

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN
DE ELECTRICIDAD, A PARTIR DEL USO DE ENERGÍA SOLAR,
MEDIANTE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO DE 1.8m”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

REALIZADO POR:

**OSCAR ALBERTO MEJÍA BURBANO
FELIPE DIEGO ZAMORA ORELLANA**

**DIRECTOR: ING. ROBERTO GUTIÉRREZ
CODIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA**

SANGOLQUÍ – ECUADOR

Noviembre del 2008

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto: “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD, A PARTIR DEL USO DE ENERGÍA SOLAR, MEDIANTE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO DE 1.8m**”, fue realizado en su totalidad por los señores: Oscar Alberto Mejía Burbano y Felipe Diego Zamora Orellana, como requerimiento previo para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Roberto Gutiérrez
DIRECTOR

Ing. José Guasumba
CODIRECTOR

Sangolquí, 20 de Noviembre de 2008

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD, A PARTIR DEL USO DE ENERGÍA SOLAR, MEDIANTE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO DE 1.8m”

ELABORADO POR:

Oscar Mejía

Felipe Zamora

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS EN LA ENERGÍA Y MECÁNICA

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ing. Emilio Tumipamba T.

Sangolquí, 20 de Noviembre de 2008

DEDICATORIA

A mis padres Miguel y Yolanda, por su apoyo constante, consejos, enseñanzas y la fuerza que siempre me han brindado para seguir hacia adelante. A mis hermanas Karen y Alejandra por su comprensión y el gran cariño que les tengo. A mi abuela Leonor muy especialmente en mi vida y para mis sobrinas Emilia e Isabelle, por darme esos momentos de tranquilidad y alegría.

Oscar A. Mejía B.

A mi madre Consuelo, por el apoyo y su inmenso cariño; a mi padre Raúl por sus consejos y la actitud positiva que transmite; a mi hermano Raúl por su amistad y compañía en todos los momentos.

Felipe Zamora.

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento a los docentes, que me formaron a lo largo de mi carrera universitaria, con sus consejos; a mi director y codirector por ser el soporte para la culminación de este proyecto; a los amigos y conocidos que fueron aporte en etapas de estudio y de ocio; compañeros de otras carreras y en fin todas y cada una de las personas que hicieron que esta etapa estudiantil sea de lo más agradable.

Oscar A. Mejía B.

Agradezco a mi familia por todo lo que me han enseñado y brindado en todo este tiempo; al director y codirector del proyecto, por el soporte y las facilidades brindadas para la ejecución del mismo; al Sr. Nelson Cárdenas por la asistencia técnica.

Felipe Zamora.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	II
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE DIAGRAMAS.....	XIII
ÍNDICE DE ANEXOS	XIV
NOMENCLATURA	XV
RESUMEN	XVIII
CAPITULO I.....	1
GENERALIDADES	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 ALCANCE	3
1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	3

CAPÍTULO II	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR	7
2.2 FUNDAMENTOS GEOMÉTRICOS	26
2.3 ÓPTICA DE CONCENTRADORES	30
2.4 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	40
2.5 CICLO STIRLING	47
2.6 GENERACIÓN ELÉCTRICA	58
CAPITULO III	61
APLICACIONES ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA	61
3.1 CONCENTRADORES CILINDRICOS PARABÓLICOS	62
3.2 PARABOLOIDES DE REVOLUCIÓN	68
3.3 HELIÓSTATOS	73
3.4 HORNOS SOLARES	76
3.5 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	78
CAPITULO IV	81
DISEÑO DEL SISTEMA ENERGETICO	81
4.1 GEOMETRÍA DEL CONCENTRADOR	81
4.2 ANÁLISIS TÉRMICO	92
4.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL	99
4.4 DISEÑO MECÁNICO	102
CAPITULO V	103
CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	103
5.1 RECURSOS DE FABRICACIÓN	103
5.2 ORGANIGRAMA DE PROCESOS	105
5.2 ESTRUCTURA SOPORTE	112
5.4 ACOPLAMIENTO DEL MOTOR STIRLING	115
5.5 ENSAMBLAJE DE PARTES	116
5.6 CRITERIOS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL	116

CAPITULO VI.....	117
PRUEBAS DE OPERACIÓN	117
6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	117
6.2 TOMA DE DATOS.....	117
6.3 TABLA DE DATOS.....	119
6.4 TABLA DE RESULTADOS.....	120
CAPÍTULO VII.....	122
ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.....	122
7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO.....	122
7.2 ANÁLISIS FINANCIERO	123
CAPITULO VIII.....	129
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	129
8.1 CONCLUSIONES.....	129
8.2 RECOMENDACIONES	131
BIBLIOGRAFÍA	132
Referencia bibliográfica.....	132
Fuentes de información complementarias.....	133

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	CONTENIDO	PAGINA
1.1	Ventajas y desventajas del uso de combustibles fósiles.....	4
1.2	Balance energético mundial.....	5
2.1	Equivalencias de la constante solar.....	8
2.2	Validez de la ecuación 2.1.....	14
2.3	Valores de las constantes a y b.	15
2.4	Factor de reflexión para luz blanca	33
2.5	Propiedades termofísicas a $T=300^{\circ}$ K.....	40
3.1	Tipos de vidrios y sus espesores.....	63
3.2	Características de cada sistema de concentración.....	79
3.3	Matriz de decisión.....	79
4.1	Factores de reducción.....	100
4.2	Factores de mayorización de carga.....	101
5.1	Tabla de materiales empleados.....	104
5.2	Nomenclatura del diagrama de flujo de procesos.....	111
6.1	Tabulación de datos.....	119
6.2	Resultados.....	120
6.2	Datos generación eléctrica en laboratorio.....	121
7.1	Costo de generadores.....	124
7.2	Valoración porcentual de costos.....	125
7.3	Estado de pérdidas y ganancias	125
7.4	Valor actual neto.....	126
7.5	TIR.....	127
7.6	Comparación de costo de venta de energía.....	127
7.7	Proyección de costos del concentrador parabólico-stirling.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	CONTENIDO	PÁGINA
2.1	Representación de la inclinación de ondas de radiación	9
2.2	Variación de la posición solar según estación del año.....	9
2.3	Posición solar en el transcurso del día.....	10
2.4	Comportamiento de un cuerpo negro.....	11
2.5	Espectro de la radiación.....	12
2.6	Movimiento de la tierra alrededor del sol	18
2.7	Movimiento aparente del sol y el ángulo de declinación solar	20
2.8	Esfera celestial y coordenadas del sol relativas a un observador ubicado sobre la tierra en el punto O	21
2.9	Representación ángulo β	22
2.10	Ángulos, respecto a una superficie colectora.....	22
2.11	Ángulo de cenit en un plano.....	23
2.12	Representación gráfica del ángulo cenital del sol, altura solar y el azimut.....	25
2.13	Esquema geométrico del concentrador parabólico	26
2.14	Espectro de radiación electromagnética	30
2.15	Comportamiento de un rayo sobre una superficie	31
2.16	Reflexión especular.....	32
2.17	Tipos de reflexión.....	32
2.18	Refracción en el límite entre dos medios	34
2.19	Tipos de transmisión	36
2.20	Absorción de luz.	37

FIGURA	CONTENIDO	PÁGINA
2.21	Cuerpo con alto índice de reflexión.....	38
2.22	Cuerpo con alto índice de absorción.....	39
2.23	Dirección del flujo del calor por conducción y gradiente de temperatura.....	42
2.24	Esquema de los flujos de calor entre el cuerpo y el entorno.....	45
2.25	Semejanza eléctrica – Suma de dos resistencias.....	46
2.26	Semejanza eléctrica – Resistencia equivalente.....	46
2.27	Ciclo Stirling P – V.....	49
2.28	Ciclo Stirling de 1-3.....	51
2.29.	Ciclo Stirling de 3-4.....	52
2.30	Movimientos relativos de pistón y desplazador.....	53
2.31	Ciclo Stirling teórico vs. real.....	53
2.32	Configuración tipo alfa.....	54
2.33	Configuración tipo beta.....	54
2.35	Esquema de generación eléctrica.....	60
3.1	Colector lineal.....	62
3.2	Tubo absorbente en concentrador.....	65
3.3	Seguimiento solar típico de un Concentrador Cilíndrico Parabólico.....	66
3.4	Estructura metálica – Plataforma solar Almería.....	67
3.5	Colector puntual.....	68
3.6	Distal I, colector puntual de 7,5 metros de diámetro.....	69
3.7	Distal II, Colector puntual de 8,5 metros de diámetro.....	69

FIGURA	CONTENIDO	PÁGINA
3.8	Proyecto en España, EuroDISH.....	70
3.9	Proyecto en España, DISPA-Stirling.....	70
3.10	Distintas configuraciones de colectores de disco.....	72
3.11	Helióstato.....	73
3.12	Helióstato de vidrio-metal de superficie reflexiva.....	74
3.13	Disposición de helióstatos alrededor del receptor.....	75
3.14	Horno solar del tipo caja.....	77
4.1	Representación de la ecuación parabólica.....	82
4.2	Representación gráfica de la parábola obtenida.....	83
4.3	Dimensión de imagen en el concentrador parabólico.....	86
4.4	Relación geométrica de la figura 4.4.....	86
4.5	Relación geométrica triángulo BCE.....	87
4.6	Relación geométrica triángulo ABE4.....	87
4.7	Factores que afectan el diámetro del receptor.....	89
5.1	Soporte de acero del concentrador.....	112
5.2.	Soporte circular de aluminio y eje acero.....	113
5.3.	Sistema de freno para posicionamiento correcto.....	113
5.4.	Colocación de película sobre la antena: (a) Colocación inicial; (b) Antena terminada.....	114
5.5.	Soporte de motor acoplado a la antena.....	115

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

DIAGRAMA	CONTENIDO	PÁGINA
5.1.	Procesos de estructura soporte.....	105
5.2.	Procesos de soporte circular.....	106
5.3.	Procesos de pedestal del motor.....	107
5.4.	Procesos de trabador - freno.....	108
5.5.	Procesos de bocin y freno.....	109
5.6.	Flujo del proceso de construcción.....	110

ÍNDICE DE ANEXOS

CONTENIDO	REFERENCIA
CARTAS DE IRRADIANCIA.....	Anexo A
DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	Anexo B
PLANOS DE CONSTRUCCIÓN.....	Anexo C
ENSAMBLES Y MONTAJE DE PARTES.....	Anexo D
PRUEBAS DE OPERACIÓN	Anexo E
ANÁLISIS ECONÓMICO.....	Anexo F
FOTOGRAFÍAS.....	Anexo G

NOMENCLATURA

H	Radiación en la superficie terrestre
H ₀	Radiación fuera de la superficie terrestre
a	Factor de confiabilidad
b	Factor de confiabilidad
N	Número de horas de brillo solar teórico
H	Número de horas de brillo solar real
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
E	Emitancia de un cuerpo negro
Q_T	Energía que recibe la tierra
d_n	Día juliano del año
δ	Declinación solar
ϕ	La latitud
θ	Ángulo de incidencia
θ_z	Ángulo de zenit
ψ	Azimut solar
ω	Ángulo horario
γ	Ángulo de azimut de superficie
Da	Diámetro de apertura del concentrador
ϕ_r	Ángulo de borde
r _r	Radio de borde
n	Índice de refracción

θ_1	Ángulo de incidencia
K_α	Coefficiente de absorción de la sustancia
λ	Longitud de onda del haz de luz
f	Distancia focal
α	Cono angular de los rayos solares
Fd	Factor de de dispersión
\mathcal{G}	Factor de configuración geométrico
α_{abs}	Factor de absortancia
ρ_C	Factor de reflectancia
Aa	Área de apertura del concentrador
Rr	Radio del receptor
Ar	Área de recepción
fo	Foco óptimo
Qu	Calor útil
Qabs	Energía recibida en el absorbedor
Qper	Pérdidas de calor en el medio ambiente
Ah	Área hueca de la antena
η_o	Eficiencia óptima
Qrh	Calor de radiación en receptor
ε	Emisividad del receptor
Tabs	Temperatura en el absorbedor °C
Tac	Temperatura ambiente en °C
Tr	Temperatura en °K en el receptor
Ar	Área de recepción del motor Stirling

T_{sky}	Temperatura del aire en °K
Q_c	Calor de convección
h_c	Coeficiente de convección
v_{aire}	Velocidad media del aire a una temperatura T(K)
T_{teor}	Temperatura medida en el receptor
G_b	Irradiancia medida
C_{maxr}	Razón de concentración máxima
α_{abs}	Factor de absorción del absorbedor
F_d	Factor de dispersión
\mathcal{G}	Factor de configuración geométrico
F_s	Fracción sombreada
F_t	Factor geométrico
E_d	Error de dispersión
ρ_C	Factor de reflectancia
η_m	Eficiencia teórica del motor Stirling
E_s	Eficiencia del sistema motor & concentrador
Q_{te}	Calor térmico equivalente
η_{tcsg}	Eficiencia total del sistema

RESUMEN

En este estudio se muestra el potencial energético que se puede obtener de los concentradores parabólicos, los mismos que guardan ciertas consideraciones geométricas respecto a su receptor, de modo que se logre la máxima eficiencia óptica. Se emplea una antena parabólica en desuso de 1.8m de diámetro, la cual es un concentrador puntual que deberá ser recubierta de un material altamente reflectivo, como es la película de aluminio, de esta forma se puede obtener el calor necesario en el absorbedor de un motor Stirling.

El conjunto antena-Stirling, se colocará sobre un soporte metálico que permite el movimiento manual biaxial para alinear el colector perpendicularmente a la posición del sol. De esta forma se maximiza la eficiencia total, y por tanto la energía eléctrica conseguida, del conjunto formado por el colector puntual y el motor Stirling. Siendo la eficiencia total del sistema el producto de la eficiencia del colector puntual por la eficiencia mecánica del motor Stirling y del generador eléctrico; se considerará que debido al tamaño del motor Stirling la máxima potencia obtenida, no corresponderá a la verdadera capacidad del sistema, pues la antena coleccionará una mayor cantidad de energía que la necesaria para el funcionamiento del motor, esto se explica fácilmente si se considera que solo basta un 8% de la superficie del colector para poner en marcha el sistema. Se realizará el estudio térmico y mecánico de sus partes.

Por ser un trabajo experimental se realizan las debidas comparaciones con sistemas similares, para establecer cual es mejor respecto a tecnología, tamaño y costos, con el fin de desarrollar a futuro sistemas competitivos en el mercado, ya que se espera que los costos y la eficiencia en los motores Stirling mejoren significativamente para el año 2030, así como también la automatización del sistema con la aplicación de un seguidor solar.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Ecuador al ser un país con un gran potencial energético solar, es necesario el desarrollo de tecnologías alternativas, limpias, de bajo costo y que sean de alto impacto social dentro de las comunidades, ayudando de este modo a mejorar los procesos lo que a su vez se reflejaría en cambios positivos en la calidad de vida en sus pobladores y mejorará significativamente el medio ambiente.

Con el objetivo de fortalecer las labores de formación académica de los alumnos de la Carrera de Ingeniería Mecánica, se crea en el 2006 el laboratorio de Energías No Convencionales, de esta manera se busca explotar el campo de las energías renovables con el apoyo del Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército (CICTE) se han desarrollado equipos solares térmicos tales como concentradores parabólicos y sistemas de combustión de biomasa. Con estos equipos se espera que a futuro puedan brindar energía limpia a zonas de difícil acceso.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El planeta sufre actualmente diferentes cambios climáticos ocasionados por un desequilibrio dentro de las actividades productivas del ser humano, es claro que el desarrollo industrial y socioeconómico de un país depende fuertemente de la solución de su problemática energética. Y estas actividades pudieran ser controladas de mejor manera mediante el uso de energías no convencionales. En el Ecuador existe poca difusión acerca de este tipo de alternativas por lo que se requiere el desarrollo de proyectos que ayuden a implementar procesos más limpios y a menor costo, tratando de provocar el mínimo impacto ambiental.

Debido a la ubicación geográfica de Ecuador, dentro de una zona de gran incidencia solar de aproximadamente $3500 \frac{W}{m^2}$ día promedio, es de gran importancia el aprovechamiento de este recurso, especialmente si consideramos que en el Ecuador el 76.23% de la energía utilizada en el país proviene de derivados del petróleo y el 16.79% de la energía eléctrica se compra a los países vecinos¹.

Debemos considerar además que existen zonas en el país las cuales no forman parte del sistema de electrificación nacional, por tanto no cuentan con servicios de energía eléctrica, pero mediante la implementación de concentradores parabólicos, estas comunidades tendrían energía eléctrica para satisfacer sus necesidades.

Es por estas razones que se construirá un concentrador solar parabólico de 1.8 metros de diámetro, el cual servirá para estudios en el Laboratorio de Energías No Convencionales del DECEM, en busca de nuevas aplicaciones futuras.

¹ Fuente: Balance Energético del Ecuador 2005, Ministerio de Energía y Minas

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Generar energía eléctrica mediante el uso de un concentrador solar parabólico, aprovechando la energía solar térmica.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio teórico que permita definir la energía solar que se puede recolectar con una parábola de 1.8 m.
- Diseñar el soporte de la parábola, que tenga las características deseadas y proporcione un funcionamiento óptimo.
- Construir el sistema de generación de energía eléctrica y realizar las respectivas pruebas de funcionamiento.
- Determinar costos de fabricación e instalación para su uso comercial.

1.4 ALCANCE

El beneficio inmediato es para los laboratorios de investigación de la Escuela Politécnica del Ejército, así como la Carrera de Ingeniería Mecánica (CIME) y posteriormente la comunidad e industria nacional, mediante la aplicación de energías renovables.

1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El sol, es la fuente directa o indirecta de casi toda la energía que usamos. Los combustibles fósiles existen gracias a la fotosíntesis que convirtió la radiación solar en las plantas y animales de las que se formaron el carbón, gas y petróleo. El ciclo del agua que nos permite obtener energía hidroeléctrica es movido por la energía solar que evapora el agua, forma nubes y las lleva tierra adentro donde caerá en forma de lluvia o nieve. El viento también se forma cuando unas zonas de la atmósfera son calentadas por el sol en mayor medida que otras, por tanto es un recurso que el hombre ha utilizado desde los inicios de su historia y puede satisfacer todas nuestras necesidades, si aprendemos a aprovechar de forma racional la luz que continuamente incide sobre el planeta.

Consideramos que el sol, puede arrojar sobre la tierra en un año cuatro mil veces más energía que la que vamos a consumir en el mismo lapso de tiempo.

En la siguiente tabla se consideran las ventajas y desventajas que se obtienen de los combustibles fósiles y el porque se deben desarrollar energías alternativas y de ese modo reducir la dependencia de los combustibles fósiles y el carbón mineral.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas del uso de combustibles fósiles.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> - Facilidad de extracción - Tecnología bien desarrollada - Además de fuente de energía, en los procesos de separación, se proporcionan materias primas para la industria química, medicinal y alimenticia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es un recurso no renovable. Se estima que, al ritmo de consumo actual, las reservas se agotarán en menos de 100 años - Transporte caro. - Difícil almacenamiento. - Provoca graves problemas ambientales: efecto invernadero, lluvia ácida. - Es un desperdicio destinar a ser quemados materiales que son materias primas para la industria química, medicina, alimentación.

Dos prometedoras vías de solución aparecen para hacer frente a esta importante problemática. La primera es aprovechar de manera más eficientemente la energía, esto podemos hacerlo usando la misma energía para varios procesos, realizando procesos en serie y de esta manera aprovechar los diferentes cambios de energía enfocada a los procesos a realizarse.

Y por otro lado acudir a fuentes de energía renovables ya sean estas: solar, eólica, hidráulica, biomasa entre otras y así disminuir el porcentaje de dependencia hacia los hidrocarburos, ya que como se muestra en la tabla del

balance energético mundial, este se sustenta en su mayoría en el uso del carbón mineral, petróleo y gas

Tabla 1.2. Balance energético mundial, en cientos de Toneladas equivalentes de petróleo.

Energía Primaria	Producción	Importa	Exporta	Cambios en Stock	TOTAL	%
Carbón Mineral	2908308	521122	-514960	-22357	2892114	25,29
Petróleo	4008014	2299336	-2224349	-6974	4076028	35,65
Productos Petróleo	0	898567	-972319	-199	-73950	-0,65
Gas	2371566	701140	-715592	4423	2361536	20,65
Nuclear	721833	0	0	0	721833	6,31
Hidro	251315	0	0	0	251315	2,20
Geotérmica Solar, etc	59025	0	0	0	59025	0,52
Combustibles renovables: Leña y bagazo	1146880		-3807	-13	1146513	10,03
Electricidad	0	52590	-53887	0	-1296	-0,01
Calor	803	4	-7	0	800	0,01
TOTAL	11467744	4476208	-4484919	-25121	11433912	100

Fuente: Agencia Internacional de Energía (IEA), año 2005.

De la tabla 1.2, si sumamos los porcentajes de producción de recursos energéticos mundiales, podemos observar que existe un gran consumo mundial de combustibles fósiles.

TOTAL Combustibles Fósiles = 81.60 %

Es de gran importancia el estudio de las energías no convencionales ya que podemos prever que las fuentes energéticas basadas en combustible fósiles

como el petróleo, gas natural y carbón se agoten en un futuro próximo y son estas las que en la actualidad mueven a la industria. Y se tiene reservas adicionales pero estas no van a llegar a cubrir la demanda energética en el futuro.

Por otra parte, es claro que el desarrollo industrial y socioeconómico de un país depende en gran medida de la solución de su problemática energética, mediante el uso de energías que sean más limpias y de menor costo. Por esta razón, varias alternativas en energías renovables han comenzado a surgir, pretendiendo responder a la demanda de energía.

En un inicio estas alternativas van a ser costosas ya que hoy por hoy, el uso de los combustibles fósiles se ha hecho extensivo y van a ser difícil el cambio a nuevas energías. Pero es un paso necesario que debe tomar la industria con el fin de lograr un equilibrio en el medio ambiente. De esta manera, el uso de la energía solar concentrada es una alternativa que permite disminuir las pérdidas de calor en el transporte de energía, incrementar la eficiencia del sistema de conversión y evitar la complejidad en el diseño estructural de soporte y seguimiento solar.

La idea principal en este proyecto es utilizar un concentrador de enfoque de espejo paraboloidal, es el que va a recibir la energía solar directa en cuyo receptor se acopla una motor stirling el cual va a recibir la energía concentrada. Una vez colectada y concentrada la energía solar, el motor Stirling va a obtener la suficiente energía del sol con la cual puede empezar el movimiento, para que así podamos mover un generador y transformar la energía calorífica del sol, a una energía mecánica para finalmente obtener energía eléctrica.

Esperáramos que este proyecto sea un aporte para el laboratorio de energías no convencionales y sea la base para el desarrollo de nuevos e innovadores proyectos en esta área.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR

2.1.1 La energía solar

Es de vital importancia proseguir con el desarrollo de la incipiente tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar, para conseguir las condiciones que la hagan definitivamente competitiva.

La forma de energía que posee el sol es energía nuclear interna, que se transforma mediante procesos de fusión, en esta transformación emite sin cesar energía radiante o radiación. El aprovechamiento de la radiación solar mediante su conversión directa en energía térmica requiere una tecnología relativamente simple, que es tratar de imitar un fenómeno que la naturaleza realiza constantemente, como es el proceso de fotosíntesis.

En un típico día despejado y en los momentos en que el sol está alto sobre el horizonte, sobre cada metro cuadrado de suelo horizontal incide en promedio un kilovatio-hora de energía radiante, dependiendo de la ubicación geográfica del sitio de incidencia. Dicha energía se transforma íntegramente en calor, elevando la temperatura de los cuerpos materiales sometidos a su acción.

Para hacerse una idea de lo que significa en términos cuantitativos dicha energía, señalemos que es similar a la energía radiante que puede emitir, en el mismo periodo de tiempo, un radiador de calefacción por agua caliente de aproximadamente un metro cuadrado de área o la producida por una placa o calentador eléctrico de 1.000 vatios de potencia, un valor corriente entre los aparatos que existen en el mercado.

La cantidad de energía disponible viene dada por la constante solar, las mediciones de la misma más actuales y aceptadas por World Radiation Center (WRC) establecen el valor de la constante solar en $1367 \frac{W}{m^2}$, de acuerdo a las estadísticas y mediciones realizadas, se ha podido determinar que existe una desviación estándar de $1.6 \frac{W}{m^2}$ y una desviación máxima de $\pm 7 \frac{W}{m^2}$. La diferencia entre este valor y el Standard NASA es de 1%.

Es preciso, señalar que existen algunos problemas que debemos afrontar y superar. Hay que tener en cuenta que esta energía está sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas. Así, por ejemplo, la radiación solar es menor en invierno.

Tabla 2.1. Equivalencias de la constante solar

$\frac{W}{m^2}$	$\frac{cal}{cm^2 \cdot min}$	$\frac{langley}{min}$	$\frac{Btu}{h \cdot pie^2}$	$\frac{KJ}{h \cdot m^2}$
1367	1.96	1.960	433.3	4921

Más importante incluso que la cantidad absoluta de energía recibida en un área y periodo de tiempo determinados, es la intensidad con que dicha energía alcanza la superficie, es decir, la mayor o menor concentración del flujo energético, puesto que dicha intensidad es el factor que más influye en la capacidad de elevar la temperatura del cuerpo que recibe la radiación.

La inclinación con la que las ondas de radiación (rayos del sol) inciden sobre la superficie que deseamos calentar determinará asimismo la intensidad de la energía térmica recibida. Cuanto más oblicuos sean los rayos con respecto a dicha superficie, la energía total que transporte un haz se repartirá sobre un área más extensa por tanto, la intensidad será más débil en cada punto de la misma.

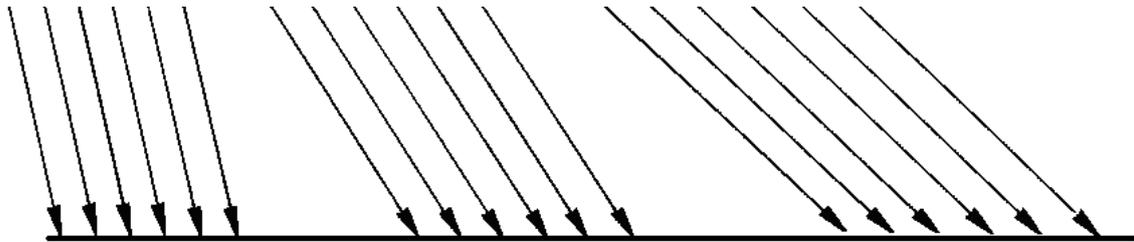


Figura 2.1. Representación de la inclinación de ondas de radiación

Debido a la inclinación del eje de rotación de la tierra con respecto al plano sobre el cual se traslada alrededor del sol, los rayos solares inciden con diferente ángulo según la época del año. En invierno, lo hacen con un ángulo más pequeño respecto a la horizontal, lo contrario que en verano, época en la que incluso llegan a alcanzar la vertical en las horas centrales del día y en las zonas cercanas al Ecuador.

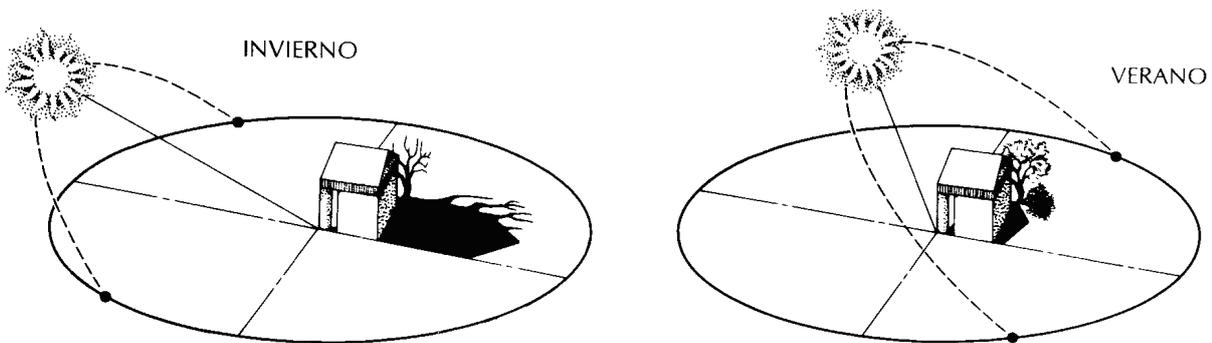


Figura 2.2. Variación de la posición solar según estación del año

Lo anterior es la causa de que, aún con cielo completamente libre de nubes, la energía total que incide a lo largo de un día sea considerablemente mayor en verano que en invierno. Aún así, en un día claro de invierno se recibe suficiente energía para que, aprovechándola de forma adecuada, se puedan satisfacer muchas de las necesidades básicas, como realizar la cocción de alimentos mediante cocinas solares.

El sol se comporta como una luminaria que se eleva diariamente desde el Este hacia el Oeste, describiendo en el cielo una trayectoria en forma de arco, más o menos amplia, según la época del año.

Debido a la mayor verticalidad de los rayos solares, si consideramos la energía incidente sobre una cierta superficie horizontal y durante un período de tiempo determinado, por ejemplo durante una o dos horas, resultará que ésta será mucho mayor en las horas centrales del día que en las horas inmediatamente posteriores al amanecer o anteriores a la puesta del sol.

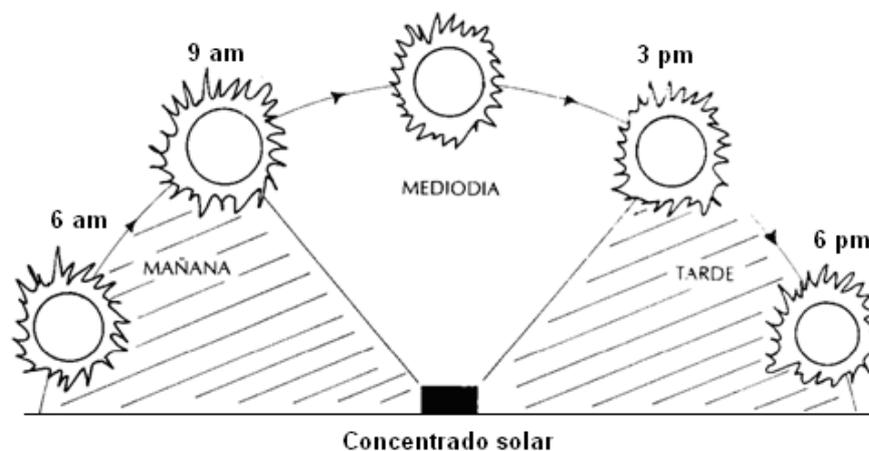


Figura 2.3. Posición solar en el transcurso del día

2.1.2 Radiación solar

Para continuar con el desarrollo teórico de la radiación solar, se hará necesario definir el concepto de cuerpo negro.

Cuerpo negro: Es un objeto ideal, en el que toda la radiación incidente desde el exterior es absorbida, sin reflejar ninguna ni emitir radiación propia, y toda la energía incidente desde el interior es emitida.

Ninguna superficie tiene exactamente las mismas propiedades que un cuerpo negro, aunque una superficie de negro de carbono puede llegar a absorber aproximadamente un 97% de la radiación incidente.

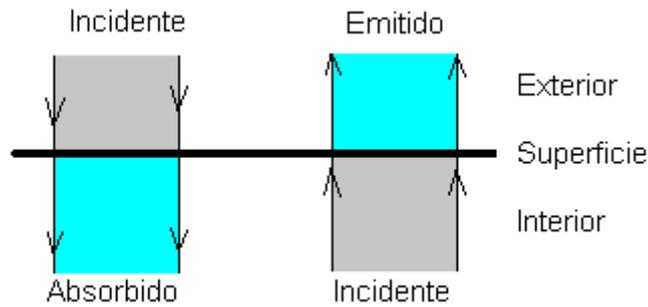


Figura 2.4. Comportamiento de un cuerpo negro

El cuerpo negro sirve como patrón para comparar las propiedades que presentan los cuerpos en situaciones reales.

Propiedades de un cuerpo negro:

- Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda ni la dirección
- Para una temperatura y longitud de onda establecida, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro.
- Aunque la radiación emitida por un cuerpo negro es una función de la longitud de onda y la temperatura, es independiente de la dirección. Es decir, el cuerpo negro es un emisor difuso.²

Radiación solar

El sol es un cuerpo que emite energía con un espectro asociable a su temperatura superficial, de alrededor de 5800 K. Por lo tanto, la longitud de onda de máxima radiación se encuentra alrededor de los 491 nm. El término radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de cualquier cuerpo, esta energía se denomina radiante y es transportada por las ondas electromagnéticas

que viajan en el vacío a la velocidad de $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$. Las ondas de radio, las

² INCROPERA, DeWITT, Fundamentos de transferencia de calor.

radiaciones infrarrojas, la luz visible, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, constituyen las distintas regiones del espectro electromagnético.

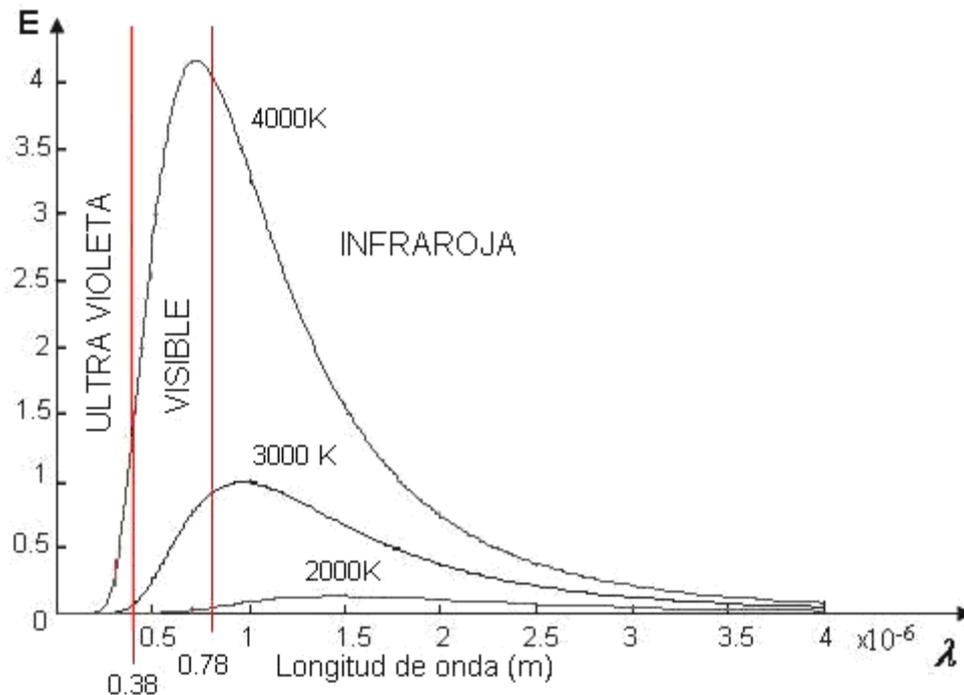


Figura 2.5. Espectro de la radiación.

La radiación solar esta formada por:

- **Radiación directa:** es la radiación que llega a la superficie de la tierra sin cambio de dirección a su paso por la atmósfera terrestre.
- **Radiación difusa:** es la radiación que llega a la superficie de la tierra con un cambio de dirección al pasar por la atmósfera terrestre. Éste desvío de los rayos solares, se produce por el choque directo con ciertas moléculas y partículas contenidas en el aire, por este motivo, los rayos solares no tienen una dirección directa.
- **Radiación total:** será la suma de todas las radiaciones, directa, difusa; en caso de que se trabaje cerca del mar o de otra superficie reflectante como nevados se considerará la radiación por “albedo” además de la radiación directa y difusa.

Cuando estamos hablando de energía solar concentrada, debemos tener presente que la radiación que realmente nos importa es la directa, es la que mayor potencial tiene.

También debemos tener en cuenta ciertos factores. En primer lugar, el factor climático es importante, en un día nublado, tendremos una radiación difusa; en cambio, si es soleado, la radiación recibida será directa. El segundo factor, es la inclinación de la superficie que recibe la radiación. Y, el tercer factor, es la presencia o ausencia de superficies reflectantes, las superficies claras son las que más reflejan la radiación solar, por este motivo, las casas se pintan de blanco.

Constante solar

La constante solar, es el promedio de energía solar incidente en una unidad de superficie, perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre.

En la actualidad ese flujo, cercano a los $E = 1370 \frac{W}{m^2}$. Este valor tiene variaciones según la estación del año de $\pm 3,2\%$ debido a la elipticidad de la órbita terrestre.

Esta radiación solar se reparte por la superficie esférica, que es cuatro veces el área de ese círculo, por lo que el flujo medio incidente en el tope de la atmósfera es un cuarto de la constante solar, es decir, unos $342 \frac{W}{m^2}$ y queda reducida en superficie (por reflexión y absorción) a unos $170 \frac{W}{m^2}$.

Heliofanía o Brillo Solar

La heliofanía representa la duración del brillo solar u horas de sol, y esta ligada al hecho de que el instrumento utilizado para su medición, heliofanógrafo, registra el tiempo en que recibe la radiación solar directa. La ocurrencia de nubosidad determina que la radiación recibida por el instrumento sea radiación solar difusa, interrumpiéndose el registro.

a) Heliofanía Relativa

El valor de heliofanía relativa se calcula dividiendo la duración del brillo solar por la cantidad de horas de sol posibles según el lugar. Las horas de sol posibles surgen de valores de tabla y son constantes para cada latitud y día del año.

b) Regresión de Armstrong Page

Relaciona ciertas variables para hallar la radiación solar sobre la superficie de la tierra

$$\frac{H}{H_o} = a + b \cdot \frac{h}{N} \quad (2.1)$$

Donde:

H, es radiación en la superficie terrestre; **Ho**, es radiación fuera de la superficie terrestre; **a**, es un factor de confiabilidad; **b**, es un factor de confiabilidad; **N**, es el número de horas de brillo solar teórico y **h**, es el número de horas de brillo solar real.

Según los estudios realizados a esta regresión, esta presenta cierta validez:

Tabla 2.2. Validez de la ecuación 2.1

Validez (%)	Latitud (°)
95	- 2 < L < 2
90	- 4 < L < 4

Fuente: Apuntes de clase de energías no convencionales

La determinación de los coeficientes a y b se lo realiza en base a experimentación, los valores determinados para el territorio ecuatoriano constan en la siguiente tabla.

Tabla 2.3. Valores de las constantes a y b.

Región	a	b
Sierra	0.25	0.45
Costa	0.28	0.54

Fuente: INAMHI

c) Índice de claridad

A la relación $\frac{H}{H_0}$ se la conoce también como Índice de Claridad (kt), el cual, para ser determinado, requiere determinar la radiación durante un período de tres años. Esta relación puede tomar valores de entre 0.3 en lugares donde el clima es abierto o nublado, hasta 0.8 localidades que son muy soleadas.

2.1.3 Leyes de la radiación

Se establecieron las siguientes leyes para explicar el comportamiento de la radiación:

1. Todos los objetos con temperatura mayor que $0^\circ K$ emiten energía radiante, por ejemplo: el sol, la tierra, la atmósfera, las personas, etc.
2. Los objetos con mayor temperatura radian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos. Por ejemplo, el sol con una temperatura media de $5.800^\circ K$ en su superficie emite aproximadamente 64 millones $\frac{W}{m^2}$, 165.000 veces más energía que la tierra (la cual emite cerca de $390 \frac{W}{m^2}$) con una temperatura media en superficie de $288^\circ K = 15^\circ C$, cifra obtenida al utilizar la ley de Stefan-Boltzmann relacionando estas temperaturas ($5.800/288$) elevadas a la cuarta potencia.
3. Los cuerpos con mayor temperatura emiten un máximo de radiación en longitudes de ondas, más cortas. Por ejemplo, el máximo de energía radiante del sol se produce en $\lambda \sim 0,5 \mu m$, mientras que para la tierra en $\lambda \sim 10 \mu m$.

a) Ley de Stefan-Boltzman

Constante de Stefan-Boltzmann: es el coeficiente medio de radiación como un cuerpo negro.

La energía emitida por un cuerpo negro por unidad de área y unidad de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta T.

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$$

La ley de Stefan-Boltzman, indica la cantidad de energía por unidad de área, E, emitida por un cuerpo negro, independientemente de la dirección

$$E = e \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.2)$$

Donde e es la emisividad, la que depende de la superficie, y asume valores entre 0 y 1.

Utilizando la relación 2.2 es posible estimar cuánta energía solar llega a la parte superior de la atmósfera de la tierra. Dado que la energía radiada decae con el cuadrado de la distancia a la fuente, a una unidad astronómica del sol la energía que debiera llegar es:

$$E = \sigma \cdot T^4 \left(\frac{R_S}{R_{TS}} \right)^2 \quad (2.3)$$

Resolviendo la ecuación 2.3, considerando que:

Radio del sol: $R_S = 6,960 \cdot 10^8 m$

Distancia entre la tierra y el sol: $R_{TS} = 1.495 \cdot 10^{11} m$ tendremos: $E = 1390W$

Para calcular la radiación solar que incide sobre la tierra, se puede emplear la siguiente formula, la cual dependerá del día del año:

$$E_{ON} = E \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \quad (2.4)$$

La tierra ofrece al sol un área efectiva correspondiente a un disco, por lo que la energía total recibida por ella está dada por:

$$Q_T = \pi \cdot R_T^2 \cdot E \quad (2.5)$$

Donde R_T es el radio de la tierra y es igual a $R_T = 1,7 \cdot 10^7 m$.

por tanto la energía que recibe la tierra es:

$$Q_T = 7,91 \cdot 110^{23} W$$

Una fracción de esta energía, llamada albedo (α), es reflejada hacia el espacio, principalmente por las nubes, la nieve, el hielo y la superficie del desierto. Si se considera la tierra completa, el albedo promedio, es de un 30%, o sea, 0,3.

b) Ley de desplazamiento de Wien

La distribución espectral de radiación de un cuerpo negro depende de la temperatura. Un objeto a temperatura muy alta como el sol, emite una cantidad muy alta de energía a longitudes de onda más cortas, en tanto que un objeto más frío, emitirá una cantidad de energía menor a mayores longitudes de onda.

La ley del desplazamiento de Wien se aplica para longitudes de onda cortas y presenta la siguiente relación:

$$\lambda_m = \frac{2897,9 \mu m \cdot K}{T} \quad (2.6)$$

Esta ecuación es conocida como la Ley de Desplazamiento de Wien y genera un lugar geométrico que describe una línea. La potencia emisiva espectral máxima se desplaza a longitudes de onda más cortas al aumentar la temperatura. Se encuentra a la mitad del espectro visible ($\lambda \approx 0,5 \mu m$) para radiación solar, esta emisividad se produce a aproximadamente 5800 K.

2.1.4 Relaciones Astronómicas Tierra-Sol

La literatura solar contiene una gran variedad de sistemas, métodos y ecuaciones para establecer las relaciones astronómicas Tierra-Sol y calcular la posición del sol en cualquier momento.

a) Distancia Tierra-Sol

La tierra gira alrededor del sol en una órbita elíptica, con el sol ubicado en uno de sus focos. La cantidad de radiación solar que llega a la tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al sol, por lo cual un valor preciso de la distancia tierra-sol es importante. La distancia media tierra-sol r_o se denomina unidad astronómica³ (UA).

La distancia mínima tierra-sol es alrededor de 0.983 UA, mientras que el máximo es aproximadamente 1.017 UA. Tradicionalmente la distancia r_o se expresa mediante una expansión en términos de series de Fourier con un número determinado de coeficientes. Con un error máximo de 0.0001.

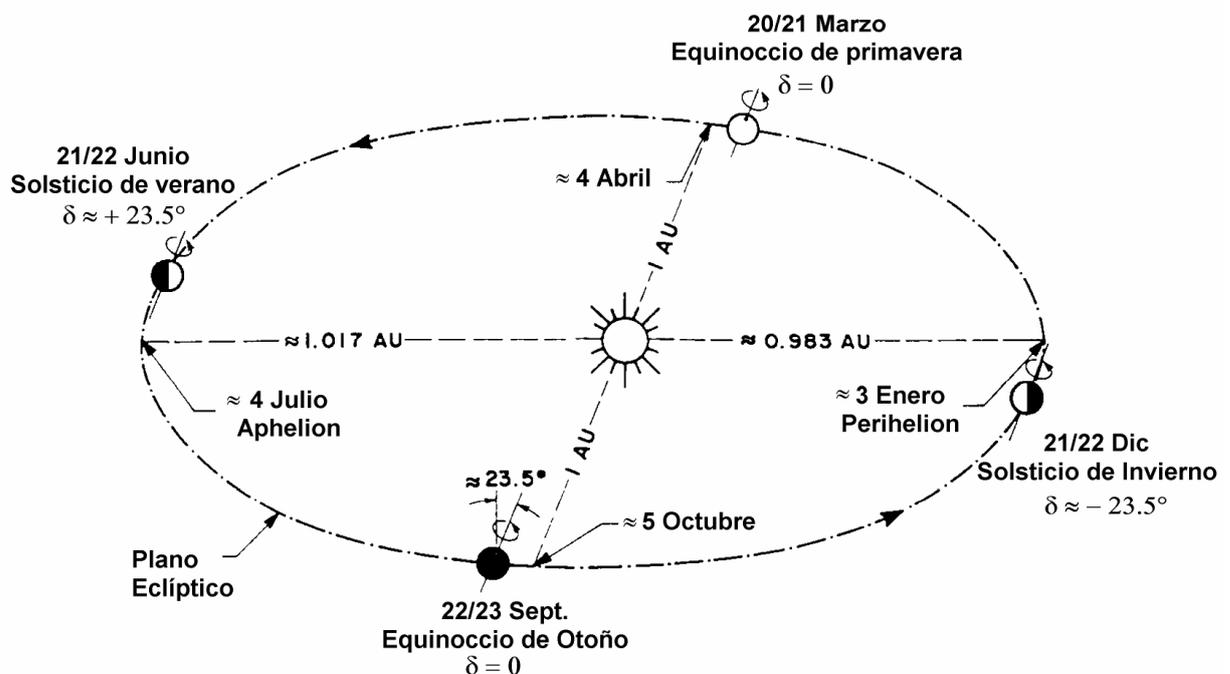


Figura 2.6. Movimiento de la tierra alrededor del sol

³ $1UA = 1,496 \times 10^8$ Km

Spencer (1971) desarrolló la siguiente expresión, para el recíproco del cuadrado del radio vector de la tierra, denominado Factor de corrección de la distancia Tierra-Sol, ρ^2

$$\rho^2 = \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \quad (2.7)$$

Para muchas aplicaciones tanto en tecnología como en ingeniería se puede aplicar la siguiente expresión (Duffie y Beckman)

$$\rho^2 = \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 = \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} \cdot d_n \right) \right]^{-1} \quad (2.8)$$

Donde d_n corresponde al número del día juliano del año ($1 \leq d_n \leq 365$), variando desde 1 para el 1 de enero, hasta 365 para el 31 de diciembre.

2.1.4.1 Declinación solar

La declinación solar δ , es el ángulo formado entre la posición del sol y el plano ecuatorial al medio día. El plano de revolución de la tierra alrededor del sol se denomina plano eclíptico. La tierra gira sobre sí misma alrededor de un eje denominado eje polar, el cual se encuentra inclinado aproximadamente 23.5° de la normal del plano eclíptico. La rotación de la tierra alrededor de este eje ocasiona los cambios diurnos en la radiación solar incidente; la posición de este eje relativo al sol causa los cambios estacionales en la radiación solar. El ángulo entre el eje polar y la normal al plano eclíptico permanece invariable.

Lo mismo es verdadero para el ángulo entre el plano ecuatorial de la tierra y el plano eclíptico. Aunque, el ángulo que forman el plano ecuatorial y la línea que une los centros del sol y de la tierra cambia cada día, de hecho, cada instante. Este ángulo es llamado declinación solar.

La declinación es cero en los equinoccios (literalmente noches iguales) de primavera y de otoño y tiene un valor aproximado de $+23.5^\circ$ el solsticio de verano y cerca de -23.5° en solsticio de invierno. Otra forma de representar la declinación

solar consiste en dibujar la esfera celeste con la tierra en el centro y el sol rotando alrededor de la tierra (Figura 2.7). Los polos celestes corresponden a los puntos en los cuales el eje polar de la tierra corta a la esfera celeste. De modo similar, el ecuador celeste es una proyección del plano ecuatorial terrestre sobre la esfera celeste. La intersección del plano ecuatorial terrestre con el plano elíptico de revolución del sol, produce un ángulo de aproximadamente 23.5°. Se presentan dos fórmulas simples comúnmente usadas para determinar la declinación (en grados), como son la fórmula de Perrin - Brichambaut

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ 0,4 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n - 82) \right] \right\} \quad (2.9)$$

Y la de Cooper, que resulta menos aproximada pero más sencilla:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (2.10)$$

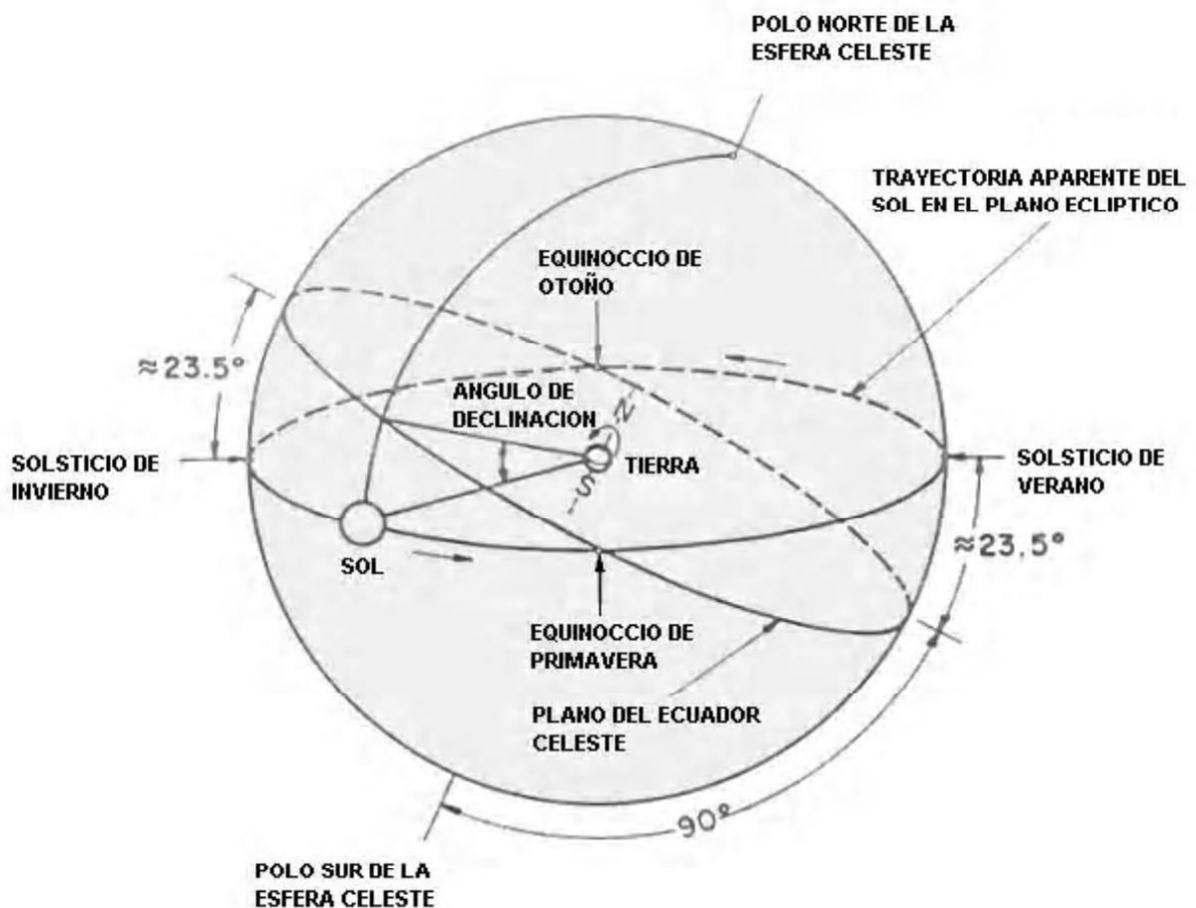


Figura 2.7. Movimiento aparente del sol y el ángulo de declinación solar

2.1.5 Posición del sol relativa a superficies horizontales

Para calcular la irradiación solar que llega a una superficie horizontal sobre la superficie de la tierra, es necesario escribir las relaciones trigonométricas entre la posición del sol en el cielo y las coordenadas (ecuatoriales) sobre la tierra. El horizonte del observador es un gran círculo dentro de la esfera celestrial en cuyo centro esta la tierra y que es atravesado normalmente por la línea que une el centro de ésta y el cenit del observador.

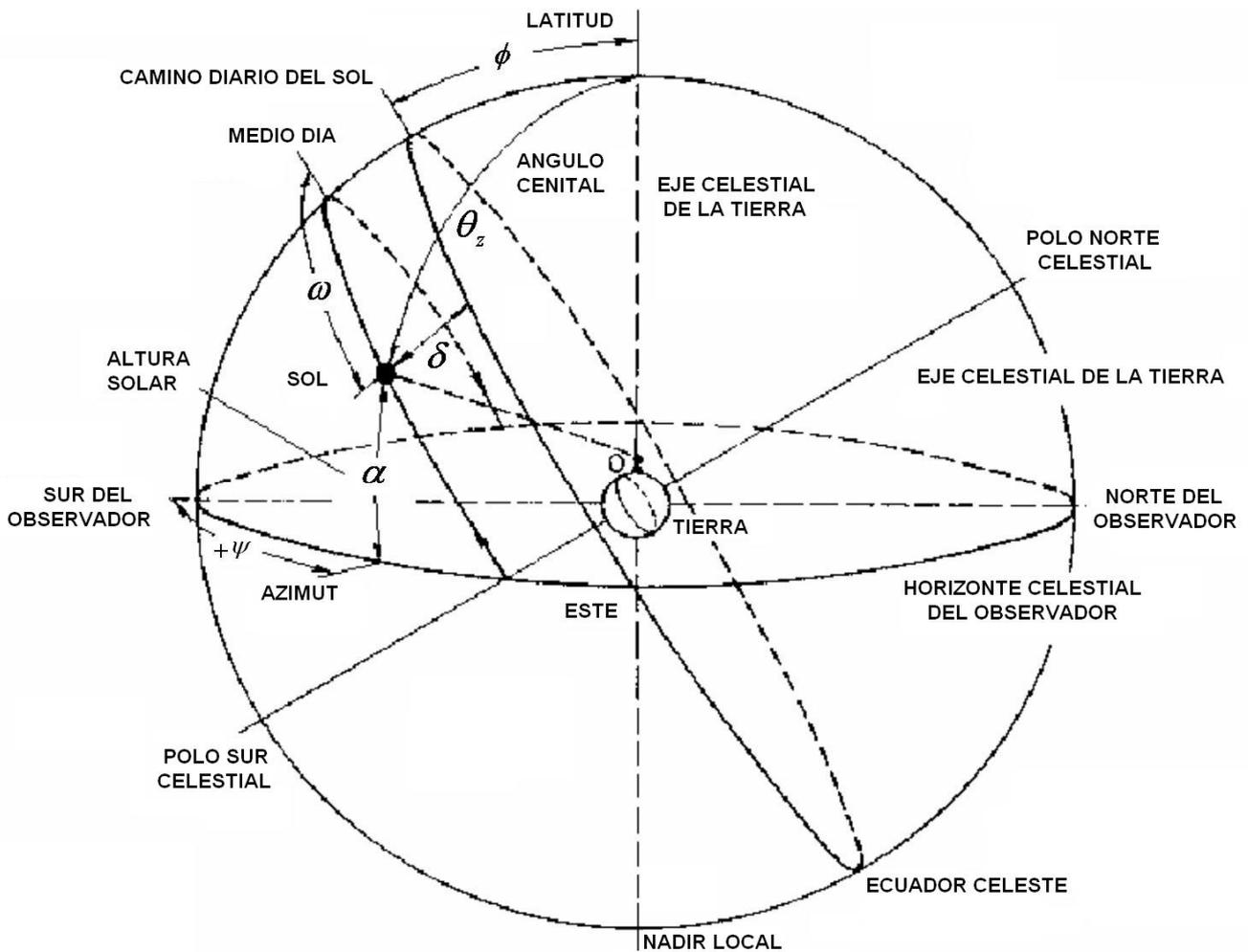


Figura 2.8. Esfera celestrial y coordenadas del sol relativas a un observador ubicado sobre la tierra en el punto O

a) Latitud

La latitud ϕ , es la distancia angular de un punto en la superficie terrestre a la línea ecuatorial

$$-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$$

En el norte la latitud tomará signo positivo, mientras que si se ubica con relación al sur su signo será negativo.

b) Ángulo de incidencia

Es el ángulo formado entre la normal a la superficie y la radiación directa, su expresión es:

$$\cos \theta = a - b + c + d + e \tag{2.11}$$

Donde:

$$a = \sin \delta \sin \phi \cos \beta$$

$$b = \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \psi$$

$$c = \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \psi \cos \omega$$

$$d = \cos \delta \sin \beta \sin \psi \sin \omega$$

$$e = \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega$$

Donde β ($0 \leq \beta \leq 180$) es el ángulo comprendido entre la superficie de análisis y la horizontal.

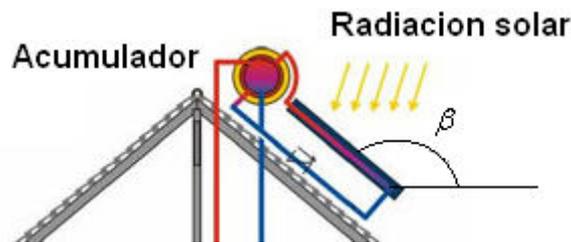


Figura 2.9. Representación ángulo β .

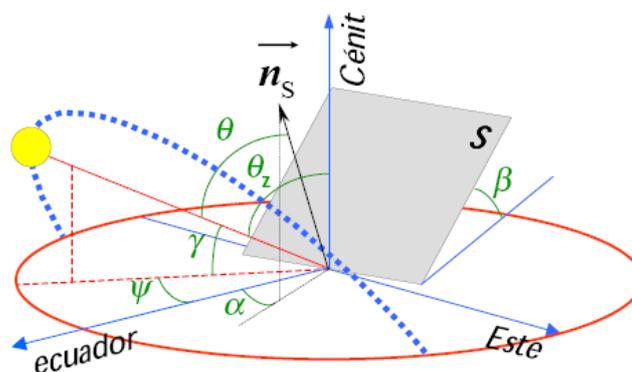


Figura 2.10. Representación de ángulos, respecto a una superficie colectora.

c) Ángulo de cenit

En cualquier momento, un observador sobre la superficie de la tierra tiene una posición correspondiente en la esfera celestial llamada el cenit del observador; este es el punto de intersección con la esfera celestial de una normal a la superficie de la tierra en la posición del observador. Entonces es el ángulo formado entre la perpendicular al observador y el sol.

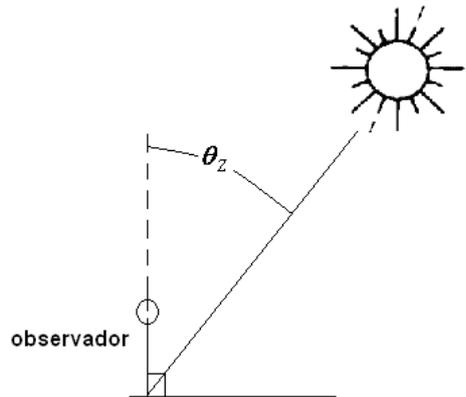


Figura 2.11. Ángulo de cenit en un plano

El cenit θ_z es el ángulo entre el cenit local y la línea que une al observador y el sol. Este es un ángulo que varía entre 0° y 90° . La altura solar (también llamada elevación solar) es la altura angular del sol sobre el horizonte celestial del observador. Este es un ángulo que varía entre 0° y 90° . La altura solar es el complemento del ángulo cenital.

El punto diagonalmente opuesto al cenit local es llamado NADIR.

Para una posición geográfica dada, cuando $\beta = 0$ en ausencia de la atmósfera de la tierra, la relación trigonométrica entre el sol y una superficie horizontal es:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \alpha \quad (2.12)$$

Para el ocaso $\cos \theta_z = 0$, entonces

$$\cos \omega = -\frac{\sin \delta \sin \phi}{\cos \delta \cos \phi} = -\text{tg}(\delta)\text{tg}(\phi) \quad (2.13)$$

$$\cos \omega_s = -\text{tg}(\delta)\text{tg}(\phi) \quad (2.14)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\operatorname{tg}(\delta)\operatorname{tg}(\phi)] \quad (2.15)$$

El ángulo horario de la salida del sol será igual al ángulo horario de la puesta del sol, excepto por la diferencia de signo.

De la ecuación precedente, puede ser calculada la duración del día. La duración del día es $2\omega_s$, y cuando se expresa en horas tiene la siguiente forma:

$$N_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\operatorname{tg}(\delta)\operatorname{tg}(\phi)] \quad (2.16)$$

d) **Azimut solar**

El azimut solar ψ , es la desviación entre el meridiano del lugar a la proyección directa en un plano horizontal. Puede ser:

De sur a oeste = positivo

De sur a este = negativo

En el sur = cero y de este modo varía entre 0° y $\pm 180^\circ$.

$$\cos \psi = \left(\frac{\sin \alpha \sin \phi + \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \right) \quad (2.17)$$

Donde: $0 \leq \psi \leq 90^\circ$ y $90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$

e) **Ángulo de azimut de superficie**

Es el ángulo γ formado por la proyección de la normal a la superficie, en un plano horizontal respecto al meridiano del sitio

Donde $-180 \leq \gamma \leq 180$, el signo lo determina:

Sur = 0

Este = positivo

Oeste = negativo

2.1.5.1 Ángulo horario

El ángulo horario ω es el ángulo medido en el polo celestial entre el meridiano del observador y el meridiano del sol. Contado desde el medio día, cambia 15° por hora.

- Si la desviación es en la mañana, será positiva
- Si la desviación es en la tarde, será negativa

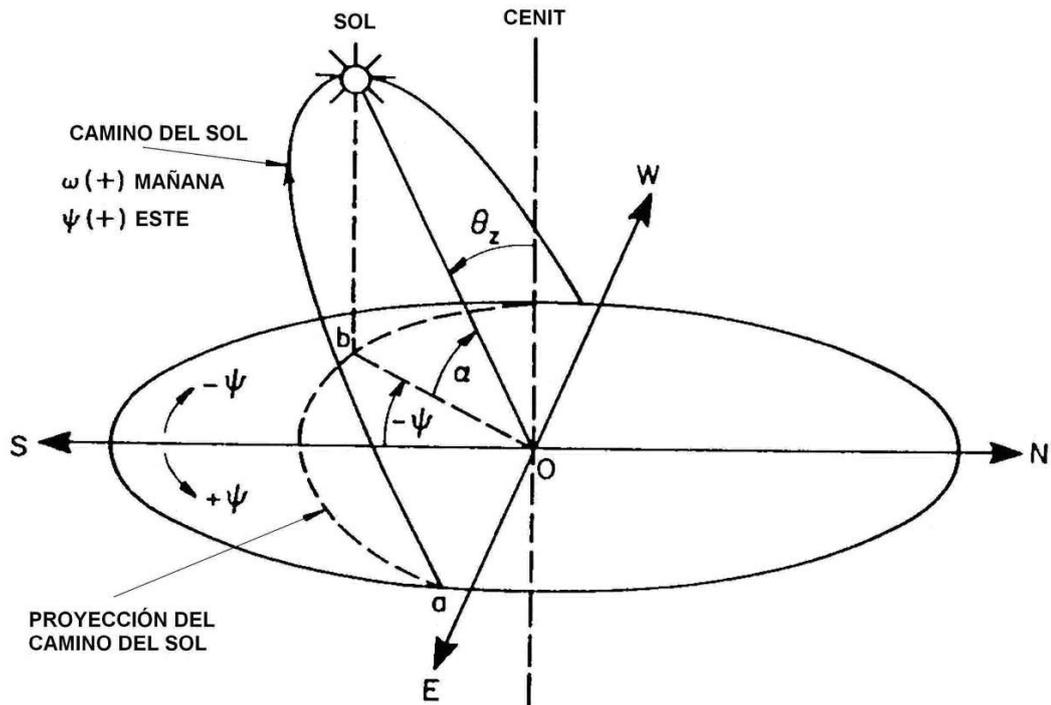


Figura 2.12. Representación gráfica del ángulo cenital del sol, altura solar y el azimut

Las definiciones y convenciones de signo son resumidas a continuación:

- θ_z , es el ángulo cenital, en grados
- α , es la altura solar, también llamada elevación solar, en grados $\alpha = 90 - \theta_z$
- ω , es el ángulo horario, igual a cero a mediodía y positivo en la mañana
- Φ , es la latitud geográfica, en grados, norte positivo
- γ , es el azimut local, en grados, sur cero, este positivo
- δ , es la declinación solar, la posición angular del sol respecto al plano ecuatorial, norte positivo, en grados.

Para todos los efectos prácticos, la refracción de la atmósfera de la tierra tendrá una influencia despreciable sobre la altura solar aparente, la cual es levemente menor que la altura calculada. La diferencia varía desde 0' (minutos) en el cenit, hasta 34' en la horizontal.

Es levemente dependiente, de la temperatura y presión atmosférica, y esta tabulada en almanaques para θ_z entre 80° y 90°, donde el efecto es máximo.

2.2 FUNDAMENTOS GEOMÉTRICOS

Geometría de concentrador parabólico.

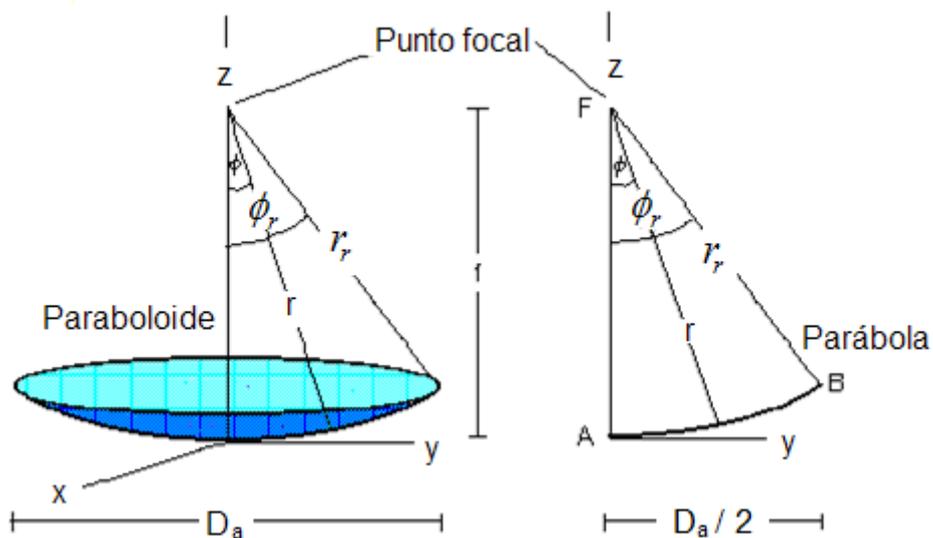


Figura 2.13. Esquema geométrico del concentrador parabólico.

Ecuación del paraboloide:

$$x^2 + y^2 = 4 \cdot f \cdot z \quad (2.18)$$

Ecuación de la parábola con origen en el vértice:

$$y^2 = 4 \cdot f \cdot z \quad (2.19)$$

y las relaciones tomadas de la Figura 2.13:

$$\tan\phi_r = \frac{y}{f - z} \quad (2.20)$$

Y

$$\text{sen}\phi_r = \frac{y}{r_r} \quad (2.21)$$

Donde ϕ_r , es el ángulo de borde y r_r , es el radio de borde.

Obtenemos z de la ecuación 2.20

$$z = f - \frac{y}{\tan\phi_r} \quad (2.22)$$

al sustituir 2.22 en la ecuación 2.19

$$y^2 = 4f \cdot \left(f - \frac{y}{\tan\phi_r} \right) \quad (2.23)$$

descomponiendo la relación 2.23 se tiene:

$$y^2 = 4 \cdot f^2 - \frac{4 \cdot f \cdot y}{\tan\phi_r} \quad (2.24)$$

si sustituimos 2.21 en la ecuación 2.24

$$(r_r)^2 \cdot \text{sen}^2\phi_r = 4f^2 - 4 \frac{f(r_r \text{sen}\phi_r)}{\frac{\text{sen}\phi_r}{\text{cos}\phi_r}} \quad (2.25)$$

y al sustituir la identidad trigonométrica:

$$\text{cos}^2\phi_r + \text{sen}^2\phi_r = 1 \quad (2.26)$$

La ecuación 2.25 cambia a:

$$(r_r)^2 \cdot (1 - \text{cos}^2\phi_r) = 4f^2 - 4f \cdot r_r \text{cos}\phi_r \quad (2.27)$$

agrupando la expresión anterior en un binomio cuadrado perfecto tal que:

$$(r_r)^2 = (2f - r_r \text{cos}\phi_r)^2 \quad (2.28)$$

encontrando la raíz cuadrada de ambos lados de la ecuación 2.28 se tiene:

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos\phi_r} \quad (2.29)$$

La relación 2.29 permite determinar el valor de r_r para un cierto ángulo de borde con una distancia focal f determinada.

Por otra parte al sustituir en la relación 2.22 el valor de $y=Da / 2$, que corresponde a la mitad de la apertura se tiene:

$$r_r = \frac{D_a}{2\text{sen}\phi_r} \quad (2.30)$$

Al igualar las relaciones 2.29 y 2.30 se llega a:

$$\frac{\text{sen}\phi_r}{1 + \cos\phi_r} = \frac{D_a}{4f} \quad (2.31)$$

Mediante trigonometría se obtiene:

$$\tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) = \frac{D_a}{4f} \quad (2.32)$$

o bien, la relación que existe entre el diámetro de apertura, el ángulo de borde y la distancia focal

$$f = \frac{D_a}{4 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \quad (2.33)$$

Por otro lado, se puede determinar una relación para el ángulo de borde en función del diámetro de apertura y el foco.

Retomando la relación 2.24 y multiplicando por $1/y^2$ ambos miembros:

$$1 = \frac{4f^2}{y^2} - \frac{4f}{y \cdot \tan\phi_r} \quad (2.34)$$

donde

$$\frac{4f^2}{y^2} - 1 = \frac{\frac{4f}{y}}{\tan\phi_r} \quad (2.35)$$

al despejando $\tan\phi_r$ de la relación 2.35 se obtiene:

$$\tan\phi_r = \frac{\frac{4f}{y}}{\frac{4f^2}{y^2} - 1} \quad (2.36)$$

En resumen, en la Relación 2.36 aparece el factor $2y$ que corresponde al valor del diámetro de apertura D_a , tal que $2y=D_a$:

$$\tan\phi_r = \frac{\frac{8f}{2y}}{16\left(\frac{f}{2y}\right)^2 - 1} \quad (2.37)$$

así la relación 2.36 será:

$$\tan\phi_r = \frac{\frac{8f}{D_a}}{16\left(\frac{f}{D_a}\right)^2 - 1} \quad (2.38)$$

despejando ϕ_r se obtiene:

$$\phi_r = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{8f}{D_a}}{16\left(\frac{f}{D_a}\right)^2 - 1} \right] \quad (2.39)$$

2.3 ÓPTICA DE CONCENTRADORES

2.3.1 Propiedades de la luz

La luz, que podemos visualizar no es más que un pequeño conjunto de radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda, que están comprendidas entre los 380 nm y los 770 nm, como se puede observar en la figura 2.14, en la cual se ha seleccionado el espectro de luz visible.

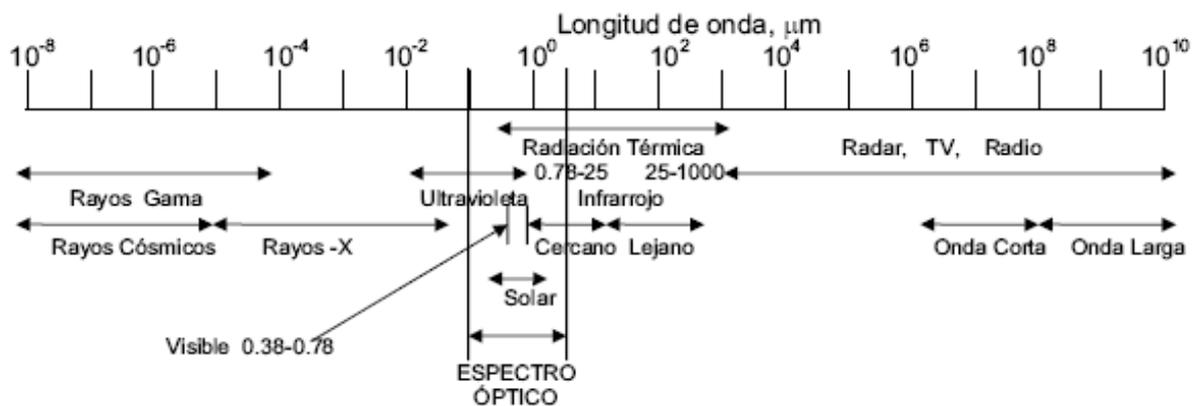


Figura 2.14. Espectro de radiación electromagnética

La luz forma parte del espectro electromagnético que comprende tipos de ondas tan dispares como los rayos cósmicos, los rayos gamma, los ultravioletas, los infrarrojos y las ondas de radio o televisión entre otros.

Cada uno de estos tipos de onda comprende un intervalo definido por una magnitud característica que puede ser la longitud de onda (L) o la frecuencia (f).

$$L = \frac{c}{f} \quad (2.40)$$

Cuando un rayo de luz llega a la superficie de separación de dos medios, una parte de esta es reflejada alejándose de la barrera y el resto penetra dentro del material.

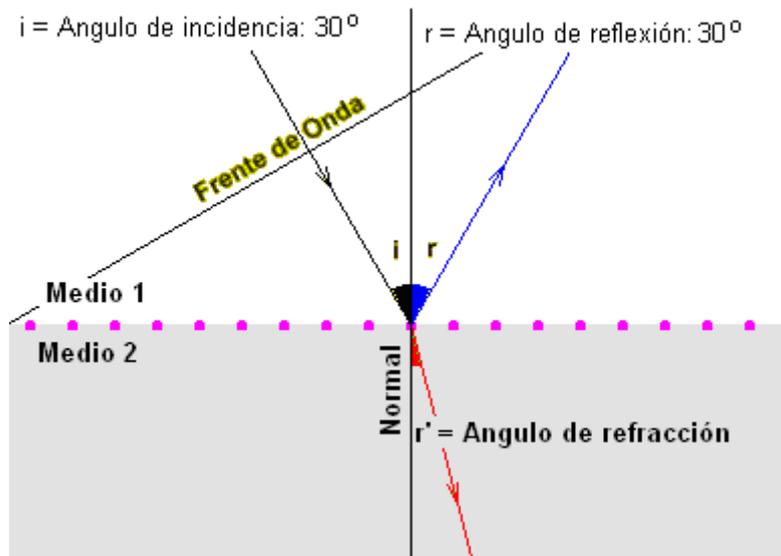


Figura 2.15. Comportamiento de un rayo sobre una superficie

La línea imaginaria perpendicular al frente de ondas se llama rayo.

Se llama ángulo de incidencia – i – al formado por el rayo incidente y la normal. La normal es una recta imaginaria perpendicular a la superficie de separación de los dos medios en el punto de contacto del rayo.

a) Reflexión

Es un fenómeno ocasionado por el choque de la luz choca contra la superficie de separación de dos medios diferentes, ya sean gases como la atmósfera, líquidos como el agua o sólidos

Tipos de reflexión:

La dirección en que sale reflejada la luz viene determinada por el tipo de superficie.

- **Reflexión especular o regular:** Se produce cuando la superficie reflectora es lisa. Dicha reflexión obedece a dos leyes fundamentales:
 1. El rayo incidente, el rayo reflejado y el normal a la superficie en un punto de incidencia se trazan en un mismo plano.
 2. El ángulo de incidencia θ_i es igual al ángulo de reflexión θ_r .

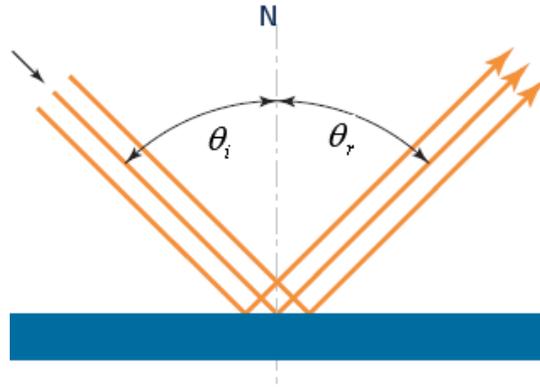


Figura 2.16. Reflexión especular

- **Reflexión compuesta:** no hay imagen de espejo de la fuente de luz, pero el ángulo de intensidad máxima reflejada es igual al ángulo de incidencia, ocurre cuando la superficie es irregular o rugosa.
- **Reflexión difusa:** se produce cuando la luz que incide sobre una superficie es reflejada en todas las direcciones, siendo el rayo normal a la superficie el de mayor intensidad, se produce en superficies como el papel blanco mate, las paredes y cielos rasos de yeso, la nieve, etc.
- **Reflexión mixta:** Es una reflexión intermedia entre la especular y la difusa, en la que parte del haz incidente se refleja y parte se difunde. Este tipo de reflexión la presentan los metales no pulidos, el papel brillante y las superficies barnizadas.

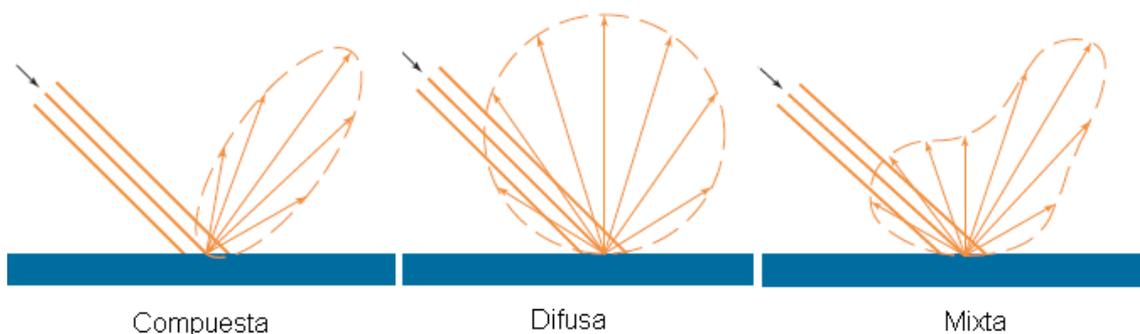


Figura 2.17. Tipos de reflexión

A continuación se citan varios materiales y sus factores de reflexión, que pueden ser utilizados para reflejar la luz solar.

Tabla 2.4. Factor de reflexión para luz blanca

Superficie reflectora	% Factor de reflexión
Plata brillante	92 - 97
Plata blanca (mate)	85 - 92
Níquel pulido	60 - 65
Cromo pulido	60 -65
Aluminio pulido	67 - 72
Aluminio electro-abrillantado	86 -90
Aluminio vaporizado	90 -95
Porcelana esmaltada	60 -80
Espejos	80 -85
Pintura blanca mate	70 -80
Amarillo y crema claro	60 -75
Techos acústicos	60 -75
Verde muy claro	70 -80
Verde claro y rosa	45 - 65
Azul claro	45 -55
Gris claro	40 -50
Rojo claro	30 -50
Marrón claro	30 -40
Película de aluminio	79,9
Fibra de vidrio pintada de blanco	70,9

Fuente: modificado de INDALUX - LUMINOTECNIA 2002 y N. Di Lalla, R. Tarulla, R. Echazú - ASADES 2001. (CONICET Dep. de Materiales CAC-CNEA, CITEFA, INENCO – UNAS)

b) Refracción

Al pasar de un medio a otro, el rayo de luz puede cambiar su dirección. Dicho cambio, se produce por una alteración en la velocidad de la luz. La misma disminuye si la densidad del nuevo medio es mayor, y aumenta si es menor. Este cambio de velocidad y de dirección se denomina refracción.

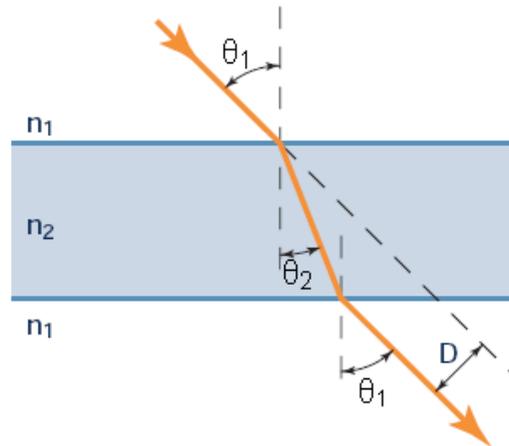


Figura 2.18. Refracción en el límite entre dos medios

Existen dos leyes de refracción:

1. Cuando la onda pasa de un medio a otro, el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia, están en el mismo plano.
2. La razón del seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es una constante para los medios comprendidos.

Dicha constante se denomina índice de refracción, n , para ambos medios. La segunda ley de refracción generalmente se denomina Ley de Snell.

Para el aire, $n = 1$ y cuando el medio sea agua, $n = 1.33$

De la figura 2.18 se deduce la Ley de Snell:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \rightarrow \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n \quad (2.41)$$

Donde:

n_1 , es el índice de refracción del primer medio; n_2 , es el índice de refracción del segundo medio; θ_1 , será el ángulo de incidencia; θ_2 , es un ángulo de refracción.

La distancia D en la figura 2.18 se conoce como desplazamiento. Dicho desplazamiento depende del ángulo de incidencia y del índice de refracción.

Propiedades de la refracción:

- Si la luz pasa de un medio más rápido a otro más lento el ángulo de refracción es menor que el de incidencia.
- Si pasa de un medio de mayor índice de refracción a otro con menor índice de refracción el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia.
- Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite no se produce refracción, sino lo que se denomina reflexión total.

c) La transmisión

Es el paso de una radiación a través de un medio sin cambio de frecuencia de las radiaciones monocromáticas que la componen. Este fenómeno es característico de ciertos tipos de vidrios, cristales, plásticos, agua y otros líquidos, y del aire. Al atravesar el material, parte de la luz se pierde debido a la reflexión en la superficie del medio siguiente y parte se absorbe. La relación entre la luz transmitida y la luz incidente se denomina transmitancia del material.

En la transmisión se pueden diferenciar tres tipos: regular, difusa y mixta.

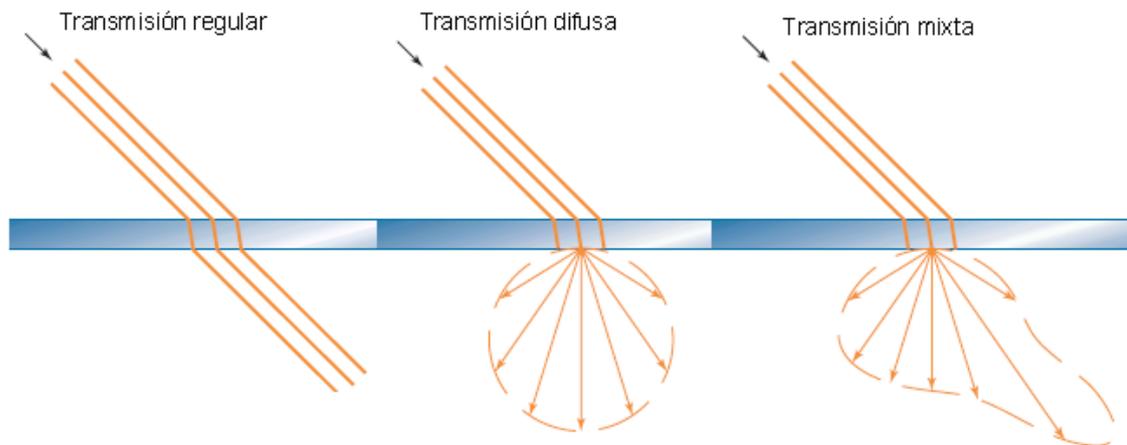


Figura 2.19. Tipos de transmisión

d) La absorptancia

Se denomina absorción a la transformación de la energía radiante en otra forma de energía, generalmente en forma de calor. Este fenómeno es una característica de todas las superficies que no son completamente reflectoras, y de los materiales que no son totalmente transparentes. La relación entre la luz absorbida y la luz incidente se denomina absorptancia del material.

La absorción de ciertas longitudes de onda de luz se denomina absorción selectiva. En general, los objetos de color le deben su color a la absorción selectiva.

Absortancia: Es la relación entre el flujo luminoso o radiante absorbido y el flujo incidente, también denominado factor de absorción.

Coefficiente de absorción:

El valor del coeficiente de absorción K_{α} varía según los materiales absorbentes y con la longitud de onda de cada material en particular. Esta ley tiende a no ser válida para concentraciones muy elevadas, en especial si el material en cuestión dispersa demasiada luz. Basa su funcionamiento en la espectroscopía para poder determinar la composición de las sustancias.

$$\kappa_{\alpha} = \frac{4\pi \cdot k}{\lambda} \quad (2.42)$$

Donde:

κ_{α} , es un coeficiente de absorción de la sustancia; λ , es la longitud de onda del haz de luz; k , es el coeficiente de extensión

La absortancia (α) del material se determinar de acuerdo al coeficiente de absorción del material, al espesor y a la concentración que el material tenga.

$$\alpha = \kappa_{\alpha} \cdot \ell \cdot C \quad (2.43)$$

Donde:

ℓ , es la distancia que la luz atraviesa por el cuerpo ; C , es la concentración de la sustancia absorbente en el medio y κ_{α} , es el coeficiente de absorción de la sustancia

También se puede determinar de acuerdo a la diferencia logarítmica de las intensidades de salida con respecto a la de ingreso

$$\alpha = -\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \quad (2.44)$$

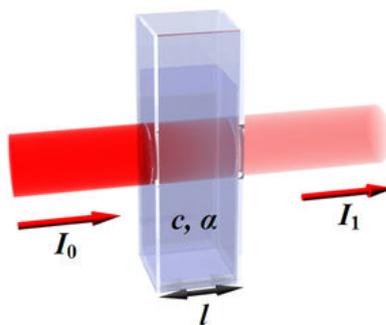


Figura 2.20. Absorción de luz.(Encarta 2007)

e) Transmitancia

Es la relación entre el flujo luminoso transmitido y el flujo luminoso incidente, de acuerdo a la ley de la conservación de la energía, la absorptancia (**a**), la transmitancia (**t**) y la reflectancia (**r**), se relacionan entre sí

Para cuerpos transparentes:

$$a + r + t = 1 \quad (2.45)$$

cuerpos opacos $t = 0$

$$a + r = 1 \quad (2.46)$$

2.3.2 Propiedades de la superficie de un cuerpo

Sobre la superficie de un cuerpo incide constantemente energía radiante, tanto desde el interior como desde el exterior. Cuando la energía radiante incide sobre la superficie una parte se refleja y la otra parte se transmite.

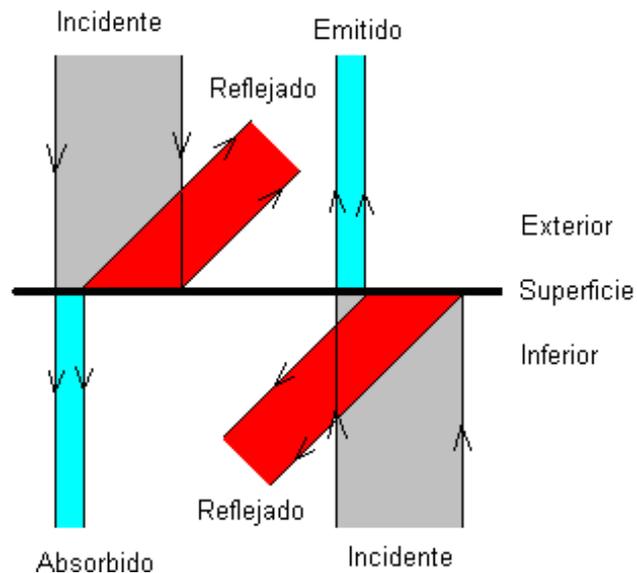


Figura 2.21. Cuerpo con alto índice de reflexión.

Consideremos la energía radiante que incide desde el exterior sobre la superficie del cuerpo. Si la superficie es lisa y pulimentada, como la de un espejo, la mayor

parte de la energía incidente se refleja, el resto atraviesa la superficie del cuerpo y es absorbido por sus átomos o moléculas.

Si r es la proporción de energía radiante que se refleja, y a la proporción que se absorbe, se debe de cumplir que $r+a=1$.

La misma proporción r de la energía radiante que incide desde el interior se refleja hacia dentro, y se transmite la proporción $a=1-r$ que se propaga hacia afuera y se denomina por tanto, energía radiante emitida por la superficie.

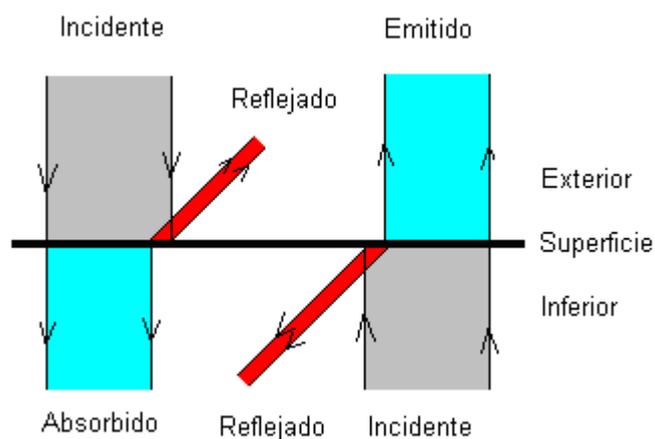


Figura 2.22. Cuerpo con alto índice de absorción.

En la figura 2.22, se muestra el comportamiento de la superficie de un cuerpo que refleja una pequeña parte de la energía incidente. Las anchuras de las distintas bandas corresponden a cantidades relativas de energía radiante incidente, reflejada y transmitida a través de la superficie. Comparando la figura, vemos que un buen reflector es un mal emisor, y un mal reflector es un buen emisor.

Una aplicación práctica está en los termos utilizados para mantener la temperatura de los líquidos como el café. Un termo tiene dobles paredes de vidrio, habiéndose vaciado de aire el espacio entre dichas paredes para evitar las pérdidas por conducción y convección. Para reducir las pérdidas por radiación, se cubren las paredes con una lámina de plata que es altamente reflectante y por tanto, mal emisor y mal absorbedor de radiación.

2.4 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

2.4.1 Propiedades Termo-físicas de los materiales

Existen propiedades de transporte, estas incluyen coeficientes de la velocidad de difusión (k) y conductividad térmica. Además las propiedades termodinámicas, estas se relacionan con el estado en equilibrio de un sistema e incluyen propiedades como la densidad (ρ), el calor específico (c_p), son algunas de las propiedades que se utilizan en el análisis termodinámico.

La difusividad térmica es la razón entre la conductividad térmica y la capacidad térmica, viene expresado en unidades de $\frac{m^2}{s}$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2.47)$$

Materiales de difusividad térmica grande responden rápidamente a cambios en su medio térmico y aquellos de difusividad térmica pequeño responden más lentamente y tardan más en alcanzar una condición de equilibrio, en la tabla 2.5 se indican las propiedades termofísicas de algunos materiales.

Tabla 2.5. Propiedades Termofísicas⁴ a T=300° K

Composición	Punto de fusión (°K)	P (Kg/m ³)	Cp (J/kg°K)	K (W/m°K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)
Acero	1810	7870	447	80,2	23,1
Acero al Carbón	1810	7854	434	60,5	17,7
Aluminio	933	2702	903	237	97,1
Cobre	1358	8933	385	401	177
Ladrillo de Cromita	473	3010	835	2,3	
Vidrio Pyrex	300	2225	835	1,4	
Teflón	300	2200		0,35	

⁴ INCROPERA, F., Transferencia de Calor, Apéndice A.

2.4.2 Transferencia de calor en sistemas de alta temperatura

En un colector solar parabólico, se puede conseguir elevadas temperaturas, con lo cual se obtiene energía calorífica aplicable a la transformación en energía mecánica.

Debido a los altos flujos de radiación incidente, permite trabajar a altas temperaturas e integrarse en ciclos más eficientes, desde ciclos Rankine con vapor de agua sobrecalentado hasta su integración en ciclos Brayton con turbinas de gas, pero gracias al desarrollo tecnológico en la actualidad se puede trabajar con el ciclo Stirling, con la ventaja de que la energía térmica se convierte en mecánica, y esta a su vez se transformara en eléctrica mediante generadores, con esto se reduce el sistema de trabajo, pues con los modelos antiguos la energía térmica se convierte en vapor, este generará energía mecánica mediante turbinas de vapor, para luego generación eléctrica. Por esto con el ciclo Stirling se pueden obtener sistemas de trabajo más eficientes que al trabajar con los dos anteriores ciclos nombrados, tienen el potencial de general electricidad con altos factores de capacidad mediante el uso de almacenamiento térmico, pudiéndose plantear ya en la actualidad sistemas superando las 4500 horas equivalentes al año.

2.4.3 Fenómenos de transferencia de calor

Conducción

Es el transporte de energía de un medio debido a un gradiente de temperatura y el mecanismo físico es el de la actividad aleatoria atómica o molecular.

La relación existente entre la velocidad de transferencia térmica por conducción y la distribución de temperaturas depende de las características geométricas y las propiedades de los materiales que lo constituyen, obedeciendo la denominada la Ley de Fourier

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.48)$$

$$Q = -\lambda \cdot \Delta T \quad (2.49)$$

El signo menos es necesario porque el calor siempre se transfiere en la dirección que la temperatura decrece, y viene expresado en unidades de W/m^2 .

Es una expresión que define una propiedad importante del material: en este caso se ha definido como conductividad térmica.

La transmisión en régimen estacionario es originada cuando el cuerpo se encuentra en equilibrio termodinámico, esto sucede si el flujo de calor y la temperatura en cada punto del mismo permanece constante; este flujo de calor es función de la propiedad de los materiales denominada conductividad.

Cuando el sistema no ha llegado a estabilizarse, se encuentra en un régimen transitorio, caracterizado porque la temperatura en cada punto varía con el transcurso del tiempo.

Una consecuencia de la variación de temperatura en el interior del receptor es la acumulación del calor, debido a la propiedad de los materiales de absorber o de disipar energía cuando varía su temperatura.

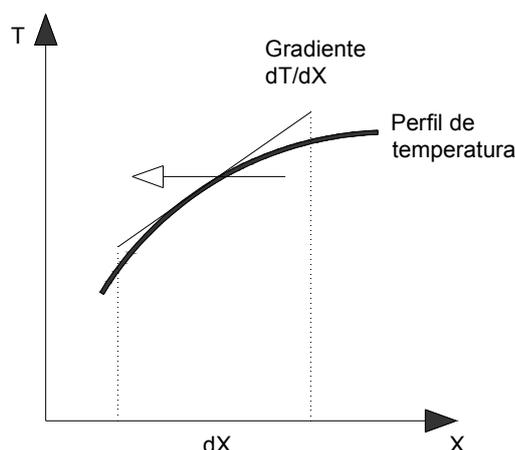


Figura 2.23. Dirección del flujo del calor por conducción y gradiente de temperatura

Convección

Es la transferencia de energía entre una superficie y un fluido que se mueve sobre esta.

En este caso cuando el aire de un ambiente se pone en contacto con la superficie del receptor a una temperatura distinta; la convección puede darse de tres maneras.

- **Convección libre**

Es el movimiento del fluido se debe a las fuerzas de empuje dentro de este.

- **Convección forzada**

Es el movimiento del fluido se debe a fuerzas de empuje externas.

- **Convección Mixta**

Es ocasionada cuando se superponen los dos tipos de fuerza, al ser magnitudes semejantes.

Para cualquiera de los casos se puede evaluar mediante la Ley de Newton del enfriamiento, viene expresado en unidades de W/m^2 .

$$Q = -h \cdot \Delta T \quad (2.50)$$

Donde:

h coeficiente de transferencia de calor por convección

ΔT variación de temperatura entre la superficial y la del fluido.

Radiación

Es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, la energía del campo de radiación se transporta por ondas electromagnéticas o por fotones, la radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío.

Todas las superficies opacas emiten energía en forma de radiación en una magnitud proporcional a la cuarta potencia su temperatura absoluta T, y en un rango de longitudes de onda inversamente proporcional a su temperatura absoluta. Por lo que los cuerpos emiten radiaciones de onda larga,

correspondiente al espectro infrarrojo lejano, procedente de sus superficies a temperaturas típicas del ambiente, en función de una propiedad superficial denominada emitancia, y de forma simultánea absorben radiaciones similares emitidas por las superficies visibles de su entorno, en un proceso denominado irradiación.

$$Q_{\text{radiación}} = e \cdot s \cdot T^4 \quad (2.51)$$

En la ecuación 2.51, se puede considerar la presencia de radiaciones de onda corta, que procede de fuentes de elevada temperatura como el caso del sol y el alumbrado artificial, en estos casos se comporta como absorbentes.

$$Q_{\text{absortancia}} = \alpha \cdot Q_{\text{incidente}} \quad (2.52)$$

Mecanismos combinados de transmisión del calor

En la naturaleza los tres fenómenos se presentan de forma conjunta, razón por la cual no podemos estudiarlos por separado y sin prescindir de uno de ellos.

Al ser un cálculo bastante complejo se recurre a determinar un coeficiente global de transferencia de calor, de fácil aplicación en casos simplificados como en normas oficiales de aislamiento térmico.

$$Q = (h_{\text{convección}} - h_{\text{radiación}}) \cdot \Delta T \quad (2.53)$$

La conducción a través de los cuerpos se considera que éste está constituido por varias capas con propiedades físicas diferentes, por lo cual debemos calcular su resistencia total (R_{total}) como la suma de varias resistencias en serie, haciendo una semejanza con la resolución de circuitos eléctricos dispuestos en serie, y que las temperaturas interiores resultantes en régimen estacionario tendrá un gradiente diferente en cada capa.

En la figura 2.24 se puede observar los mecanismos de transmisión de calor, entre el cuerpo y el entorno.

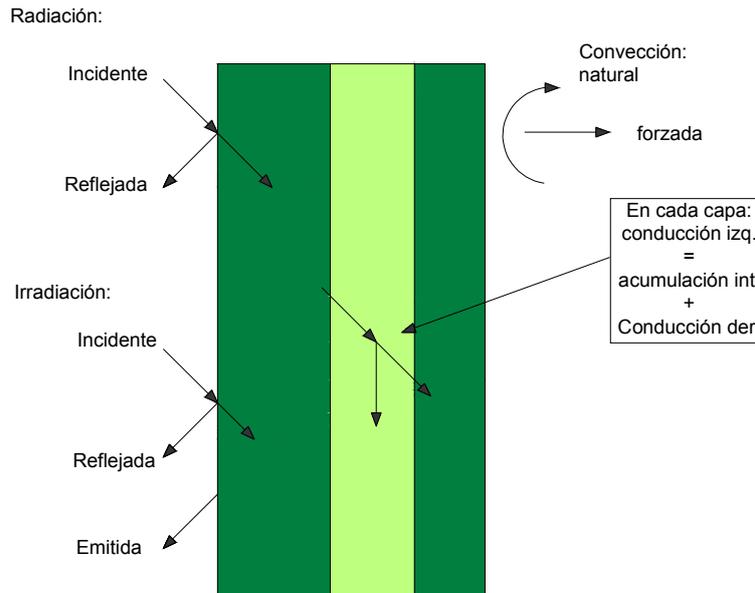


Figura 2.24. Esquema de los flujos de calor entre el cuerpo y el entorno

El único mecanismo para transmitir calor en medios sólidos opacos es la conducción, debido al gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura debido al contacto directo entre las moléculas del medio.

2.4.4 Coeficiente de transferencia de calor

Para poder trabajar y manipular los sistemas compuestos es conveniente utilizar un coeficiente global de transferencia de calor, el cual se define haciendo analogía con la Ley de enfriamiento de Newton.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.54)$$

Donde:

U Coeficiente Global de Transferencia de calor W/m².°K.

A través de la analogía eléctrica para determinaremos el coeficiente global de transferencia de calor.

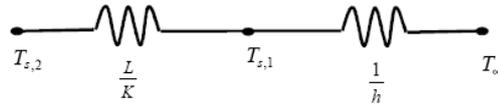


Figura 2.25. Semejanza Eléctrica – Suma de dos resistencias

Las resistencias que ofrecen cada medio, depende específicamente del coeficiente de transferencia de calor en un área determinada

$$R_1 = \frac{1}{U_1 \cdot A} \quad (2.55)$$

$$R_2 = \frac{1}{U_2 \cdot A} \quad (2.56)$$

La resistencia total es igual a la suma de los medios que intervienen durante el proceso de transferencia de calor en un medio determinado

$$R_{total} = \sum R_i \quad (2.57)$$

Esta resistencia equivalente es igual a variación de temperatura multiplicado por el inverso del calor.

$$R_{total} = \frac{\Delta T}{q} \quad (2.58)$$

Al reemplazar por una resistencia equivalente, como se observa en la figura 2.26, y se obtiene la resistencia total equivalente como se puede apreciar en la ecuación 2.45, que se analiza como que si fuese un medio único que tiene un coeficiente de transferencia de calor y un área de sección propia para el caso que se desea analizar.



Figura 2.26. Semejanza Eléctrica – Resistencia equivalente

$$R_{total} = \frac{1}{U \cdot A} \quad (2.59)$$

2.5 CICLO STIRLING

2.5.1 Conversión termodinámica

Un sistema de disco parabólico-ciclo Stirling consta de un colector puntual de gran diámetro con un motor de combustión externa tipo Stirling ubicado en su foco. El colector realiza seguimiento solar continuado, de manera que los rayos solares son reflejados en su foco (receptor), obteniéndose energía solar.

El motor Stirling es un motor de combustión externa que emplea el ciclo termodinámico del mismo nombre y que presenta dos ventajas que le hacen muy adecuado para esta aplicación:

- Es de combustión externa, por lo tanto el aporte energético puede realizarse mediante la radiación solar recogida por el colector y concentrada en su foco.
- Es un ciclo de alto rendimiento térmico.

El motor Stirling lleva acoplado un alternador, de manera que dentro de un mismo bloque situado en el foco del colector se realiza la conversión termodinámica de la energía luminosa en electricidad que se puede inyectar en la red eléctrica o bien destinarla a consumo directo en alguna aplicación próxima al lugar de emplazamiento.

2.5.2 Motor Stirling

El motor Stirling es un mecanismo que trabaja teóricamente el ciclo que lleva su mismo nombre, el ciclo Stirling. El fluido de trabajo que utiliza es un fluido compresible como aire, hidrógeno, helio o nitrógeno que, al trabajar en un ciclo cerrado, no emite ningún tipo de contaminante, únicamente se emitirá el estricto y necesario utilizado como fuente de calor externa para el calentamiento de éste, ya que el motor Stirling es de combustión externa, además de no repercutir en el coste del mantenimiento del motor por la no necesidad de alimentar éste con

combustible. Al ser un motor de combustión externa puede tener muchas fuentes de calor como: Combustión de algún tipo de material, biomasa y energía solar. El límite térmico de operación del motor Stirling dependerá del material usado en su construcción y el fluido de trabajo, encargado de la transferencia de calor, deberá combinar una alta presurización con una baja viscosidad para reducir el flujo de masa requerido por el motor.

Los motores térmicos son normalmente diseñados para operar en un punto intermedio de dos casos límite de especial y primordial interés, buscando un equilibrio entre estos dos límites: Eficiencia máxima posible y potencia obtenida máxima. El primer caso límite es el rendimiento de Carnot de un motor completamente reversible que representa la máxima eficiencia posible. El segundo caso límite es el rendimiento Curzon-Ahlborn de un motor endo-reversible (subsistemas reversibles que intercambian calor de forma irreversible y todas las irreversibilidades están interconectadas entre los subsistemas) que representa la eficiencia obtenida en la operación de obtener la máxima potencia posible.

El rendimiento de Carnot es dado por:

$$E_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (2.60)$$

Donde T_C es la temperatura de la zona fría del motor en K (Fig. 2.27).

Para alcanzar el rendimiento de Carnot en un proceso completamente reversible, las isothermas donde se produce el proceso de aporte de energía (q_{in}) o donde se produce el proceso de pérdida energética (q_{out}) deben ser infinitamente lentos. De esta manera se consigue un continuo equilibrio térmico entre el fluido de trabajo y la fuente de calor. Como, en este caso, es necesario un período de tiempo infinito para conseguir una cantidad de trabajo finita, la potencia, en esos infinitos períodos de equilibrio térmico, de la máquina tenderá a cero.

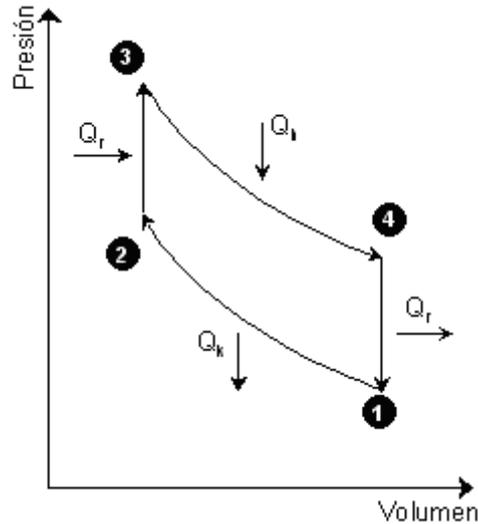


Figura 2.27. Ciclo Stirling P – V

En los motores térmicos endoreversibles el proceso de transferencia de calor es considerado, únicamente en el ciclo de trabajo, un proceso irreversible. Sin embargo, en los motores tipo-Carnot la transferencia de calor entre el fluido de trabajo y la zona caliente y fría es considerada isotérmica o cuasi-isotérmica, el motor Stirling es considerado un motor de tipo-Carnot (ver Fig. 2.27). Por lo tanto, la eficiencia en los motores de tipo-Carnot endo-reversibles es siempre más pequeña que la que se obtendría de un motor de Carnot completamente reversible, sin embargo, destacar que la potencia obtenida en ambos motores será semejante. La eficiencia de un motor tipo-Carnot endoreversible es dado por:

$$E_{Endo-reversible} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (2.61)$$

Donde T_1 es la temperatura del fluido de trabajo en la zona fría en K, T_3 es la temperatura del fluido de trabajo en la zona caliente en K. Curzon y Ahlborn fueron los primeros en desarrollar la eficiencia de un motor tipo-Carnot endoreversible bajo la condición de máxima potencia posible. El rendimiento Curzon-Ahlborn es dado por:

$$E_{Curzon-Ahlborn} = 1 - \left(\frac{T_C}{T_H} \right)^{0.5} \quad (2.62)$$

Recalcar que el rendimiento Curzon-Ahlborn no representa el límite superior de la eficiencia real del motor térmico, únicamente representa la eficiencia real de un motor térmico bajo la condición de obtención de la máxima potencia posible.

En el caso de estudio de un motor Stirling real la eficiencia del motor vendrá representada por la fórmula de Malmo que es:

$$E_{IT} = K_S - \frac{T_C}{T_H} \quad (2.63)$$

Donde K_S es el coeficiente Stirling. Se define K_S como la proporción de la eficiencia del ciclo ideal Stirling que se puede obtener con la tecnología actual. Los valores K_S están comprendidos entre 0,55 – 0,88.

2.5.3 Funcionamiento del ciclo Stirling

Un motor Stirling es un motor de ciclo cerrado, lo cual implica que el fluido de trabajo (aire, helio o hidrógeno) está encerrado en el motor y los pistones lo desplazan en las diversas etapas del ciclo. El elemento más destacado del motor es el llamado regenerador. Éste tiene la propiedad de poder absorber y ceder calor en las evoluciones a volumen constante del ciclo. El regenerador es un medio poroso, con conductividad térmica despreciable que divide al motor en dos zonas: Zona caliente y zona fría. El fluido se desplaza de la zona caliente a la fría a lo largo de los diversos ciclos de trabajo, atravesando el regenerador.

Los elementos a tener en cuenta en el ciclo Stirling (Fig. 2.28) son el cilindro, el pistón, el fluido y el desplazador. Se parte de la posición 1 en el que el desplazador, colocado en el interior del cilindro, ubica todo el fluido en la zona fría y el pistón se encuentra en la posición inferior.

Cuando el pistón pasa de la posición 1 a la 2 se realiza una compresión isotérmica a la temperatura inferior. El proceso es representado en un diagrama presión – volumen.

Si se mantiene fijo el pistón y se mueve el desplazador, para hacer pasar todo el aire a la zona caliente, se tiene un proceso isocórico en el que sin variar el volumen aumenta la presión (posición 2 – 3). En este momento se puede obtener una expansión isotérmica a la temperatura más elevada, haciendo bajar juntos el pistón y el desplazador (posición 3 -4). Moviendo el desplazador a la posición inicial se obtendrá otro proceso isocórico que finalizará el ciclo termodinámico (posición 4 -1).

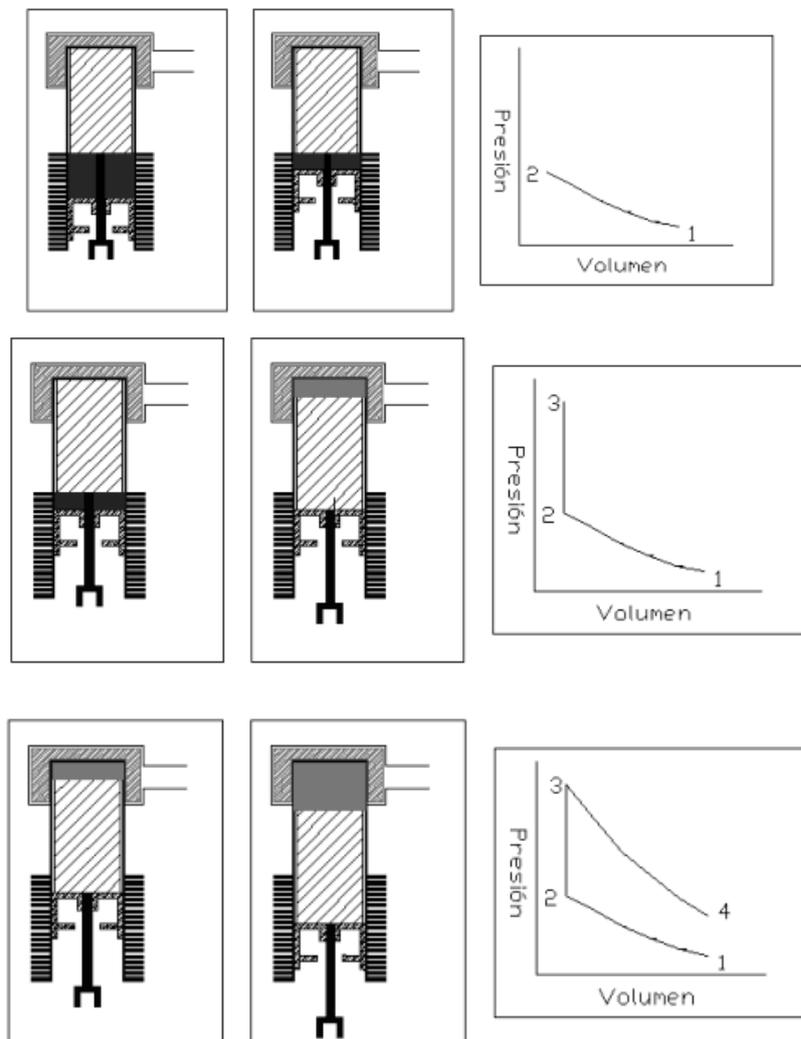


Figura 2.28. Ciclo Stirling de 1-3

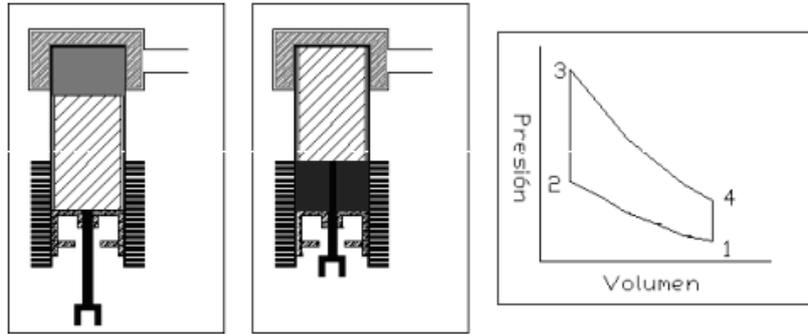


Figura 2.29. Ciclo Stirling de 3-4

Teóricamente, los movimientos de pistón y desplazador son discontinuos, lo cual es imposible desde el punto de vista dinámico. Una aproximación a los movimientos teóricos puede realizarse mediante dos sinusoides desfasadas 90°, obtenidas mediante el mecanismo biela – manivela de cualquier motor (Fig.2.29 y fig.2.28) En este caso el área del ciclo Stirling real es inferior al del teórico (Fig. 2.30)

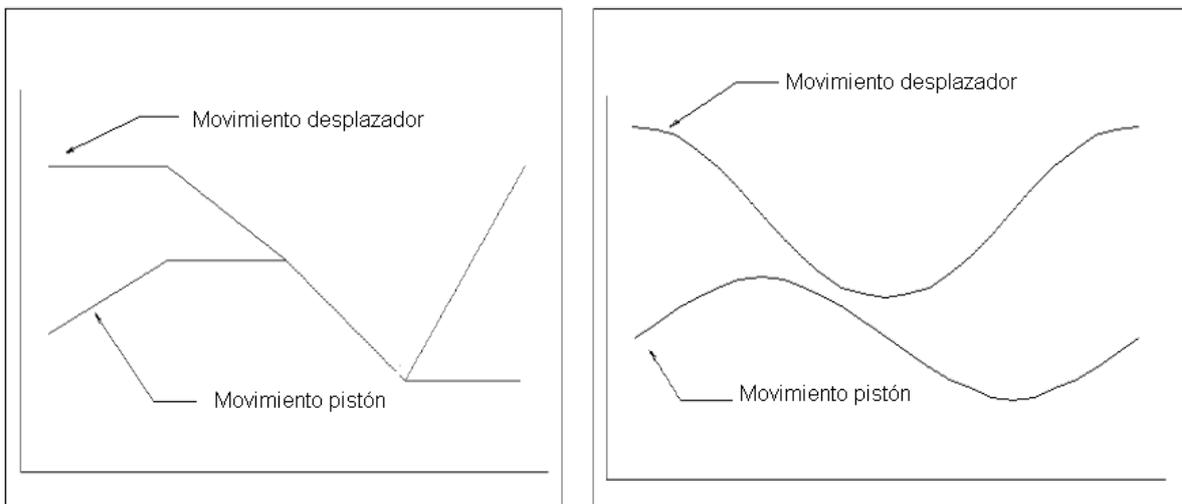


Figura 2.30. Movimientos relativos de pistón y desplazador (teórico vs. real)

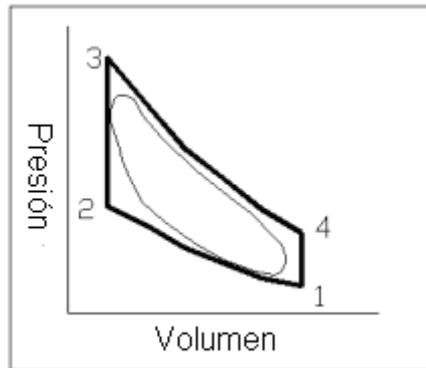


Figura 2.31. Ciclo Stirling teórico vs. real

2.5.4 Configuraciones mecánicas del motor Stirling

Configuración tipo alfa

Los motores Stirling con configuración tipo alfa (Fig.2.32) constan de dos cilindros independientes, sin desplazador, conectados por un tubo en el que se sitúa el regenerador que almacena y cede el calor. En cada uno de los cilindros hay un pistón que se mueve 90° desfasado respecto del otro, uno de los cilindros se calienta y el otro se enfría mediante agua o aletas. El desfase entre los dos pistones hace que el aire pase de un cilindro a otro calentándose, enfriándose y realizando el trabajo que permite el funcionamiento del motor.

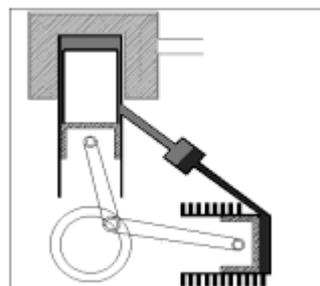


Figura 2.32. Configuración tipo alfa

Configuración tipo beta

Los motores Stirling con configuración tipo beta (Fig. 2.33) constan de un cilindro donde se incorporan el desplazador y el pistón de potencia. El cilindro posee una zona caliente y una zona fría por donde pasa el fluido de trabajo por acción del desplazador. Concéntrico con éste está el pistón de potencia que, mediante un cigüeñal especial, el movimiento del pistón y el desplazador están desfasados 90° , lo que permite que el motor funcione. Los motores pequeños no suelen llevar regenerador, y para solventarlo existe una holgura de algunas décimas de milímetro entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del fluido de trabajo.

Desde el punto de vista termodinámico es el motor más eficaz, pero su construcción es complicada ya que el pistón debe de tener dos bielas y permitir el paso del vástago que mueve el desplazador.

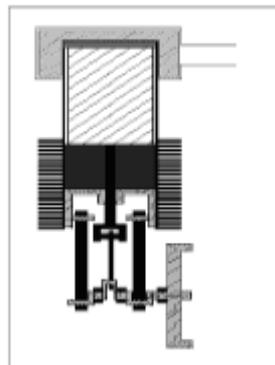


Figura 2.33. Configuración tipo beta

Configuración tipo gamma

Los motores Stirling con configuración gamma (Fig. 2.34) son derivados de los motores Stirling de configuración beta. Constan de dos cilindros separados en uno de los cuales se sitúa el desplazador y en el otro el pistón de potencia. El mecanismo es unido mediante el sistema biela – manivela.

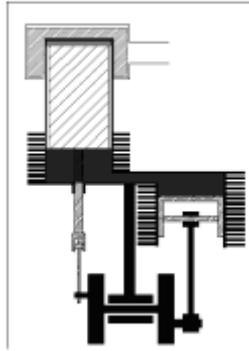


Figura 2.34. Configuración tipo gamma

2.5.5 Elección

Según el funcionamiento de las distintas configuraciones mecánicas de motores Stirling se ha escogido como motor, para su posterior aplicación en el presente estudio, el motor Stirling de configuración beta. Debido a que es más eficaz, además de buscar un sistema que no necesite tantos puntos de control como puede ser una turbina, y también en el hecho de simplificar el sistema (utilización de un único cilindro) para obtener así una disminución de costos de mantenimiento y repuestos.

2.5.6 Motor Stirling Solar

Un motor Stirling Solar es un sistema compuesto de un concentrador solar de tipo colector puntual y un motor Stirling. La eficiencia del motor stirling solar viene dada por:

$$E = E_c - E_E \quad (2.64)$$

Donde E_E representa la eficiencia del motor en cuestión.

La eficiencia del concentrador de la siguiente forma:

$$E_c = \alpha \cdot \rho - K_1 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H^4 - 9,2845 \cdot 10^{-6} \cdot T_A^6) - K_2 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H - T_A) \quad (2.65)$$

Donde:

$$K_1 = \varepsilon \cdot \sigma / IC \quad (2.66)$$

$$K_2 = h_H / IC \quad (2.67)$$

De esta manera la Ec. (2.64) pasa a ser:

$$E = [\alpha \cdot \rho - K_1 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H^4 - 9,2845 \cdot 10^{-6} \cdot T_A^6) - K_2 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H - T_A)] \cdot E_E \quad (2.68)$$

Las expresiones límite para los casos de estudio entre la eficiencia máxima posible y la máxima potencia obtenida se obtendrán sustituyendo las Ecs. (2.66) y (2.67) en la Ec (2.68). De esta forma se consigue que la temperatura de trabajo del motor esté comprendida entre los dos límites de estudio, por lo tanto, la temperatura óptima del motor Stirling tenderá entre estos dos casos límite.

2.5.6.1 Condición de eficiencia máxima posible

Substituyendo la Ec. (2.64) en la Ec. (2.68) da lugar

$$E = E_C E_{Carnot} = [a - b] \cdot c \quad (2.69)$$

Donde:

$$a = \alpha \cdot \rho - K_1 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H^4 - 9,2845 \cdot 10^{-6} \cdot T_A^6)$$

$$b = K_2 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H - T_A)$$

$$c = \left(1 - \frac{T_C}{T_H} \right)$$

Para maximizar la eficiencia total, se deriva la eficiencia total respecto a la temperatura del absorbedor e igualamos a cero, $dE/dT_H = 0$, la temperatura óptima del absorbedor T_H^* , se obtendrá de la resolución de la siguiente ecuación:

$$T_H^{*5} - \frac{3}{4}T = T_C T_H^{*4} + \frac{K_2 T_H^{*2}}{4K_1} - \frac{1}{2} \left[9.2845 \cdot 10^{-6} \cdot T_A^6 + \frac{K_2}{K_1} \cdot T_A + \frac{1}{K_1} \right] \cdot T_C = 0 \quad (2.70)$$

2.5.6.2 Condición de máxima potencia obtenida

Substituyendo la Ec. (2.62) en la Ec. (2.68) da lugar

$$E = E_C E_{Ahlborn} = [a - b] \cdot c \quad (2.71)$$

Donde:

$$a = \alpha \cdot \rho - K_1 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H^4 - 9.2845 \cdot 10^{-6} \cdot T_A^6)$$

$$b = -K_2 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H - T_A)$$

$$c = 1 - \left(\frac{T_C}{T_H} \right)^{0.5}$$

Con el mismo proceder que anteriormente, la temperatura óptima del absorbedor para la segunda condición vendrá dado por la siguiente ecuación:

$$a - b = 0 \quad (2.72)$$

Donde:

$$a = T_H^{*9/2} - 0.875 T_C^{0.5} T_H^{*4} + \frac{K_2 T_H^{*3}}{4K_1} - \frac{K_2 T_C^{0.5} T_H^*}{8K_1}$$

$$b = \frac{1}{8} \left[9.2845 \cdot 10^{-6} \cdot T_A^6 + \frac{K_2}{K_1} \cdot T_A + \frac{1}{K_1} \right] \cdot T_C^{0.5}$$

2.5.6.3 Motor stirling solar real

Substituyendo la Ec. (2.63) en la Ec. (2.68) da lugar

$$E = E_C E_{IT} = [a - b] \cdot c \quad (2.73)$$

Donde:

$$a = \alpha \cdot \rho - K_1 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H^4 - 9.2845 \cdot 10^{-6} \cdot T_A^6)$$

$$b = -K_2 \cdot \alpha \cdot \rho (T_H - T_A)$$

$$c = K_S \left(1 - \frac{T_C}{T_H} \right)$$

Se observa que la Ec. (2.73) es igual que la Ec. (2.69) excepto en el término de la constante K_S , por lo tanto, en este caso, la temperatura óptima del absorbedor obtenida en la condición de eficiencia máxima posible será la misma que para el estudio del motor stirling solar real.

2.6 GENERACIÓN ELÉCTRICA

Para generar energía eléctrica en la actualidad se disponen de varios métodos como:

- Energía química a eléctrica: pila, batería.
- Energía mecánica a eléctrica: dínamo.
- Energía cinética del agua a rotatoria (turbina) y eléctrica: central hidroeléctrica
- Energía química de combustión a energía de vapor de agua, rotatoria (turbina) y eléctrica: central térmica
- Energía nuclear a vapor de agua, energía rotatoria (turbina) y eléctrica: Central nuclear.
- Energía química a rotatoria (motor) y eléctrica: generador portátil.

En este proyecto se considero la posibilidad de trabajar con una turbina de vapor o con un motor stirling, pero por ser un proyecto de estudio se eligió la segunda opción, debido a que es la que menos difusión tiene en la actualidad, además se empleará un generador DC. No se profundizara en la teoría de inducción electromagnética, debido a que no se construirá el generador, sin embargo todo generador consta de las siguientes partes:

- **El estator:** Armadura metálica, que permanece en reposo, cubierta en su interior por unos hilos de cobre, que forman diversos circuitos.
- **El rotor:** Está en el interior del estator y gira accionado por la turbina. Está formado en su parte interior por un eje, y en su parte más externa

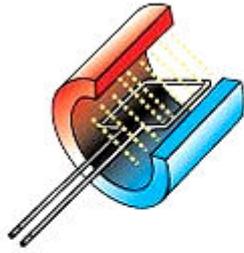
por unos circuitos, que se transforman en electroimanes cuando se les aplica una pequeña cantidad de corriente.

Cuando el rotor gira a una velocidad considerable, debido a la energía mecánica transmitida por el motor Stirling, se producen corrientes en los hilos de cobre del interior del estator. Estas corrientes proporcionan al generador la denominada fuerza-electromotriz, capaz de producir energía eléctrica.

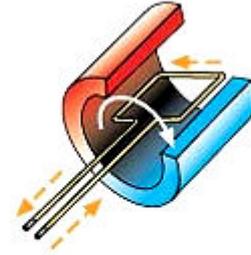
El elemento conductor, recorrido por una corriente eléctrica, genera a su alrededor un campo magnético, de la misma manera, el magnetismo también puede crear electricidad. Al girar la espira de cable en el interior de las líneas de fuerza del campo magnético, generamos una diferencia de potencial entre los extremos del cable conductor. Es decir, se crea una corriente eléctrica que circula por el cable, este fenómeno se llama inducción electromagnética y de esta forma el generador permite transformar la energía mecánica que usamos para girar la espira de cable en energía eléctrica. La espira de cable giratoria debe estar conectada a un cable eléctrico fijo para transportar la electricidad generada: este contacto se realiza mediante un par de escobillas.

La energía mecánica a emplearse para generar corriente continua en este caso la proveerá el motor Stirling, mediante el uso de un oring o una pequeña banda de transmisión, existirá una relación de transmisión de 2 a 1, entre dicho motor y el generador eléctrico.

El generador eléctrico será un motor DC, con una capacidad máxima de 10V y 0.20A, el amperaje variará según se oponga resistencia al movimiento del rotor dentro del estator.



Un electroimán genera un fuerte campo electromagnético entre sus polos



Al girar el alambre en el interior del campo electromagnético, se genera un flujo de electrones

Figura 2.35. Esquema de generación eléctrica

Modificado de <http://jaja.cl/?a=1828>

CAPITULO III

APLICACIONES ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA

Las aplicaciones sobre energía solar concentrada son varias, sobre todo a nivel industrial, donde se necesita que la energía sea liberada a altas temperaturas. Dadas las características propias de los colectores solares planos, no se los puede usar ya que la radiación solar es una energía de baja intensidad. En consecuencia, para obtener temperaturas altas (sobre los 100 °C), se hace necesario incrementar la intensidad de la energía solar. , lo que se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (sol) y la superficie que absorbe toda la energía, la que debe ser pequeña en comparación con la del dispositivo óptico.

Con los colectores concentradores de energía solar, se pueden tener densidades de energía que van desde 1.5 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico. Teniendo temperaturas entre 100 y 500 °C si se usan colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500 °C si el sistema óptico de los colectores tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500 °C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

Uno de los problemas que enfrentan los concentradores, desde el punto de vista de la ingeniería, es que necesitan ser orientados continuamente al sol mediante

algún mecanismo con el fin de obtener el mayor beneficio del sol mediante la energía solar directa.

Otro problema importante, se refiere al acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico, ya que no solamente deben ser de buena calidad, sino que debe mantener sus propiedades por largos períodos de tiempo a la intemperie sin ser deteriorados.

Las desventajas claras que presentan los colectores concentradores son los costos elevados así como también los problemas de operación enunciados anteriormente. Pero igual existen diferentes aplicaciones en las que se usan estos dispositivos como: Concentradores cilíndricos parabólicos, paraboloides de revolución, heliostatos, hornos solares, torres de potencia y más.

3.1 CONCENTRADORES CILINDRICOS PARABÓLICOS⁵

El concentrador cilindro parabólico (CCP), es aquel que está compuesto por un espejo cilindro parabólico, de ahí toma su nombre, que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor colocado en el foco de la parábola, por el cual circula el fluido a calentar.

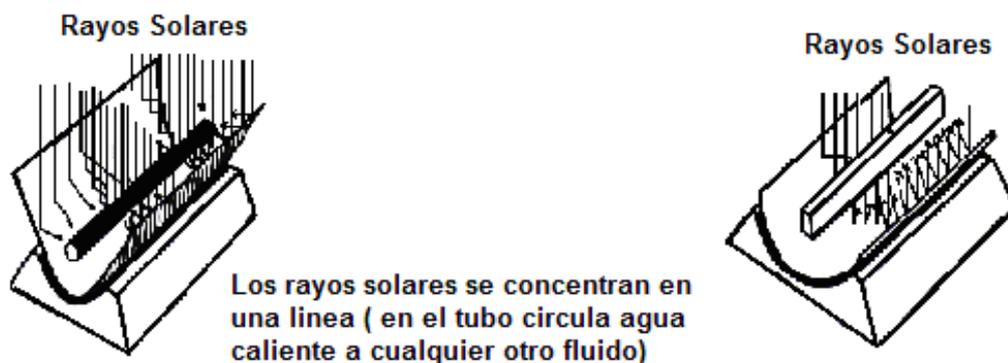


Figura 3.1 Colector lineal

Su superficie reflectora es la mitad de un cilindro. Su aplicación principal es la producción de vapor en una central térmica, pertenecen al rango de aprovechamiento térmico denominado de media temperatura (entre 125° y 450°C)

⁵ ENERGÍA SOLAR TERMOELÉCTRICA; Dr. Manuel Romero Álvarez; Pág. 7

3.1.1 PARTES CONSTITUTIVAS DE UN CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO

– El reflector cilindro-parabólico

Es un espejo curvado en una de sus dimensiones con forma de parábola, que concentra sobre su línea focal toda la radiación solar que atraviesa su plano.

La superficie especular se consigue a base de películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da rigidez. Entre los soportes para la película están de distintos materiales como:

Laminas de aluminio

Estas son chapas de aluminio pulido, debido a su alta reflectividad especular y que actúa a la vez de elemento reflexivo. La ventaja de esta opción es el bajo costo, y una desventaja es la baja durabilidad, ya que la superficie del aluminio se deteriora con cierta rapidez por la aparición del óxido de aluminio que deteriora las propiedades de reflectividad.

Vidrio

El es vidrio de bajo contenido en hierro, sobre su cara posterior se deposita una fina película de plata protegida mediante una película de cobre y otra de pintura epoxi.

De acuerdo al espesor del vidrio sobre el que se deposita la película reflexiva de plata, se tienen dos tipos diferentes de espejos:

Tabla 3.1. Tipos de vidrios y sus espesores

TIPO	ESPESOR	CURVATURA
Vidrio grueso	3mm	Caliente
Vidrio delgado	1.5mm	Frío

Los vidrios gruesos se curvan en caliente antes de depositar la película de plata, de tal manera que adopte la forma parabólica. Los vidrios gruesos de 1.5mm o menores, el espejo tienen la suficiente flexibilidad como para curvarse en frío y pueden pegarse directamente sobre una chapa metálica que asegura la adecuada curvatura.

Plástico

El reflector es de lámina de material plástico sobre la que se deposita una película de plata o aluminio, siendo una fina lámina de plástico reflectante que puede pegarse sobre cualquier sustrato, estas láminas plásticas adoptan la forma parabólica de acuerdo a la forma de la estructura.

El principal problema de estas láminas reflectantes es su baja durabilidad en la intemperie, ya que se deteriora debido a las partículas que circulan por el aire, estas las rayan y erosionan su superficie.

– El tubo absorbente

Este elemento es fundamental en el sistema, ya que en este está el rendimiento global del colector, puede constar de un tubo o de dos tubos concéntricos; en el caso de tubos concéntricos, el tubo interior es por el cual circula el fluido que se calienta, de material metálico y el tubo exterior es de cristal.

El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorción mayor al 90% y una baja emisividad en el interior de este tubo va a pasar el fluido de trabajo, ya sea agua o aire.

El tubo de cristal que rodea al tubo interior metálico tiene la doble misión de reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo metálico y de proteger de las inclemencias del clima debido a su recubrimiento selectivo, este tubo de cristal suele llevar también un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmisividad a la radiación solar y, consiguientemente, el rendimiento óptico del colector.



Figura 3.2. Tubo absorbente en concentrador⁶

Al utilizar recubrimientos selectivos fabricados mediante sputtering⁷ o PVD⁸, entre el tubo metálico y el tubo de vidrio se hace el vacío, para que no se degrade la superficie selectiva, para el caso los extremos del tubo de vidrio van soldados, mediante una soldadura vidrio-metal, de tal forma que exista un espacio anular estanco entre el tubo metálico y el de vidrio, a la vez que la diferente dilatación térmica de los tubos de vidrio y metal sea compensada por el fuelle metálico.

Cuando la temperatura máxima del fluido que circula por el absorbedor es de 300°C, no es necesario recurrir a recubrimientos de sputtering o PVD, que son caros y difíciles de fabricar, es suficiente con recubrimiento mediante cobalto, cromo o níquel negro, que son bastante económicos y fáciles de fabricar, este recubrimiento es estable en contacto con el aire hasta una temperatura del orden de los 325°C, por lo que no es necesario utilizar tubos absorbentes con vacío entre el tubo interior metálico y el exterior de vidrio.

Por el interior del tubo receptor circula el fluido de trabajo, el tipo de fluido que se utiliza en los depende de la temperatura máxima de operación, en caso de que las temperaturas sean moderadas (menores a 200°C), se puede utilizar agua

⁶ http://tcp.averroes.cica.es/recursos_informaticos/proyectos2006

⁷ Proceso de ataque utilizado para limpieza de superficies. - www.icmm.csic.es/fis/espa/sputtering.html

⁸ Physical Vapour Deposition

desmineralizada, o una mezcla con Etileno-Glicol, como fluido de trabajo, para temperaturas que están entre 200°C y 450°C se utiliza aceite sintético.

El trabajar a menores presiones posibilita el uso de materiales más económicos para las tuberías y simplifica la instalación y sus medidas de seguridad. Existen diversos tipos de aceite y la elección de uno u otro se hace en base a la temperatura máxima de trabajo que soportan. Existe una diversidad de opciones para el fluido de trabajo, que se deben evaluar antes de seleccionar el más adecuado para un caso concreto.

– El sistema de seguimiento del sol

El sistema de concentrador cilíndrico parabólico aprovecha la radiación solar directa al máximo si existe un mecanismo de seguimiento solar automatizado que siga la trayectoria del sol a lo largo del día. El sistema de seguimiento solar consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del colector alrededor de un eje de seguimiento.

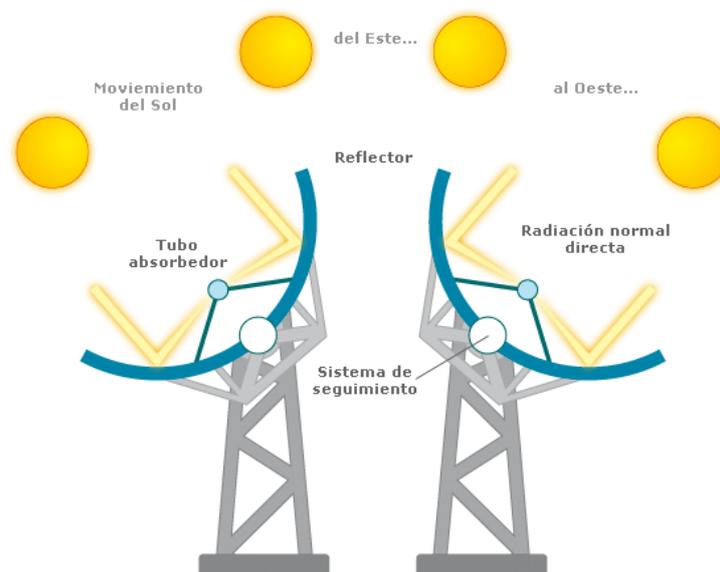


Figura 3.3. Seguimiento solar típico de un Concentrador Cilíndrico Parabólico⁹

⁹ European Solar Thermal Power Industry Association (ESTIA)

– La estructura metálica

La estructura del colector es la encargada de dar rigidez al conjunto de elementos que lo componen, a la vez que actúa y se relaciona con la fundación del concentrador, ya que a través de esta pueden estar los tubos que llevan el fluido, ver la figura 3.4.



Figura 3.4. Estructura metálica – Plataforma solar Almería

3.1.2 VENTAJAS

De las ventajas de los CCP están que trabajan a media temperatura, $< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, su impacto arquitectónico y visual es menor, pero también su rendimiento.

Los concentradores cilíndricos son comercialmente disponibles y tienen más de 10.000 millones de kWh de experiencia operacional; operan a una temperatura potencial de hasta $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$ comercialmente probados).

Rendimiento anual comercialmente probado del 14% de la producción solar eléctrica a la red. Se realiza un mejor empleo del terreno, por el tamaño de los mismos y también poseen una capacidad de almacenamiento.

3.2 PARABOLOIDES DE REVOLUCIÓN¹⁰

El sistema de concentración de discos parabólicos, se componen de un reflector o un conjunto de reflectores que tienen la forma de paraboloides de revolución, esta formado por una superficie de revolución reflectora que concentra la radiación solar sobre un punto focal en el que se encuentra el receptor de calor.

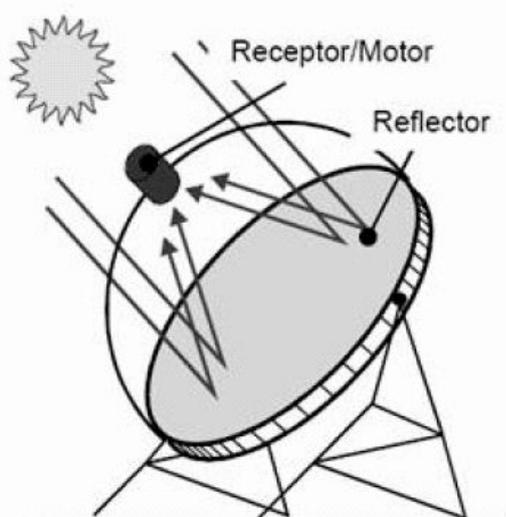


Figura 3.5. Colector puntual

3.2.1 PARTES CONSTITUTIVAS DE UN PARABOLOIDE DE REVOLUCIÓN

– **Concentrador**

Tiene la forma de un paraboloides de revolución, el tamaño del concentrador depende de la potencia nominal y de la energía que se requiere generar en un periodo de tiempo determinado de radiación solar y rendimientos de los elementos que constituyen el sistema.

Los discos parabólicos son construidos de forma que se aproximen a la geometría del paraboloides, esta superficie reflexiva se consigue a base de espejos de vidrio o de películas reflectante.

¹⁰ ASENSA. Asociación Española de Empresas de Energía Solar y Alternativas www.asensa.org

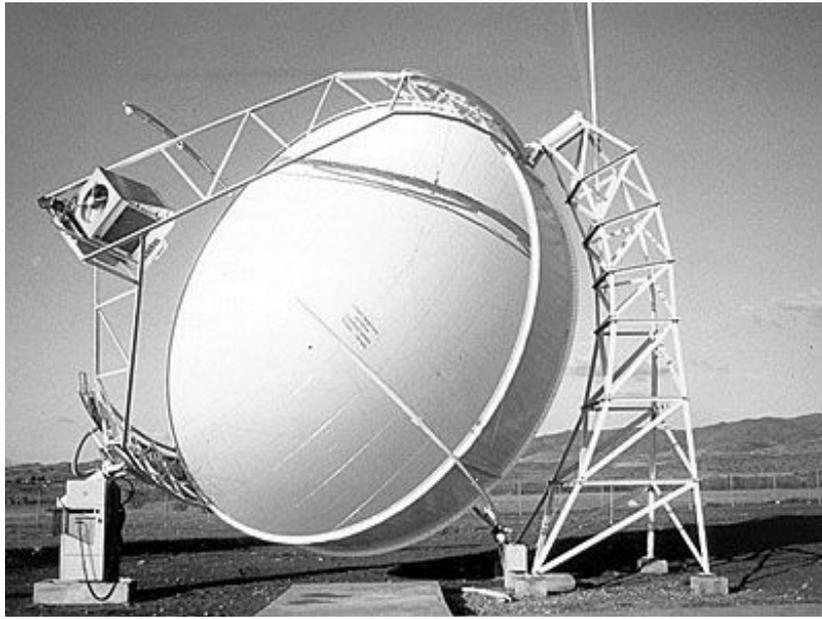


Figura 3.6. Distal I, colector puntual de 7,5 metros de diámetro capaces de recoger hasta 40 kWt de energía y generar hasta 9 kWe

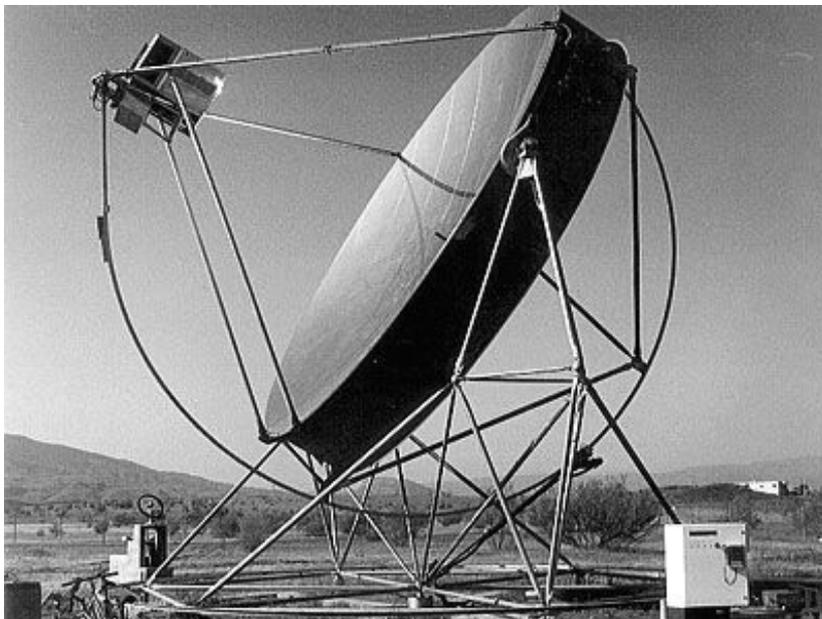


Figura 3.7. Distal II, Colector puntual de 8,5 metros de diámetro capaces de recoger hasta 50 kWt de energía y generar hasta 10 kWe.

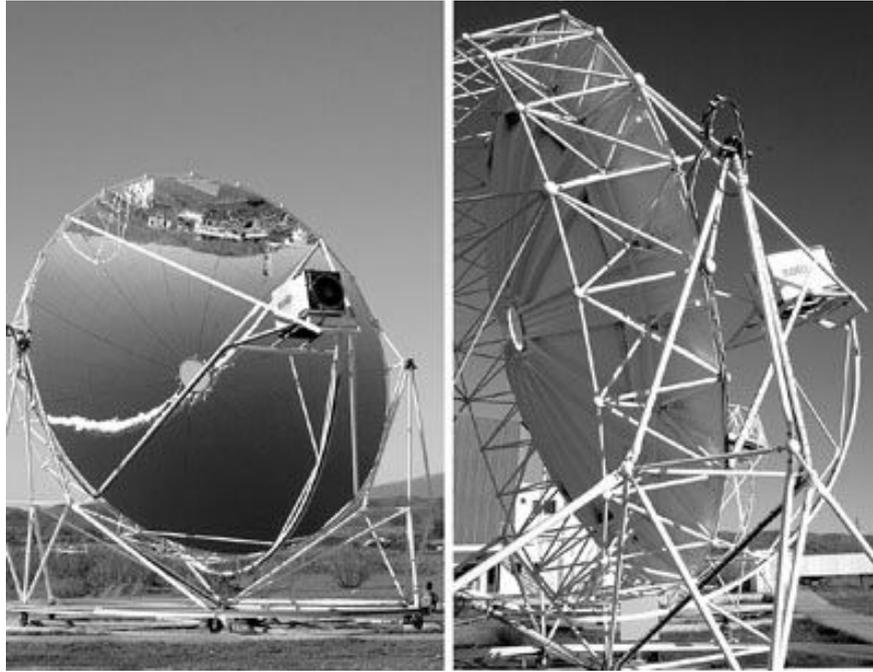


Figura 3.8. Proyecto en España, EuroDISH



Figura 3.9. Proyecto en España, DISPA-Stirling

– Estructura y sistema de seguimiento

Este sistema dispone de una estructura soporte y un mecanismo de seguimiento al sol en dos ejes, con objeto de seguir la posición del sol en todo momento, existe de seguimiento manual y también sistemas más complejos automatizados.

– Receptor

El receptor de un sistema de discos parabólicos tiene dos funciones fundamentales:

Absorber la radiación solar reflejada por el concentrador y transferir la energía absorbida al fluido de trabajo de la máquina térmica asociada (motor Stirling).

Los receptores de cavidad se emplean generalmente, el empleo de receptores externos presenta algunas ventajas para sistemas de baja temperatura, en los que la radiación concentrada entra por una apertura que se encuentra situada en el foco del paraboloide incidiendo posteriormente sobre el absorbedor, de tal manera que se disminuye las pérdidas radiactivas y convectivas, así como homogeneizar flujo radiante incidente sobre el absorbedor y reducir su valor máximo.

Se han empleado dos tipos de receptores para los sistemas de discos parabólicos.

Receptores de tubos directamente iluminados los que permiten una adaptación directa del calentador de los motores Stirling.

Receptores de reflujo emplean un fluido intermedio para la transmisión del calor.

– Sistema generador

Está constituido por un ciclo termodinámico de potencia o máquina térmica y el generador propiamente dicho, que transforma la energía mecánica en electricidad, es desarrollo de los sistemas de discos parabólicos ha estado muy ligado a los motores Stirling, en la actualidad se comienza a emplear también

ciclos de turbinas de gas, gracias al desarrollo de turbinas de gas de tamaño reducido y alto rendimiento.

Las potencias de estos motores o turbinas suelen oscilar entre los 5 y los 25 Kw, con rendimientos entre el 30% y el 40%.

3.2.2 VENTAJAS

Este sistema es como un seguidor de doble eje que concentra los rayos en un punto del colector, su concentración es la más alta de todas y su rendimiento también. Este absorbe la energía reflejada por los concentradores, haciendo que el fluido del receptor se caliente a unos 750°C . Este se usa entonces para generar electricidad en un pequeño motor, por ejemplo un motor Stirling o una micro turbina, unida al receptor.

La eficiencia de conversión es muy alta y la eficiencia máxima de solar a eléctrica de aproximadamente un 30%. Existe poca experiencia operacional de los primeros prototipos, pero se ve gran potencial. Se están desarrollando actualmente con el objetivo de reducir costes unos avanzados receptores de calor de tubería y motores Stirling que están teniendo unos esperanzadores resultados. Existen aplicaciones independientes o pequeños sistemas eléctricos aislados.



Figura 3.10. Distintas configuraciones de colectores de disco

3.3 HELIÓSTATOS¹¹

Un helióstato es un conjunto de espejos que se mueven sobre dos ejes normalmente en montura altacimutal, lo que permite, con los movimientos apropiados, mantener el reflejo de los rayos solares que inciden sobre él, se fijen en todo momento en un punto o pequeña superficie de concentración, deshaciendo en el rayo reflejado el movimiento diurno terrestre.



Figura 3.11. Helióstato

Se utilizan fundamentalmente:

- En observaciones astronómicas, para mantener fija la imagen del Sol o de un astro sobre el aparato de observación. En este caso suelen ser de pequeñas dimensiones.
- En centrales solares termoeléctricas, para concentrar la energía solar sobre el receptor, y conseguir así altas temperaturas. Estos helióstatos suelen ser grandes, llegando a tener más de 120 m².
- En experimentación y pruebas de materiales a altas temperaturas, ya que un conjunto suficientemente alto de heliostatos puede concentrar los rayos solares hasta conseguir temperaturas de más de 2000°C.
- En centrales solares termoeléctricas fuera de servicio, como es el caso de *Solar Two*, se utilizan en observaciones astronómicas, para poder observar la radiación de Cherenkov gracias a la concentración conseguida empleando helióstatos.

¹¹ Plataforma Solar de Almería: www.psa.es

- En urbanismo y arquitectura, para iluminar zonas normalmente umbrías.

3.3.1 PARTES CONSTITUTIVAS DE UN HELIÓSTATO

- El helióstato

El helióstato es una serie de espejos que están distribuidos alrededor de la torre, los mismos que están encargados de captar la radiación solar y redirigirla hacia el receptor que se encuentra en la torre, estos representan una fracción muy significativa de hasta el 60% del costo del sistema de torre solar.

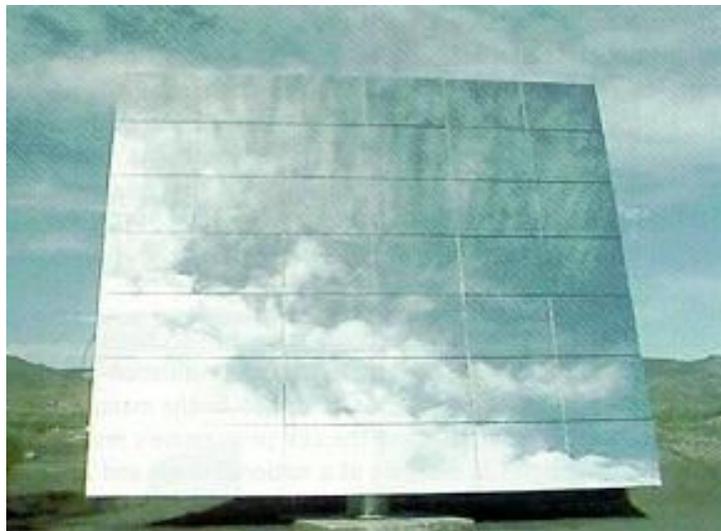


Figura 3.12. Helióstato de vidrio-metal de superficie reflexiva

Un helióstato está compuesto básicamente por una superficie reflectante, una estructura soporte, mecanismos de movimiento y un sistema de control, las superficies reflectantes más empleadas hasta hoy son a base de espejos de vidrio, también se han empleado superficies reflectantes a base de películas poliméricas de alta reflectividad. El mayor inconveniente para la introducción de esta última tecnología es su menor durabilidad.

Los helióstatos de las primeras plantas construyeron con espejos de vidrio sustentados en una estructura metálica tecnología de vidrio-metal. A mediados de la década de 1980 se desarrollaron los primeros prototipos de helióstatos de membrana tensionada.

Los helióstatos de membrana tensionado crearon grandes expectativas por su potencial debido a la reducción de costos, los avances más significativos en este campo se han dado con helióstatos de vidrio-metal, debido principalmente la reducción de costos de los espejos y a la optimización de componentes.

La superficie reflexiva por helióstato ha ido evolucionando hacia tamaños cada vez mayores, partiendo de unos 40 – 50 m² para los helióstatos de las primeras plantas hasta llegar a los 150 m² de algunos desarrollos recientes.

La disposición del campo de helióstatos en relación al receptor está condicionada en gran medida por las características del terreno disponible, por el tamaño de la planta y por la posición del receptor.



Campo Norte o Sur del receptor



Campo circundante al receptor

Figura 3.13. Disposición de helióstatos alrededor del receptor

– **La torre**

Es el lugar donde va ubicado y de soporta al receptor, ya que debe ir situado a una cierta altura sobre el nivel del campo de helióstatos para reducir las sombras y bloqueos entre éstos, y los diferentes elementos auxiliares como los sistemas de medida.

Las torres más comunes son las de estructura metálica, también se han realizado de hormigón, también se puede utilizar la cúspide de una montaña si en las faldas de esta se puede ubicar el campo de helióstatos.

- **El receptor**

El receptor es un dispositivo donde se produce la conversión de la radiación solar concentrada en energía térmica, en la cual aumenta de entalpía del fluido. A continuación se detalla, diferentes tipos de receptores utilizados en los diversos proyectos y el respectivo fluido de trabajo con el cual funcionan.

3.3.2 VENTAJAS

Un conjunto de helióstatos reflejan la luz en un punto de una torre, alcanzando mayor temperatura, mayor concentración, mayor rendimiento y mayor impacto visual.

Los medios de transferencia de calor usados hasta ahora incluyen agua/vapor, sales fundidas, sodio líquido y aire. Si se presuriza un gas o incluso aire en el receptor, puede usarse alternativamente para hacer funcionar una turbina de gas. Trabajan el punto de concentración de 400°C a 700° dependiendo del número de helióstatos que se coloquen alrededor del receptor.

3.4 HORNOS SOLARES¹²

Los hornos solares alcanzan los más altos niveles energéticos que se pueden obtener con un sistema solar de concentración, habiéndose conseguido concentraciones por encima de los 10.000 soles.

Su campo de aplicación comprende principalmente los ensayos de materiales, tanto en condiciones ambientales como en atmósferas controladas o al vacío, y experimentos de química solar mediante receptores asociados a reactores químicos.

¹² Cocinas solares, <http://solarcooking.org>

Constan esencialmente de un heliostato plano que realiza seguimiento solar continuo, un espejo parabólico concentrador, un atenuador o persiana y la zona de ensayos situada en el foco del concentrador [Martínez y Rodríguez, 1998].

El espejo captador plano –heliostato- refleja los rayos solares paralelos y horizontales sobre el disco parabólico, el cual los vuelve a reflejar concentrándolos en su foco (área de ensayos). La cantidad de luz incidente se regula mediante el atenuador situado entre el concentrador y el heliostato. Bajo el foco se encuentra la mesa de ensayos que tiene movimiento en las tres dimensiones espaciales (Este-Oeste, Norte-Sur, arriba-abajo), y sirve para posicionar las probetas con gran exactitud en el foco.



Figura 3.14. Horno solar del tipo caja

3.4.1 PARTES CONSTITUTIVAS DE UN HORNO SOLAR

- La caja

Es ideal que la estructura se haga de madera de pino de 2x1” o 3x1” con la que se hacen marcos. Esto para facilitar el montaje. La base es bueno hacerla unos 4 a 6 mm de espesor (más resistente). Se puede usar otros materiales, pero cualquier material debe tener una resistencia razonable a la intemperie, soportar temperaturas mayores de 150°C y tener buena resistencia mecánica.

- **El aislante**

El ideal es utilizar **lana de vidrio** (no lana mineral, lana de vidrio, la cual es amarilla). Para una cocina demostrativa, de no muy larga duración, se puede aislar con planchas de "aislapol". El mínimo razonable de aislante es 50 mm. Un espesor mayor permitirá retener mejor el calor, pero no tiene sentido ir más allá de los 8 a 10 cm.

- **Cubierta**

Para la cubierta se utilizan dos vidrios separados por unos 10 milímetros con listones de madera de 10x10 mm. o un termopanel. Los vidrios se pegan con silicona a los listones y el termopanel así hecho se pega sobre la cocina. No olvidar dejar espacio para que el vidrio se dilate. También es importante que quede un pequeño marco por fuera del vidrio para que sobre él se atornillen las aletas.

3.4.2 VENTAJAS

El horno solar nos brinda más de una ventaja, primeramente debemos recalcar que es una alternativa para disminuir el consumo de productos contaminantes como los hidrocarburos los cuales generan el dióxido de carbono y el metano. Es una opción excelente para aquellos países pobres que no pueden acceder a electrodomésticos o estufas; es de bajo costo y puede utilizarse en casi todos los lugares con materiales sencillos, y por último hacemos hincapié en su capacidad de cocinar cualquier tipo de alimento.

3.5 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para la selección de la mejor alternativa en el objetivo que tenemos vamos a tener que sacar fuera de nuestra, matriz de decisión al horno solar, ya que a diferencia del otro tipo de concentradores, esta cumple la función fundamental de la cocción de alimentos.

Tabla 3.2. Características de cada sistema de concentración¹³

	Cilindro-parabólicos	Receptor Central	Discos Parabólicos
Potencia	30-80 MW*	10-200 MW*	5-25 kW
Temperatura operación	390 °C	565 °C	750 °C
Factor de capacidad anual	23-50 %*	20-77 %*	25 %
Eficiencia pico	20 %	23 %	29,4 %
Eficiencia Neta Anual	11-16 %*	7-20 %*	12-25 %
Estado comercial	Disponible comercialmente	Demostración	Prototipos-demostración
Riesgo Tecnológico	Bajo	Medio	Alto
Almacenamiento disponible	Limitado	Sí	Baterías
Diseños híbridos	Sí	Sí	Sí
Coste W instalado			
€/W	3,49-2,34*	3,83-2,16*	11,00-1,14*
€/Wp**	3,49-1,13*	2,09-0,78*	11,00-0,96*

* El rango indicado se refiere al periodo de 1997 al año 2030

** €/Wp se refiere al coste por W instalado eliminando el efecto de almacenamiento de energía

Los factores a calificarse van a ser los siguientes:

1. Potencia a generar
2. Temperatura de operación
3. Factor de capacidad anual
4. Eficiencia anual
5. Factibilidad de comercio
6. Tecnología a usarse
7. Espacio a usarse

Tabla 3.3. Matriz de decisión

Factores	Valor %	Cilindros Parabólicos		Helióstatos		Discos Stirling	
		Calificación (1-10)	Calf. Total	Calf. (1-10)	Calf. Total	Calf. (1-10)	Calf. Total
1	0,25	7	1,75	10	2,50	6	1,50
2	0,10	5	0,50	6	0,60	8	0,80
3	0,10	6	0,60	7	0,70	5	0,50
4	0,20	5	1,00	8	1,60	10	2,00
5	0,10	8	0,80	5	0,50	8	0,80
6	0,10	10	1,00	8	0,80	6	0,60
7	0,15	6	0,90	4	0,60	8	1,20
			6,55		7,3		7,4

¹³ Datos de EurObserv'ER 2003

Podemos observar en esta tabla que la diferencia entre los distintos sistemas no es mucha, podríamos decir que el cilindro parabólico tiene una cierta ventaja tecnológica, ya que se han construido por más tiempo y su sistema esta perfeccionado. A diferencia de los discos Stirling que están en un proceso de auge y de desarrollo tecnológico.

El conjunto helióstatos y torres solares también tiene ciertas ventajas con respecto a la cantidad de energía que puede generar, funciona con una eficiencia anual menor y se requiere de un sistema de mayor tamaño para la generación. Y tenemos una temperatura máxima en el concentrador menor a la que obtenemos en un concentrador parabólico.

Hemos decidido utilizar un sistema de concentrador parabólico, en primer lugar porque disponemos del disco concentrador, que es una de las partes de mayor costo y por sus características propias para la generación eléctrica.

Al ser un prototipo experimental, es importante el desarrollo y mejoramiento del sistema con el Stirling, por lo que al construir un concentrador solar parabólico de disco, estaríamos impulsando el estudio de este tipo de sistemas en el país, para futuras generaciones usen este pequeño prototipo como un primer paso a seguir.

CAPITULO IV

DISEÑO DEL SISTEMA ENERGETICO

4.1 GEOMETRÍA DEL CONCENTRADOR

4.1.1 Análisis geométrico de la parábola

Determinación de la ecuación de la parábola a emplearse como concentrador, se dispone de una antena de diámetro 1.8m, una altura h de 38.5m y poseen un agujero de 0.8m de diámetro.

Datos parábola:

X1 := 80 · mm	Radio agujero interno
X2 := 900 · mm	Radio parábola
h := 385 · mm	Altura parábola

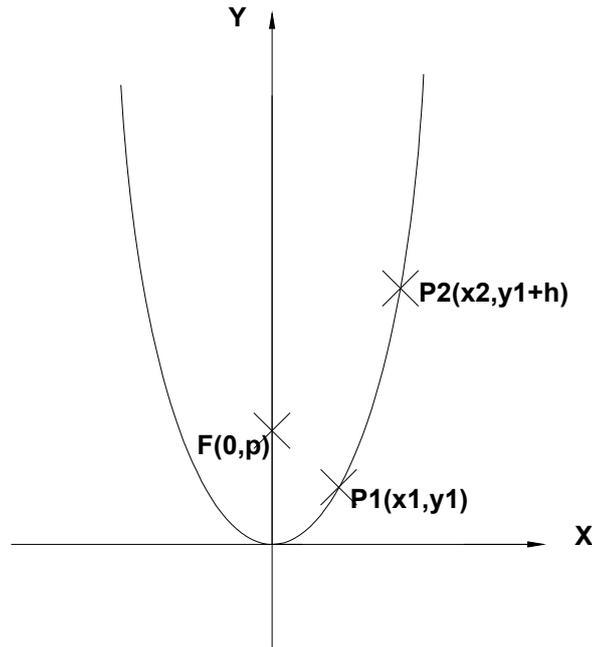


Figura 4.1. Representación de la EC parabólica

Partiendo de la ecuación general de la parábola

$$(X + k)^2 = 4p(Y + h) \quad (4.1)$$

Donde:

k, es igual a 0, debido a que no hay desplazamiento en el eje x; **p**, es la distancia focal; **h**, es una coordenada en el eje y que cumple con la EC 4.1

Suponga los siguientes valores, para determinar la ecuación 4.1

$$Y_1 := 1\text{mm}$$

$$p := 1\text{mm}$$

Dada la EC 4.1 en función de los puntos P1 y P2 de la figura 4.1

$$X_1^2 = 4 \cdot p \cdot Y_1 \quad (4.2)$$

$$X_2^2 = 4 \cdot p \cdot (Y_1 + h) \quad (4.3)$$

Resolviendo las ecuaciones 4.2 y 4.3, se obtiene el valor de la coordenada Y1 y el valor de p, respectivamente:

$$Y1 := 3.066 \text{ mm}$$

$$p := 522 \text{ mm}$$

Por tanto la EC 4.1 será:

$$X^2 = 4 \cdot (522 \text{ mm} \cdot Y) \quad (4.4)$$

Se determinaran las coordenadas de los puntos P1 y P2 de la figura 4.1

$$Y2 := Y1 + h \quad (4.5)$$

el valor de $Y2 = 0.388$, por tanto:

P1(80, 3.066)mm y P2(900, 38.8)mm

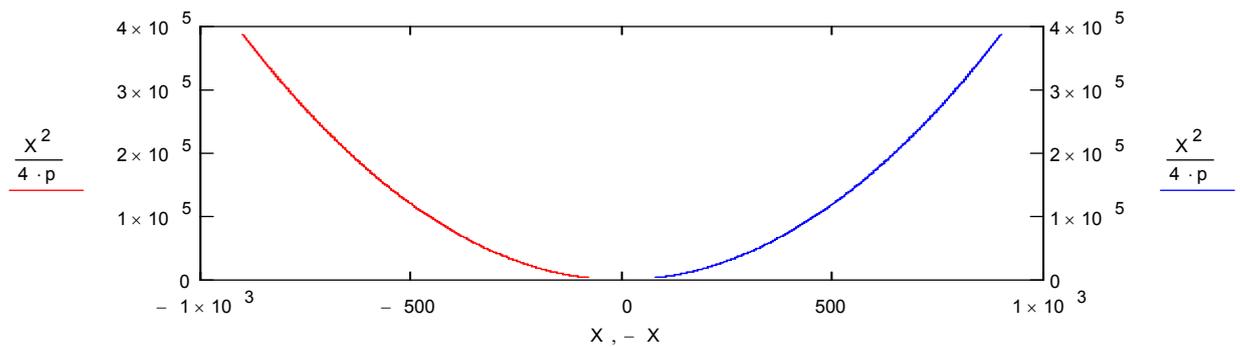


Figura 4.2. Representación grafica de la parábola obtenida

Análisis de la superficie de la antena parabólica

En función de este análisis se determinara el área que deberá ser cubierta con una superficie reflectiva, en este caso con polarizado tipo espejo.

$$Ae := 4 \cdot \pi \cdot \sqrt{p} \cdot \int_{Y1}^{Y2} \sqrt{Y + p} \, dY \quad (4.6)$$

Resolviendo la EC 4.6 en función de los puntos conocidos P1 y P2:

$$Ae = 2.952 \text{ m}^2$$

Se harán necesarios 3 m^2 para cubrir la superficie de la antena.

4.1.2 Análisis del reflector

La imagen solar producida por un concentrador depende de la geometría de éste. La geometría de un paraboloide de revolución permite la concentración en el foco de los rayos solares que son paralelos a su eje de apertura. Una vez concentrados los rayos solares forman una imagen circular, la cual permitirá el funcionamiento del motor Stirling. Para entender cómo opera el colector de espejo parabólico, es necesario describir las propiedades ópticas del concentrador y las imágenes solares que éste produce.

Se analizará por tanto el reflector perfecto y más adelante las posibles imperfecciones de éste.

La ecuación que describe a un paraboloide de revolución en un sistema de coordenadas xyz es:

$$x^2 + y^2 = 4 \cdot f \cdot z \quad (4.7)$$

La Ecuación 4.7, involucra la distancia focal f (distancia medida desde el punto focal al vértice), pero no limita las dimensiones del paraboloide. Una de estas dimensiones es el ángulo de borde ϕ_r , que trunca al paraboloide y restringe el diámetro de apertura D_a .

En la figura 2.13 se esquematiza el paraboloide de revolución truncado a un ángulo de borde definido y se presenta además, un corte transversal en $x=0$, de tal forma que permite un análisis simplificado en dos dimensiones. De esta manera se establece la analogía entre el paraboloide de revolución con la rama de una parábola, que en términos de sus coordenadas espaciales es:

Razón de concentración en el paraboloide de revolución

La razón de concentración máxima para un concentrador parabólico es función de la geometría del receptor, ya que ésta determina la manera en que son interceptados los rayos solares que han sido concentrados. Así, cada receptor presenta una forma particular de interceptar la radiación solar concentrada estableciéndose entonces diferentes distribuciones de energía por unidad de área. Se analizara el concentrador parabólico con receptor cilíndrico. Este análisis se basa en el tamaño de la imagen solar formada en el plano focal del espejo parabólico al ser interceptada por un receptor circular o plano.

En la figura 4.4 se bosqueja la radiación solar directa incidente y cómo ésta es reflejada por la superficie especular del concentrador. Así, la geometría del paraboloide de revolución permite concentrar la radiación incidente en su plano receptor.

Se establece que la radiación solar directa se encuentra en un cono angular $\alpha=0.53^\circ$ (el ángulo que sustente el sol a la distancia Tierra-Sol, $\alpha=32'$) y que la radiación entrante es normal a la apertura del concentrador. Se especifica que la radiación concentrada impacta un receptor circular o plano, el cual se sitúa en el plano focal del concentrador.

Dado:

$D_a := 1800 \text{ mm}$

D_a es diámetro del concentrador

$f := 521.82 \text{ mm}$

f , es la distancia focal

$\alpha := 0.267 \text{ deg}$

α , es el cono angular de los rayos solares

$$A_a := \frac{\pi \cdot D_a^2}{4} \quad (4.8)$$

Donde **A_a** es el área de apertura del concentrador

En la figura 4.4:

$$a := 10 \cdot \text{mm}$$

a , es el radio del cilindro receptor (cabeza del motor Stirling)

c , es un segmento comprendido entre el punto **B** y el foco f

Las siguientes relaciones se derivan de la figura 4.3 y de la figura 4.4

$$c := \frac{a}{\sin(\phi r)} \quad (4.9)$$

$$b := rr - c \quad (4.10)$$

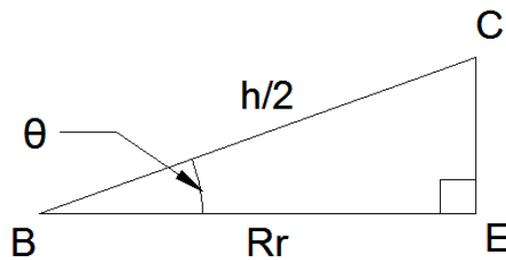


Figura 4.5. Relación geométrica triángulo BCE

En la figura 4.5:

$h/2$, es superficie de contacto del Stirling, Rr , es el radio del receptor

$$\theta := 90 + \frac{\alpha}{2}$$

De la figura 4.5 se deduce que:

$$\frac{h}{2} = \frac{Rr}{\cos(\theta - \phi r)} \quad (4.11)$$

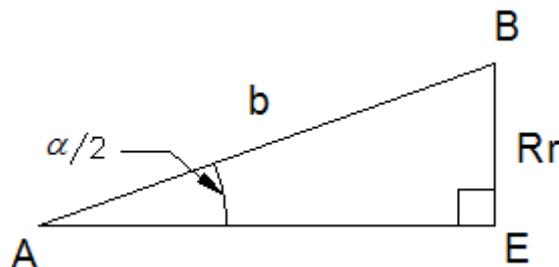


Figura 4.6. Relación geométrica triángulo ABE

De la figura 4.6 se obtienen las siguientes relaciones:

$$Rr := b \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.12)$$

Donde:

$$Rr = 2.096 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Sustituyendo el valor de **Rr**, en la EC 4.12:

$$h = 5.132 \cdot \text{mm}$$

entonces el área de recepción **Ar** será

$$Ar := 2\pi a \cdot h \quad (4.13)$$

Al sustituir los valores de **a** y **h** se tiene:

$$Ar = 322.433 \cdot \text{mm}^2$$

Por otra parte, la concentración máxima C_{\max} se define como la relación que existe entre el área de apertura de captación del paraboloide de revolución y el área mínima de captura para la radiación que se encuentra en la imagen solar formada en el receptor, tal que:

$$C_{\max} := \frac{Aa}{Ar} \quad (4.14)$$

$$C_{\max} = 7.892 \times 10^3$$

Se observa que la concentración máxima que se obtiene en un concentrador parabólico con receptor plano depende solamente del ángulo de borde, sin embargo en las ecuaciones anteriores no se contempla la dispersión angular en el receptor.

Esta dispersión puede deberse principalmente a tres causas: seguimiento solar inapropiado; rugosidades inherentes en la superficie (proceso de recubrimiento de película reflectora) y por mal conformado en la curvatura. En la figura 4.7 se muestra la dispersión angular δ y sus tres posibles razones.

Por lo tanto, el ángulo de dispersión es un factor que debe tomarse en cuenta en el diseño del receptor. De no ser así, una fracción de la energía concentrada se encontrará fuera del área de absorción en el receptor, lo que puede ocasionar daños en los componentes del mismo.

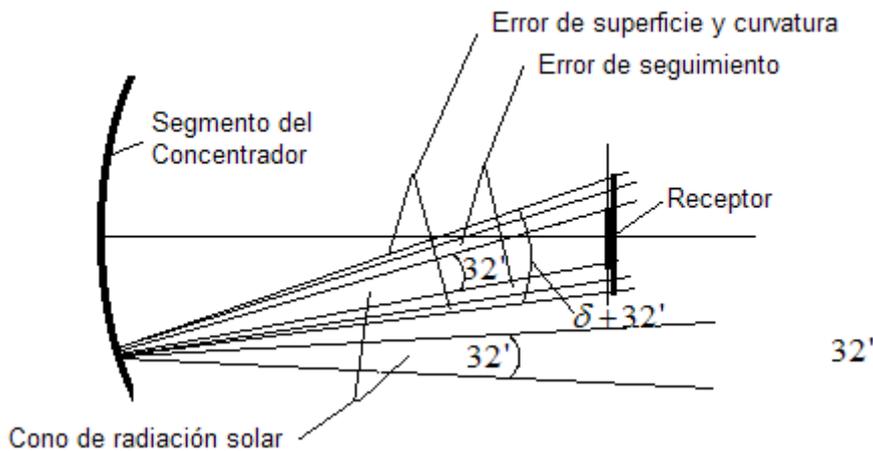


Figura 4.7. Factores que afectan el diámetro del receptor

Al considerar que la interceptación de toda la radiación especular reflejada se encuentra en un cono angular con $(0.53^\circ + \delta)$, la EC 2.29 es ahora:

$$h1 := \frac{2Rr}{\cos\left(\theta - \phi_r + \frac{\delta}{2}\right)} \quad (4.15)$$

Donde:

δ , es la desviación especular, la misma que tiene un valor teórico de 3 grados.

Sustituyendo el valor de la EC 4.15 en la EC 4.14:

$$C_{maxr} := \frac{Aa}{2\pi a \cdot h1} \quad (4.16)$$

$$C_{maxr} = 7.744 \times 10^3$$

Por otra parte, la distancia focal óptima **f_o** para lograr una concentración tan alta como sea posible, al proponer un receptor plano de diámetro **D_r** y un ángulo de

borde ϕ_r que trunca al paraboloides, puede ser obtenida al combinar las Ecuaciones 2.33 y 2.28.

Partiendo de la ecuación 4.14:

$$C_{\max} = \frac{A_a}{A_r}$$

Sustituyendo la EC 4.8 y la EC 4.13 en la EC 4.14

$$C_{\max} = \frac{\left(\frac{\pi}{4} \cdot Da^2\right)}{(2\pi \cdot a \cdot h)} \quad (4.17)$$

Despejando el diámetro de apertura **Da** de la EC 4.17

$$Da_1 = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot a \cdot h \cdot C_{\max r}} \quad (4.18)$$

Por tanto:

$$Da_1 = 1.783 \cdot m$$

Este valor a su vez será remplazado en la EC 4.17, con lo cual **fo**, el foco óptimo será:

$$fo = 51.689 \cdot cm$$

Cantidad de energía que llega al receptor

Al realizar un balance de energía se puede determinar que el calor útil **Qu** está dado por la energía recibida en el absorbedor **Qabs** menos las pérdidas de calor el medio ambiente **Qper**, por lo que:

$$Q_u = Q_{abs} - Q_{per} = Q_{abs} - (Q_r + Q_c) \quad (4.19)$$

Eficiencia óptica del colector parabólico

Será la energía que colecta la parábola que puede ser aprovechada y dependerá del área óptima **Ao**. La misma que será igual a:

$$A_o := A_a - A_h \quad (4.20)$$

Donde:

Ah, es el área hueca de la antena, y **Aa** es el área de apertura.

$$A_h := \pi \cdot X_1^2 \quad (4.21)$$

El radio de apertura será $X_1 = 0.1025\text{m}$

Sustituyendo las EC 4.8 y 4.21 en la EC 4.20, se tiene:

$$A_o = 2.512\text{m}^2$$

Con el **Ao**, se halla la fracción no sombreada **ft**:

$$f_t := \frac{A_o}{A_a} \quad (4.22)$$

Con lo anterior, se tiene la eficiencia óptima η_o en el concentrador es:

$$\eta_o := f_t \cdot \rho_C \cdot \alpha_{abs} \cdot \gamma_g \cdot F_d \quad (4.23)$$

Donde:

$$F_d := 0.75$$

Fd, factor de de dispersión

$$\gamma_g := .9$$

γ_g , es el factor de configuración geométrico

$$\alpha_{abs} := 0.8$$

α_{abs} , es un factor de absorptancia

$$\rho_C := 0.8$$

ρ_C , es un factor de reflectancia

Eficiencia optima

$$\eta_o = 0.426$$

4.2 ANÁLISIS TÉRMICO

Partiendo del análisis geométrico y de que se pudiera contar con un motor stirling de mayor potencia (100W de potencia efectiva) que aproveche toda la cantidad de energía térmica generada por el concentrador solar parabólico, se hallara a continuación la cantidad de energía térmica concentrada que se puede emplear para que trabaje el absorbedor.

La energía Q_{abs} que se dispone en el receptor se determina con la siguiente relación

$$Q_{abs} := \eta_0 \cdot A_o \cdot G_b \quad (4.24)$$

Donde:

G_b , es la irradiancia solar directa y será igual a $327.409 \frac{W}{m^2}$:

Entonces:

$$Q_{abs} = 350.646 \text{ W}$$

Pérdidas de calor

Los datos iniciales son:

$T_{abs} := 650 \cdot C$ **T_{abs}** , temperatura en el receptor

$T_{ac} := 25$ **T_{ac}** , temperatura ambiente en C

Las temperaturas deben estar en grados kelvin para lo cual serán convertidas.

$$T_a := (273 + T_{ac})K \quad (4.25)$$

Donde: **T_a** , es la temperatura ambiente en K

$$T_a = 298 \text{ K}$$

$$T_r := (273 + T_{rc})K \quad (4.26)$$

Donde: **T_r** , es la temperatura en K en el receptor

$$T_{rc} = 773^\circ K$$

El calor de radiación en receptor Q_{rh} , corresponde a la siguiente relación:

$$Q_{rh} := \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_r \cdot (T_r^4 - T_{sky}^4) \quad (4.27)$$

Donde:

$\varepsilon_r := 0.8$ ε_r , es la emisividad del receptor

$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ σ , constante de Stefan-Boltzmann

$A_r = 322.433 \cdot mm^2$ A_r , es el área de recepción del stirling

T_{sky} , es la temperatura del aire en grados kelvin y es igual a:

$$T_{sky} := 0.0552 T_a^{1.5} \quad (4.28)$$

Resolviendo la EC 4.28, se obtiene el valor de la temperatura ambiente:

$$T_{sky} = 283.964 \text{ K}$$

Al sustituir los valores anteriores en la EC 4.a7 se obtiene que el calor de radiación en el motor stirling es de:

$$Q_{rh} = 10.52 \text{ W}$$

Calor de convección Q_c

El coeficiente de convección h_c depende de la velocidad del viento del lugar, además, su cálculo está influenciado por el acabado de la superficie del absorbedor y la incidencia de la corriente de aire. (Jürges)

Para la aplicación planteada, la corriente de aire será perpendicular a la superficie de recepción.

Donde **v_a**, es la velocidad media del aire a una temperatura T(K) y será 0.5 (m/s)

$$h_c := 16.9 v_a^{0.45} \quad (4.29)$$

Resolviendo la EC 4.29 se tiene que:

$$h_c = 12.372$$

El calor de convección estará dado por la siguiente EC:

$$Q_c := hc \cdot A_r \cdot (T_r - T_a) \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.30)$$

Entonces:

$$Q_c = 2.493 \text{ W}$$

El calor perdido **Qper**, cumple con la ecuación 4.31:

$$Q_{per} := Q_c + Q_{rh} \quad (4.31)$$

Resolviendo la EC 4.31 se tiene:

$$Q_{per} = 13.013 \text{ W}$$

Retomando la formula del calor útil Q_u se tiene:

$$Q_u := Q_{abs} - Q_{per} \quad (4.32)$$

$$Q_u = 337.633 \text{ W}$$

Es necesario conocer la eficiencia instantánea del colector, para avanzar con el análisis, para lo cual emplearemos la formula 4.33

$$\eta_c := \frac{Q_u}{G_b \cdot A_a} \quad (4.33)$$

Entonces:

$$\eta_c = 0.405$$

Para determinar la temperatura teórica en el foco se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$T_{real} := \sqrt[4]{\frac{G_b \cdot C_{maxr} \cdot \alpha_{abs} \cdot \varepsilon \cdot \gamma_g \cdot F_s \cdot F_f \cdot E_d}{\sigma \cdot \rho_C}} \quad (4.34)$$

Donde:

$$G_b := 327.409 \frac{W}{m^2} \quad \mathbf{G_b}, \text{ es Irradiancia}$$

$$C_{maxr} = 7.744 \times 10^3 \quad \mathbf{C_{maxr}}, \text{ es la razón de concentración}$$

$$\alpha_{abs} := 0.8 \quad \alpha_{abs}, \text{ es un factor de absorptancia}$$

$$\varepsilon = 0.8 \quad \mathbf{\varepsilon}, \text{ es la emisividad del receptor}$$

$F_d := 0.75$

F_d, factor de de dispersión

$\gamma_g := .9$

γ_g , es el factor de configuración geométrico

$F_s := 0.15$

F_s, es la fracción sombreada

$F_f := 0.9$

F_t, es un factor geométrico

$E_d := 0.20$

E_d, es el error de dispersión

$\rho_c := 0.8$

ρ_c , es un factor de reflectancia

Motor Stirling solar

Un motor Stirling Solar es un sistema compuesto de un concentrador solar de tipo colector puntual y un motor Stirling. La eficiencia del motor Stirling Solar viene dada por:

$\eta_m := 0.4$

η_m , es la eficiencia teórica del motor stirling

$$E_s := \eta_m \cdot \eta_c \quad (4.35)$$

Donde **ES**, será la eficiencia del sistema motor & concentrador y será:

$E_s = 0.167$

Por tanto el calor térmico equivalente **Q_{te}**, que puede ser aprovechado será:

$$Q_{te} := E_s \cdot Q_u \quad (4.36)$$

$Q_{te} = 123.853W$

Análisis energético para el motor stirling de 1W de potencia

Área experimental para que funcione el motor stirling

Para obtener del concentrador solar parabólico solar una cantidad de energía térmica suficiente para que trabaje el motor stirling y se genere electricidad, solo se usara una parte del concentrador, que corresponderá a un radio de 325mm

Sustituyendo el valor del radio real de uso en la EC4.8

$$A_a = 0.332 \text{ m}^2$$

Considerando el área total

$$A_t := 2.545 \text{ m}^2$$

El porcentaje de área usada de todo el concentrador para cumplir con el objetivo será

$$\text{usosup} := \frac{A_a}{A_t} \quad (4.37)$$

El mismo que corresponderá al 13% del área total

El factor de concentración para la práctica se deriva de la EC 4.15 y EC 4.16, y toma de datos será:

$$C_{\text{maxr}} = 858.646$$

Cantidad de energía que llega al receptor

Al realizar un balance de energía se puede determinar que el calor útil Q_u está dado por la energía recibida en el absorbedor Q_{abs} menos las pérdidas de calor al medio ambiente Q_{per} , por lo que al resolver la EC 4.19:

Energía Absorbedor

Se determinara el área efectiva, que se obtiene al resolver la EC 4.21 y reemplazarla en la EC 4.20

Resolviendo la EC 4.21 se tiene que el área hueca o que no producirá reflectancia será:

$$A_h = 0.02 \text{ m}^2$$

Reemplazando **A_h**, en la EC 4.20 se tiene

$$A_o = 0.312 \text{ m}^2$$

El factor geométrico cambiara al resolver la EC 4.22 a:

$$f_t = 0.879$$

La eficiencia óptima en el concentrador η_0 , al resolver la EC 4.24 será:

$$\eta_0 = 0.406$$

La energía Q_{abs} que se dispone en el receptor se determina con la EC 4.24

$$Q_{abs} = 41.419 \text{ W}$$

Análisis térmico para la práctica y toma de datos

$$T_{abs} := 447.6 \cdot \text{C} \quad \mathbf{T_{abs}}, \text{ temperatura en el receptor}$$

$$T_{ac} := 25 \quad \mathbf{T_{ac}}, \text{ temperatura ambiente en C}$$

Pérdidas de calor

Calor de radiación en receptor Q_{rh}

Donde: T_a , es la temperatura ambiente en K

$$T_a = 298 \text{ K}$$

Donde: T_r , es la temperatura en K en el receptor

$$T_r = 720.6 \text{ K}$$

$$\varepsilon_r := 0.8 \quad \mathbf{\varepsilon_r}, \text{ es la emisividad del receptor}$$

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad \mathbf{\sigma}, \text{ constante de Stefan-Boltzmann}$$

$$A_r = 322.433 \cdot \text{mm}^2 \quad \mathbf{A_r}, \text{ es el área de recepción del stirling}$$

T_{sky} , es la temperatura del aire en grados kelvin y es igual a:

Resolviendo la EC 4.28 se tiene que la temperatura del aire es:

$$T_{sky} = 283.964 \text{ K}$$

A_r Es el área del receptor, es un dato del motor

$$A_r := 322.433 \text{ mm}^2$$

Al sustituir estos valores en la EC 4.27 el calor de perdidas será:

$$Q_{rh} = 3.848 \text{ W}$$

Calor de convección Q_c

Se debe determinar el coeficiente de convección h_c , resolviendo la EC 4.29, partiendo de que la velocidad del aire $v_{aire} = 0.5 \text{ m/s}$

$$h_c = 12.372$$

El calor de convección al resolver la EC 4.30 es:

$$Q_c = 1.686 \text{ W}$$

Calor perdido Q_{per}

El calor perdido será igual a Q_{per} , a partir de la EC 4.31 y es:

$$Q_{per} = 5.534 \text{ W}$$

Retomando la formula 4.19, del calor útil Q_u , se tiene:

$$Q_u = 35.885 \text{ W}$$

Eficiencia instantánea del colector corresponde a la EC 4.33 y es igual a:

$$\eta_c = 0.33$$

Motor Stirling solar

Considerando que el motor stirling tiene una potencia mecánica de 1W, y que el calor útil que puede ser aprovechado por el motor es de 35.885W, para el análisis de eficiencias consideraremos que será el resultado de la eficiencia del colector por la eficiencia del motor stirling que será del 40% y por la eficiencia del sistema motor stirling generador DC.

$$\eta_m := 0.4$$

La potencia mecánica P_{ter} , real del motor stirling medida corresponde a:

$$P_{ter} := 1 \text{ W}$$

Mientras que la potencia eléctrica (P) corresponde a la EC 4.38

$$P := Vol \cdot In \quad (4.38)$$

Y depende de los valores de voltaje **vol**; y de los valores de intensidad **Int**:

$$\text{Vol} := 5\text{V}$$

$$\text{Int} := 0.12\text{A}$$

Al resolver la EC 4.57, se obtiene que la potencia eléctrica obtenida es:

$$P = 0.6\text{W}$$

La eficiencia entre el motor y el generador corresponde a la EC 4.39

$$\eta^{\text{st}} := \frac{P}{P_{\text{ter}}} \quad (4.39)$$

y es:

$$\eta^{\text{st}} = 60\cdot\%$$

La eficiencia total del sistema será:

$$\eta^{\text{tcs}} := \eta^{\text{C}} \cdot \eta^{\text{M}} \cdot \eta^{\text{st}} \quad (4.40)$$

$$\eta^{\text{tcs}} = 7.927\%$$

4.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para el análisis estructural del soporte del concentrador parabólico, se empleará el método de elementos finitos bajo las condiciones de la norma LRFD (Load and Resistance Factor Design).

La norma LRFD es un procedimiento estadístico el cual se basa en las probabilidades, por tanto es un método que basa su análisis en las mejores prácticas de ingeniería comprobadas a través de los años.

Al no poder conseguir un estado de riesgo cero, en el diseño se debe adoptar métodos de confiabilidad de momentos de primer y segundo orden, los cuales no sobrepasan la resistencia de los elementos que conforman la estructura, éstos métodos consideran que la carga Q y la resistencia R son variables aleatorias, el requerimiento de seguridad industrial, expresado en la inecuación 4.59; en la cual

la resistencia del componente o del sistema en general es mayor o igual a la carga máxima esperada.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (4.41)$$

Donde:

Φ , es el factor de resistencia de diseño; ϕ_i , son cargas factorizadas

Según datos estadísticos tomados por los estándares ANSI, se tienen factores reductores y factores de mayorización.

Factores de reducción:

Tabla 4.1. Factores de reducción

Valor de Φ	Caso
0.90	Fluencia por tracción
0.75	Fractura a la tracción
0.85	Compresión
0.90	Flexión
0.90	Fluencia por corte

Factores de mayorización de carga:

- Carga muerta **D**: es el peso propio de toda la estructura la cual depende de la densidad del material
- Carga viva **L**: son las cargas que actúan de forma intermitente o no permanente como el caso del polvo, peso de personas.
- Carga de viento **W**: la estructura se encuentra ubicada en el Laboratorio de Energías No Convencionales de la ESPE, el cual tiene una velocidad máxima de viento de 10 m/s
- Carga sísmica **E**: es la carga que actúa sobre la estructura en caso de presentarse un fenómeno sísmico.

- Carga de nieve **S**: es la carga que por el peso de nieve se adiciona al peso muerto de la estructura.
- Carga de agua o hielo **R**: es la carga que por el peso del agua o del hielo se suman al peso de la estructura.

Tabla 4.2. Factores de mayorización de carga

Combinación de carga (C)	Máxima posibilidad de carga en la vida útil de 50 años
1.4D	D durante la construcción
1.2D+1.6L+0.5(Lr o S o R)	L
1.2D+1.6(Lr o S o R)+(0.5L+0.8W)	L en el techo
1.2D+0.5L+0.5(Lr o S o R)	W aditiva a D
1.2D+1.5E+0.5L o 0.2S	E aditiva a la D
0.9D+1.3W o 1.5E	W o E opuesta a la D
1.2D+1.6L+1.0E	S nieve, R agua o hielo

El material seleccionado para la construcción del soporte del concentrador solar parabólico será tubo redondo con costura de 1 ¼" X 2mm , debido primero a que es común en el mercado nacional y por tanto se lo puede conseguir fácilmente, además sus propiedades cumplen con los requerimientos mecánicos, como lo comprueba el programa SAP2000 posteriormente.

Debemos tomar en cuenta las condiciones de utilización, de duración, basadas en las características de las soldaduras y de los materiales utilizados, su resistencia a la intemperie, el fabricante debe garantizar las características mecánicas de la torre, así como el cumplimiento con las tablas de carga del servicio.

Esta estructura debe tener un tratamiento anticorrosivo y estar exenta de cualquier anomalía que afecte al comportamiento como deformaciones de los elementos que conforman la estructura, agrietamientos en las soldaduras, oxidación evidente.

Soporte

Las condiciones de diseño serán:

- Debe soportar un peso máximo de 50kg
- Debe permitir un rango de funcionamiento máximo para el concentrador de 160°
- Giro horizontal para ubicar correctamente la posición solar.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL – SAP 2000, se detalla en el anexo B.

4.4 DISEÑO MECÁNICO

Análisis de eje - SAP2000, anexo B

Para seleccionar un eje adecuado que nos permita dar movimiento al concentrador solar parabólico a lo largo del día, se realiza un estudio con el programa MITCALC,

El cual usa utiliza para sus calculos, algoritmos y datos de los estándares ANSI, ISO, DIN, BS y literatura especializada. Estándares utilizados: DIN 3971, DIN 3991 Kegelradern 1-4, ISO 6336 1-3, DIN 3965 Toleranzen für Kegelradverzahnungen 1-4, ISO 1328, DIN 3990, ANSI B6.1-1968, AGMA 2001-C95, AGMA 908-B89/95, AGMA 2003-A86/88, AGMA 2005-B88 y otros.

CAPITULO V

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

5.1 RECURSOS DE FABRICACIÓN

Para la fabricación del conjunto concentrador solar parabólico – Stirling, se van a usar distintos materias para sus partes, por ejemplo para el soporte los materiales se pueden adquirir directamente en fábricas de aceros; para el concentrador parabólico se usara un disco aluminio que anteriormente era una antena de transmisión de dato, esta esa forjada en aluminio; para la sujeción de las partes, se usaron pernos de distinto tamaño y también ciertos accesorios como chumaceras, ruedas, etc.

Existen elementos que se compraron y no se los construyo, como son el caso de los dos motores, el primero es un motor Stirling y el otro es un motor de DC que va a realizar la función de generador. Estos van a ser acoplados en el sistema.

Los diferentes tipos de fabricación influyen principalmente en las tecnologías necesarias en el producto y la calidad de sus terminaciones. Se puede usar máquinas CNC con el fin de automatizar proceso de mecanizado, información de geometrías y condiciones de mecanizado, se podrían establecer procesos en serie. Por otro lado, podrían existir guillotinas algo más automatizadas para el

proceso de corte, pero integradas con algún alimentador automático de material que avance hasta topes y la máquina corte en forma automática. Sin embargo, la construcción de este equipo concentrador no es de una gran complejidad, de hecho su construcción manual es bastante fácil y rápida si se cuenta con el personal y equipamiento adecuado.

El concentrador solar es una antena de forjada en aluminio, pero esta puede ser reemplazada por concentradores de de otro material como fibra de vidrio o de aluminio pero de espesor menor. Y realizar el respectivo recubrimiento con material reflectivo.

Tabla 5.1. Tabla de materiales empleados

ITEM	TIPO	CANTIDAD
Motor	Stirling	1
Generador eléctrico	Motor DC	1
1/4 Galón pintura blanca	Anticorrosiva	2
Juego 4 garruchas	25Kg	1
Película tipo espejo	1000mm X500mm	8
Juego 4 garruchas	20Kg	1
1/2 Kg Electrodo	AGA 6011	3
Tubo redondo	1 ¼ " x 2mm	12m
Pernos chumacera	3/4"	4
Pernos inoxidables motor	3/8 X 1 1/2"	2
Pernos inoxidables	3/8"	2
Rosca inoxidables	3/8"	2
Tornillo con tuerca	25mm x 5mm	24
Pletina de acero	A36 80mm x 6mm	500mm
Pernos	40mm x 6mm	7
Pletina de acero	A36 25mm x 6mm	500mm
Eje Acero	1" A 36	400mm
Cinta	Aluminio	1
Chumacera	1"	2
Generador eléctrico	Motor DC	1
Cable con lagarto	30cm	2
O-ring	#80	2

5.2 ORGANIGRAMA DE PROCESOS

5.1.1 Estructura Soporte

Para la estructura de soporte se uso tubo redondo de acero negro; se realizo los respectivos biseles y cortes a 45° y 60° respectivamente para las uniones en los vértices. Para el proceso de soldadura se uso suelda eléctrica con electrodo 6011.

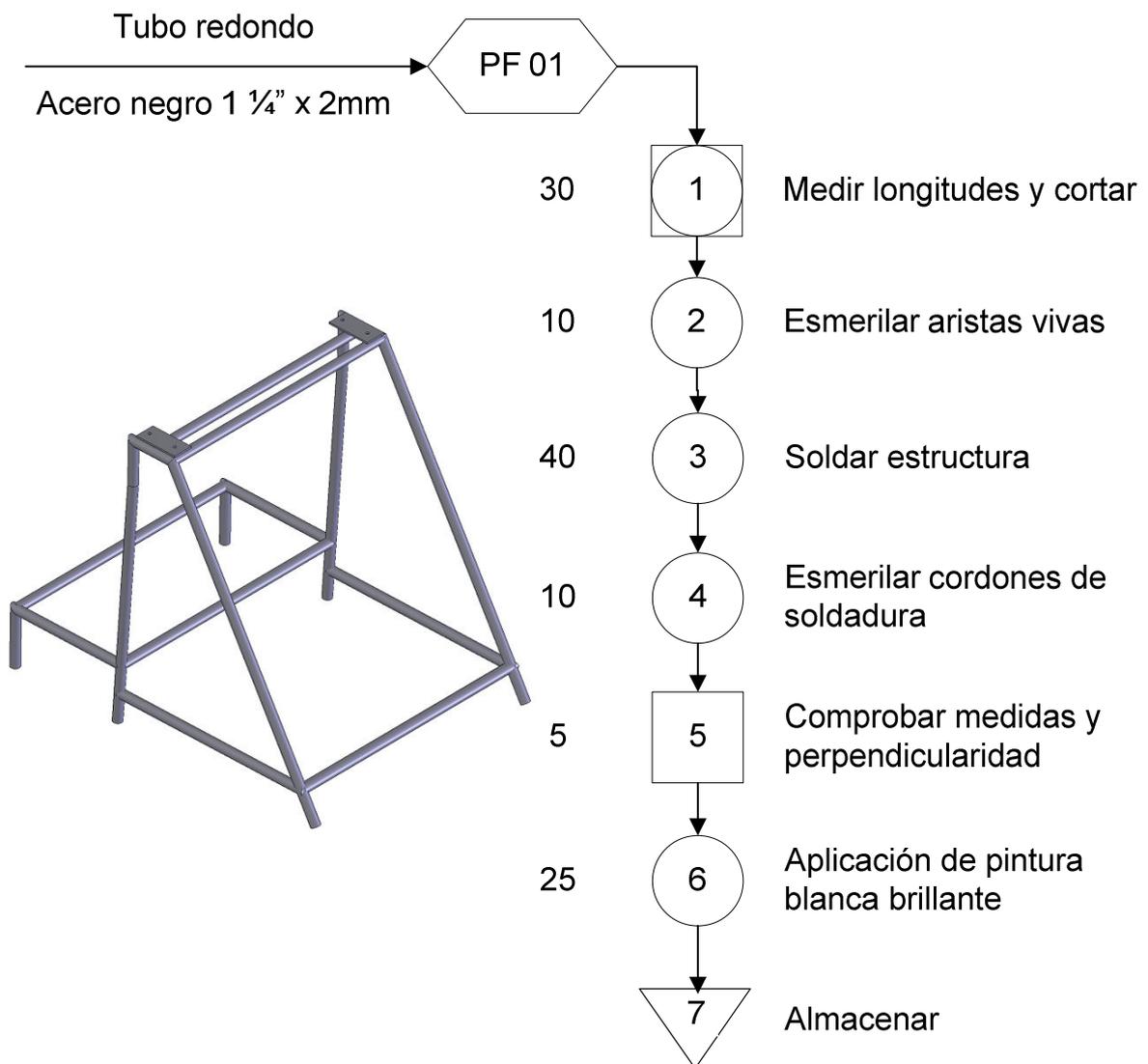


Diagrama 5.1. Diagrama de procesos de estructura soporte

5.1.2 Soporte cilíndrico

En este se empernar la antena mediante diez pernos y sirve de soporte y de agarre de la antena, en el soporte cilíndrico este se encuentran empernadas dos orejas y a su vez en estas están soldados los ejes sobre el cual la antena va a realizar la rotación de 160°, los ejes debes estar perfectamente alineados entre si.

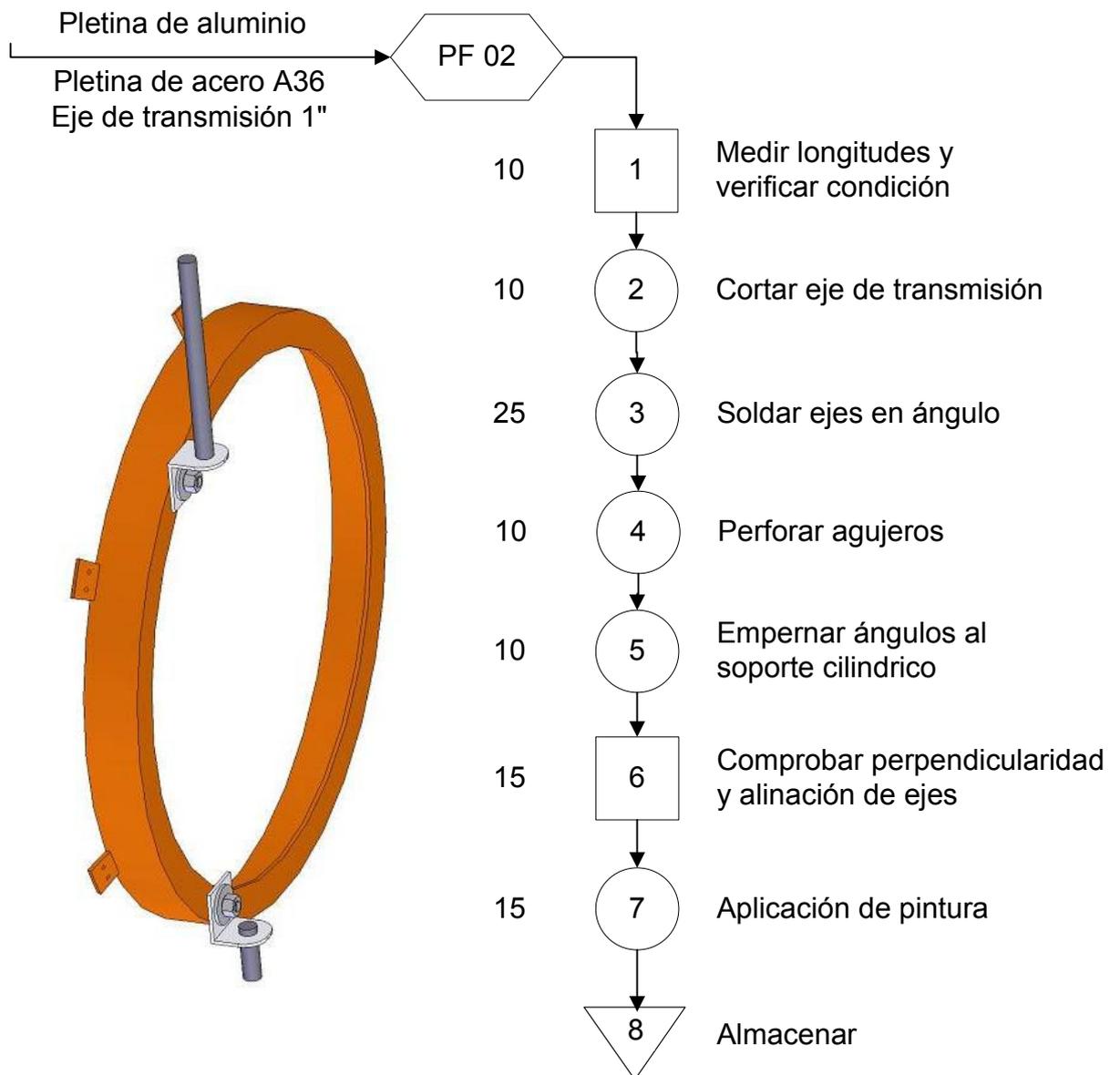


Diagrama 5.2. Diagrama de procesos de soporte circular

5.1.3 Pedestal para motor

El pedestal esta construido de tal manera que por el interior del tubo vertical se puedan colocar los alambres que van a ir conectados desde el motor de DC a la resistencia. Tiene soldado un perno en la parte superior con el fin de que variar el foco en donde se va a encontrar el motor.

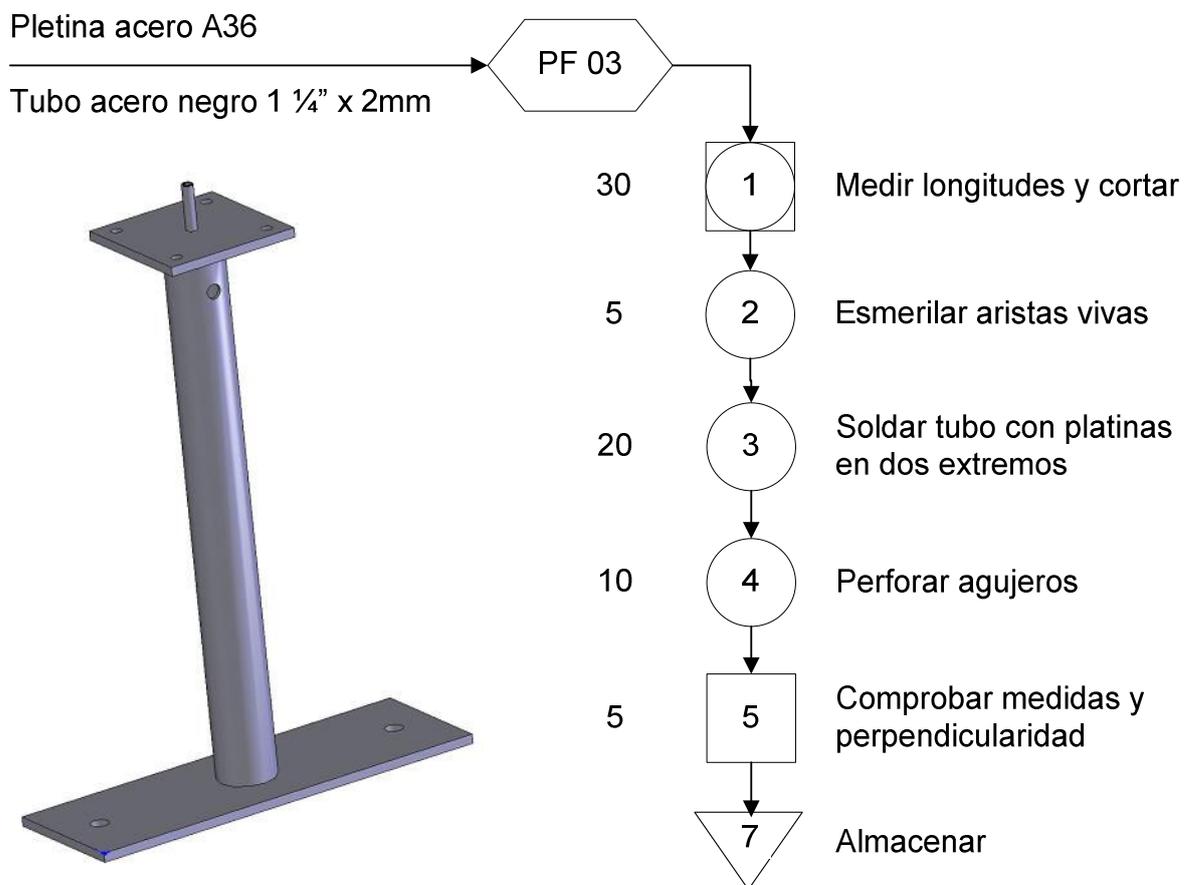


Diagrama 5.3. Diagrama de procesos de pedestal del motor

5.1.4 Trabador de freno

Este pletina circular cumple la función de trabador en conjunto con el freno y el bocin, aquí se marcaran los distintos grados de acuerdo a la posición en la que se encuentre el sol.

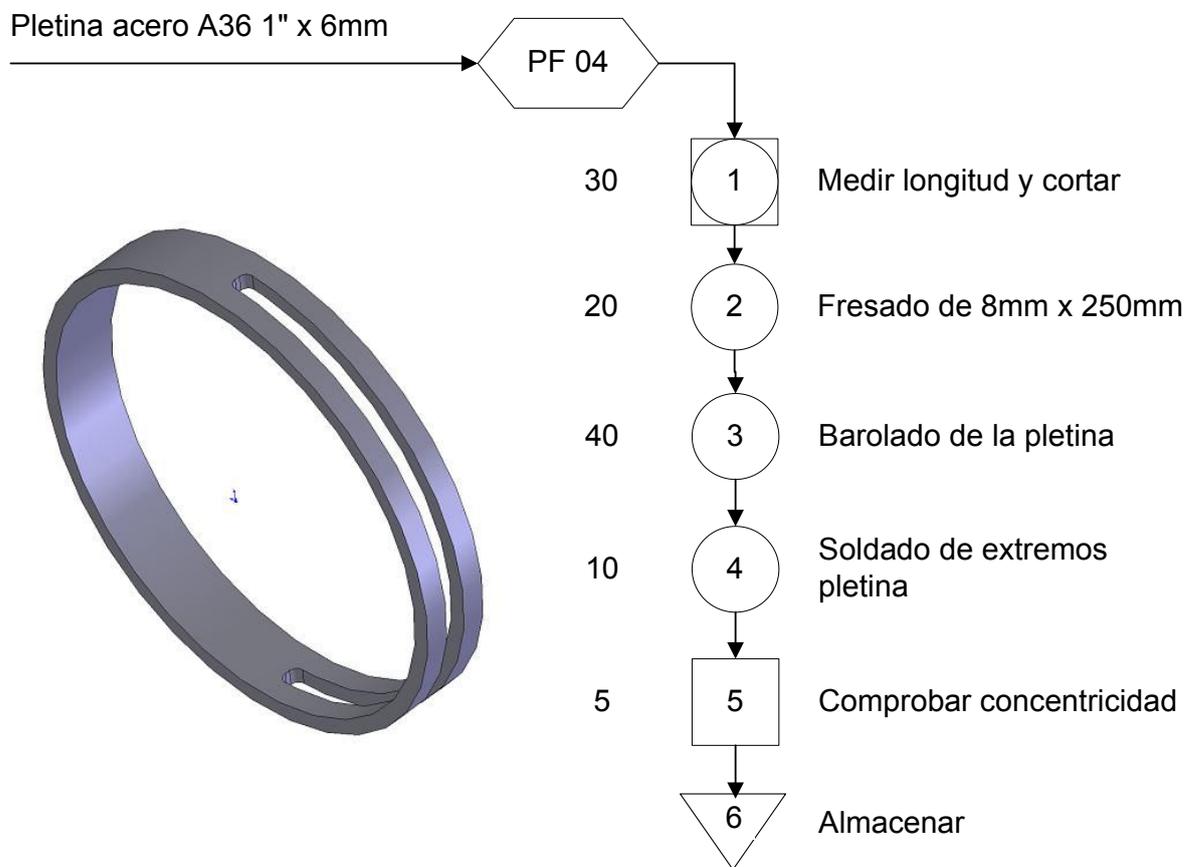


Diagrama 5.4. Diagrama de procesos de trabador freno

5.1.5 Bocin y freno

El bocin va a estar acoplado al eje através de un pasador, este pasa por la parte media del trabador y gracias al freno el cual se ajusta con el bocin por medio de pernos se puede fijar la antena en una posición fija.

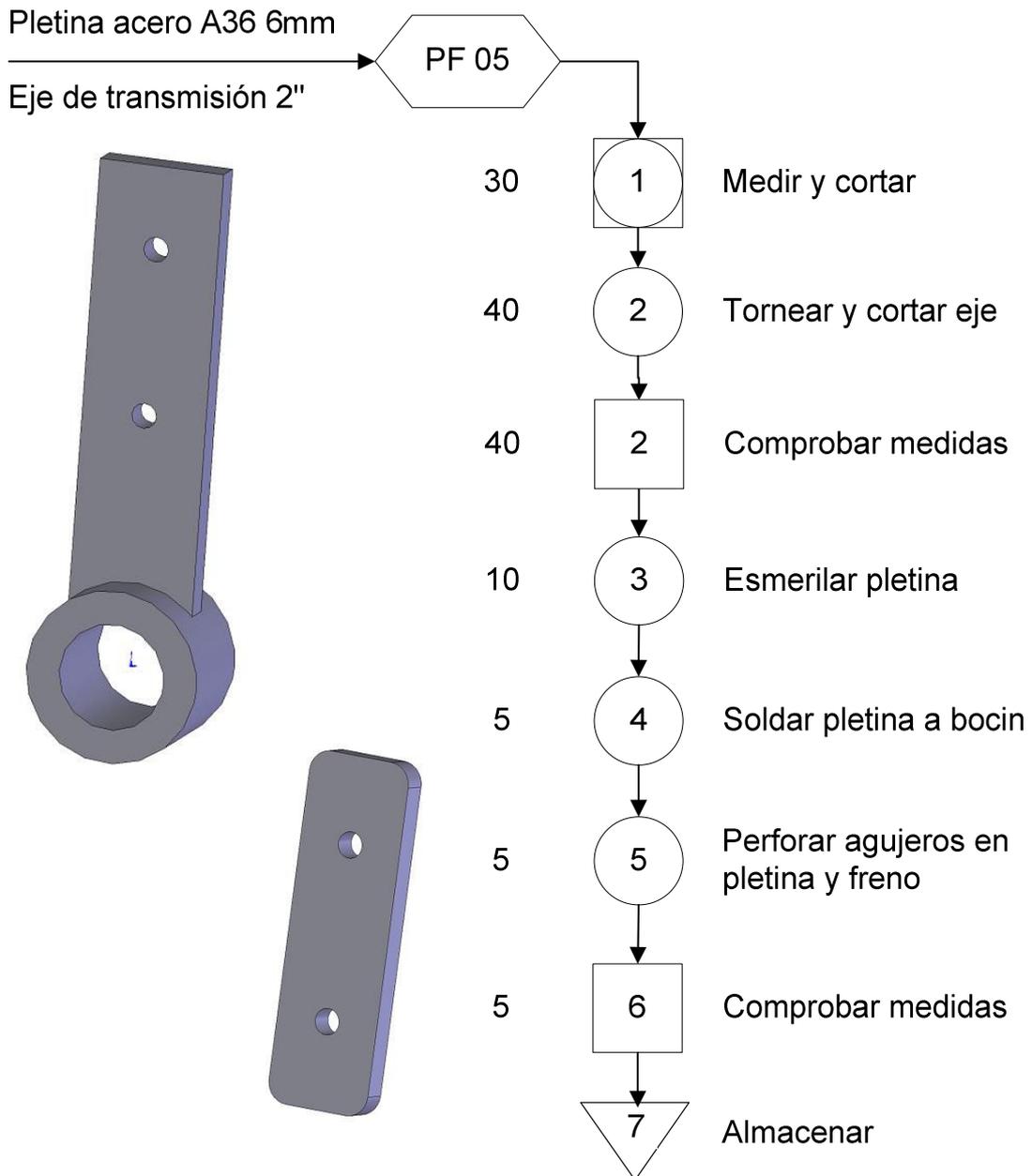


Diagrama 5.5. Diagrama de procesos de bocin y freno

A continuación se detalla el proceso de construcción de todo el conjunto concentrador solar parabólico - Stirling, y de las parte o elementos que no han sido construidos pero se acoplaran a todo el sistema, como por ejemplo el motor Stirling y el motor DC (generador).

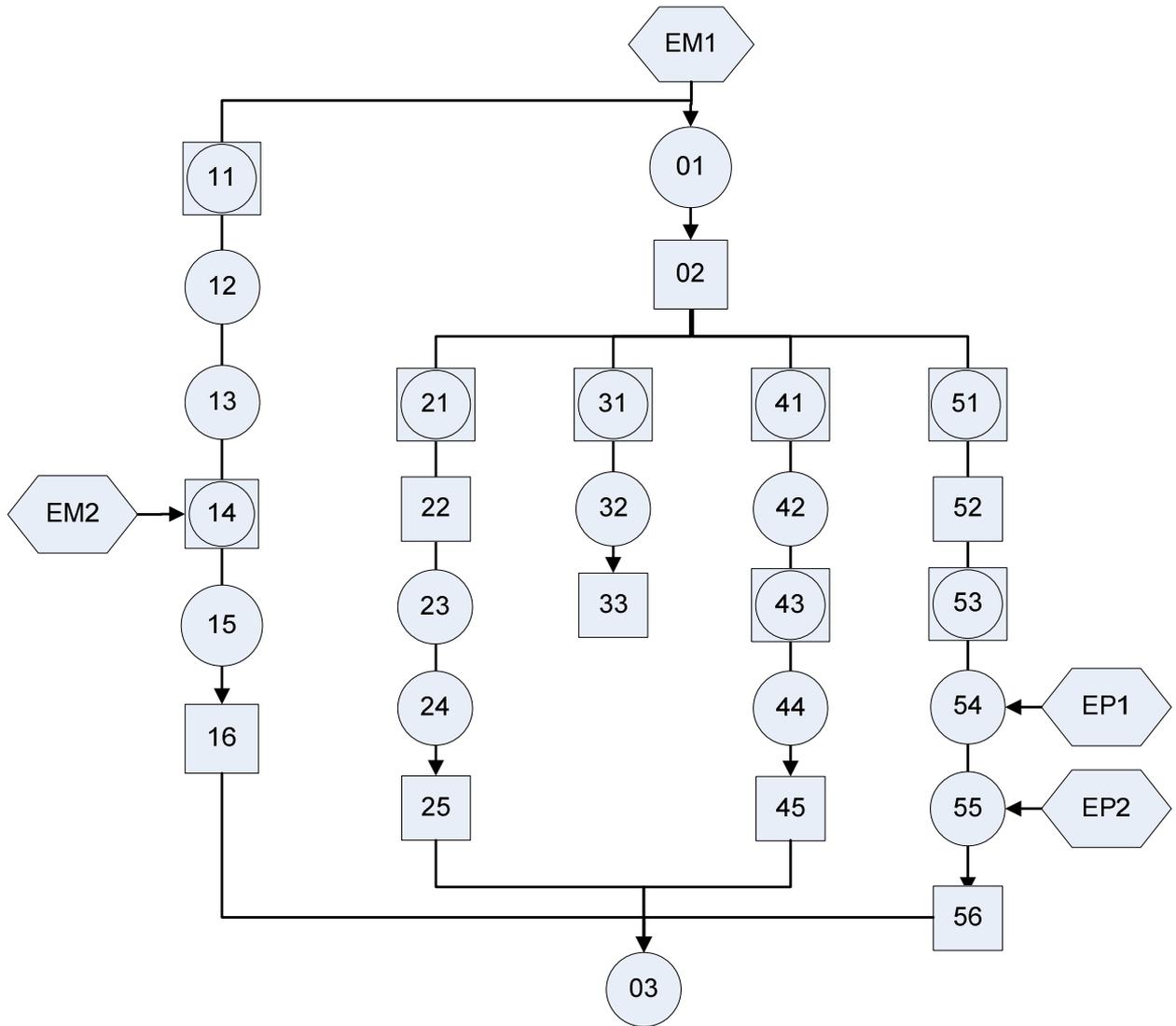


Diagrama 5.6. Diagrama de flujo del proceso de construcción

En este diagrama podemos observar, que no se realiza ningún proceso de construcción en la antena, ya que se disponía de esta parte, solo se realizan procesos de puesta a punto como es la preparación de la superficie de la misma para el pegado de el materia reflectivo y trabajo de pintura para su conservación a

exposición exterior. De igual manera se establece en que parte del proceso entran los respectivos motores, los cuales tampoco fueron construidos.

Tabla 5.2. Nomenclatura del diagrama de flujo de procesos

DESCRIPCIÓN	
EM1	Entrada de Materiales
EM2	Entrada de material reflector
EP1	Entrada de Motor Stirling
EP2	Entrada de Motor DC
1	Cortado general de piezas y aceros
2	Inspección General
3	Ensamble de las partes
11	Inspección de la antena original
12	Despintar la antena y dejar una superficie limpia
13	Pintar la parte exterior de la antena
14	Cortar y agregar el material reflectante
15	Asegurar el material reflectante
16	Inspección y asegurar el material reflectante
21	Soldado de piezas estructura
22	Inspección
23	Pintado de estructura
24	Colocación de ruedas y pernos
25	Inspección
31	Soldado de ejes a soporte circular
32	Ajuste de ángulos de soporte y soldado de ejes
33	Inspección
41	Fresado de pletina
42	Rolado de pletina
43	Soldado de pletina y corte y agujeros de frenos
44	Pintura de sistema de freno
45	Inspección
51	Soldado de soporte para Motor Stirling
52	Inspección
53	Corte de soporte para generador
54	Acoplamiento Motor Stirling
55	Acoplamiento Generador
56	Inspección

5.2 ESTRUCTURA SOPORTE

SopORTE: Estructura de acero que debe soportar la carga total del equipo (Eje de la parábola, chumaceras, soporte circular y la parábola de 50 Kgr aproximado); está diseñado para soportar el peso en las diferentes posiciones en las que se encuentre la antena.



Figura 5.1. Soporte de acero del concentrador

Esta estructura esta diseñada para que la antena se mueva libremente 120° para que pueda recibir el sol durante todo el día y a la vez con 40° más de libertad para que la antena se la pueda poner en una posición de guardado cuando no este en uso.

Soporte Circular: Este soporte cumple la función de sostener al disco parabólico (antena), en éste se hallan las orejas donde se encuentran soldados los pedazos de eje sobre el cual va a girar la antena.



Figura 5.2. Soporte circular de aluminio y eje acero

Sobre el soporte y ejes se sostiene la parábola reflectante; el eje permite el movimiento de rotación de la parábola que hace que se mantenga el foco en la misma posición al rotar con el movimiento del sol; van incluidas las chumaceras y el soporte circular de la antena en donde se encuentra empotrado el eje. Consta de un sistema manual de posicionamiento y un sistema de freno. El freno está formado por platinas de aceros y un bocin adaptado al eje.



Figura 5.3. Sistema de freno para posicionamiento correcto

Los planos del soporte se encuentran adjuntos en el **Anexo C** – Estructura

5.3 PARABOLOIDE ESFÉRICO

Parábola reflectante: Es la parte más importante del equipo, por cuanto soporta la superficie reflectante, debe tener un buen acabado, sobre cuya superficie se coloca la película de aluminio, también conocida comercialmente como polarizado tipo espejo. Se realizó un molde de forma triangular para evitar que el polarizado se arrugue y se obtenga la mayor reflectividad; así se espera obtener resultados óptimos adecuados en la concentración de la energía.



Figura 5.4. Colocación de película sobre la antena: (a) Colocación inicial
(b) Antena terminada

El paraboloide del presente proyecto, era una antena para transmisión de datos, la cual no estaba siendo usada por el Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos - Clirsen, ya que en esta Institución se están mudando a distintas tecnologías en la trasmisión de datos.

La antena, por lo tanto, fue despintada y re pintada, para obtener una superficie apta para la colocación de la película de aluminio, después se aseguraron los fillos de la película con cinta adhesiva de aluminio para obtener una mayor resistencia en los bordes.

Los planos del paraboloide esta adjuntos en el **Anexo C** – Paraboloide Esférico

5.4 ACOPLAMIENTO DEL MOTOR STIRLING

Motor Stirling: El motor es de marca Sun Runner, tiene gran capacidad de transformar energía calorífica en energía mecánica, recibiendo todo el calor sobre una tapa de acero, la cual soporta temperaturas de 600°C a 800°C y alcanza velocidades de 1,000 Rpm y superiores. El peso es de 6.00 lb. y las dimensiones del motor largo, 8.25" y ancho 3", con un volante de inercia de 3.25".

Soporte de motor: Está formado por un tubo de 30 centímetros de largo de 1 ¼" de espesor y tiene una platina cuadrada donde descansa el motor, el cual se acopla a este soporte mediante un perno que se enrosca en la parte inferior.



Figura 5.5. Soporte de motor acoplado a la antena

Los planos del motor Stirling están adjuntos en el **Anexo C** – Acoplamiento Motor

5.5 ENSAMBLAJE DE PARTES

El ensamble del sistema concentrador cilíndrico parabólico – stirling está adjunto en el **Anexo C** – Ensamble Final

5.6 CRITERIOS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL

Algunas consideraciones que deben tenerse en cuenta en la elaboración del concentrador solar y otras, con respecto al uso normal en las diferentes pruebas.

Construcción del concentrador

- Uso de ropa trabajo adecuada.
- Protección para manos y ojos (guantes y gafas de seguridad)
- Mascarillas de protección cuando se usan productos inflamables (removedor o pinturas).

Uso del concentrador solar

- Uso de gafas oscuras cuando la antena este expuesta al sol ya que la radiación solar puede afectarnos la vista.
- Guantes para acercarse al foco y poder manipular el motor.
- Permanecer alejado del foco
- Ajustar bien el freno en la posición adecuada.
- Ajustar las garruchas de seguridad, para que no se mueva el sistema concentrador.

CAPITULO VI

PRUEBAS DE OPERACIÓN

6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS

Se detalla e indican las características técnicas del concentrador solar parabólico, para la correcta instalación y posterior funcionamiento del equipo, el cual servirá como respaldo para la correcta operación. El protocolo de pruebas que corresponde a este equipo consta en el **anexo E**.

6.2 TOMA DE DATOS

A continuación, se detallan las variables que influyen en el funcionamiento, y que cuantifican en el desempeño de colector solar parabólico para la generación de electricidad:

- Diámetro de apertura del colector parabólico
- Radio del receptor en el motor stirling
- El foco del colector parabólico
- Área no sombreada
- Temperatura ambiente
- Temperatura en el receptor
- Irradiancia solar
- Velocidad del viento
- Temperatura interna del receptor (agua – vapor)

- Hora de la medición

Se deberán determinar:

- El ángulo de borde
- Altura de la superficie de recepción del motor stirling
- Razón de concentración
- Foco óptimo
- Temperatura del viento
- Coeficiente de convección
- Voltaje
- Intensidad eléctrica
- Potencia térmica
- Calor útil
- La eficiencia del sistema

Para realizar la toma de datos e radiación primero se deberá hallar la ecuación correspondiente al comportamiento del radiografo, partiendo de los datos de la carta de operación del equipo incluida en el **anexo-A**.

6.3 TABLA DE DATOS

Datos experimentales

Tabla 6.1. Tabulación de datos - 2008/11

Hora	Grados	Irradiancia (mA)	Irradiancia (W/m ²)	Vviento (m/s)	Tamb (°C)	Tr teórica (°K)	Tr real °C	Voltaje (V)	Intensidad (A)
9:00	15	37,1	247,313	0,3	19,7	722,9	446,1	5,04	0,12
9:30	22,5	39,8	265,640	0,4	22,5	735,9	448,4	5,05	0,13
10:00	30	40,1	267,677	0,4	24,4	737,3	439,8	5,05	0,13
10:30	37,5	43,3	289,398	0,5	25,2	751,8	442,4	4,19	0,12
11:00	45	46,7	312,476	0,5	25,8	766,4	440,3	5,01	0,13
11:30	52,5	48,9	327,409	0,3	26,9	775,4	447,6	5,05	0,13
12:00	60	48,9	327,409	0,4	25,6	775,4	440,1	5,02	0,12
12:30	67,5	47,8	319,943	0,3	27,8	770,9	438,7	4,96	0,12
13:00	75	46,7	312,476	0,5	27,7	766,4	441,2	4,96	0,13
13:30	82,5	47,5	317,906	0,3	28,4	769,7	436,3	4,91	0,12
14:00	90	42,2	281,931	0,5	28,1	746,9	442,9	4,96	0,13
14:30	97,5	43,4	290,076	0,4	28	752,3	437,8	4,91	0,12
15:00	105	40,2	268,355	0,4	26,7	737,8	432,5	4,86	0,13

Fuente: F. Zamora / O. Mejía

6.4 TABLA DE RESULTADOS

Tabla 6.2. Resultados - 2008/11

Hora	Q abs (W/m ²)	hc	Tsky (°C)	Qrh (W/m ²)	Qc (W/m ²)	Qu (W/m ²)	η_c (%)	P eléc (W)	$\eta_{Stir-gen}$ (%)	η_s (%)
9:00	31,328	9,831	276,42	3,825	1,351	26,151	31,85%	0,605	60,48%	7,71%
9:30	33,649	11,190	280,40	3,870	1,536	28,242	32,02%	0,657	65,65%	8,41%
10:00	33,907	11,190	283,11	3,681	1,499	28,727	32,33%	0,657	65,65%	8,49%
10:30	36,659	12,372	284,25	3,735	1,664	31,259	32,53%	0,503	50,28%	6,54%
11:00	39,582	12,372	285,11	3,689	1,653	34,240	33,00%	0,651	65,13%	8,60%
11:30	41,474	9,831	286,68	3,844	1,333	36,296	33,39%	0,657	65,65%	8,77%
12:00	41,474	11,190	284,82	3,685	1,495	36,293	33,39%	0,602	60,24%	8,05%
12:30	40,528	9,831	287,98	3,651	1,302	35,574	33,49%	0,595	59,52%	7,97%
13:00	39,582	12,372	287,83	3,705	1,649	34,228	32,99%	0,645	64,48%	8,51%
13:30	40,270	9,831	288,84	3,600	1,293	35,377	33,52%	0,589	58,92%	7,90%
14:00	35,713	12,372	288,41	3,740	1,654	30,318	32,39%	0,645	64,48%	8,35%
14:30	36,745	11,190	288,26	3,632	1,478	31,634	32,85%	0,589	58,92%	7,74%
15:00	33,993	11,190	286,40	3,525	1,464	29,005	32,56%	0,632	63,18%	8,23%

Fuente: F. Zamora / O. Mejía

Tabla 6.3. Datos generación eléctrica en laboratorio - 2008/11

RPM	Voltaje (V)					Intensidad (mA)
	#1	#2	#3	#4	Media	
300	1,61	1,63	1,62	1,62	1,62	700
400	2,18	2,19	2,21	2,17	2,19	800
500	2,73	2,74	2,75	2,74	2,74	1200
600	3,33	3,29	3,31	3,35	3,32	1200
700	3,8	3,81	3,79	3,83	3,81	1300
800	4,47	4,48	4,46	4,48	4,47	1300
900	5,04	5,01	5,05	5,01	5,03	1300
1000	5,57	5,57	5,59	5,57	5,58	1300

Fuente: F. Zamora / O. Mejía

Cálculo de la irradiación

Para determinar la radiación en W/m^2 , se utiliza la ecuación de la recta proporcionada por el fabricante del instrumento utilizado para determinar la irradiación, la ecuación es:

$$I = 6,7878 \times A - 4,5141 \quad (W/m^2) \quad (6.1)$$

$$I = 6,7878 \times (37,1) - 4,5141$$

$$I = 247,313 \quad W/m^2$$

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico, corresponde a la revisión de los costos de la realización del proyecto de tesis, los mismos que se detallan en el **anexo-F** y corresponden a:

Costo de materiales y construcción del equipo

Para determinar los costos de producción del equipo, es necesario definir ciertos conceptos básicos como son:

- **Costo:** es la valorización monetaria de las necesidades económicas de la producción, corresponde a la suma de recursos y esfuerzos que han de invertirse para la producción de un bien o de un servicio.
- **Costos directos:** son costos que se relacionan directamente con la producción de un bien o servicio.
- **Costos indirectos:** también se denominan costos generales y son costos que no se relacionan directamente con la producción de un bien o servicio
- **Costos de producción:** también llamados costos de operación, son la suma de los costos directos e indirectos.

- **Materia prima directa:** son los materiales que forman parte del producto final.
- **Materia prima indirecta:** también se denominan insumos y estos no forma parte del producto terminado, pero intervienen en la fabricación del mismo, como removedor de pintura, lijas, etc.
- **Mano de obra directa:** es la mano de obra que tienen una relación directa con la producción o la prestación de algún servicio.
- **Mano de obra indirecta:** es la mano de obra consumida en las áreas administrativas o que sirven de apoyo para la producción, como la ayuda de un asesor, en este caso en particular la colaboración del director y el codirector del proyecto de grado.
- **Imprevistos:** son aquellos gastos en los cuales se incurre de manera inesperada o accidental. Se relacionan directamente con los niveles de riesgo del Proyecto. No incluyen estos costos, lo que se conoce en el medio como “fuerza mayor”, correspondientes desastres naturales, técnicos o económicos difícilmente previsible que afecten costo económico del proyecto. Los imprevistos pueden variar entre un 5 y un 15% de los otros costos, pudiendo aplicarse tasas diferentes para cada tipo de costo.

7.2 ANÁLISIS FINANCIERO

El análisis financiero detalla la viabilidad para que se ejecute el proyecto, refiriéndose al posible mercado para su comercialización y una comparación de costos de generación.

Mercado Potencial

Primero se considerará, que aunque el Ecuador recibe grandes cantidades de radiación, el único tipo de radiación que interesa es la radiación directa, esta no está disponibles durante todo el año en los niveles necesarios de irradiancia, debido a los altos índices de nubosidad, los cuales limitan la aplicación de la energía solar concentrada solo a ciertas zonas del país, partiendo del **anexo A**, las zonas a tomar en cuenta son las que tienen niveles de radiación directa entre 200 y 350 $\frac{W}{m^2}$.

Luego, su aplicación estará destinada al sector de generación eléctrica, donde el suministro de energía eléctrica es nulo debido a su ubicación geográfica, siendo orientado explícitamente al Ministerio de Energía No Renovables, organismo que está encargado de la generación y suministro de la energía eléctrica en el país.

Se debe tener en cuenta, los costos de generación, los cuales se presentan en la tabla 7.1, la potencia requerida y el costo/beneficio.

Tabla 7.1 Costo de Generadores

Potencia de la Turbina	Costo (\$/Kw) de la turbina	Costo (\$/m ²)
0.2 Kw	13000	1000
0.4 Kw	5500	700
1 Kw	2500	430
2 Kw	2100	400
3.5 Kw	2000	390
4.5 Kw	1700	370
6.5 Kw	1500	350

Fuente: <http://www.cubasolar.cu>

En la tabla 7.1 podemos observar que los costos de los generadores descritos disminuyen a medida que la potencia que generan aumenta. Esto se debe a que de esta manera los generadores se muestran competitivos con los sistemas fotovoltaicos, porque en éstos los costos se mantienen casi invariables.

A continuación se presenta una valoración porcentual de los costos promedio para un sistema de potencia de 1KW

Tabla 7.2 Valoración porcentual de costos.

Item	Costo (USD)	Porcentaje (%)
Motor stirling*	3200	58,18
Paraboloide de concentración $\phi 6m$	1000	18,18
Estructura metálica	500	9,09
Mano de obra	500	9,09
Mantenimiento	300	5,45
TOTAL	5500	100,00

*El valor del motor stirling, no incluye valores de importación y es un valor comercial en USA

Análisis de pérdidas y ganancias

Tabla 7.3 Estado de perdidas y ganancias

Item	Costos Fijos	Costos variables
Mano de obra directa	1400,00	
Materia prima directa		1396,22
Pago asesores del proyecto	200,00	
Insumos		34,75
Misceláneos		150,00
Depreciación 10% anual	349,91	
Imprevistos 10%		318,10
TOTAL	1949,91	1899,07

Fuente: Autores

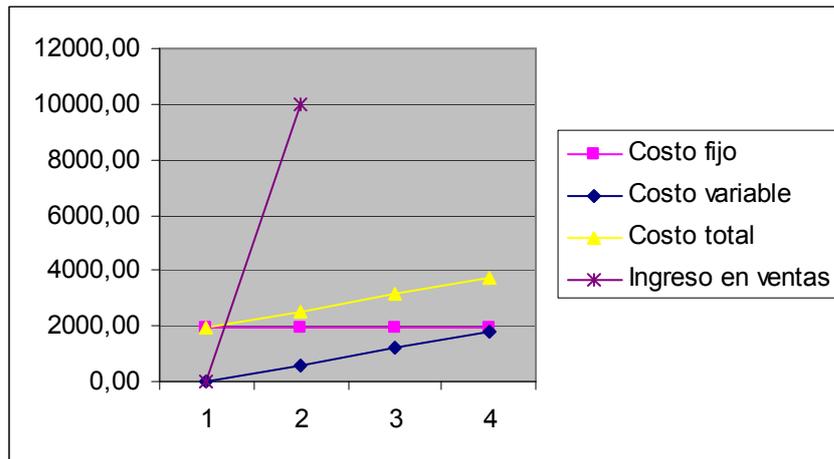


Figura 7.1. Estado de estado de perdidas y ganancias

En la figura 7.1 se observa que podría ser rentable la producción en serie, ya que no se necesitan de muchas unidades para recuperar lo invertido, por tanto se analizara el tiempo necesario para recuperar la inversión.

Al realizar el análisis del valor actual neto **VAN** a partir de la tabla 7.3, se tiene:

Tabla 7.4 Valor actual neto

VAN	i (%)
-3.395,90	0,5
-2.656,80	1
-910,95	5
-498,46	10
-343,05	15

Fuente: Autores

Si, **VAN>0**, entonces el proyecto es rentable

Con los valores de la tabla 7.4 se observa que el proyecto no es rentable.

El tiempo para recuperar la inversión de un sistema concentrador-Stirling de 1 KW/h, si una familia promedio de 4 personas en el Ecuador consumen mensualmente un promedio 200 KW/h a USD 0.07¹⁴.

¹⁴ Fuente Empresa Eléctrica Quito

Tabla 7.5 Análisis de TIR

Inversión inicial	5500
Ahorro año 1	168
Ahorro año 2	184,80
Ahorro año 3	203,28
Ahorro año 4	223,61
Ahorro año 5	245,97
Ahorro año 6	270,57
TIR	-8%

Fuente: Autores

Por último, se presentan datos sobre los diferentes costos de venta de la energía eléctrica

Tabla 7.6 Comparación de costo de venta de energía

Tipo de Energía	Costo por Kwh (USD)
Eólica	0,02
Hidráulica	0,07
Térmica	0,06
Solar fotovoltaica	8,75
Mareomotriz*	0,11
Nuclear*	0,06
Solar-Stirling	2,5 - 4,4

*Este tipo de energía no está disponible en Ecuador.

El sistema concentrador solar parabólico-stirling, es un sistema que produce energía a un alto precio, comparados con otros sistemas de producción de energía como hidráulica y eólica. Pero también se debe tomar en cuenta que es un sistema que se encuentra en etapa de prueba, las proyecciones que tiene sin embargo son aceptables, a largo plazo y se detallan en la siguiente tabla 7.7.

Tabla 7.7 Proyección de costos del concentrador parabólico-stirling

	Corto plazo	Corto plazo	Corto plazo	Medio-plazo (~5 años)	Largo-plazo (~10 años)	Largo-plazo (~10 años)
Ciclo eléctrico	Rankine	Rankine	ISCC	Rankine	Rankine	Rankine
Campo solar (.000m ²)	193	1210	183	1151	1046	1939
Almacenamiento (h)	0	0	0	0	0	9-12
Capacidad solar (MW)	30	200	30	200	200	200
Capacidad total (MW)	30	200	130	200	200	200
Factor capacidad solar	25%	25%	25%	25%	25%	50%
Eficiencia solar anual	12.5%	13.3%	13.7%	14.0%	16.2%	16.6%
Costes capital (\$/kW)						
Central EEUU	3500	2400	3100	2100	1800	2500
Internacional	3000	2000	2600	1750	1600	2100
Coste O&M (\$/kWh)	0.023	0.011	0.011	0.009	0.007	0.005
LEC solar (\$/kWh)	0.166	0.101	0.148	0.080	0.060	0.061

Fuente: Greenpeace.org

Con el tiempo, la tecnología solar térmica habrá aumentado su nivel comercial, esto se debe a que en la actualidad tiene altos costos de generación, con la capacidad instalada de sólo 354 MW. Para el 2015 la capacidad total instalada de centrales eléctricas termo-solares habrá alcanzado los 5.000MW. Para el 2020 la capacidad adicional estaría aumentando a razón de casi 4.500 MW al año. Para el 2020, la capacidad total instalada en el mundo de energía solar térmica habrá alcanzado 21.540 MW, para el 2030 la capacidad mundial habrá alcanzado 106.000 MW, y para el 2040 un nivel de casi 630.000 MW. El aumento de disponibilidad de las centrales, debido al mayor uso de tecnologías eficaces de almacenamiento, también aumentará la cantidad de electricidad generada por una capacidad instalada dada. El resultado proyectado será que para el 2040 más del 5% de la demanda eléctrica mundial podría satisfacerse con energía solar térmica.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- Se cumplió con el objetivo del proyecto, se logró aprovechar la energía solar que se encuentra incidiendo de manera constante sobre la superficie terrestre, transformando de irradiación solar a energía eléctrica.
- Con el concentrador parabólico de 1.8m de diámetro usado para el proyecto, se puede recolectar una potencia máxima de 350.646 W con una irradiancia máxima de $327,049 \frac{W}{m^2}$, siempre que se trabaje en un día completamente despejado. Tomado en cuenta el mapa de irradiancia directa del INAMHI, da un valor máximo de $350 \frac{W}{m^2}$, considerando que las mediciones fueron realizadas durante el invierno.
- El diseño de la estructura de soporte donde se encuentra el concentrador, no solo debe contemplar la parte estructural y de resistencia, sino que a su vez la parte funcional y operacional. Por esta razón, se lo construyó con tal disposición, para que el concentrador se mueva libremente en su recorrido de posicionamiento con el sol.

- Debido a su alto costo, su comercialización estará limitada al uso en laboratorio para su desarrollo tecnológico, debido a que se halla en período de pruebas; los costos son altos para su comercialización y no serían competitivos con las actuales formas de generación de electricidad. El KW/h de energía hidráulica es de casi 7cvs de dólar, mientras que la proyección comercial en países industrializados, que emplean tecnología concentrada-Stirling se encuentra entre los 2,5 a 4,4 dólares el KW/h. Se estableció que el uso de concentradores solares parabólicos será una realidad a largo plazo.
- El motor funciona en toda su capacidad usando solo un 13% del área útil de la antena.
- La película de aluminio tipo espejo como superficie reflectiva presenta una mayor eficiencia de transmisión, en comparación con otros materiales como el aluminio u otras películas reflectivas.
- El acabado de la superficie que cubre la antena debe ser lo mas lisa posible, para evitar altos índices de dispersión.
- Si las investigaciones con respecto a concentradores solares, siguen mejorando tanto en tecnología como en la disminución de costos, se esperaría que para dentro de 30 años la demanda global de energía eléctrica, que se podría satisfacer con electricidad solar térmica, habrá alcanzado una cuota del 5%, con este porcentaje se habrá logrado disminuir en algo el impacto del uso de combustibles fósiles.

8.2 RECOMENDACIONES

- Para aprovechar toda la energía que se concentra, se debe ubicar en el foco de la parábola un motor Stirling de mayor capacidad.
- Para el modelo, se usó película de aluminio como material reflectivo en la superficie del paraboloides pero, se podría emplear material con un coeficiente más alto de reflectividad para aumentar porcentaje de reflexión hacia el receptor.
- El uso de un sistema de seguimiento automatizado nos permitirá el aprovechar al máximo, el tiempo de uso del equipo y de manera más exacta establecer perpendicularidad de la superficie del concentrador y los rayos del sol.
- El sistema de concentrador – Stirling debería formar parte de los equipos usados dentro de la cátedra de Energías No Convencionales, como un apoyo para demostrar y complementar de forma práctica lo aprendido en clases, así como también ayudar al desarrollo y mejoramiento de sistemas similares.
- Dado el impacto ambiental causado por los combustibles fósiles, en las personas, animales, plantas, así como en el clima, es necesario preparar planes de desarrollo de energías limpias, para que de esta manera podamos evitar o revertir el efecto invernadero.
- Establecer políticas sociales del uso de energías alternativa y a su vez establecer políticas económicas para subsidiar a empresas que impulsen y usen energías que no produzcan daños al medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

Referencia bibliográfica

- INCROPERA, F.P., DEWIT, D.P. Fundamentos de transferencia de calor. Prentice Hall, 1996, p. 633-688.
- GREENPEACE. *Energía solar termoeléctrica. 2020 Pasos firmes contra el cambio climático.*
- European Solar Thermal Power Industry Association (ESTIA)
- MARIMÓN, *Jose María*. Abengoa Solar, Solar Power for a Sustainable World.
- SÁNCHEZ, Fernando; Estudio CENCER, Energía Solar; Nov. 2004.
- GUTIERREZ, Wladimir; Implementación de equipo concentrador solar parabólico tipo scheffler; Dic. 2005.
- HORACIO, J. [et. al]. Aprovechamiento de la energía en forma térmica para la producción de energía eléctrica.
- PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA.
www.psa.es/webesp/instalaciones/discos.html
- RUIZ, V., SILVA, M., LILLO, I. Laboratorios del grupo de termodinámica y energías renovables. Ingenio. Núm. 23, 2005, p. 24-29.
- ROBOTIKER TECNALLA. *Tipos de motores Stirling*. Núm. 7.
<http://revista.robotiker.com/articulos/articulo40/pagina1.jsp>
<http://revista.robotiker.com/articulos/articulo40/pagina2.jsp>
- JARAMILLO, OSCAR ALFREDO; Transporte de energía solar concentrada a través de fibras ópticas: Acoplamiento fibra-concentrador y estudio térmico; Temixco, 1998.

Fuentes de información complementarias

www.greenpeace.org/raw/content/espana/reports/solar-termoelectrica-2020-pas.pdf

<http://fing.uncu.edu.ar/energiasolar/solarstirling.pdf>

www.censolar.com

www.recosol.net

www.solarco.com

www.solarcooking.org

www.cne.cl

