el Sol y su relación espacial con la Tierra resulta en una intensidad de radiación solar establecida en la capa exterior de la atmósfera terrestre y que se denomina radiación extraterrestre o constante solar G_{sc} , y que se define como la energía proveniente del Sol por unidad de tiempo recibida sobre una unidad de área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación. Desde 1954 se han desarrollado

estudios y mediciones para determinar el valor de la constante solar. En 1982 Duncan y colaboradores reportaron valores de 1367, 1372 y 1374 W/m^2 mientras que en 1983 el Centro de Radiación Solar o WRC (World Radiation Center) adoptó el valor de 1367 W/m^2 . Posteriormente, gracias a mediciones directas de la radiación solar mediante diferentes instrumentos en nueve programas experimentales diferentes y a través de la utilización de aeronaves, globos aerostáticos y naves espaciales, se ha obtenido un valor de 1353 W/m^2 , con un error estimado de $\pm 1.5\%$, este valor fue aceptado por la NASA (National Aeronautic and Space Administration) en 1971 (Duffie y Beckman, 2009a).

2.2.1.6 DISTRIBUCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE

El Sol es un reactor de fusión en constante funcionamiento en donde la masa perdida en la reacción de Hidrógeno se convierte en energía la cual viaja como ondas electromagnéticas en forma de fotones sin necesidad de un medio físico para su propagación, desplazándose por el espacio en todas direcciones. Una vez conocida la magnitud de la energía proporcionada por la radiación solar extraterrestre, es de gran utilidad conocer su distribución espectral para determinar la región que es aplicable en los cálculos de ingeniería.

La cantidad de energía que transporta una onda es proporcional a la frecuencia, mientras que la longitud de onda es inversamente proporcional a la misma. Por tanto, cuanto más pequeña sea la longitud de onda más grande será la frecuencia, es decir, más veces se repite la onda en el tiempo, y por tanto, puede ser transportada mayor cantidad de energía, estos parámetros son importantes para determinar la energía, la visibilidad, el poder de penetración y otras características de la radiación solar.

Una curva de radiación espectral ha sido compilada basada en medidas realizadas a grandes alturas y en el espacio. La curva de irradiancia espectral mostrada en la Figura 2.3 fue tomada a partir

de la constante solar de 1366.1 W/m^2 a la distancia promedio Tierra-Sol y basada en una serie de datos incluidos en la norma ASTM E-490 (Solar Spectra, 2007) así como su ubicación en el espectro de radiación electromagnética. Se observa que la mayor cantidad de energía se encuentra en el rango de 0.25 hasta $1 \mu\text{m}$ que corresponde al espectro de luz visible.

2.2.1.7 VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN EXTRATERRESTRE

La radiación extraterrestre tiene dos fuentes de variación que deben ser consideradas. La primera es ocasionada por la variación en la radiación emitida por el Sol la cual se sugiere que tiene variaciones menores a $\pm 1.5\%$, en diferente periodicidad, al igual que variaciones relacionadas con las manchas solares. Es importante mencionar que un estudio realizado por Hickey *et al.* (1982) muestra que la constante solar está decreciendo lentamente a proporción aproximada de 0.02% por año, este estudio se basa en datos proporcionados por el satélite **Nimbus 7** recolectados durante un periodo de 2.5 años. La segunda variación es basada en la distancia entre el sol y la tierra debido al movimiento de traslación de la misma, la cual influye en la radiación en un rango de $\pm 3.3\%$. Consideraciones estas variaciones, se tienen las ecuaciones 2.1 (Spencer, 1971) y 2.2 (Iqbal, 1983), las cuales son adecuadas para estimar la radiación solar y ocupar el dato en cálculos de ingeniería. La ecuación 2.1 tiene una precisión de $\pm 0.03\%$ mientras que la ecuación 2.2 es de $\pm 0.01\%$.

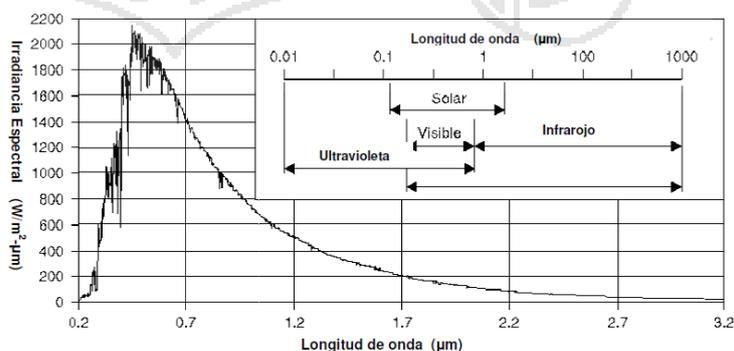


Figura 2.3. Curva de irradiación espectral normalizada por la ASTM E-490



$$G_{on} = \begin{cases} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} \right) \dots \dots \dots (2.1) \\ G_{sc} \left(1.000110 + 0.034221 \cos B + 0.001280 \sin B + \right. \\ \left. 0.000719 \cos 2B + 0.000077 \sin 2B \right) \dots (2.2) \end{cases}$$

Donde G_{on} es la radiación extraterrestre que incide en un plano normal a la radiación en un n-ésimo día del año (n), G_{sc} es la constante de radiación solar extraterrestre y B está dado por la siguiente ecuación:

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \dots \dots \dots (2.3)$$

El n-ésimo día del año puede obtenerse de la Tabla 2.1 cuyos valores son válidos para latitudes menores a 66.5° , ($|\varphi| < 66.5^\circ$) (Klein, 1977).

Tabla 2.1 Días promedios de los meses y valores de n para cada mes

Mes	n-ésimo día del mes	Para el día promedio del mes		
		Fecha	N	δ
Enero	i	17	17	-20.9
Febrero	31+i	16	47	-13.0
Marzo	59+i	16	75	-2.4
Abril	90+i	15	105	9.4
Mayo	120+i	15	135	18.8
Junio	151+i	11	162	23.1
Julio	181+i	17	198	21.2
Agosto	212+i	16	228	13.5
Septiembre	243+i	15	258	2.2
Octubre	273+i	15	288	-9.6
Noviembre	304+i	14	318	-18.9
Diciembre	334+i	10	344	-23.0

2.2.1.8 COMPONENTES DE LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar incidente en la superficie de la Tierra se encuentra dividida en tres componentes diferentes. Estos son la radiación directa, la radiación dispersa o difusa y la radiación reflejada o albedo, las cuales se describen a continuación.

Radiación solar directa (Hb): Aquella que la superficie de la Tierra recibe sin ningún efecto de atenuación ejercido por la atmósfera, es incidente sobre cualquier superficie con una dirección y ángulo únicos.

Radiación difusa (H_d): Al llegar la radiación solar a las capas de la atmósfera terrestre ésta cambia su dirección debido a los gases y partículas que la componen. Un claro ejemplo de la dispersión de la radiación solar debido a estos componentes es el color azul del cielo y en ocasiones las diversas tonalidades rojizas que se perciben debido a que los gases de la atmósfera dispersan con mayor facilidad las longitudes de onda cortas (violeta y azul) comparado con las longitudes de onda largas (naranja y rojo). Por otra parte, se tiene que un área con sombra o pieza sin luz solar está iluminada debido a que le llega luz difusa o radiación difusa.

Radiación reflejada o albedo (H_r): Se llama albedo a la fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie. La reflexión es variable de un instante a otro y de un lugar a otro dependiendo del material reflejante predominante, ya sea nieve, asfalto, cemento, pasto, etc.

La radiación total que incide sobre una superficie corresponde a la suma de las tres componentes de la radiación antes mencionadas, según se indica en la ecuación (2.4) y se ilustra en la Figura 2.4.

$$H = H_b + H_d + H_r \dots \dots \dots (2.4)$$

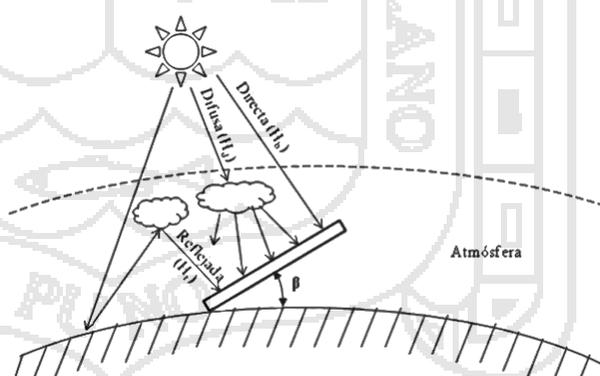


Figura 2.4. Componentes de la radiación solar

2.2.1.9 DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR RESPECTO AL PLANO TERRESTRE

Ángulo cenit θ_z . Es el ángulo entre la vertical y la línea hacia el Sol, es decir, el ángulo de incidencia respecto a un plano horizontal. Su representación se muestra en la Figura 2.5.

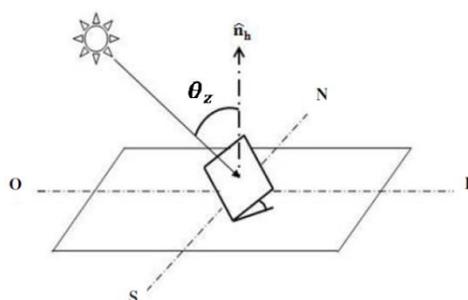


Figura 2.5. Definición esquemática del ángulo cenit θ_z .

Para superficies horizontales $\beta = 0$, el ángulo de incidencia es el ángulo cenit del Sol, es decir $\theta = \theta_z$.

El valor del ángulo cenit debe estar entre 0° y 90° cuando el Sol se encuentra arriba del horizonte. Para esta situación la ecuación se define como sigue:

$$\cos\theta_z = \cos\varphi\cos\delta\cos\omega + \sin\varphi\sin\delta \dots\dots\dots (2.5)$$

Ángulo de altitud solar α . Es el ángulo entre la horizontal y la línea al Sol, es decir el complemento del ángulo cenit, como se puede observar en la Figura 2.6.

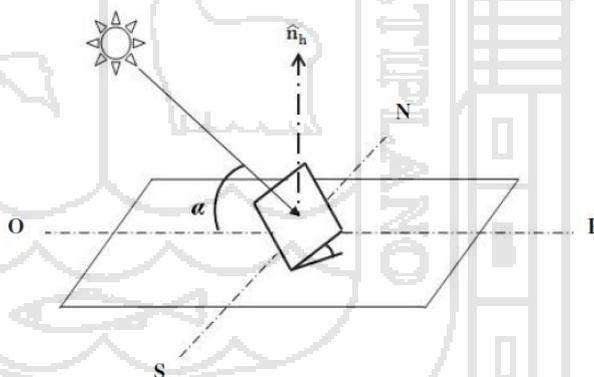


Figura 2.6. Definición esquemática del ángulo de altitud solar α .

Ángulo acimutal solar γ_s . Ángulo de desplazamiento de la proyección de la radiación directa sobre un plano horizontal medido a partir del Sur.

El ángulo acimutal solar se calcula con la ecuación (2.6) y se muestra esquemáticamente en la Figura 2.7 (Duffie y Beckman, 2009c):

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos\theta_z \text{sen}\varphi - \text{sen}\delta}{\text{sen}\theta_z \cos\varphi} \right) \right| \dots\dots\dots (2.6)$$

La función *sign* en la ecuación (2.6) es igual a 1 cuando ω es positivo y toma el valor de -1 cuando ω es negativo. Otras relaciones para calcular el ángulo de incidencia en superficies inclinadas directamente al Norte o al Sur pueden ser derivadas del hecho que las superficies con inclinación β al Norte o al Sur, tienen la misma relación angular de radiación solar como una superficie horizontal en una latitud artificial dada por $\varphi - \beta$.

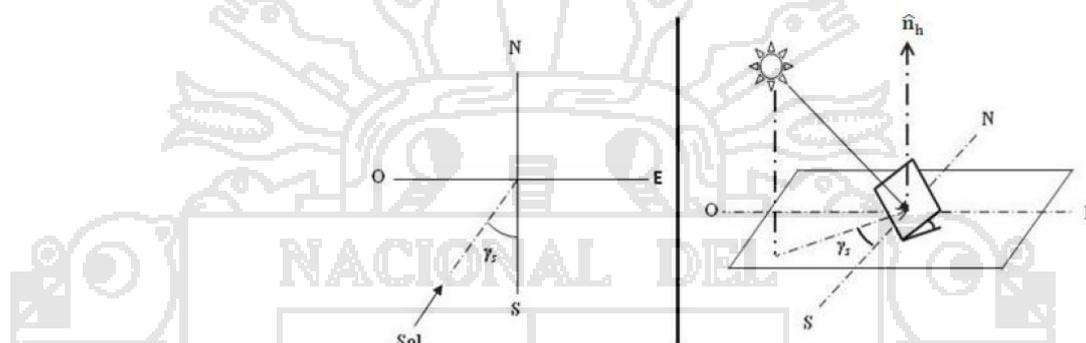


Figura 2.7. Vista superior del plano terrestre definiendo el ángulo acimutal solar γ_s .

2.2.1.10 DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR RESPECTO A LA SUPERFICIE DEL COLECTOR.

Otros ángulos que son importantes para la estimación del recurso solar disponible incidente sobre una superficie en el plano terrestre son los que a continuación se describen.

Inclinación de la superficie β . Ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal del plano terrestre. $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

Ángulo acimutal de superficie γ . Es la desviación del eje del plano de la superficie a partir del Sur geográfico. Hacia el Este es negativo, y hacia el Oeste positivo según se indica en la Figura 2.8.

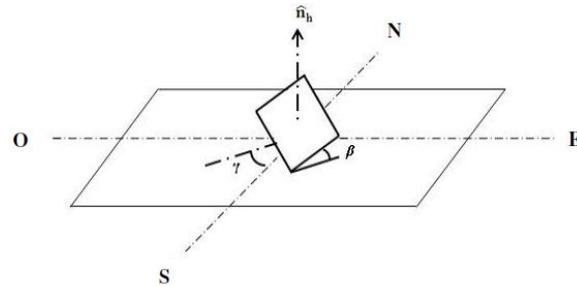


Figura 2.8. Definición de la inclinación β y el ángulo acimutal γ .

Ángulo de incidencia θ . Es el ángulo entre la normal a la superficie de colección (\hat{n}) y la radiación solar directa incidente sobre la misma como se muestra en la Figura 2.9.

Las ecuaciones que describen el ángulo de incidencia θ de la radiación solar sobre una superficie son:

$$\cos\theta = \text{Sen}\delta\text{sen}\varphi\cos\beta - \text{sen}\delta\cos\varphi\text{sen}\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\varphi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\text{sen}\varphi\text{sen}\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\text{sen}\beta\text{sen}\gamma\text{sen}\omega \dots\dots\dots (2.7)$$

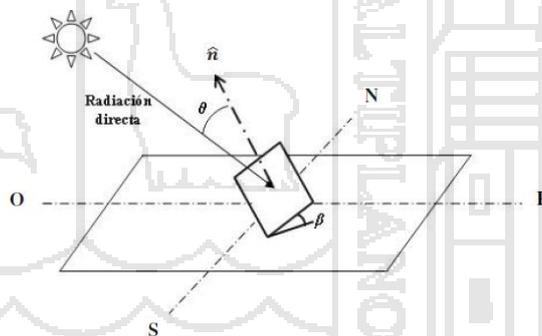


Figura 2.9. Definición esquemática del ángulo de incidencia θ .

$$\cos\theta = \cos\theta_z\cos\beta + \text{sen}\theta_z\text{sen}\beta\cos(\gamma_s - \gamma) \dots\dots\dots (2.8)$$

Para el hemisferio Norte:

$$\cos\theta = \cos(\varphi - \beta)\cos\delta\cos\omega + \text{sen}(\varphi - \beta)\text{sen}\delta \dots\dots\dots (2.9)$$

Para el hemisferio Sur:

$$\cos\theta = \cos(\varphi + \beta)\cos\delta\cos\omega + \text{sen}(\varphi + \beta)\text{sen}\delta \dots\dots\dots (2.10)$$

El ángulo U puede exceder 90° lo cual significa que el Sol se encuentra atrás de la superficie colectora, o que se encuentra más allá del campo de visibilidad establecido entre la salida y la puesta del Sol.

2.2.1.11 COLECTOR SOLAR

Un **colector solar**, es cualquier dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica. Los colectores se dividen en dos grandes grupos: los colectores de baja temperatura, utilizados fundamentalmente en sistemas domésticos de calefacción y Agua Caliente Sanitaria, y los colectores de alta temperatura, conformados mediante espejos, y utilizados generalmente para producir vapor que mueve una turbina que generará energía eléctrica.

2.2.1.12 TIPOS DE COLECTORES

Los colectores de energía solar son tipos especiales de intercambiadores de calor que transforman la energía proveniente de la radiación solar en energía interna de algún medio físico para posteriormente transportarla a un fluido de trabajo. El principal componente de cualquier sistema solar es el colector solar, siendo éste el dispositivo que absorbe la radiación solar incidente y posteriormente la transfiere en forma de flujo de calor a un fluido de trabajo (usualmente aire, agua o aceite) el cual fluye a través del colector. Los colectores solares pueden clasificarse de tres formas distintas; por su movimiento, por su temperatura de operación, o por el tipo de absorbedor.

Por su tipo de movimiento pueden ser estacionarios o con seguimiento solar ya sea de uno o dos ejes. Por su temperatura de operación se clasifican en de baja temperatura (30 – 60°C), de mediana temperatura (65 – 200°C) y de alta temperatura (250 – 2000°C). Por el tipo de absorbedor se clasifican en planos o de concentración, estos últimos se dividen en tubulares o focales. En la Tabla 2.2 se muestra la clasificación de los diferentes concentradores solares.

Existe otra forma de clasificar los colectores solares que no es tan común como los anteriores, y se fundamenta en la relación de concentración la cual se define como el cociente del área de apertura entre el área del absorbedor.

Los colectores solares planos se utilizan principalmente para calentar o enfriar agua y aire en las casas, albercas, lavanderías y baños públicos, pero también para secado de granos, refrigeración, etc. Tienen una eficiencia del 40 al 55% y hasta ahora son los dispositivos solares más desarrollados y utilizados en el mundo.

Los colectores tubulares, consisten en dos o tres tubos concéntricos, dos interiores de metal y uno exterior de vidrio. Entre el tubo de vidrio y el tubo metálico externo, que debe ser negro, existe un vacío para reducir las pérdidas de calor por conducción y convección, con lo cual se consiguen temperaturas más elevadas. La forma tubular permite que se soporten altas presiones, así como una mayor cantidad de captación de radiación solar. Su eficiencia oscila entre 60 y 70%.

Tabla 2.2. Clasificación de colectores solares.

Movimiento	Tipo de colector	Tipo	Concentración	Temperatura (°C)
Estacionario	Colector plano FPC (Flat-platecollector)	Plano	1	30-80
	Tubo evacuado ETC (Evacuated tube collector)	Plano	2	50-200
	Parabólico compuesto CPC (Compoundparaboliccollector)	Tubular	1-5	60-240
	5-15		60-300	
Seguimiento solar en 1 eje	Reflector Fresnel LFR (Linear Fresnel reflector)	Tubular	10-40	60-250
	Cilíndrico CTC (Cylindricaltroughcollector)	Tubular	15-50	60-300
	Canal parabólico PTC (Parabolictroughcollector)	Tubular	10-85	60-400
Seguimiento solar en 2 ejes	Disco parabólico reflector PDR	Focal	600-2000	100-1500
	Heliostato HFC (Heliostatfieldcollector)	Focal	300-1500	150-2000

En el caso de los llamados colectores de concentración focal, los cuales aprovechan la radiación solar directa, se alcanza una eficiencia entre el 40 y 60%. Para alcanzar un aprovechamiento máximo, estos colectores deben tener un mecanismo de seguimiento solar que les permita seguir el movimiento aparente del Sol a lo largo del día, con el objeto de que sea mayor la intensidad de la radiación. Se encuentran en diversas aplicaciones, entre las cuales se pueden mencionar los hornos solares, las estufas

o cocinas solares, para ventilación o el bombeo de agua a partir del acoplamiento con un motor Stirling. Cuando son de pequeñas dimensiones alcanzan temperaturas de 100 a 300°C y en regiones con insolación intensa pueden emplearse a mediana escala para la generación de energía eléctrica en plantas de potencia de 1 a 100 MW. La cantidad de energía captada en el colector depende del tamaño de la superficie expuesta a los rayos del Sol, mientras mayor sea la superficie de captación la temperatura de operación será más alta.

En este trabajo se pretende utilizar colectores de concentración para aprovechar la energía solar por lo cual a continuación se presentan las principales ventajas y desventajas de los colectores solares de concentración con seguimiento solar.

Ventajas:

- Pueden alcanzarse temperaturas más altas que las alcanzadas con un colector plano suponiendo la misma superficie colectora de energía.
- La eficiencia térmica es mayor debido a una buena concentración solar para el motor Stirling.
- Las superficies reflejantes requieren menor cantidad de material y su estructura es más sencilla que los colectores planos. Por lo tanto, el costo por unidad de área de superficie colectora es menor.

Desventajas:

- Colectan muy poca radiación en días nublados, dependiendo de las estaciones.
- Con el tiempo las superficies reflejantes pueden perder su reflectancia, requiriendo una limpieza periódica y recubrimiento.
- El costo total de estos colectores se incrementa debido a la inclusión del dispositivo de seguimiento solar.

2.2.1.13 PARTES DEL COLECTOR SOLAR PDR

Para entrar en materia respecto a la teoría del concentrador solar tipo PDR, primero es necesario establecer las terminologías a manejar en lo subsecuente de este capítulo y de este trabajo en general. En la Figura 2.10 se muestran las partes que conforman al colector y posteriormente se hace una breve descripción de cada componente.

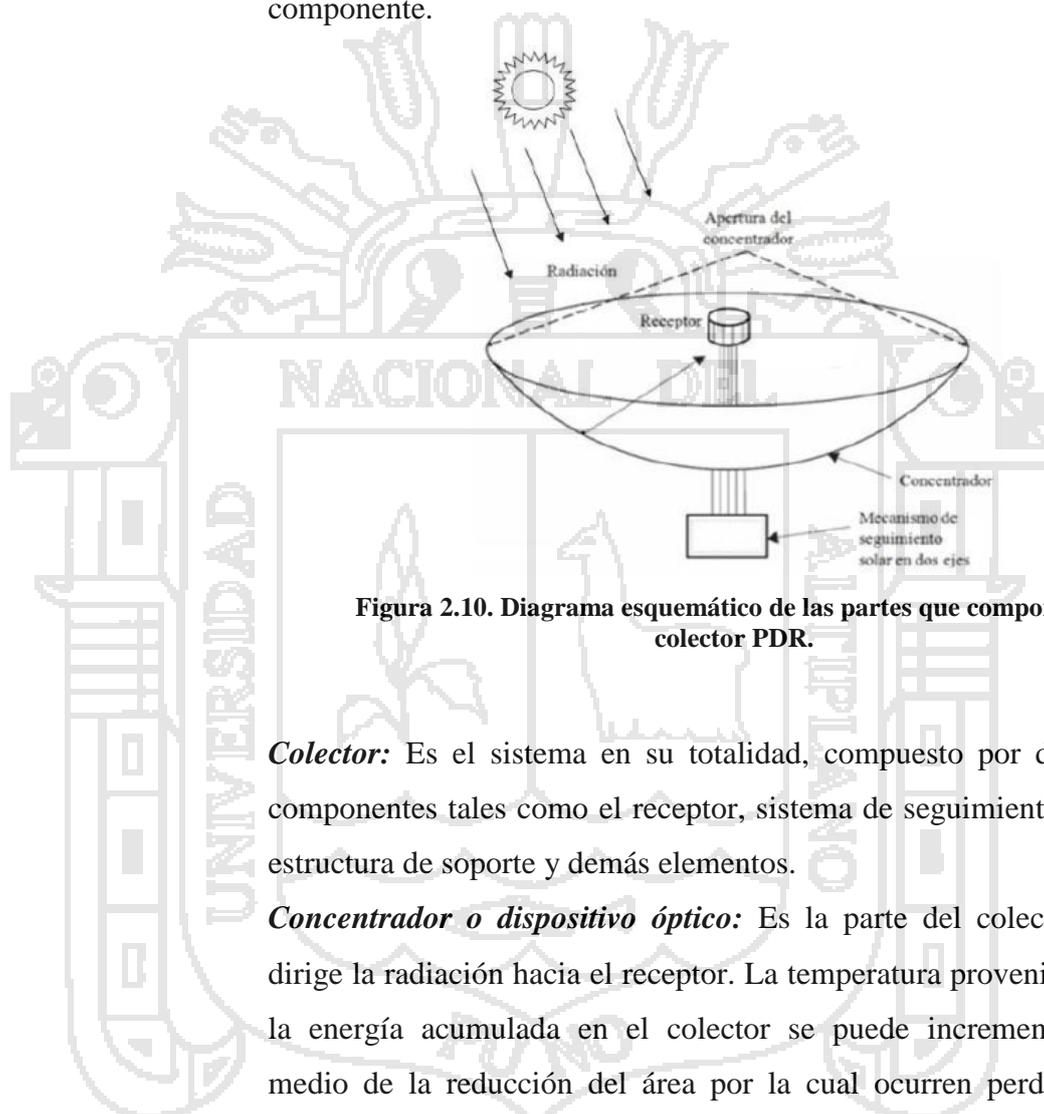


Figura 2.10. Diagrama esquemático de las partes que componen al colector PDR.

Colector: Es el sistema en su totalidad, compuesto por diversos componentes tales como el receptor, sistema de seguimiento solar, estructura de soporte y demás elementos.

Concentrador o dispositivo óptico: Es la parte del colector que dirige la radiación hacia el receptor. La temperatura proveniente de la energía acumulada en el colector se puede incrementar por medio de la reducción del área por la cual ocurren pérdidas de calor. Esta reducción se lleva a cabo interponiendo el colector entre la fuente de radiación al motor Stirling para su generación de energía.

Apertura del concentrador: Es la sección transversal por la cual entra la radiación solar al concentrador.

Receptor: Es el elemento del sistema donde la radiación está concentrada focalmente al motor Stirling y así generar energía.

Mecanismo de seguimiento solar: Es el sistema que le permite al concentrador posicionarse de manera normal a la dirección de propagación de la radiación solar; involucra un sistema mecánico y un sistema de control para efectuar un movimiento en dos ejes.

2.2.1.14 IMPLEMENTACION DE CONCENTRADOR SOLAR DE DISCO PARABOLICO REFLECTOR

Dentro de los colectores de concentración focal se encuentran los de disco parabólico reflector (PDR por sus siglas en inglés). Estos colectores se conforman principalmente por un disco parabólico cuya superficie se encuentra cubierta por un material reflejante que dirige los rayos solares hacia una superficie absorbedora, localizada en el eje focal de la parábola. La energía calorífica concentrada en este punto es transmitida a un fluido de trabajo por conducción y convección, estos procesos de intercambio de calor se llevan a cabo dentro de un módulo de almacenamiento de energía.

Los colectores PDR cuentan con un mecanismo de seguimiento solar en dos ejes (altitud y acimut). Pueden ser conectados a una red eléctrica en un esquema distribuido de generación de energía como sistemas autónomos, resultando particularmente interesantes para aplicaciones productivas, como el bombeo de agua, la producción de frío, la desalación de agua, y el abastecimiento de pequeñas redes eléctricas no interconectadas.

Dependiendo de la aplicación, puede variar el tamaño, la forma parabólica del disco, los materiales reflejantes, el fluido de trabajo, las estructuras de soporte tanto del disco como del punto focal y el mecanismo de seguimiento solar así como su técnica de control.

Actualmente en el ámbito internacional Infinia, una empresa americana especializada en ingeniería energética que basa sus desarrollos en el uso de motores Stirling para producir energía solar.

La tecnología solar térmica utiliza una antena parabólica de espejos para concentrar la luz del sol para calentar y expandir helio en el

interior de un intercambiador de calor. Esto provoca que un pistón similar al de un motor, se traslade hacia adelante y hacia atrás. A su vez, este movimiento acciona un alternador para producir electricidad, de forma similar a como lo hace un motor Stirling.



Figura 2.11. Infinia motores Stirling con el colector térmica.

2.2.2 SEGUIDOR SOLAR

La incidencia de los rayos solares sobre el concentrador solar difiere a lo largo del día y por lo tanto se ve reducida la eficiencia del concentrador solar. Es posible corregir esta situación utilizando un seguidor solar que oriente el concentrador a la posición del Sol. El uso de seguidores solares ha reportado ganancias superiores al 20% en estudios de campo.

Es estrictamente necesario para tener una comprensión amplia de lo que un seguidor solar debe hacer, conocer antes no solamente el lugar que ocupará en el planeta, es decir sus coordenadas terrestres, sino también el movimiento al que está sometido, por encontrarse en un planeta que no está inmóvil, sino que gira y se desplaza de varias maneras a través del espacio.

Tomaremos en cuenta para nuestro estudio, aquellos movimientos en los que se ve envuelto nuestro planeta, La Tierra, con respecto a nuestra estrella más cercana, el Sol, y de la cual depende toda la vida que existe.

Es bastante fácil suponer los movimientos de La tierra alrededor de su eje y alrededor del Sol, pero cuando tenemos que precisar las coordenadas celestes en que se encontrará el Sol respecto a nuestro plano terrestre en

un momento específico del año, entonces es necesario recurrir a un análisis más profundo del tema.

De manera que estudiaremos algunos conceptos relacionados con la posición y el movimiento de La Tierra y de los astros durante el año.

2.2.2.1 MOVIMIENTOS DEL PLANETA CON RESPECTO AL SOL

La Tierra realiza dos movimientos que inciden en la posición relativa de un punto en su superficie con respecto al Sol, el movimiento que más afecta esta posición es el de rotación, movimiento que realiza la Tierra sobre su propio eje con una duración de 24 horas 0 minutos y 57.33 segundos, que se ha sintetizado a 24 horas, con la compensación del año bisiesto. Así se da lugar al día y la noche ya que durante el giro la mitad de la Tierra está iluminada y la otra mitad en penumbra.

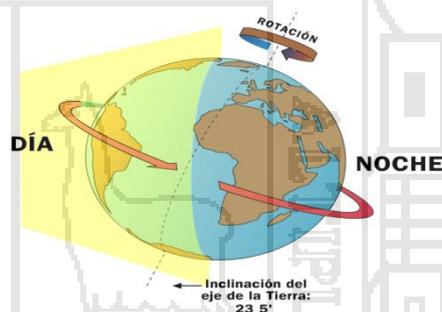


Figura 2.12. Movimiento de Rotación de la Tierra

El intervalo de tiempo del día y la noche depende de la ubicación geográfica del punto considerado, solo en la línea del Ecuador los días y las noches duran 12 horas durante todo el año. El movimiento de rotación, Figura 2.12, genera que el Sol dibuje una trayectoria circular en el espacio en el periodo que dura el día.

El segundo movimiento que realiza la Tierra es el de traslación que se refiere al movimiento que realiza la Tierra alrededor del Sol. El movimiento de traslación tarda en realizarse 365.2422 días, que para efectos prácticos se toma de 365 y cada cuatro años (año bisiesto) se toma de 366 días. Durante el recorrido la Tierra presenta una trayectoria elíptica alrededor del Sol. La trayectoria elíptica de la Tierra alrededor del Sol tiene un ángulo con respecto a la horizontal del Ecuador solar de 23.45° , Figura 2.13.

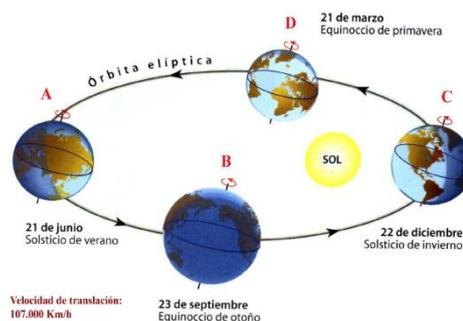


Figura 2.13. Movimiento de Traslación de la Tierra

El movimiento de translación de la Tierra genera que la trayectoria aparente del Sol, ocasionada por el movimiento de rotación, presente una variación a lo largo del año como se muestra en la Figura 2.14, la trayectoria aparente del Sol a lo largo del día varía entonces en su declinación con respecto al observador, esta variación en la declinación incide en la duración del día y la noche. El Sol en su trayectoria pasa siempre por un punto central orientado hacia el sur a las 12 horas del día Solar.

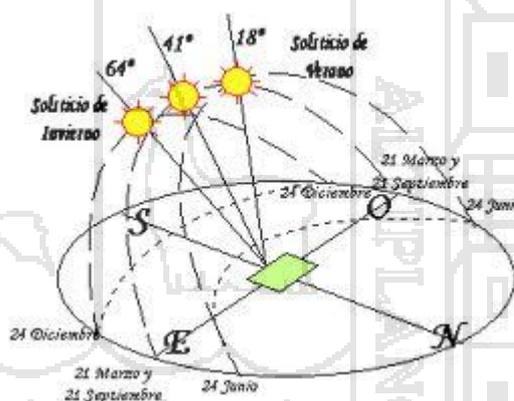


Figura 2.14. Variación en la Declinación por Efecto del movimiento de translación

2.2.2.2 LA HORA SOLAR

Un día solar es el tiempo que tarda el Sol en pasar dos veces por el mismo punto, tiene una duración aproximada de 24 horas y siempre a las 12 horas el Sol se encuentra en el meridiano, la aplicación exacta de este tiempo sería poco práctica, por lo que se estandarizó a 24 horas y se crearon los husos horarios para que comunidades cercanas cuenten con el mismo horario, obteniéndose la hora civil, es posible calcular la hora solar a partir de la hora civil con lo que se puede saber la posición exacta del Sol. Para calcular la hora solar es necesario calcular la ecuación del tiempo.

$$ET = 12 + (0.1236\text{Sin}X - 0.0043\text{Cos}X) + (0.1583\text{Sin}2X + 0.0608\text{Cos}2X) \dots\dots\dots (2.11)$$

En donde X es el ángulo de desviación de acuerdo al día del año N:

$$x = \frac{360^{\circ}(N-1)}{365-2422} \dots\dots\dots (2.12)$$

La longitud del tiempo estándar del lugar determinada por:

$$LI = (\text{longitud del lugar} - \text{meridiano de referencia})/15^{\circ}$$

El valor del meridiano de referencia corresponde al del huso horario del lugar donde se desea realizar el cálculo. Para finalmente calcular el tiempo solar (TS):

$$TS = TC - ET - LI \dots\dots\dots (2.13)$$

La diferencia en el valor de la hora civil y la hora solar presenta un valor distinto a lo largo del año. La Figura 2.15 nos indica la cantidad de minutos de diferencia de la hora solar con el reloj civil a las 12 horas. El eje de los minutos nos indica la cantidad de minutos que hay que sumar en el reloj civil para saber cuándo son las 12 hora solar. En esta gráfica no se considera el cambio de horario en verano.

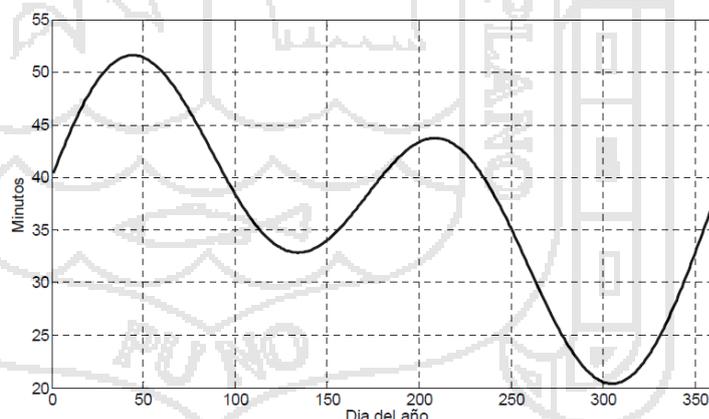


Figura 2.15.Hora Solar

2.2.2.3 UBICACIÓN DE LA TRAYECTORIA SOLAR

Para poder ubicar la trayectoria solar primero hay que conocer nuestra ubicación en la Tierra. Para localizar un punto en la Tierra se utilizan los ángulos de latitud y longitud propios del lugar, el ángulo de latitud nos dirá que tan retirados estamos del Ecuador y

el ángulo de longitud establece la posición de acuerdo al meridiano de Greenwich (plano de referencia internacional para definir el huso horario civil).

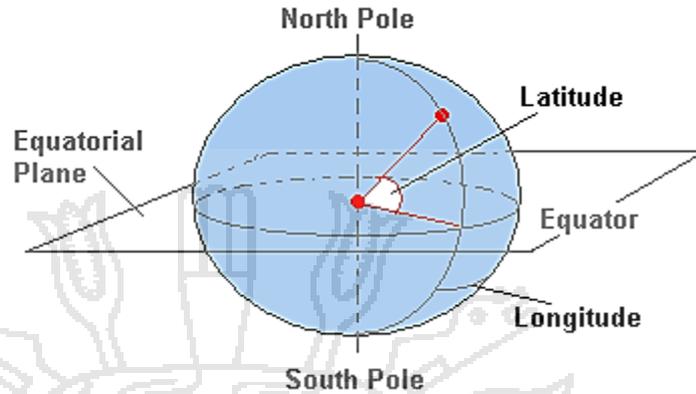


Figura 2.16. Ubicación de un punto en la tierra

Para ubicar la posición del Sol respecto a un punto en la Tierra se hace uso de dos ángulos, el de altura (h), que es el ángulo del Sol con respecto al plano horizontal y el de azimut (az) que se mide en sentido horario a partir del sur hasta la proyección del Sol en el plano horizontal, Figura 2.17.

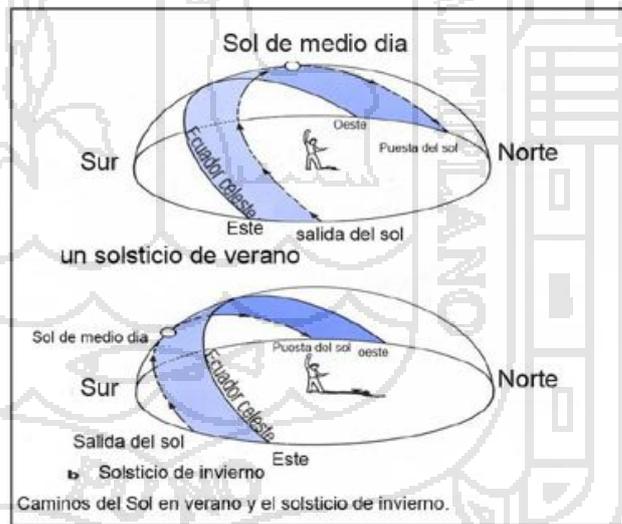


Figura 2.17. Ubicación del sol

El valor del ángulo de altitud y azimut es una función de la hora, día del año y latitud del lugar que puede ser calculado por métodos numéricos. En primer lugar se determina el ángulo de declinación de la Tierra (d) debida al movimiento de traslación:

$$d = 23.45 \sin \left[(284 + N) \frac{360}{365} \right] \dots \dots \dots (2.14)$$

Donde N es el día consecutivo del año que se desea conocer. El ángulo horario (hs) es el ángulo comprendido entre el meridiano local y la hora de estudio, es decir, es el ángulo que se forma entre el medio día solar y la hora de referencia, que se obtiene por:

$$hs = (12 - \text{hora deseada}) \times 15 \dots \dots \dots (2.15)$$

Con estos datos se obtiene el ángulo de la altura del sol (h):

$$\text{Sin}(h) = \text{Cos}(L)\text{Cos}(d)\text{Cos}(hs) + \text{Sin}(L)\text{Sin}(d) \dots \dots (2.16)$$

Y el ángulo de azimut del sol (as):

$$\text{Sin}(as) = \frac{\text{Cos}(d)\text{Sin}(hs)}{\text{Cos}(h)} \dots \dots \dots (2.17)$$

Es necesario aplicar una función inversa cuando el ángulo azimutal es mayor a 90° (cuando la posición del Sol rebasa el eje o plano vertical este-oeste), bajo el siguiente razonamiento:

$$\text{Cos}(hs) < \frac{\text{Tan}(d)}{\text{Tan}(L)} \rightarrow as = \text{Sin}^{-1} \left[\frac{\text{Cos}(d)\text{Sin}(hs)}{\text{Cos}(h)} \right] \dots \dots \dots (2.18)$$

$$\text{Cos}(hs) < \frac{\text{Tan}(d)}{\text{Tan}(L)} \rightarrow as = 180^\circ - \text{Sin}^{-1} \left[\frac{\text{Cos}(d)\text{Sin}(hs)}{\text{Cos}(h)} \right] \dots \dots (2.19)$$

Ahora que se conoce la trayectoria aparente del Sol, porque se provoca y cómo se comporta, se pueden analizar los tipos de seguidores solares.

2.2.2.4 TIPOS DE SEGUIDORES SOLARES

Según el dispositivo que proporciona el movimiento existen dos tipos básicos de seguidores:

2.2.2.4.1 SEGUIDOR SOLAR PASIVO

El seguidor solar pasivo es un seguidor de un eje polar que carece de un control electrónico para su funcionamiento; su diseño usa un gas comprimido de bajo punto de ebullición, el cual es conducido hacia un lado o hacia otro, según sea calentado por la luz solar incrementando la presión en el gas, provocando que el seguidor se mueva en respuesta a ese desbalance. Como es un tipo de seguimiento impreciso no puede utilizarse para sistemas concentrados, pero sí en sistemas fotovoltaicos no concentrados.

2.2.2.4.2 SEGUIDOR SOLAR ACTIVO

Un seguidor solar activo es aquel que utiliza motores eléctricos, brazos electromecánicos con engranajes o tornillos sin fin, los cuales son controlados por un circuito electrónico. Este tipo de seguidor debe estar energizado ya sea por una fuente externa al sistema de generación o por el mismo, convirtiendo al seguidor en “autónomo”. Se debe considerar que la energía en el sistema de generación solar debe ser suficiente para energizar el seguidor, de lo contrario, no podrá orientarse.

2.2.2.4.3 SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE AZIMUTAL

El seguidor solar azimutal gira sobre un eje vertical y la superficie de los módulos tiene una inclinación igual a la latitud del lugar para obtener un mejor rendimiento a lo largo del año. El movimiento es determinado directamente por el valor del ángulo de azimut del Sol. La curva que dibuja en el espacio presenta siempre la misma altitud con un volumen de trabajo reducido en comparación con los otros seguidores, Figura 2.18, su diseño suele ser el más simple por lo que su uso se ha extendido entre los fabricantes.

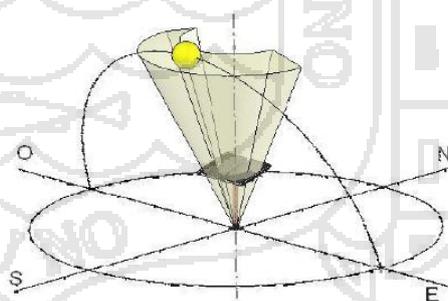


Figura 2.18. Seguidor solar de un eje azimutal

2.2.2.4.4 SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE, HORIZONTAL

El seguidor solar gira sobre un eje horizontal norte-sur, los módulos son colocados de manera paralela al eje de giro. La trayectoria dibujada es siempre un arco de este a oeste

perpendicular al plano horizontal, que difiere de la trayectoria solar en la inclinación que tiene, Figura 2.18.

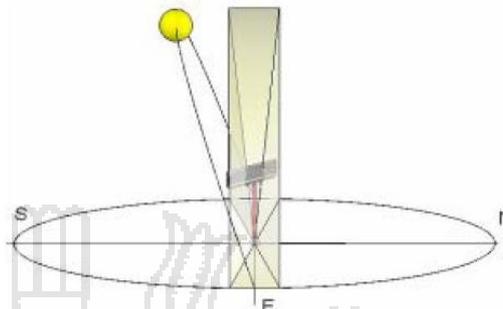


Figura 2.19. Seguidor solar de un eje horizontal

2.2.2.4.5 SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE, POLAR

El seguidor solar gira sobre un eje orientado en dirección norte-sur y con una inclinación del eje igual a la latitud del lugar, los módulos se colocan paralelos al eje de giro, la velocidad de giro es de aproximadamente 15° por hora.

Muy parecido al seguidor horizontal pero su inclinación provee una mejor ganancia por año con respecto a éste ya que corrige la declinación de la trayectoria coincide con la del Sol, en contra se tiene un diseño más elaborado. La inclinación de los módulos opcionalmente puede ajustarse manualmente aun con este ajuste la trayectoria descrita solo coincide fielmente con la del Sol en el equinoccio de primavera y otoño, Figura 2.20.

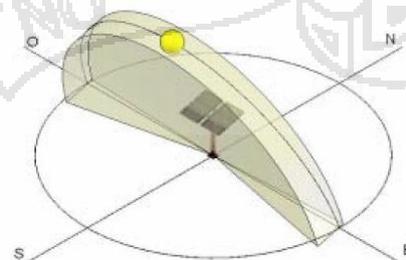


Figura 2.20. Seguidor solar de un eje polar

2.2.2.4.6 SEGUIDORES DE DOS EJES

Estos tienen dos grados de libertad, es decir dos ejes de rotación. Estos ejes están típicamente perpendiculares el uno del otro. 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.

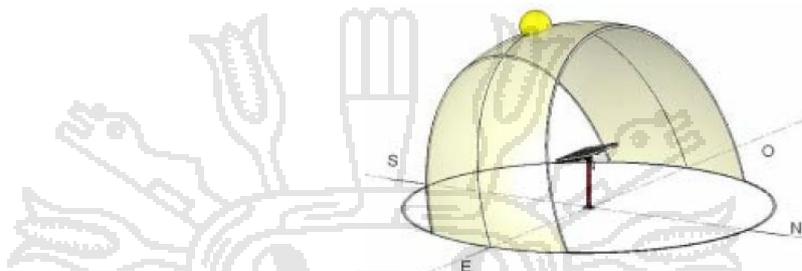


Figura 2.21. Seguidor solar de dos ejes

Hay varios tipos de seguidores de dos ejes. Estos son los más comunes:

2.2.2.4.7 SEGUIDOR DE DOS EJES DE INCLINACIÓN (TIP-TILT)

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.

2.2.2.4.8 SEGUIDOR DE ACIMUT-ALTITUD

Este tipo de seguidor tiene su eje primario vertical respecto al suelo. El eje secundario es perpendicular al primario. Este tipo de seguidor de dos ejes es el más implementado debido a su sencillez en la estructura, además que no requiere estar a gran altura por sobre el suelo; esto es especialmente importante en el caso de tratarse de grandes instalaciones.

Este tipo de seguidor ubica a los concentradores solares frente al Sol girando alrededor de su eje vertical un ángulo conocido como Acimut, y elevando la inclinación de los paneles a la Altitud a la que se encuentra el Sol.

2.2.3 MOTOR STIRLING

2.2.3.1 HISTORIA DEL MOTOR STIRLING

El motor Stirling aparece en el año de 1816 patentado por Sir Robert Stirling, un fraile escocés, que se dedicaba a sus labores religiosas, pero que además se dedicó a la invención durante toda su vida. La máquina de vapor, como fuente de energía mecánica estaba muy desarrollada y ampliamente utilizada ya en el principio del siglo XIX y era la única fuente de la energía mecánica, sin tomar en cuenta los molinos de agua o de viento.

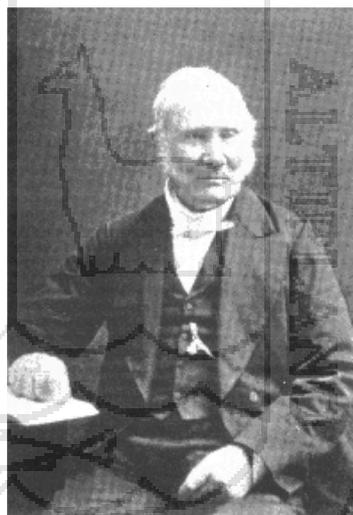


Figura 2.22. Sir Robert Stirling

Sir Robert Stirling consideraba demasiado complicado calentar agua en una caldera, producir vapor, expansionarlo en un motor, condensarlo y mediante una bomba introducir de nuevo el agua en la caldera, sumado a los constantes accidentes fatales causados frecuentemente por las máquinas a vapor, ya que aún no se había inventado el acero y las calderas explotaban con facilidad por la subida de presión al interior de ellas, matando a quienes se encontraban alrededor.

El motor de Stirling realizaba los mismos procesos de calentamiento y enfriamiento de un gas, pero todo dentro del motor y el gas era aire en vez de vapor de agua, por lo que el motor no necesitaba caldera.

Existían distintas maneras de denominar los motores térmicos: Motores caloríficos, Motores de aire caliente, Motores de Gas, y, por fin motores de Stirling. La historia de desarrollo de los motores de aire caliente adquirió una transformación muy peculiar, a través de la máquina de vapor, y la ingeniería de motores en general, primero convirtiéndose en el motor de aire caliente, y después en los motores de combustión interna, los de Otto, (gasolina) y Diesel, (fuel). Los últimos son más el producto de la ola de transformación de petróleo en combustibles, que ágilmente fueron ocupando, prácticamente todo el mercado de transporte y otras aplicaciones, expulsando por completo a sus antepasados, la máquina de vapor y el motor Stirling.

2.2.3.2 CICLO TÉRMICO

Transformar la energía calorífica en energía mecánica es una de las mayores prioridades de la ingeniería, en cualquier máquina, hace falta cierta cantidad de energía para producir trabajo; es imposible que una máquina realice trabajo sin necesidad de energía.

“El motor térmico de Stirling es un dispositivo mediante el cual un sistema realiza un ciclo, en el que absorbe calor de un foco de temperatura alta, cede una cantidad de calor a un foco de temperatura inferior y realiza un trabajo sobre el exterior”.

La conversión del trabajo en calor se puede conseguir con un rendimiento del 100 %, pero la conversión de calor en trabajo viene limitada por el Segundo principio de la Termodinámica: “No es posible un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor procedente de un foco y la conversión íntegra de este calor en trabajo, sin producir ningún otro efecto” (enunciado de Kelvin-Planck). Sin embargo el motor térmico de Stirling tiene el potencial

de alcanzar el rendimiento de Carnot, lo cual le permite, teóricamente, alcanzar el límite máximo de rendimiento.

2.2.3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL CICLO STIRLING

El montaje y el modo de funcionamiento se presentan en la figura 2.23. El modelo a construir se compone de dos cilindros unidos por un tubo. El pistón mecánico está abierto por uno de sus extremos. Entre el pistón de impulsión y el cilindro de combustión hay un pequeño espacio donde puede circular el aire. Los dos pistones trabajan opuestos a 90° sujetos por un cigüeñal. La llegada del aire caliente tiene lugar en el extremo del cilindro de impulsión (cilindro de combustión). El radiador garantiza una rápida caída de la temperatura y por tanto de una mayor eficacia.

Para explicar mejor el funcionamiento, se parte de una situación de paro.

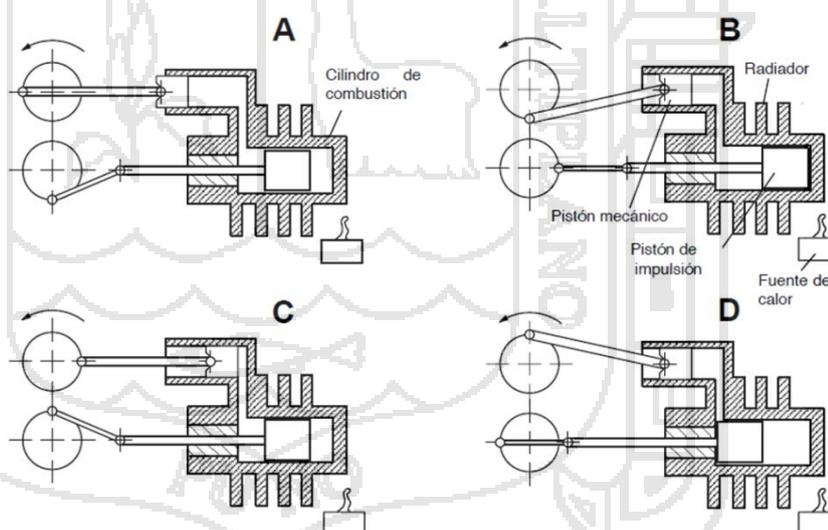


Figura 2.23. Comportamiento de cada del motor Stirling tipo gamma.

A. El aire en el interior del cilindro mecánico está frío. Por una ligera compresión, el pistón es aspirado en el cilindro. El volumen de aire está en su máximo. El pistón de impulsión se desplaza hacia el extremo caliente del tubo y expulsa el aire caliente hacia la zona más fría haciendo un trabajo mecánico.

- B.** El pistón de impulsión está entonces en su máximo, ha impulsado el aire caliente hacia el pistón mecánico. Las dos ruedas motrices se ocupan de que el pistón mecánico se desplace dentro de su cilindro.
- C.** En la fase C, el pistón mecánico impulsa el aire frío en el cilindro de combustión, el pistón de impulsión se desplaza hacia la zona fría del cilindro de impulsión. El aire accede a la zona caliente del tubo, se dilata y comprime el pistón mecánico, implicando un trabajo mecánico.
- D.** EL pistón de impulsión está en su punto muerto mientras el pistón mecánico desplazándose bajo el efecto de la dilatación A.

2.2.3.4 VENTAJAS DEL MOTOR STIRLING

- El aporte de calor es externo, por lo que las condiciones de combustión son flexibles.
- Funciona con cualquier fuente de calor, no solo por combustión, por lo que se puede utilizar fuentes de calor como solar, geotérmica, nucleares, biológicas, etc.
- La mayoría de los motores Stirling tienen los mecanismos y juntas en el foco frío, y por tanto necesitan menos lubricación y duran más que otras máquinas alternativas.
- Los mecanismos son más sencillos que en otras máquinas alternativas, estos es, no necesitan válvulas, el quemador puede simplificarse.
- Una maquina Stirling usa un fluido de trabajo de una única fase, manteniendo las presiones internas cercanas a la presión de diseño y por tanto se reducen los riesgos de explosión. En comparación una máquina de vapor usa agua en estado líquido y vapor, por lo que un fallo en una válvula puede provocar una explosión peligrosa.
- En algunos casos, las bajas presiones, permiten utilizar cilindros ligeros.

- Arrancan con facilidad (despacio y después del calentamiento inicial) y funcionan mejor con temperaturas ambientales frías, en contraste con los de combustión interna que arrancan con facilidad en temperatura templada pero con problemas en temperaturas frías.
- Se pueden usar para bombear agua, pudiendo diseñarse para utilizar el agua como refrigerante del foco frío, (a menor temperatura del agua mejor funcionamiento).

2.2.3.5 TIPOS DE CONFIGURACIÓN CONSTRUCTIVA DE LOS MOTORES STIRLING

Existen tres tipos de configuraciones para un motor Stirling:

2.2.3.5.1 CONFIGURACIÓN ALFA

Consta de dos cilindros independientes unidos mediante un ducto; este tipo de motor Stirling no tiene desplazador, pero tiene dos pistones desfasados 90° . Uno de los cilindros se calienta mediante suministro de calor y el otro se enfría mediante aletas o agua.

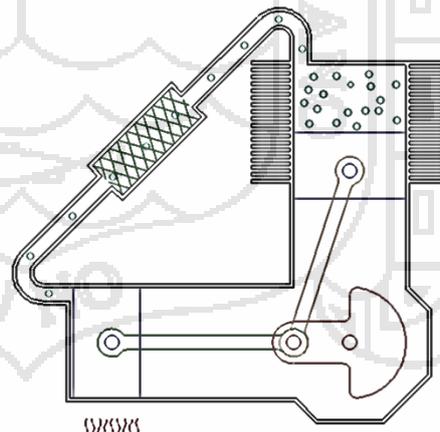


Figura 2.24. Motor Stirling de configuración alfa.

2.2.3.5.2 CONFIGURACIÓN BETA

En este tipo, el pistón y el desplazador están en el mismo cilindro, por eso tiene poco volumen muerto, y, por lo tanto,

es el de mayor potencia específica de las tres configuraciones. Existe una holgura entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del gas de la zona caliente a la fría y viceversa. Su desventaja está en su fabricación, porque ésta es muy complicada y requiere de bastante precisión.

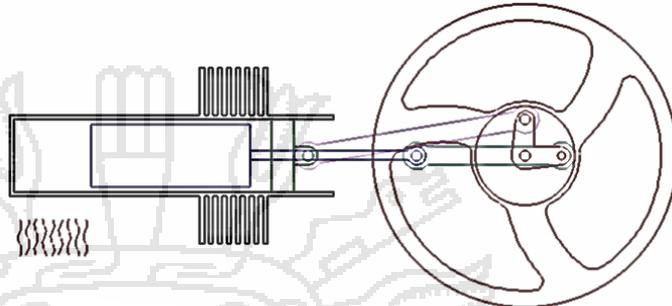


Figura 2.25. Motor Stirling de configuración beta.

2.2.3.5.3 CONFIGURACIÓN GAMMA

Este tipo es derivado de la configuración beta, pero más sencillo de construir. Consta de dos cilindros separados, en uno de los cuales se sitúa el desplazador y en el otro el pistón de potencia. Es el de menor potencia específica debido a su gran volumen muerto.

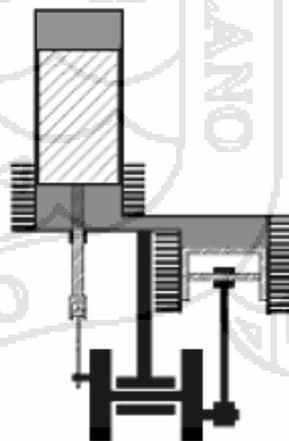


Figura 2.26. Motor Stirling de configuración gamma.

2.2.3.6 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN MOTOR STIRLING

Un motor Stirling está compuesto, generalmente, de las siguientes partes (figura 2.27):

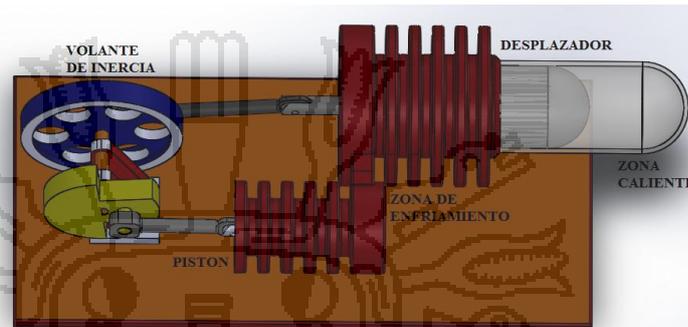


Figura 2.27. Componentes de un motor Stirling.

2.2.3.6.1 ZONA CALIENTE

Esta es la parte del motor donde se le entrega (transfiere) calor, y, por consiguiente, estará sometido a altas temperaturas (alrededor de 800°C). Los materiales a utilizar para su fabricación deberían ser materiales resistentes al CREEP. Se podría utilizar acero inoxidable austenítico, acero al Cr-Mo, etc.

Esta parte puede ser de varias formas. Su forma más simple es cuando no hay ningún tipo de presurización dentro del cilindro, ésta puede ser un cilindro con una tapa plana, como se muestra en la figura 2.28, esta configuración la podemos adoptar en motores pequeños y experimentales que no estén presurizados.

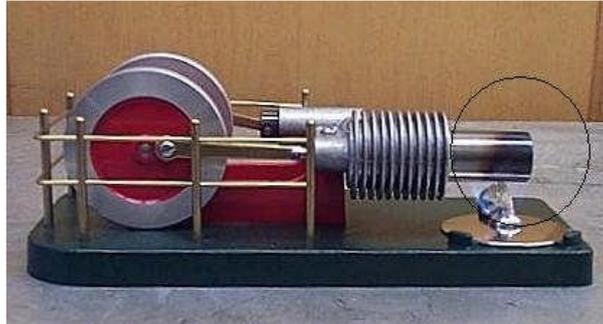


Figura 2.28. Fotografía de la zona caliente de un motor no presurizado.

El diseño de la zona caliente varía de acuerdo al fluido de trabajo a utilizar, esto es debido a las propiedades del fluido. Por ejemplo, el He tiene una conductividad térmica de seis veces la conductividad del aire, por esta razón el diámetro interno de los tubos de la zona caliente debería ser más pequeño si utilizamos aire como fluido de trabajo, esto es para hacer más eficiente la transferencia de calor debido a la baja conductividad térmica del aire. Un motor diseñado para utilizar aire, si funciona eficientemente utilizando He y H₂, pero no ocurre lo contrario.

2.2.3.6.2 ZONA FRÍA

En esta parte se extrae calor del motor. La extracción de calor puede realizarse por convección libre o forzada. En el caso que sea libre, ésta puede realizarse mediante la colocación de aletas de aluminio para disipar rápidamente el calor.

En el caso de una refrigeración forzada, ésta se realiza acondicionando una camiseta de agua. Esta parte puede hacerse de acero inoxidable, fierro fundido, aluminio, cobre, etc.

Estos dos últimos materiales se pueden utilizar en motores de baja potencia o experimentales, ya que en motores de alta potencia sería necesario un mayor espesor de éstos, y el costo sería elevado.

A continuación se hablará sobre el sistema de refrigeración para un motor Stirling:

Sistema de refrigeración de un motor Stirling

El sistema de refrigeración tiene como objeto evacuar el calor del fluido de trabajo hacia un medio exterior más frío. Este es una parte muy importante del motor, porque debe ser capaz de evacuar por lo menos el 50% del calor que recibe el motor, y que lo debe hacer a la menor temperatura posible para mejorar la eficiencia térmica del motor. Existen dos tipos de refrigeración:

➤ **Refrigeración por aire**

Puede ser por convección natural o forzada. Es necesario acoplar aletas al cilindro; es una transmisión poco eficiente y se utiliza en motores lentos y no presurizados, mayormente se utiliza en pequeños motores demostrativos.

➤ **Refrigeración por agua**

Es la más eficiente si se dispone de una fuente inagotable de agua a temperatura ambiente (ríos, lagos, red pública). Sólo se puede utilizar en motores estacionarios. En motores que no son estacionarios lo más recomendable es utilizar un circuito de agua con radiador, el único inconveniente es que se consume energía para bombear el agua e impulsar el aire.

Para las pruebas en el motor construido se utilizó los dos tipos de refrigeración. A continuación hablaremos de la experiencia adquirida durante este trabajo.



Figura 2.29. Esquema de la zona fría del motor Stirling construido.

2.2.3.6.3 REGENERADOR

Esta es una parte muy importante del motor Stirling. Es sumamente necesario hacer uso del regenerador cuando el motor Stirling es presurizado, y, también, cuando el motor tenga grandes dimensiones a pesar que no esté presurizado. El regenerador absorbe y entrega calor al fluido de trabajo compensando una parte del calor perdido por el motor, haciendo que la potencia y velocidad del motor se incrementen, esto sucede porque cuando trabaja el regenerador el fluido de trabajo necesitaría absorber menos calor en cada ciclo, con lo cual hace que el ciclo necesite de menos tiempo para realizarse y también se consume menos cantidad de combustible.

El regenerador trabaja de la siguiente manera: suponiendo que el gas en la zona caliente está a 400°C y en la zona fría a 40°C . Cuando el gas pasa de la zona fría a la zona caliente, un regenerador ideal elevaría la temperatura del gas hasta 300°C , por lo tanto, el calentador tiene que entregar menos cantidad de calor para subir la temperatura del gas de 300 a 400°C ; de la misma manera, cuando el gas pasa de la zona caliente a la zona fría, el calor absorbido por el regenerador dejaría al gas que está en el lado frío a una temperatura de 100°C , y sólo se tendría que enfriar un poco para pasar de 100 a 40°C . Con

esto se lograría, en ambos casos, reducir el tiempo de calentamiento y enfriamiento del gas con lo cual el ciclo se desarrolla más rápidamente.

Existen varias disposiciones de los regeneradores, entre los cuales están los estáticos y los móviles. Los móviles mayormente están dentro del desplazador y los estáticos pueden estar dentro o fuera del cilindro.

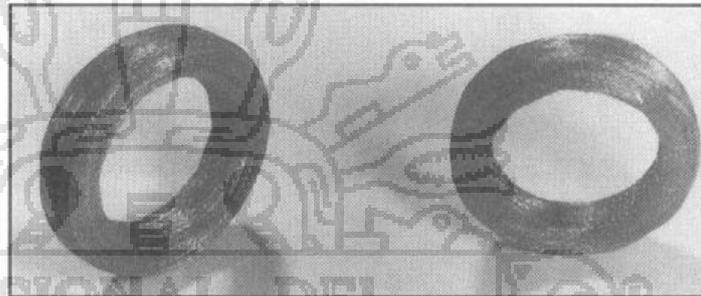


Figura 2.30. Regeneradores anulares.

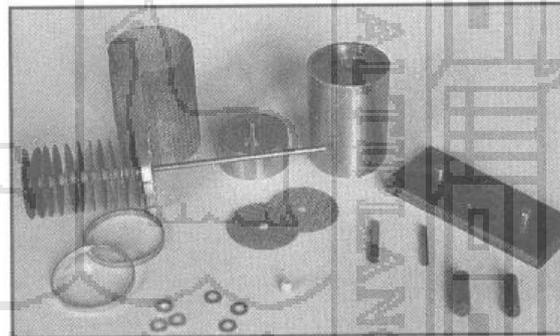


Figura 2.31. Regeneradores móviles.

El material del regenerador debe tener una alta capacidad de almacenar energía térmica para que su temperatura sea estable. También, debe tener una conductividad térmica baja en la dirección del flujo, para generar un gradiente de temperatura. La capacidad térmica volumétrica de un material se mide como el producto $\rho c_p \left(\frac{J}{m^3 \cdot K} \right)$, a mayor valor el material puede absorber más calor.

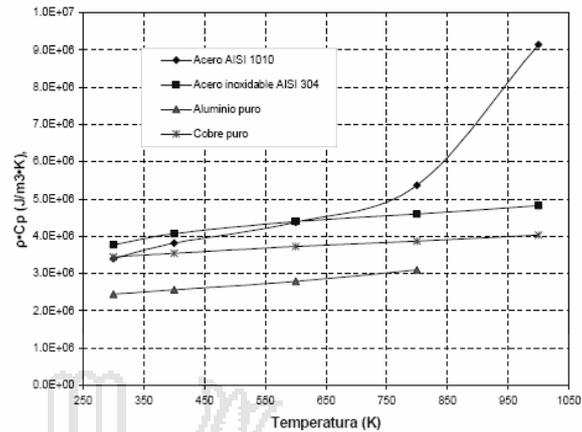


Figura 2.32. Capacidad térmica volumétrica para diferentes materiales.

Otro parámetro importante es la Difusividad térmica α , este parámetro mide la capacidad de un material para conducir la energía térmica en relación con su capacidad de almacenar energía térmica. Con lo mencionado anteriormente necesitamos que α sea pequeño.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \left(m^2/s \right) \dots \dots \dots (2.20)$$

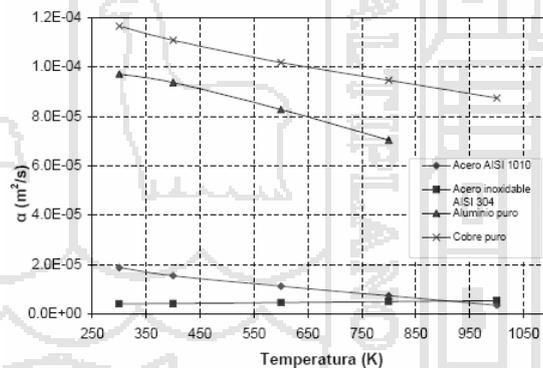


Figura 2.33. Difusividad térmica volumétrica para diferentes materiales.

Los materiales que se utilizan mayormente en los regeneradores, son láminas, lana o hilos de acero inoxidable bastantes delgados (0,1 mm). El cual es un regenerador móvil, ya que está dispuesto en el desplazador del motor.

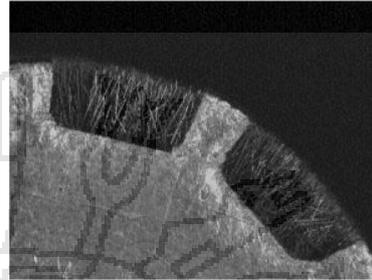
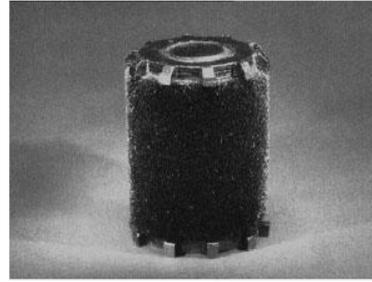


Figura 2.34. Desplazador regenerador (NASA).

2.2.3.6.4 PISTÓN

Esta parte es la que realiza el trabajo motriz, y va conectado al mecanismo de transformación de movimiento. El pistón debe ser ligero porque el gas realiza trabajo sólo durante la expansión. Debido a que el pistón está en la zona fría del motor, sí se puede utilizar aluminio para su construcción. Para motores pequeños experimentales, también utilizan teflón.

El pistón debe llevar anillos en el caso de que el motor sea presurizado y se podría obviar éstos en el caso de ser un motor pequeño o experimental.

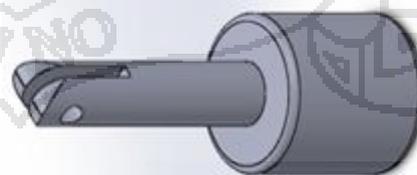


Figura 2.35. Pistón.

2.2.3.6.5 DESPLAZADOR

Esta parte es la encargada de desplazar el aire de una zona a otra. Esta parte debe ser capaz de generar un gradiente de temperatura entre la zona caliente y la zona fría.

Idealmente, esto se lograría haciendo que la cámara central del desplazador sea un aislador térmico, pero debido a que sería complicada su construcción, se puede hacer el desplazador largo y que el material tenga baja conductividad térmica; por otra parte, éste debe ser capaz de soportar altas temperaturas, porque la zona caliente siempre se mantendrá a alta temperatura. En motores pequeños y experimentales, el desplazador suele comportarse como un regenerador haciendo que éste tenga paredes lo más delgadas posible.

El desplazador también debe ser liviano porque, en la expansión, sube, juntamente con el pistón, y si éstos son pesados hacen más difícil la expansión del gas, y, por consiguiente, disminuye la potencia. Mayormente, los desplazadores se construyen de acero inoxidable por sus propiedades de conductividad térmica y de resistencia a altas temperaturas. Se sabe que en motores pequeños (de exhibición), también se pueden hacer de aluminio, pero esto no sucede en motores más grandes.

La longitud de un desplazador puede ser de 1 a 3 veces su diámetro, y la holgura radial que debe haber entre éste y el cilindro es de 1 a 2% del diámetro del cilindro, para que exista un efecto de regeneración. Algunos investigadores consideran que el diámetro óptimo del desplazador es el 98% del diámetro del cilindro, lo cual es equivalente al 1% mencionado anteriormente.

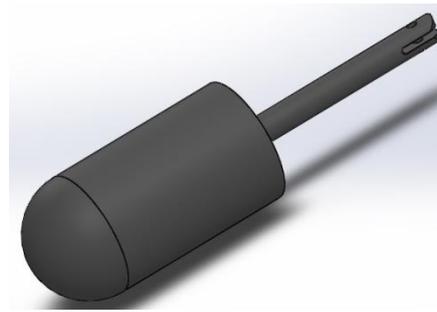


Figura 2.36. Desplazador.

2.2.3.6.6 LA VOLANTE

Esta es la parte que entrega energía al ciclo para que se produzca la compresión del fluido de trabajo y también ayuda a mantener estable el giro del motor.



Figura 2.37. Volante.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 SEGUIDOR SOLAR:

Un seguidor solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles solares, concentradores solares de forma que éstos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares, siguiendo al sol desde el este en la alborada hasta el oeste en la puesta. Los seguidores solares son usados en todas las tecnologías de seguimiento solar.

2.2.2 COLECTOR SOLAR:

Un captador solar, también llamado colector solar, es cualquier dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica. Los colectores se dividen en dos grandes grupos: los captadores de baja temperatura, utilizados fundamentalmente en sistemas domésticos de calefacción, y los colectores de alta temperatura, conformados mediante espejos, y utilizados generalmente para producir vapor que mueve una turbina que generará energía eléctrica.

2.2.3 PUNTO FOCAL:

Cuando hablamos de punto focal nos referimos a algún objeto o elemento que está situado en alguna habitación, y que al momento de entrar nos atrae inmediatamente la vista y nos llama la atención. Pero a la vez, forma parte integral de ese espacio. Es importante que ese objeto refleje el ambiente que se quiere crear a través de la decoración.

El punto focal es el centro de interés o actividad en un trabajo de arte. Puede que sea o no el centro real de una pintura o dibujo, pero siempre es la parte más importante. El contraste, estructura o color son tres cosas que pueden ayudar a definir el punto focal.

2.2.4 COMPARADORES:

Un comparador es un circuito electrónico, ya sea analógico o digital, capaz de comparar dos señales de entrada y variar la salida en función de cuál es mayor. En un circuito electrónico, se llama comparador a un amplificador operacional en lazo abierto (sin realimentación entre su salida y su entrada) y suele usarse para comparar una tensión variable con otra tensión fija que se utiliza como referencia.

Un comparador es un circuito analógico que monitorea dos entradas de voltaje. Uno es llamado voltaje de referencia (V_{ref}) y el otro voltaje de entrada (V_{in}). Cuando V_{in} se incrementa por encima o se reduce por debajo de V_{ref} , la salida (V_{out}) del comparador cambia de estado entre bajo y alto.

2.2.5 FOTOTERMICA:

Se entiende por energía solar térmica, a la transformación de la energía radiante solar en calor o energía térmica. La energía solar térmica se encarga de calentar el agua de forma directa alcanzando temperaturas que oscilan entre los 40° y 50° gracias a la utilización de paneles solares (siempre temperaturas inferiores a los 80°C). El agua caliente queda almacenada para su posterior consumo: calentamiento de agua sanitaria, usos industriales, calefacción de espacio, calentamiento de piscinas, secaderos, refrigeración, etc.

Por tanto, la energía solar térmica utiliza directamente la energía que recibimos del Sol para calentar un fluido. La diferencia con la energía solar fotovoltaica es que ésta aprovecha las propiedades físicas de ciertos materiales semiconductores para generar electricidad a partir de la radiación solar.

2.2.6 FOTOVOLTAICA:

La energía fotovoltaica es la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación se produce en unos

dispositivos denominados paneles fotovoltaicos. En los paneles fotovoltaicos, la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor generando una pequeña diferencia de potencial. La conexión en serie de estos dispositivos permite obtener diferencias de potencial mayores.

Los materiales semiconductores, para su utilización en celdas fotovoltaicas, han de ser producidos en purezas muy altas, normalmente con estructura cristalina.

La conversión de la energía solar a eléctrica se realiza de manera limpia, directa y elegante.

2.2.7 PDR:

Reflector parabólico también llamado a veces reflector parabólico, o plato reflector parabólico simplemente es un tipo de superficie reflectante usado para capturar el diseño o la energía asociada a la onda procesos , tales como la luz , a la radiación infrarroja , o cualquier otra forma de radiación electromagnética , o sonido y otras formas de ondas de presión. El reflector se construye con una sección de un paraboloides circular generada por revolución de una parábola alrededor de su eje. Se produce cuando la reflexión especular, en la que hay igualdad entre el ángulo de incidencia y ángulo de reflexión, el reflector parabólico transforma una onda plana incidente en una onda esférica convergente su foco. Por la misma razón, una onda esférica generada por una fuente puntual situado en el foco del reflector se refleja como una onda plana que se propaga en el espacio como un haz colimado a lo largo del eje de la parábola.

2.2.8 COMBUSTION EXTERNA:

Un motor de combustión externa es una máquina que realiza una conversión de energía calorífica en energía mecánica mediante un proceso de combustión que se realiza fuera de la máquina.

Los motores de combustión externa también pueden utilizar gas como fluido de trabajo (aire, H_2 y He los más comunes) como en el ciclo termodinámico Stirling.

Motor térmico en el cual la fuente de calor es exterior al mismo, es decir, la combustión no se produce dentro del cilindro o de la turbina.

2.2.9 RADIACION ELECTROMAGNETICA:

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

La radiación electromagnética puede manifestarse de diversas maneras como calor radiado, luz visible, rayos X o rayos gamma. A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío. En el siglo XIX se pensaba que existía una sustancia indetectable, llamada éter, que ocupaba el vacío y servía de medio de propagación de las ondas electromagnéticas.

2.2.10 MOTOR STIRLING:

Un motor Stirling es un motor térmico operando por compresión y expansión cíclica de aire u otro gas, el llamado fluido de trabajo, a diferentes niveles de temperatura tales que se produce una conversión neta de energía calorífica a energía mecánica. O más específicamente, un motor térmico de ciclo cerrado regenerativo con un fluido gaseoso permanente, donde el ciclo cerrado es definido como un sistema termodinámico en el cual el fluido está permanentemente contenido en el sistema, y regenerativo describe el uso de un tipo específico de intercambio de calor y almacenamiento térmico, conocido como el regenerador. Esta inclusión de un regenerador es lo que diferencia a los motores Stirling de otros motores de ciclo cerrado.

Es un motor de combustión externa frente a los tradicionales motores gasolina o diesel de combustión interna que mueven los vehículos. El motor opera con una fuente de calor externa que puede ser incluso solar o nuclear y un sumidero de calor, la diferencia de temperaturas entre ambas fuentes debe ser grande. En el proceso de conversión del calor en trabajo el motor de Stirling alcanza un rendimiento superior a cualquier otro motor real, acercándose hasta el máximo posible del motor ideal de Carnot. En la práctica está limitado, porque el gas con el que trabaja es no ideal, es inevitable el rozamiento en los distintos componentes que se mueven, etc. En la fotografía se muestra un motor Stirling activado por energía solar.

2.2.11 LDR (FOTORRESISTENCIA):

Una fotorresistencia es un componente electrónico cuya resistencia disminuye con el aumento de intensidad de luz incidente. Puede también ser llamado fotorresistor, fotoconductor, célula fotoeléctrica o resistor dependiente de la luz, cuyas siglas, LDR, se originan de su nombre en inglés light-dependent resistor. Su cuerpo está formado por una célula o celda y dos patillas. En la siguiente imagen se muestra su símbolo eléctrico.

El valor de resistencia eléctrica de un LDR es bajo cuando hay luz incidiendo en él (puede descender hasta 50 ohms) y muy alto cuando está a oscuras (varios mega ohmios).

2.2.12 LAZO ABIERTO:

Es aquel sistema en que solo actúa el proceso sobre la señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada, pero basada en la primera. Esto significa que no hay retroalimentación hacia el controlador para que éste pueda ajustar la acción de control. Es decir, la señal de salida no se convierte en señal de entrada para el controlador.

Estos sistemas se caracterizan por:

- Ser sencillos y de fácil concepto.

- Nada asegura su estabilidad ante una perturbación.
- La salida no se compara con la entrada.
- Ser afectado por las perturbaciones. Éstas pueden ser tangibles o intangibles.

La precisión depende de la previa calibración del sistema.

2.2.13 MYLAR:

Mylar o tereftalato de polietileno es un polímero termoplástico (patentado por la Calico Printer's Association de Manchester), utilizado entre otras cosas, para la fabricación de botellas de plástico y otros envases de alimentos. También es utilizado a menudo como material base para los utensilios de cocina.

Película de poliéster o lámina de plástico se fabrican en una gama de diferentes estilos, acabados y espesores.

2.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION

2.3.1. HIPOTESIS GENERAL

- El diseño e implementación del prototipo, a través de un concentrador solar y un motor Stirling es el indicado para obtener una mejora en el aprovechamiento de la energía solar, con una eficiencia en gran medida.

2.3.2. HIPOTESIS ESPECÍFICO

- La construcción del concentrador solar con un antena de TV satelital y papel reflectante Mylar es el adecuado para la funcionalidad del motor Stirling.
- El seguidor solar PDR de dos ejes es lo suficientemente adecuado para posicionar el concentrador solar.
- Las características del motor Stirling tipo gamma es idóneo para la conversión de energía solar a energía mecánica.

CAPITULO III

III. METODO DE INVESTIGACION



3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación a realizarse será de tipo experimental.

3.1.1 DISEÑO DE INVESTIGACION

EXPERIMENTAL

Se considera así teniendo en cuenta que las variables a manipular son modificables por el investigador, existe una manipulación directa sobre la variable independiente.

3.2. METODOLOGÍA

- El diseño del motor Stirling tendrá cuatro procesos básicos como es la, compresión, calentamiento, expansión y enfriamiento.
- El diseño de una antena parabólica tipo disco se tendrá que pulir la parte metálica, para así obtener una mayor concentración de los rayos del sol.
- La parte física del motor Stirling se basara por un juego de pistones, intercambiadores de calor y un elemento llamado “regenerador” y el fluido podría ser de aire.

3.3. TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS

3.3.1 TECNICAS

Como fue descrito anteriormente en el diseño de investigación, la técnica que fue utilizada para la recolección de información es la observación directa por los ejecutores sobre los aspectos mencionados en los objetivos planteados las características y aspectos importantes para el posicionamiento del concentrador solar.

3.3.2 MEDICION

Técnica que comprende la identificación y el establecimiento de diferentes parámetros del sistema de control de posicionamiento del seguidor solar y el motor Stirling y su entorno.

3.3.3 REVISION DE HOJA DE DATOS

Mediante el cual se conocerá las especificaciones técnicas y de funcionamiento de los dispositivos utilizados en nuestro sistema, para conocer los alcances y limitantes del prototipo de conversión.

3.3.4 INSTRUMENTOS

Para la medición de las diferentes señales se ha utilizado diferentes instrumentos de medición, tales como: osciloscopio, multímetro, entre otros.

3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

- Variable Independiente : Temperatura
: Concentración Solar
- Variable Dependiente : Generación de Energía Eléctrica

3.5. RECURSOS HUMANOS

El desarrollo del proceso investigativo es realizado por dos integrantes, puesto que se trata de un proyecto de investigación implementado de acuerdo a las políticas establecidas por la universidad.

Por otro lado el presente proyecto de tesis fue autofinanciado en toda su integridad por los ejecutores.

CAPITULO IV

IV. CARACTERIZACION DEL ÁREA DE INVESTIGACION



4.1. ÁREA DE ESTUDIO

La región Puno se localiza en la sierra sudeste del país, en la meseta del Collao a: $13^{\circ}00'66''00''$ y $17^{\circ}17'30''$ de latitud sur y los $71^{\circ}06'57''$ y $68^{\circ}48'46''$ de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

La región de Puno Limita:

- Por el Sur, con la región Tacna.
- Por el Este, con la República de Bolivia
- Por el Oeste, con las regiones de Cusco, Arequipa y Moquegua.

La región Puno se encuentra en el Altiplano entre los 3,812 y 5,500 msnm y entre la ceja de selva y la selva alta entre los 4,200 y 500 msnm. La capital del departamento es la ciudad de Puno y está ubicada a orillas del lago Titicaca.



Figura 4.1. Ubicación de la Región Puno

En general el clima de la región Puno se halla frío y seco. Las precipitaciones pluviales son anuales y duran generalmente entre los meses de diciembre a abril, aunque suelen variar en ciclos anuales, originando inundaciones y sequías, generalmente las precipitaciones son menores a 700 mm.

La temperatura es muy digna, con marcadas diferencias entre los meses de junio y noviembre y con oscilaciones entre una temperatura promedio máxima de 21°C y una mínima de -25°C .

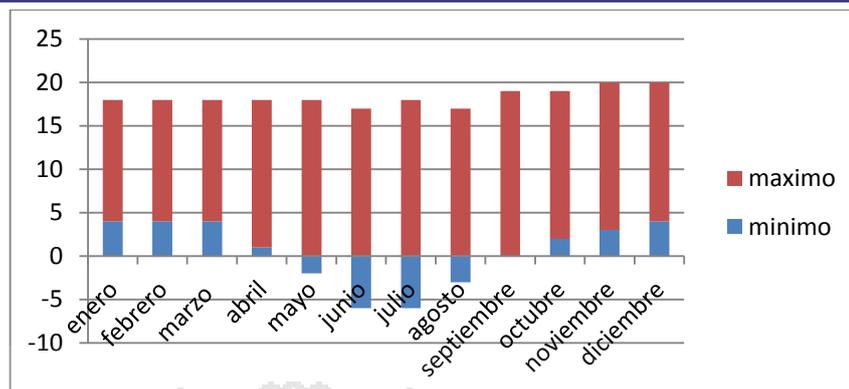


Figura 4.2. Temperaturas Máximas y Mínimas

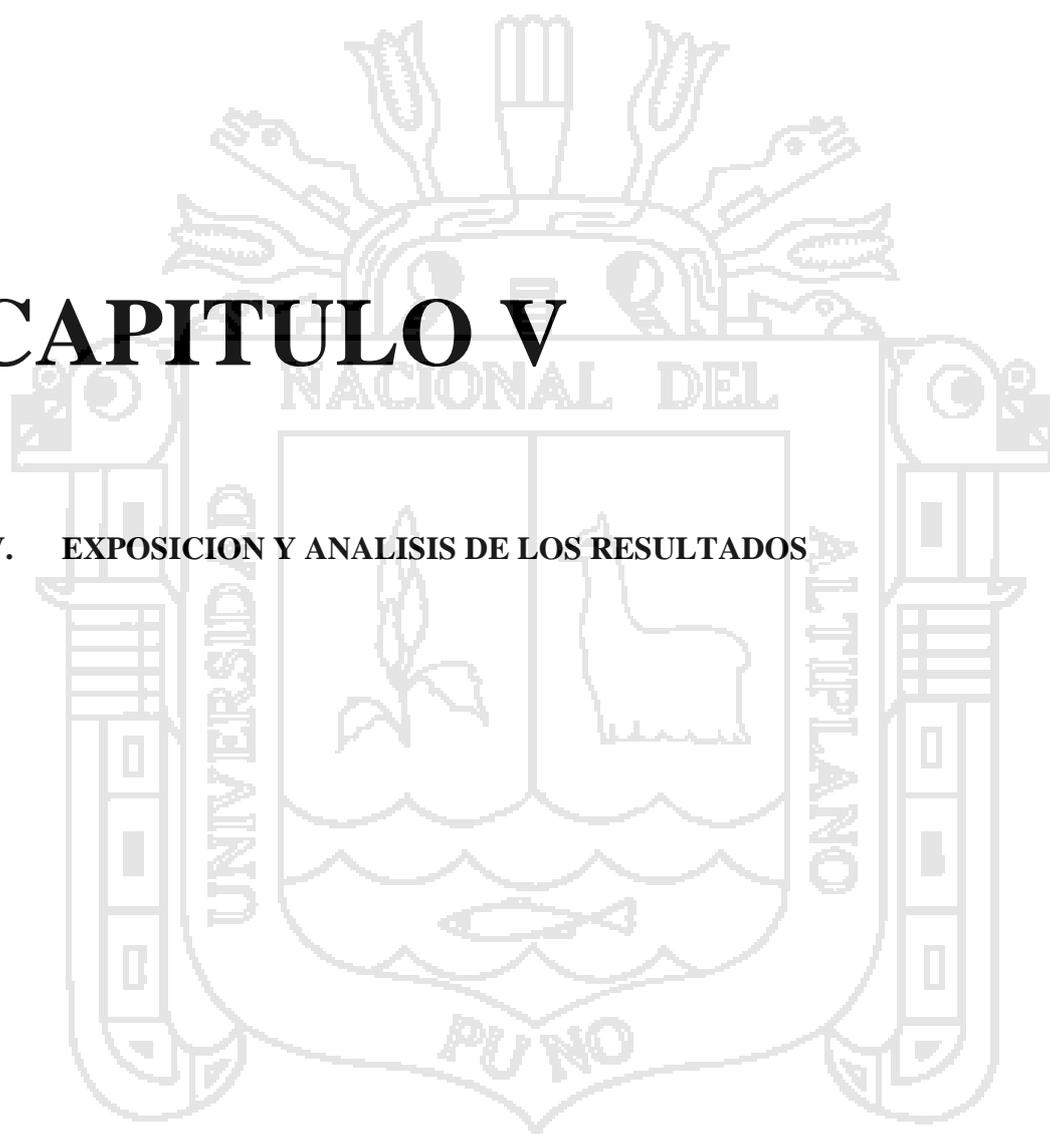
“En el país, la región Puno alcanza los valores más elevados de radiación solar, reportándose hasta 15 el índice de radiación ultravioleta, esto según informa el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – Puno, este índice es favorable para el funcionamiento del prototipo a diseñar.

En el último año a nivel regional, el 27% de la población aún espera la cobertura en el servicio de energía eléctrica y aunque desde el gobierno central a través de un programa de masificación de energía fotovoltaica se tiene proyectado entregar 46 mil paneles solares para la región Puno, a la fecha sólo el 10% de municipalidades hicieron alcance de sus requerimientos ante la DREM.

Nuestro área de estudio comprende la ciudad de Puno, Principalmente la Universidad Nacional del Altiplano, y los laboratorios de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica que brindan todas las facilidades para realizar nuestra investigación.

CAPITULO V

V. EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS



5.1 CONCENTRADOR SOLAR

5.1.1 CONSTRUCCION DEL COLECTOR PDR

Para nuestro concentrador se optó por emplear una antena de TV con foco Offset, esta decisión se basa fundamentalmente en evitar sombras sobre el concentrador, ya que esto nos reduciría el área de reflexión lo que con lleva a una reducción en la temperatura que deseamos alcanzar.

5.1.2 DESCRIPCION DE CONSTRUCCION DE UN COLECTOR PDR CON UNA ANTENA DE TV (OFFSET)

Primero debemos conseguir una antena de TV como se muestra en la figura 5.1, este tipo de antena asimétrica se obtiene recortando de grandes antenas parabólicas de forma esférica. Tienen el foco desplazado hacia abajo, de tal forma que queda fuera de la superficie de la antena para que no provoque sombra. El rendimiento es algo mayor que en la de foco primario, y llega a ser de un 70% o algo más.

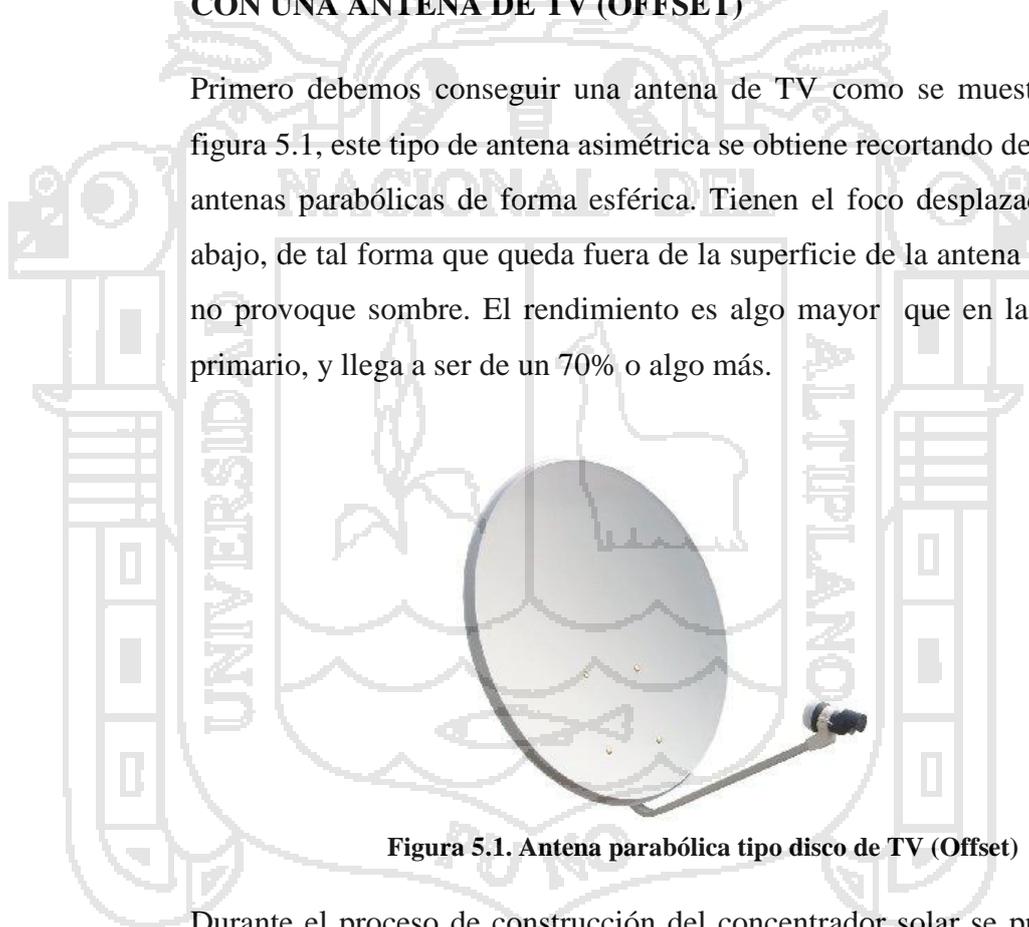


Figura 5.1. Antena parabólica tipo disco de TV (Offset)

Durante el proceso de construcción del concentrador solar se probó dos tipos de concentradores.

El primero fue de pulir la antena (quitar la pintura con disolventes) para lograr un índice de reflexión. Este tipo de concentrador resultó poco eficiente por el bajo índice de reflexión que tiene un rango de 20 a 45%.

Para el segundo concentrador se utilizó material reflectante (Mylar) con un índice de reflexión del 90 – 95%, el papel Mylar se pegó de manera uniforme a la antena de TV.

Para lograr el alto grado de reflexión se deberá de realizar un pegado uniforme sin pliegues como se muestra en la figura 5.2.



Figura 5.2 Manera de pegar Mylar

El resultado final será como se muestra en la figura 5.3.



Figura 5.3. Antena parabólica Forrado de Mylar

Cuando tenemos la parabólica terminada, la orientamos al Sol será trabajo del seguidor solar para determinar su punto focal. Es recomendable utilizar gafas de sol para evitar deslumbramientos al mirar al foco, o ceguera temporal.

Una vez determinada la distancia al punto focal, debemos construir una estructura que mantenga un soporte para colocar el motor Stirling justo en el punto focal. El soporte para el motor Stirling debe estar ubicado en la parte del cilindro de vidrio y así estar en el foco del concentrador.

5.1.3 TEMPERATURAS ALCANZADAS:

Las temperaturas alcanzadas por los dos concentrados solares probados están en el rango de 60 a 200 grados Celsius.

El concentrador solar que logra la funcionalidad del motor Stirling siendo esta como siguen:

Tabla 5.1. Temperaturas alcanzadas

Tipo de concentrador	Temperatura
Concentrador de metal pulido	60 a 90 grados Celsius
Concentrador con láminas adhesivas (Lamina Mylar)	70 a 200 grados Celsius

5.1.4 REFLECTIVIDAD:

Primer Concentrador:

Concentrador solar de metal pulido, se puede observar en la figura 5.4, que este tipo de concentrador tiene un bajo grado de reflectividad, este tipo de concentrador no es recomendable para el prototipo que se implementó.



Figura 5.4. Concentrador de metal pulido

Segundo concentrador:

El concentrador es una antena de TV, donde se pegó las láminas Mylar, logrando una gran reflectividad como se muestra en la figura 5.5, con este concentrador podemos lograr temperaturas mayores a los 150 grados Celsius.



Figura 5.5. Concentrador de alta reflectividad

5.2 SEGUIDOR SOLAR

5.2.1 DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR

El diseño mecánico del seguidor solar se desarrolló considerando las condiciones del lugar de emplazamiento y con componentes que se pudieran adquirir fácilmente, se evitó también la fabricación de componentes mecánicos de difícil manufactura por el aumento del costo que esto significaría en su desarrollo.

Se buscó el balance de los pesos y áreas con respecto al eje de movimiento para que el momento que se tenga que vencer sea mínimo y el actuador solo ayude a conservar el equilibrio y a provocar el movimiento del seguidor pero que no tenga que soportar el peso completo de los módulos en todo momento.

El tipo de control que se escogió se realiza sin retroalimentación (a lazo abierto) de la posición del Sol, utilizando para ello sensores (LDR's).

5.2.1.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE SEGUIDOR

La mejor manera para elegir un tipo de seguidor es analizando su desempeño individual. Hemos seleccionado, de los tipos mencionados, el seguidor solar que implementaremos obedeciendo a diferentes razones.

Primeramente, se eligió construir el seguidor activo de dos ejes, es decir, que influyera motores para realizar los movimientos.

Otro aspectos tal vez el más importante es que nuestro sistema de generación es un sistema concentrado, es decir requiere que la componente de luz directa este concentrada en un punto específico, y por lo tanto debe estar orientado con mucha precisión.

Otro factor no menos importante es de poder aplicar los conocimientos de electrónica adquiridos en nuestra formación.

5.2.2 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES

Nuestro diseño de seguidor consistirá en un circuito analógico capaz de detectar el desbalance luminoso entre dos fotorresistencias ubicadas en la misma posición que el concentrador solar, de manera que cuando estas no estén orientadas hacia el Sol, el circuito pueda activar un motor que actúe sobre la estructura del concentrador solar para orientarlo hacia el Sol y corregir dicho desbalance. La figura muestra un esquema básico del funcionamiento del sistema.

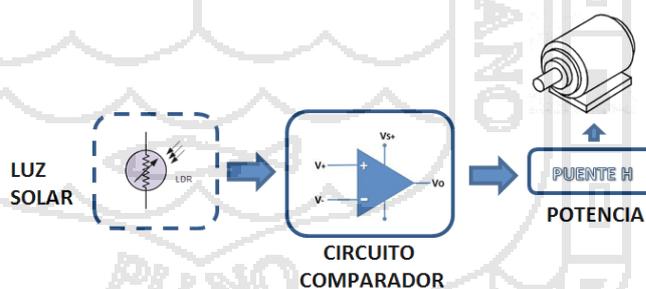


Figura 5.6. Esquema básico del seguidor solar

Iniciamos describiendo la parte electrónica de nuestro diseño de seguidor, puesto que fue la primera en ser implementada y probada, aunque antes de eso se tuvieron consideraciones respecto a la parte mecánica del mismo. Está muy claro que deben estar correspondidos ambos diseños, y ajustados a la medida del otro, de otro modo la operación del sistema se vería afectada, limitada o bien completamente suprimida.

5.2.2.1 SENSORES

Nuestro diseño consistió en primer lugar de un circuito electrónico capaz de tomar decisiones básicas a partir de variables de entrada. El circuito comparador, evaluará las variables y enviará un valor de salida acorde a la entrada. Hemos mencionado anteriormente que el circuito estará basado en sensores de luz ubicados en el concentrador solar, dispuestos de tal manera que sólo puedan proporcionar un valor de voltaje determinado estando ubicados ambos frente al Sol, el resto será trabajo del circuito.

El tiempo de respuesta del arreglo de los LDR's es aproximadamente entre 50 segundos y 1 minuto, esto no depende del tamaño del tabique, sino está directamente relacionada al movimiento de la tierra con respecto al sol. El tiempo básicamente es la actualización del movimiento de los motores.

El tamaño de nuestro tabique es de 39mm que nos una desviación en el rango de 0.7 y 1; está desviación es necesario tenerla en un rango menor a 0.5 para lograr una mayor concentración solar en el foco de nuestro concentrador.

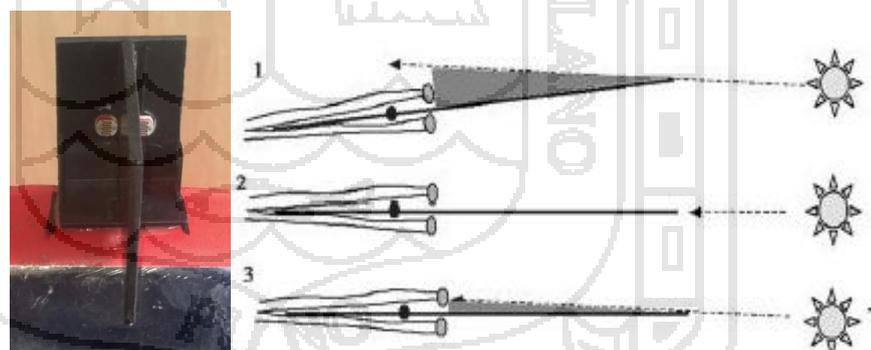


Figura 5.7. Disposición y Desviación de los LDR's

Este tipo de arreglos de LDR's se utilizan mayormente para uso en robótica, cuando es necesario que un dispositivo sea guiado por un haz de luz para un determinado fin. Pero también es utilizado en seguimiento solar, aunque para otras aplicaciones. De las figuras se desprende que la precisión de este tipo de arreglos depende de

varios parámetros, por ejemplo las características propias de las LDR's, la separación entre ellas, el ancho del tabique, etc.

Entre más cerca estén las fotorresistencias del tabique el sistema será más sensible, ya que una ligera variación en la posición del Sol hará sombra sobre alguna LDR; pero depende además de la altura del tabique, que al ser pequeño disminuye la sensibilidad, puesto que la sombra es más pequeña. La longitud del tabique no es muy importante ni su anchura, simplemente limitarán el “horizonte” de las LDR's, para que no tomen luz de debajo de ellas.

Las características propias de las fotorresistencias pueden ser diferentes entre sí, y es necesario asegurarse de que ambas LDR's a utilizar sean lo más idénticas posible. Se estudiaron y obtuvieron en el laboratorio las características resistencia-irradiación para varias fotorresistencias, mostrándose los resultados en la figura 5.8. Las LDR's más recomendables son los que poseen una resistencia más alta.

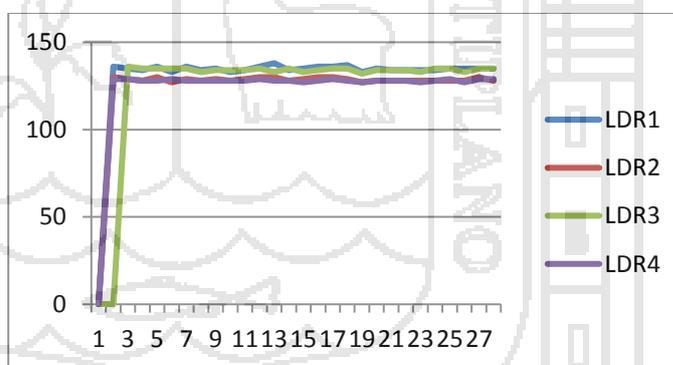


Figura 5.8. Respuesta de los sensores LDR's

Es recomendable sustituir las LDR's por otras que, no solamente sean iguales (lo más posible) entre sí, sino que tengan valores altos (más de 50 k-ohm). Además debe procurar que la variación sea lo más lineal posible.

5.2.2.2 CIRCUITO ELECTRÓNICO

El circuito básico puede apreciarse en la figura 5.9. Por simple inspección, vemos que se trata de un comparador.

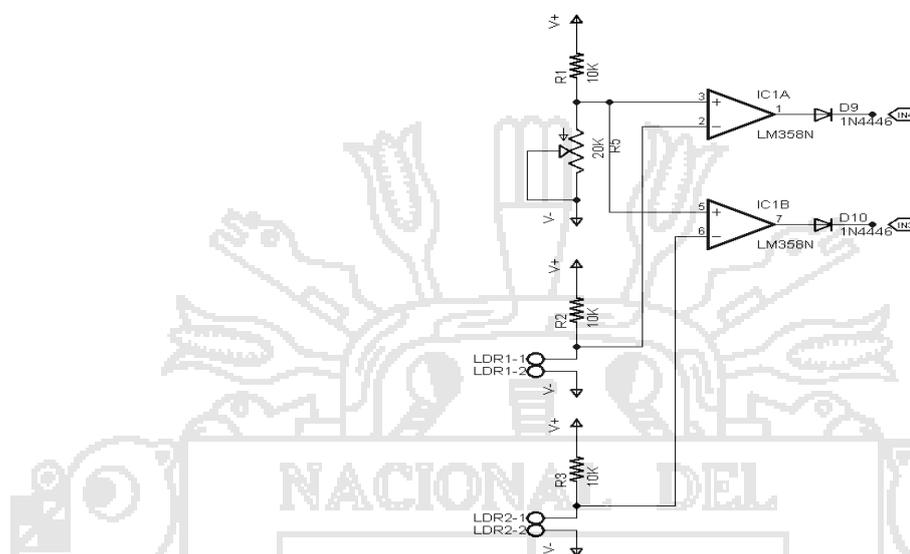


Figura 5.9. Circuito comparador

En esta configuración el OPAMP como dice su nombre recibe dos señales y dependiendo de cuál sea más grande será la respuesta. Para nuestro caso las entradas no inversoras de los amplificadores están determinadas por la resistencia R1 y el potenciómetro R5, este último nos permitirá calibrar la sensibilidad de nuestros LDR's con lo que tendremos mayor precisión con nuestro seguidor solar. Los sensores de luz solar LDR's van conectados a la entrada inversora de OPAMP esto para tener en la salida siempre una señal positiva V+ para poder activar el puente H.

5.2.2.3 PUENTE H

Para la etapa de potencia de los 2 ejes, se hace empleo del integrado L298 por su gran versatilidad de uso, funcionalidad y por sus características técnicas.

Este integrado nos permite trabajar con 2A los que son suficiente para posicionar el concentrador solar frente al sol.

5.2.2.5 REGULADOR DE TENSIÓN

El circuito de control básicamente funciona con 5V y el motor está energizado con 12V, esta tarjeta de control tiene dos alternativas de funcionalidad que dependerá de JP1.

Puede funcionar con una sola fuente de 12V para esto se tendrá que colocar el jumper para cerrar circuito y así alimentar toda la tarjeta. En caso de que la fuente de alimentación de 12V no entregue la suficiente corriente se puede optar por conectar una fuente de 5V y retirando el jumper.

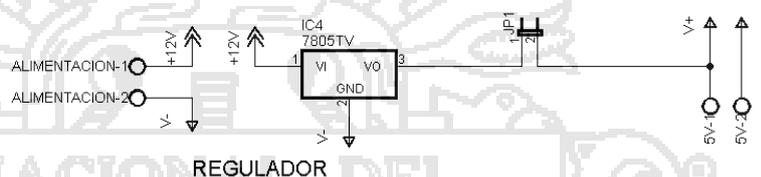


Figura 5.12. Regular de tensión

5.2.2.6 CIRCUITO COMPLETO

El circuito implementado se muestra en la figura 5.13, en donde se puede observar la disposición de cada uno de los componentes que lo integra, teniendo este resultado.



Figura 5.13. Circuito completo del seguidor solar

En la figura 5.14, se muestra el resultado final de la placa de cobre del seguidor solar, donde posteriormente se soldaran todos los componentes.

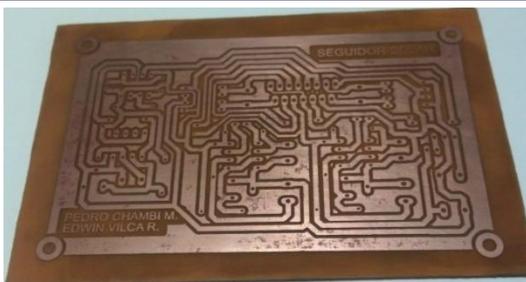


Figura 5.14. Cara Transversal de la Placa del Seguidor

5.2.2.7 MATERIALES UTILIZADOS

Se listan los materiales necesarios para la fabricación del circuito electrónico para el movimiento del seguidor.

Los materiales mencionados en la tabla 5.2. Son los que se necesitan para construir el circuito analógico.

Tabla 5.2. Materiales

DESCRIPCION	CANTIDAD	COSTOS
Placa de cobre 8X12 cm.	01	2.00
LM 358	03	4.50
NE555	01	1.50
L298	01	10.00
LDR	05	12.50
Regulador 7805	01	1.50
Resistencia 10k	08	0.80
Resistencia 1M	01	0.10
Capacitor 10uF	01	0.50
Capacitor 47uF	01	0.50
Capacitor 10nF	01	0.50
Diodos	14	7.00
Potenciómetro 20K	03	3.00
Sócalos 8 pines	04	2.00
Bornera de 2 pines	09	4.50
Cable 4 hilos	3mts	9.00
Cable 2 hilos	1.5mts	1.50
		S/.61.40

Además de los materiales empleados se requirió hacer uso de los siguientes programas:

- CadSoft Eagle PCB Design Software; empleado para diseñar la placa del seguidor solar.
- Labcenter electronics Proteus PCB Design and Simulation; empleado para visualizar la funcionalidad del circuito de control del seguidor.
- SolidWorks 2013; empleado para diseñar y dimensionar la estructura del motor y el seguidor.

5.2.3 CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

Se construyó el prototipo con base en las dimensiones obtenidas previamente, siendo necesario sólo unos ajustes en las dimensiones de algunos componentes por disponibilidad de material y con el fin de abaratar costos, además se modificó la ubicación del soporte del actuador, obteniendo un prototipo muy parecido al de diseño, Figura 5.15.

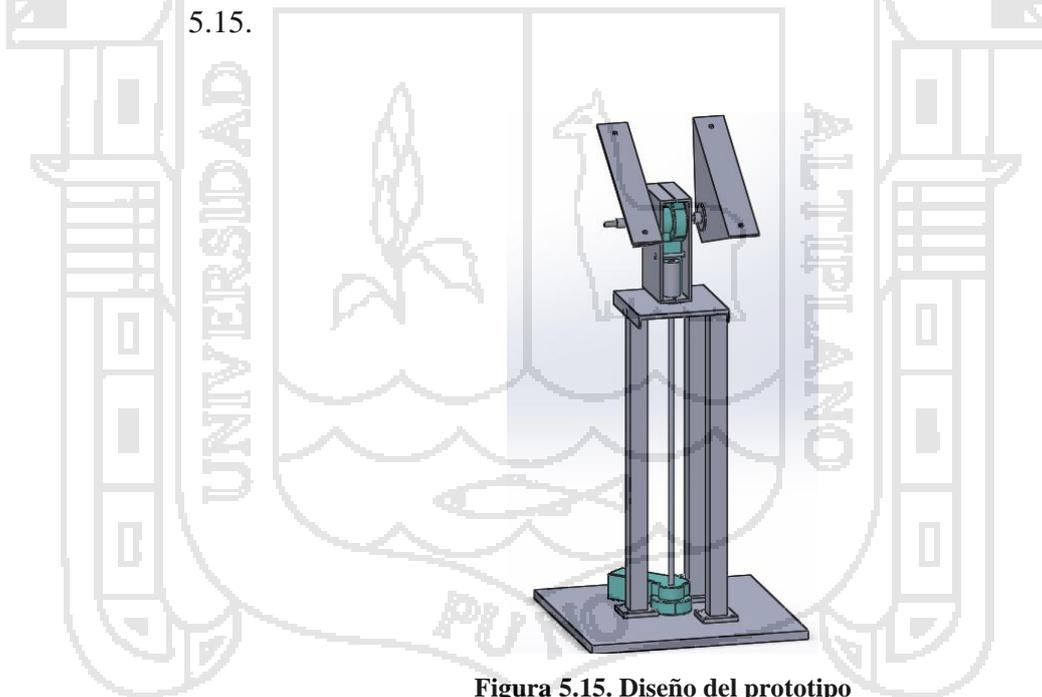


Figura 5.15. Diseño del prototipo

Comenzaremos este capítulo por mencionar algunos de los requerimientos mecánicos que el sistema debe de cumplir. Entre ellos veremos algunos fenómenos que también afectarán el funcionamiento mecánico de este sistema a diseñar.

Así mismo, hay criterios que evaluar de la parte eléctrica que afectarán directamente el diseño que tendrá la estructura, por mencionar algunos

ejemplos podríamos decir que los accionadores serán motores eléctricos o del tipo activo.

Todos estos criterios serán tomados en cuenta para el diseño y posterior construcción de nuestro seguidor solar para el concentrador solar.

5.2.3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE MECÁNICA

Tomaremos en cuenta algunas de las secciones anteriores para elaborar la parte mecánica del seguidor solar, en especial, el capítulo donde se expone la teoría respecto al tema, por ejemplo, el movimiento del Sol durante las diferentes épocas del año, los límites que este debe tener para su movimiento, la orientación adecuada para optimización de energía del mismo (en cuanto a largo o ancho del concentrador solar), entre otras consideraciones.

A continuación, se ilustran los criterios más importantes que se han tomado en cuenta para la construcción de la estructura mecánica.

5.2.3.2 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

- Se necesita que se mueva en dos ejes, es decir, que posea movimiento hacia dos direcciones de forma lineal (del tipo de doble inclinación).

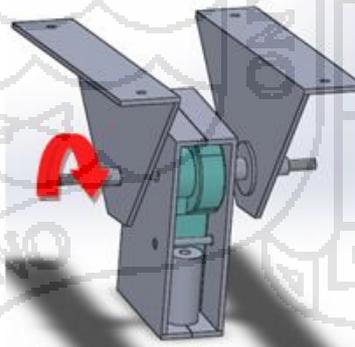


Figura 5.16. Movimiento Vertical

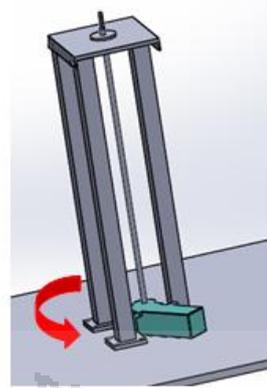


Figura 5.17. Movimiento horizontal

- Se estará expuesto a fenómenos atmosféricos impredecibles, es decir, vientos leves y fuertes, terremotos de incierta magnitud, lluvias de impredecible fuerza, granizadas, calor, etc. Así pues, debe de ser suficientemente fuerte para soportar estos fenómenos naturales.
- Deberá soportar peso aproximado de 5 kilos (del concentrador solar y el motor Stirling). Importante para elegir el material de construcción.
- Será un sistema concentrado, es decir, usará tecnología concentradora de insolación solar como lo muestra la figura 5.18.

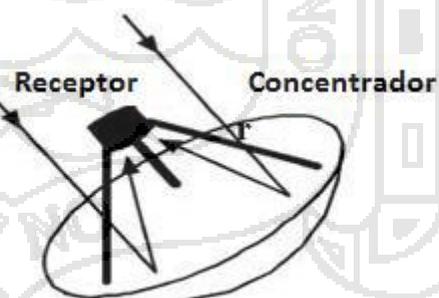


Figura 5.18. Sistema de concentrado

- Además sobre la plataforma se tendrán que colocar los sensores de luz (LDR).

Con estas consideraciones se dividió en dos partes el diseño del seguidor:

5.2.3.3 DISEÑO DEL EJE VERTICAL

Nuestro eje vertical es muy simple de ensamblar, pues resulta de muy pocas piezas como son las dos aletas de soporte que se muestran en la figura 5.19, que van acopladas al eje del motor que será protegido por una cubierta metálica.

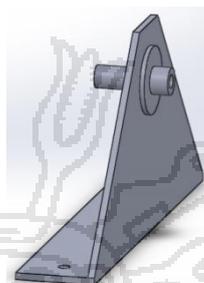


Figura 5.19. Aleta de soporte del concentrador solar

El eje vertical se une al eje horizontal mediante un engranaje y cojinetes esto para suavizar el movimiento circular que habrá entre estos.

El resultado final será como se muestra en la figura 5.20, cabe mencionar que todas las piezas son de metal y están soldadas y atornilladas para su rigidez.

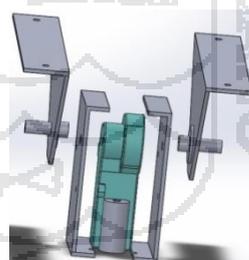


Figura 5.20. Eje vertical

5.2.3.4 DISEÑO DEL EJE HORIZONTAL

El diseño del eje horizontal consta de tres soportes que van ubicados en forma triangular, esta disposición es para darle resistencia a la estructura pues tendrá que soportar un aproximado de 10 kilos de peso. En el centro de estos tres soportes se encuentra el motor que nos dará el movimiento para posicionar el concentrador solar. El resultado se muestra en la figura 5.21.

Donde se puede observar la disposición de los soportes y el motor que tiene una varilla de 35cm como eje que va conectado al eje vertical.



Figura 5.21. Eje horizontal

En la figura 5.22, Se muestra el resultado de la estructura ya ensamblada tanto como el eje vertical como horizontal, mientras que en la figura 5.23, se muestra el seguidor y el concentrador solar ya ensamblados listos para su operatividad.



Figura 5.22. Estructura de seguidor solar



Figura 5.23. Concentrador solar acoplado al seguidor solar

5.3 MOTOR STIRLING

5.1.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO

El prototipo testeado es un motor del tipo Gamma, lo que facilita realizar cambios futuros en cualquiera de sus elementos. Se utiliza como parámetro que el motor sea compacto en sus dimensiones, quedando como objetivo que la potencia sea máxima para el prototipo diseñado a un bajo nivel de revoluciones para evitar el aumento de pérdidas mecánicas y de carga.

El diseño del motor se realizó gracias a la ayuda de un software de diseño como es el SolidWorks 2013, donde se pudo realizar el dimensionamiento de cada una de las piezas que componen el motor.

5.1.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

5.1.2.1 CILINDRO

Un de las piezas más importantes es el cilindro puesto que aquí será concentrara el calor, luego servirá como medio de transferencia (circulación del aire) de la zona caliente a la zona fría.

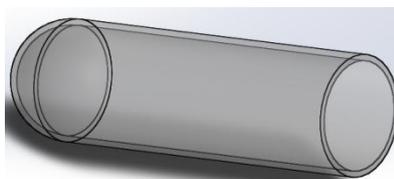


Figura 5.24. Diseño 3D Cilindro

Para esta pieza se ha elegido usar un tubo de ensayo como se muestra en la figura 5.25, por ser resistente a temperaturas del rango de los 300°C y por la baja fricción que tiene.

Además es un buen conductor de calor lo que permite disipar el aire caliente, esto influye en el funcionamiento del motor.

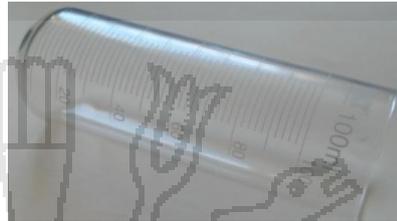


Figura 5.25. Tubo de ensayo (Cilindro)

5.1.2.2 ENFRIADOR

Básicamente está compuesto por dos piezas circulares y que están torneadas en forma de disipadores, y unidos por sus extremos mediante un tubo de aluminio de diámetro 0.5 mm, esto para la transferencia de aire.

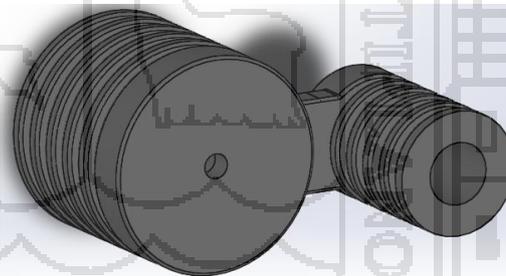


Figura 5.26. Diseño 3D Enfriador

En la figura 5.27, se puede observar el resultado final de esta pieza que básicamente está torneada en aluminio, la forma que se le dio obedece básicamente a modelos de disipadores existentes, con este antecedente es que se toma la forma.



Figura 5.27. Enfriador

5.1.2.3 PISTON

En la figura 5.28, se muestra el diseño del pistón, esta pieza fue modificada durante la construcción, los problemas con esta pieza fueron:

- Peso elevado
- Fricción elevada

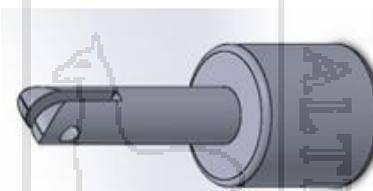


Figura 5.28. Diseño 3D Pistón

La pieza final está hecha de baquelita que tiene menor peso y menos fricción, logrando así un buen funcionamiento.

5.1.2.4 DESPLAZADOR

El desplazador deberá seguir algunas características como son:

- Ser liviano,
- Tener la misma forma que el cilindro.
- Tener una separación de 0.02mm del cilindro.
- No tener agujeros (esto aumentan las zonas muertas).

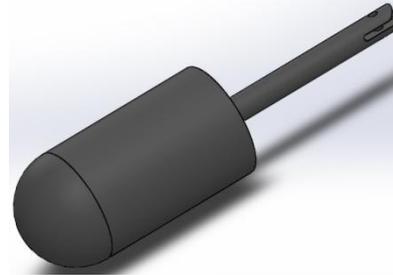


Figura 5.29. Diseño 3D Desplazador

5.1.2.5 SOPORTE DEL CIGÜEÑAL

Esta pieza deberá ser rígida ya que sobre ella serán montados la volante y la rueda de apoyo, tendrá que ser bien fijada para poder soportar el movimiento circular de las mismas.



Figura 5.30. Diseño 3D Eje del Cigüeñal

5.1.2.6 VOLANTE

Un elemento primordial a la hora de ensamblar el motor es la volante, puesto que es el que compensa el giro en las zonas muertas del giro.

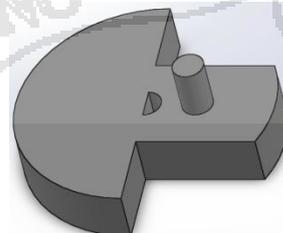


Figura 5.31. Diseño 3D volante

La volante se construyó de láminas de aluminio, esto para lograr el peso adecuado, esta pieza está relacionada con el desplazador puesto que estos dos conforman un sistema de equilibrio.

El resultado final se muestra en la figura 5.32, además esta pieza va acompañada de una rueda de apoyo que será impulsada por el pistón lo que cerrará el ciclo Stirling.



Figura 5.32. Volante y rueda de apoyo

5.1.3 FUNCIONALIDAD:

El desempeño del motor está en gran medida relacionado con los siguientes factores:

Desplazador y pistón:

El desplazador como el pistón tiene que ser ligeros.

La separación entre el desplazador y el cilindro tiene que ser mínima.

El motor tiene que estar sellado para evitar cualquier tipo de fuga, ya que esto reducirá en gran medida el desempeño del motor.

La zona de refrigeración tiene que ser proporcional a la zona de calentamiento, esto influye en las revoluciones del motor.

Funcionalidad:

El motor diseñado en estado funcional tiene gran versatilidad teniendo un aproximado de 700 rpm, este desempeño en gran medida está relacionado

con la temperatura alcanzada por el concentrador, teniendo como influencia directa los rayos solares.

Para lograr la funcionalidad del sistema es indispensable tener un cielo despajado en un 90% ya que de no ser así el motor tendrá dificultades para su funcionalidad.



Figura 5.33. Motor Stirling

Finalmente construidas cada una de las componentes del prototipo se procede a montar teniendo como resultado final el prototipo listo para su funcionamiento como se muestra en la figura 5.34.



Figura 5.34 Eje horizontal

CONCLUSIONES

- Primero.** La contaminación producida por el funcionamiento del motor es mínima, porque al funcionar a combustión externa, ésta se puede controlar fácilmente haciendo que la combustión sea casi completa, disminuyendo las emisiones tóxicas para el medio ambiente.
- Segundo.** El motor Stirling es seguro y tiene un nivel de ruido más bajo que los motores de combustión interna.
- Tercero.** El motor Stirling podría utilizarse en zonas rurales, para la generación de energía eléctrica a pequeña escala, y la generación de energía mecánica (para el accionamiento de bombas, ventiladores, etc.), con bajos niveles de ruido, pudiéndose utilizar, en principio, cualquier tipo de combustible.
- Cuarto.** La generación de energía del prototipo es insuficiente para lograr su autonomía, es necesario tomar energía externa para el posicionamiento de los motores.
- Quinto.** Las condiciones meteorológicas suponen una disminución considerable en el rendimiento del sistema proporcional a la densidad de las nubes o lluvia presentada, la caída en potencia llega hasta 60% de acuerdo a la densidad de la nube.
- Sexto.** Al finalizar nuestro estudio relacionado con la implementación de un seguidor solar en dos ejes para un concentrador solar concluimos primeramente que el dispositivo seguidor es funcional tanto en su parte de control y electrónica, como en su parte mecánica. Este tipo de seguidor puede incrementar el rendimiento del concentrador solar al efectuar el seguimiento diario.
- Séptimo.** Es necesario efectuar mediciones de irradiación durante al menos un año a fin de obtener datos de insolación diaria para los demás meses y el promedio anual. Estos datos pueden servir para calcular más precisamente el beneficio económico potencial relacionado con la implementación de este tipo de seguidor solar.

Octavo. Es necesario diseñar un sistema de impulso capaz de poner en funcionamiento al motor Stirling.



RECOMENDACIONES

- Primero.** Se recomienda que el motor tenga una zona de amortiguamiento, cuya presión sea mayor que la presión atmosférica, para mejorar así la eficiencia mecánica. Lo ideal sería que la presión de amortiguamiento sea igual a la presión media del ciclo.
- Segundo.** Se recomienda que el desplazador y el pistón sean lo más livianos posible, sin que esto afecte la resistencia de sus partes.
- Tercero.** Para disminuir el desgaste de las bielas se recomienda utilizar bocinas de bronce grafitado o utilizar rodamientos. Estos últimos requieren de mayor precisión en su fabricación.
- Cuarto.** Todas las partes del sistema de seguimiento solar pueden ser mejoradas en cuanto a diseño e implementación, en especial la estructura mecánica, puesto que es en nuestro caso la que aporta más limitantes al movimiento del concentrador solar.
- Quinto.** Para una mejor medición de la potencia al eje, se recomienda que inicialmente se comience aplicando la mayor carga posible al motor, de tal manera que el motor apenas gire, para luego ir disminuyendo gradualmente la carga.
- Sexto.** Se recomiendan que las holguras por donde se deslizan las partes sea como máximo 0,02 mm. Esto es debido a que si las holguras son mayores se incrementan las fugas y esto disminuye la potencia del motor.
- Séptimo.** A través del trabajo de grado realizado se indica apoyar la necesidad de realizar un proceso de estudio complementario en el área de transferencia de calor, para adecuar mejor la entrada y salida de energía térmica en las fases del ciclo donde se advierte las fugas a través de los mecanismos y accesorios del motor Stirling.
- Octavo.** Se sugiere la necesidad de investigar materiales alternativos y nuevas configuraciones que garanticen la confiabilidad del motor en el tiempo a la vez que disminuyan las pérdidas de energía por el efecto de la

fricción. Además para el motor poder entregar trabajo, en el interior del motor el fluido operante circula constantemente de una zona a otra. Implicando con ello que para obtener mejores rendimientos se indica un mejor análisis en cuanto a la mecánica de los fluidos para así reducir al mínimo las pérdidas de presión y comprender mejor como deben ser las geometrías internas para el desplazamiento del fluido operante.

Noveno. Se recomienda diseñar un sistema de arranque para el motor Stirling ya que para su funcionalidad necesita de un impulso inicial.



BIBLIOGRAFIA

- Virgil Moring Fyres y Clifford Max Simmang. Termodinámica; Sexta edición
- Castro, M. Energía Solar Térmica de Baja Temperatura, Editorial Progensa; 1ra Edición, Sevilla ,2000.
- Wilson, J. Energía Solar, Editorial Alambra, 1ra Edición.
- Pitts. D. Teoría y Problemas de Transferencia de Calor, Editorial Mcgraw Hill, 1ra Edición.
- Rolle, K, Termodinámica, Editorial Pearson, 6ta Edición.
- Mills, A, Transferencia de Calor, Editorial Irwin, 1ra Edición.
- James R. Senft, “THEORETICAL LIMITS ON THE PERFORMANCE OF STIRLING ENGINES”, International Journal of Energy Research, Int. J. Energy Res., 1998.
- Rizzo, James G. “THE STIRLING ENGINE MANUAL”, Camden Miniature Steam Services, Vol. I & II, 20009.
- Shah, Ramesh K., Jhon Wiley & Sons, “FUNDAMENTALS OF HEAT EXCHANGER DESIGN”, Inc, 2003.
- Paul, B. K., Peterson, “MICROLAMINATION FOR MICROTECHNOLOGY BASED ENERGY, CHEMICAL, AND BIOLOGICAL SYSTEMS”, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nashville, Tennessee, 1999.
- Kongtragool, B., Wongwises, “THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A STIRLING ENGINE INCLUDING DEAD VOLUMES OF HOT SPACE, COLD SPACE AND REGENERATOR, Renewable Energy, 2006.
- ViorelBadsecu, J. “SIMULATION OF A SOLAR STIRLING ENGINE OPERATING UNDER VARIES V WHEATER CONDITIONS ON MARS”, Solar Engineering, Vol 126, 2004.

- ENERGIA SOLAR: SELECCIÓN DEL EQUIPO INSTALACIÓN Y APROVECHAMIENTO, Montgomery Richard,
- Pino Duran Medina. Diseño y Construcción de un Prototipo de Concentrador solar Parabólico de Disco Reflector para la Generación de Energía Térmica. [Tesis de Maestría]. México, D.F.; Instituto Politécnico Nacional; 2012.
- Víctor Raúl Agüero Zamora. Diseño y Construcción de un Motor Stirling para la Generación de Energía Eléctrica. [Tesis de grado]. Lima, Perú; Universidad Nacional de Ingeniería; 2006.
- Darío Omaña Velázquez. Estudio Teórico del Regenerador Para un Motor Stirling. [Tesis de Maestría]. México, D.F.; Instituto Politécnico Nacional; 2007.
- Juan Manuel González Mendoza. Diseño de los Mecanismos Para un Seguidor Solar Pseudo-ecuatorial. [Tesis de Maestría]. México, D.F.; Instituto Politécnico Nacional; 2012.
- José Ignacio Sánchez Lizama. Modelación Numérica, Diseño, Construcción y Análisis Experimental del Desempeño de un Motor Stirling de Baja Entalpia. [Tesis de Maestría]. Santiago, Chile; Universidad de Chile; 2012.
- Eduardo José Mercado Medina. Estudio de un Motor de Combustión Externa. [Tesis de Grado]. Mérida; Universidad de los Andes; 2009.
- Jorge Vázquez Cervantes. Metodología Para el Rediseño de Motores de Ciclo Stirling. [Tesis de Maestría]. México, D.F.; Instituto Politécnico Nacional; 2007.
- Edwin Geovani Cacuango Alba, Manuel Arturo Falconi Borja. Diseño y Construcción de un Motor Prototipo de Ciclo Stirling a Base de Energía Solar. [Tesis de Grado]. Sede Latacunga, Ecuador; Escuela Politécnica del Ejército; 2009.
- Adrian de Alfonso Prieto Puga. Diseño Mecánico de un Seguidor Para Mover un Generador Solar de 600 W con Lentes de Fresnel. [Tesis de Maestría]. Catalunya, España; Universidad Politécnica de Catalunya; 2011.
- Domingo Heriberto Guardado Gutiérrez, Víctor Eulises Rivera Chávez. Implementación de Seguidor Solar en Dos Ejes Para el Sistema Fotovoltaico de la

Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES. [Tesis de Grado]. San Salvador, El Salvador; Universidad de El Salvador; 2012.

- Jessica Guadalupe Trujeque Bolio. Diseño de Refrigerador Solar por Adsorción Para Clima Cálido Húmedo. [Tesis de Maestría]. Querétaro, Qro.; Instituto Politécnico Nacional; 2010.
- José Beltrán Adán. Prototipo Fotovoltaico con Seguimiento del Sol Para Procesos Electroquímicos. [Tesis de Maestría], Cuernavaca, Morelos, México; Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico; 2007.
- Cecilia Pintos Lanzuela. Seguidor Solar Ligero Para Cubiertas. [Tesis de Grado]. Madrid, España; Universidad Pontificia Comillas; 2010.
- William Beale, “UNDERSTANDING STIRLING ENGINES”, VITA Technical Paper.

PAGINA WEB:

- InfiniaCorp.com, PowerDish [sede web]. Connecticut; [acceso septiembre del 2013]. Disponible en: <http://www.infiniacorp.com>
- Miqueridopinwino.blogspot.com, Tecnología para un desarrollo sostenible; [actualizada 29 de diciembre del 2010; acceso septiembre del 2013]. Disponible en: <http://miqueridopinwino.blogspot.com/2010/12/el-sorprendente-motor-stirling-de.html>
- Ohio.edu; Stirling Engine Simple Analysis, [acceso septiembre de 2013] Disponible en: <http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/simple/simple.html>
- Engineeringtoolbox.com; The Engineering Toolbox [acceso octubre de 2013]. Disponible en: http://www.engineeringtoolbox.com/melting-boiling-temperatures-d_390.html
- Lenntch.com, Water Treatment Solutions Lenntch, [sede web]. The Netherlands 1998. [acceso octubre de 2013]. Disponible en: <http://www.lenntech.com/Stainless-steel-304.htm>

- Unaalternativaenergeticastirling.blogspot.com; Una Alternativa Energetica Stirling Motor; [acceso septiembre de 2013]. Disponible en: <http://unaalternativaenergeticastirling.blogspot.com/>
- Deltavolt.pe; Delta Volt Energía Renovable; [sede web]. Perú 2010 – 2013; [acceso septiembre del 2013]. Disponible en: <http://deltavolt.pe/atlas/atlassolar/>
- Cocinasolar.wordpress.com; Cocina Solar; [acceso septiembre del 2013]. Disponible en: <http://cocinasolar.wordpress.com/construye-una/cocina-solar-parabolica-antena-tv/>
- Motorstirlingyadyrtecsup.blogspot.com; Motor Stirling; [actualizada 27 de abril del 2012; acceso octubre del 2013]. Disponible en: <http://motorstirlingyadyrtecsup.blogspot.com/>
- Tutoelectro.com; TutoElectro; [acceso septiembre del 2013]. Disponible en: <http://www.tutoelectro.com/>
- Datasheetcatalog.com; DatasheetCatalog.com; [acceso septiembre del 2013]. Disponible en: <http://www.datasheetcatalog.com/>
- Todopic.com.ar; Todopic.com.ar; [acceso septiembre del 2013]. Disponible en: <http://www.todopic.com.ar/foros/index.php?topic=20444.msg153662#msg153662>
- Aavbae.net; AAV-BAE Un Reloj... ¿de sol?; [acceso octubre del 2013]. Disponible en: http://www.aavbae.net/bol30/reloj_sol.php