



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: JORGE LEONARDO SUNTAXI CAIZA

**TEMA: “CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE
HIDROCONVERSIÓN DE LA LUZ SOLAR PARA APLICACIONES DE MEDIA
TEMPERATURA UTILIZANDO UNALENTE DE FORMA PARABÓLICA”**

**DIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA
CODIRECTOR: ING. FRANCISCO TERNEUS**

SANGOLQUÍ, FEBRERO DEL 2014

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE HIDROCONVERSIÓN DE LA LUZ SOLAR PARA APLICACIONES DE MEDIA TEMPERATURA UTILIZANDO UNA LENTE DE FORMA PARABÓLICA” fue realizado en su totalidad por Jorge Leonardo Suntaxi, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Guasumba

DIRECTOR

Ing. Francisco Terneus

CODIRECTOR

Sangolquí, 29 de Enero del 2014

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**YO, JORGE LEONARDO SUNTAXI CAIZA**

DECLARO QUE:

La tesis/proyecto de grado titulado **“CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE HIDROCONVERSIÓN DE LA LUZ SOLAR PARA APLICACIONES DE MEDIA TEMPERATURA UTILIZANDO UNALENTE DE FORMA PARABÓLICA”**, ha sido desarrollada en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas y notas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis/proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Diciembre del 2013

Sr. Jorge Leonardo Suntaxi

1709219149

AUTORIZACIÓN

Yo, Jorge Leonardo Suntaxi Caiza

Autorizó, a la Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE HIDROCONVERSIÓN DE LA LUZ SOLAR PARA APLICACIONES DE MEDIA TEMPERATURA UTILIZANDO UNALENTE DE FORMA PARABÓLICA”, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría”

Sangolquí, 29 de Enero del 2014

Sr. Jorge Leonardo Suntaxi Caiza

DEDICATORIA

La elaboración de este proyecto lo dedico a mi Padre(+), a mi Madre que me enseñaron a volar, pero no volarán mi vuelo, me enseñaron a soñar, pero no soñarán mi sueño, me enseñaron a vivir pero no vivirán mi vida, sin embargo en cada vuelo, en cada vida, en cada sueño, perdurará siempre la huella del camino enseñado.

Tambièn quiero dedicar este proyecto a una persona muy especial como lo es mi esposa Xime, que gracias a su constantante e invaluable apoyo nunca deje de luchar por conseguir esta meta alcanzada, a mis hijas Andrea y Daniela quienes fueron y serán siempre mi motivación

Jorge Sntaxi C

Autor

AGRADECIMIENTOS

- Gracias a Dios por las bendiciones que derramas cada día sobre mi familia
- A mi padre (+), que lamentablemente no podrá ver cumplido uno de sus más grandes anhelos como lo es la culminación de mi carrera.
- A mi madre que aún sigue confiando en que los valores que me pudo transmitir y enseñar como son: paciencia, responsabilidad y esfuerzo permitirán superar cualquier obstáculo de la vida para culminar con éxito lo que se emprende.
- Agradezco a quienes conforman la Carrera de Ingeniería Mecánica, por sus experiencias y conocimientos impartidos en esta noble institución durante mi etapa de formación.
- A mi Director Ing. José Guásumba y Codirector de Tesis Ing. Francisco Terneus, profesionales a carta cabal, por sus consejos, enseñanzas, y experiencia me orientaron para alcanzar la culminación del proyecto de una manera exitosa.
- A todas y cada una de las personas que creyeron y depositaron toda la confianza en mi persona lo cual permitió llegar a concluir con éxito este aporte.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	Pág.
Certificaciòn de la elaboraciòn del proyecto.....	i
Autoria de Responsabilidad.....	iii
Autorizaciòn.....	iv
Dedicatoria.....	vii
Agradecimientos.....	ix
Índice de contenidos.....	vi
Índice de fotografias.....	iii
Índice de anexos.....	xv
Nomenclatura.....	xvi
 CAPÍTULO 1	
GENERALIDADES.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definiçòn del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 General.....	4
1.3.2 Especìficos.....	4
1.4 Alcance.....	5
1.5 Justificaciòn e importancia.....	5
 CAPITULO 2.....	7
MARCO TEÒRICO.....	7

2.1 Anàlisis del modelo de radiaciòn directa	7
2.1.1 Radiaciòn electromagnetica	7
2.1.2 La energia del sol	8
2.1.3 Caracterizaciòn de la radiaciòn solar	10
2.2 Tècnicas de estimaciòn de la radiaciòn solar	12
2.2.1 Mètode de Anstrong Page	12
2.2.1.1 Variaciòn de la radiaciòn solar extraterrestre.....	13
2.2.1.2 Posiciòn del sol : coordenadas horarias	13
2.2.1.3 Posiciòn del sol : coordenadas angulares	14
2.2.2 Mètode de Jutglar.....	18
2.2.2.1 Radiaciòn solar extraterrestre.....	16
2.2.2.2 Estimaciòn de la energia solar global incidente sobre el suelo.....	16
2.2.2.3 Càlculo del àngulo de incidencia sobre una superficie plana cualquiera	19
2.2.2.4 Càlculo de la irradiaciòn sobre una superficie inclinada a partir de la horizontal cualquiera.....	21
2.2.3 Mètode de cielo isòtropa.....	23
2.2.4 Otros estudios realizados	23
2.2.4.1 Datos del satellite de la NASA.....	24
2.2.4.2 Datos del sàtelite 3 TIER	24
2.2.4.3 Datos hora sol pico(HSP)l.....	25
2.3 Tecnologia de los concentradores	27
2.3.1 Clasificaciòn de los sistemas solares	27

2.3.2 Principio de diseño de un concentrador solar	28
2.3.3 Relación de concentración	30
2.3.4 Clasificación de los concentradores	30
CAPITULO 3	35
HIDROCONVERSIÓN DE LA LUZ SOLAR	35
3.1 Geometría del modelo experimental	35
3.2 Óptica geométrica	36
3.2.2 Refracción en las lentes delgadas.....	36
3.2.2 Fórmulas de las lentes convergentes	38
3.2.3 Comportamiento óptico de la lente de agua.....	40
3.2.3.1 Eficiencia óptica.....	44
3.2.3.2 Razón de concentración.....	44
3.3 Volumen del paraboloide.....	44
3.4 Análisis térmico	45
3.4.1 Balance de energía	45
3.4.2 Temperatura focal	47
3.5 Resultados experimentales preliminares	47
3.5.1 Radiación solar mediante expresiones matemáticas	47
3.5.1.1 Radiación real.....	50
3.5.1.2 Error porcentual entre radiación teórica y real.....	51
3.5.2 Radiación solar mediante los instrumentos de medición	52
3.5.3 Distancia focal.....	60
3.5.3.1 Cálculo de la distancia focal	60

3.5.3.2 Medición de la distancia de la distancia focal	61
3.5.3.3 Càlculo de la temperatura focal.....	61
3.5.3.4 Temperatura experimental.....	62
CAPITULO 4.....	63
HOMOLOGACIÓN DE LALENTE DE AGUA	63
4.1 Metologia	63
4.2 Cronograma de operaciones tecnològicas.....	64
4.3 Lente concentrador.....	65
4.3.1 Consideraciones preliminares.....	65
4.4 Bastidor o estructura soportante	66
4.5 Sujetador de la lente	68
4.6 Sujetador concentrador focal.....	68
4.7 Extensiòn sujetador concentrador focal	69
4.8 Concentrador focal.....	69
4.9 Selecciòn de materiales	70
4.9.1 Lente de agua	70
4.9.2 Bastidor o estructura soportante.....	73
4.9.3 Sujetador de la lente.....	74
4.9.4 Sujetador concentrador focal.....	75
4.9.5 Extensiòn sujetador del concentrador focal	75
4.10 Instrumentos de medida	77
4.10.1 Tèrmometro infrarojo para alta temperatura con puntero laser	

modelo 42545.....	77
4.10.2 Termoanemòmetro Extech Instruments modelo 407113	78
4.10.3 Medidor de radiaciòn Raydec	79
4.10.4 Higrotermòmetro Extech Instruments.....	80
4.10.5 Cuerpo de prueba	81
4.10.6 Gafas protectoras.....	82
4.10.7 Guantes.....	82
4.10.8 Gorro protector.....	83
4.11 Toma de datos	83
4.12 Anàlisis de datos y discusiòn	87
4.12.1 Magnitudes y sìmbolos relacionados con el modelo matematico del concentrador.....	87
4.12.1.1 Propiedades superficiales de los materiales.....	88
4.12.2 Càlculo de la temperatura focal.....	89
CAPITULO 5.....	93
APLICACIONES FUTURAS DEL EXPERIMENTO.....	93
5.1 Vaporizaciòn	93
5.1.1 Paràmetros termofìsicos.....	93
5.1.2 Concentrador	93
5.1.3 Balance de energìa final	100
5.2 Mejoramiento superficial de materiales	100
5.2.1 Tratamiento tèrmico.....	101
5.2.2 Cladding.....	105

CAPITULO 6	107
ANALISIS ECONOMICO	107
6.1 Costos directos	107
6.2 Costos indirectos	109
6.3 Costos de producciòn	110
6.4 Gastos administrativos	111
6.5 Servicios especializados.....	112
CAPITULO 7	113
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
7.1 Conclusiones	113
7.2 Recomendaciones.....	114
BIBLIOGRAFÍA	116

ÍNDICE DE FIGURAS

No Figura	Contenido	Pág.
2.1	Irradiancia espectral solar ($P(\lambda)$).....	9
2.2	Balance de radiación en la Tierra.....	10
2.3	Mapa de radiación del Ecuador.....	11
2.4	Posición del sol en Coordenadas horarias.....	14
2.5	Posición del sol en Coordenadas angulares.....	15
2.6	Posición de una superficie inclinada.....	20
2.7	Radiación promedio diaria anual.....	24
2.8	Irradiancia vs Tiempo.....	25
2.9	Horas sol pico vs mes.....	27
2.10	Clasificación de los sistemas solares.....	28
2.11	Principio de diseño del concentrador.....	28
2.12	Relación de concentración vs Temperatura.....	29
2.13	Lentes Convencional y de Fresnel.....	30
2.14	Tipos de concentradores solares.....	33
3.1	Modelo Experimental : Geometría.....	35
3.2	Modelo Experimental : Isometría.....	36
3.3	Lentes.....	36
3.4	Convergencia de los rayos paralelos al eje.....	37
3.5	Rayos paralelos a un eje secundario.....	37
3.6	Fórmula de las lentes convergentes.....	38
3.7	Modelo para análisis de reflexión y refracción de la luz.....	40
3.8	Modelo 1 para análisis y obtención de la ecuación de la paràbola.....	41

3.9 Modelo 2 para análisis y obtención de la ecuación de la parábola	43
3.10 Paraboloide de revolución	45
3.11 Desarrollo Experimental: Balance Energético	46
3.12 Radiación Vs Mes del año.....	52
3.13 Gráfico de la Irradiancia tomados a diferentes horas del mes de julio	
Día tipo 22.....	54
3.14 Gráfico de la Temperatura focal en función de la irradiancia del	
mes de julio del día tipo 22.....	56
3.15 Gráfico de la Tempertura del concentrador en función de la irradiancia	
del mes de julio del día tipo 22	58
3.16 Gráfico de la humedad relativa en función de la temperatura	
ambiente del mes de julio del día tipo 22.....	60
4.1 Lente del concentrador parabólico esférico	66
4.2 Estructura soportante.....	67
4.3 Sujetador de la lente	68
4.4 Sujetador del concentrador focal.....	69
4.5 Concentrador focal	70
4.6 Material de empaque o sello(fomix)	71
4.7 Llenado de la lente de agua.....	72
4.8 Concentrador parabòlico esfèrico.....	76
4.9 Termómetro infrarojo para alta temperatura.....	77
4.10 Termoanòmetro.....	79
4.11 Medidor de radiación	80
4.12 Higrotermòmetro.....	81

4.13 Cuerpo de prueba	81
4.14 Gafas protectoras.....	82
4.15 Guantes.....	82
4.16 Gorro protector	83
4.17 Temperatura focal Vs Irradiancia.....	91
4.18 Temperatura focal Vs Irradiancia(ecuaciòn 3.11).....	91
5.1 Luz concentrada por la lente de agua.....	94.
5.2 Diagrama Temperatuta Vs Entropià.....	96
5.3 Profundidad del tratamiento térmico del acero.....	103
5.4 Temple.....	104
5.5 Cladding del acero inoxidable.....	106

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Contenido	Pág.
A: Datos recolectados		117
A.1: Datos recolectados 13 julio 2012		117
A.2: Datos recolectados 15 julio 2012		120
A.3: Datos recolectados 22 julio 2012		123
C: Planos mecánicos		127

NOMENCLATURA

He	Radiación extraterrestre
Ho	Radiación sobre superficie horizontal
I_{sc}	Constante solar
Z	Número de día del año,
ϕ	Latitud
δ	Declinación,
h_s	Angulo horario de la puesta de sol para una superficie horizontal
h	Angulo horario
α	Azimut
β	Altitud
ψ	Cenital
N	Número de horas de brillo solar
a y b	Coefficientes climáticos
K	Indice de nubosidad
H_d	Radiación difusa
H_b	Irradiancia directa sobre superficie inclinada
σ	Coefficiente de insolación
n	Horas de insolación
s	Ángulo formado por la superficie considerada y el plano horizontal
Θ	Ángulo de incidencia de la radiación solar directa

$h_{r,s,w}$	Àngulo de salida del sol
$h_{s,s,w}$	Àngulo de puesta del sol
τ_a	Transmitancia de la cubierta del absorbedor
α_a	Absortancia del absorbedor
ρ_L	Reflejancia de la lente
f	Distancia focal
HSP	Horas sol pico
r_1	Radio de la superficie de apertura
r_2	Radio de la parábola,
t	Espesor de la lente
n_c	Índice de refracción para paredes compuestas
n_a	Índice de refracción del acrílico
n_{H_2O}	Índice de refracción del agua
F	Fracción de apertura no sombreada
k_s	Factor de suciedad
f_t	Error en el seguimiento.
A_a	Area de apertura del concentrador
A_r	Area del absorbedor
T_a	Temperatura ambiente
U_c	Coefficiente global de transferencia de calor

η_0	Eficiencia óptica.
T_f	Temperatura focal
R_c	Razón de concentración
H_b	Irradiancia
T_a	Temperatura ambiente
T_c	Temperatura concentrador
T_f	Temperatura focal
T_{fm}	Temperatura focal medida
T_{cm}	Temperatura concentrador medida
HR	Humedad relativa
ϵ_a	Emisividad del recubrimiento del absorbedor,
σ	Constante de Stefan- Boltzmann.
W_s	Ángulo de ocaso
E	Radiación electromagnética incidente sobre el colector parabólico
A_{em}	Área efectiva máxima de captación electromagnética
m_{ABS}	Masa del absorbedor
$C_{p_{ABS}}$	Calor específico del absorbedor
C_{p_g}	Calor específico a presión constante

RESUMEN

El presente proyecto, comprende la investigación, el desarrollo experimental y la caracterización energética de un sistema de hidroconversión de la luz solar, para lo cual se utilizó de un concentrador parabólico esférico de 200 W térmicos, con diámetro de apertura de 0.7 m, para la recolección y concentración de la radiación solar directa, mediante el uso del agua como medio óptico, y una envolvente en material acrílico transparente. La luz solar que se dirige en forma perpendicular hacia la pared de apertura del concentrador, es refractada en las capas tipo sandwich entre el agua y el acrílico, para reorientarse y transmitir un haz de radiación térmica de forma cónica que se disipa en el absorbedor, produciendo temperaturas superiores a los 400 °C, y concretamente en el desarrollo del presente proyecto de 419 °C. En este procedimiento de conversión de la energía solar, en energía térmica, no se produce emisión de sustancias contaminantes como en los procesos de combustión de los combustibles fósiles. La densidad energética obtenida, en la cámara de reacción, depende de la irradiancia solar, relación de concentración, y absortancia del absorbedor.

CARACTERIZACIÒN ENERGÈTICA DE UN SISTEMA DE
HIDROCONVERSIÒN DE LUZ SOLAR USANDO UN CONCENTRADOR
PARABÒLICO ESFÈRICO.

“CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE
HIDROCONVERSIÓN DE LA LUZ SOLAR PARA APLICACIONES DE MEDIA
TEMPERATURA UTILIZANDO UNALENTE DE FORMA PARABÓLICA”

Existen dentro del estado del arte, aplicaciones de media temperatura de 100°C a 400°C, se encuentran los concentradores parabólicos cilíndricos, y sobre los 400 °C, las lentes de Fresnel, torres de potencia, hornos solares, espejos parabólicos esféricos, donde su óptica de alta concentración necesita de materiales avanzados de alta reflectividad, difíciles de encontrarlos en el medio. Para que estas tecnologías de concentración por medios ópticos puedan ser implementadas, se necesita contar con radiación solar directa por lo menos unas 3 horas por día y valores de irradiancia dentro del rango de 500 a 1000 W/m², que se pueden obtener en los trópicos. En las zonas cercanas a la línea equinoccial, la dirección de la radiación solar directa, cae casi perpendicular, al plano horizontal, por lo que se pueden realizar importantes instalaciones para el aprovechamiento de este recurso. Sin embargo, es necesario que se considere la presencia de nubosidad intermitente, contaminación ambiental, influencia de microclimas, las mismas que reducirían las horas de utilizabilidad de los medios ópticos. A pesar de estas dificultades, es necesario propender de esta nueva iniciativa de conversión energética, que servirá para desarrollar aplicaciones de alta temperatura, utilizando para su fabricación, materiales ecológicos y aprovechando una energía inagotable y no contaminante como la solar térmica.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

El presente proyecto, comprende la caracterización energética de un concentrador parabólico esférico, para la recolección y concentración de la radiación solar directa, mediante el uso del agua como medio óptico, y una envolvente en material acrílico transparente. La principal característica de la estructura antes mencionada es el de tener una gran absorción solar y una emisión térmica reducida. Como los materiales comunes no cumplen con este requisito, se utilizan materiales combinados para obtener la mejor relación absorción / emisión.

La luz solar que se dirige en forma perpendicular hacia la pared de apertura del concentrador, es refractada en las capas tipo sandwich entre el agua y el acrílico, para reorientarse y transmitir un haz de radiación térmica de forma cónica que se disipa en el absorbedor, produciendo temperaturas superiores a los 100 °C.

La longitud focal determina el tamaño de la imagen y la abertura del reflector la cantidad de energía que pasa por el área focal para una velocidad dada en incidencia de radiación directa. El cociente entre la abertura y la longitud focal es, pues, una medida de flujo de energía disponible en el área focal y con arreglo a este flujo se puede calcular una temperatura de cuerpo negro.

En este procedimiento de conversión de la energía solar, en energía térmica, no se produce emisión de sustancias contaminantes como en los procesos de

combustión de los combustibles fósiles. La densidad energética obtenida, en la cámara de reacción, depende de la irradiancia solar, relación de concentración, y absorptancia del absorbedor.

Existen instalaciones solares térmicas de baja temperatura como el colector solar plano que tiene rendimientos de conversión del 40% al 60%, que si se acopla a una máquina térmica para generación de electricidad, su eficiencia no alcanzaría ni el 5%.

En Europa están instalados más de 1000000 de m² de colectores planos, y sirven para la obtención de agua caliente sanitaria, en aplicaciones de baja temperatura inferiores a los 100°C. En el caso del Ecuador, existen desarrollos construidos de manera artesanal, y que no se encuentran homologados para saber la calidad de materiales, durabilidad, eficiencia.

En las aplicaciones de media temperatura de 100°C a 400 °C, se encuentran los concentradores parabólicos cilíndricos, y sobre los 400 °C, las lentes de Fresnel, torres de potencia, hornos solares, espejos parabólicos esféricos, donde su óptica de alta concentración necesita de materiales avanzados de alta reflectividad, difíciles de encontrarlos en el medio.

Para que estas tecnologías de concentración por medios ópticos puedan ser implementadas, se necesita contar con radiación solar directa por lo menos unas 3 horas por día y valores de irradiancia dentro del rango de 500 a 1000 W/m², que se pueden obtener en los trópicos. En las zonas cercanas a la línea equinoccial, la dirección de la radiación solar directa, cae casi perpendicular, al plano horizontal, por lo que se pueden realizar importantes instalaciones para el aprovechamiento de este recurso. Sin embargo, es necesario que se considere la presencia de nubosidad

intermitente, contaminación ambiental, influencia de microclimas, las mismas que reducirían las horas de utilizabilidad de los medios ópticos. A pesar de estas dificultades, es necesario propender de esta nueva iniciativa de conversión energética, que servirá para desarrollar aplicaciones de media temperatura, utilizando para su fabricación, materiales ecológicos y aprovechando una energía inagotable y no contaminante como la solar térmica.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, muy a pesar del vertiginoso avance de la tecnología, aun no se dispone de sistemas energéticos eficientes orientados al aprovechamiento de la energía solar térmica de alta temperatura, solo se cuenta con dispersos desarrollos a nivel experimental como el EURODISH, lente de Fresnel del CENIM , Hornos de Odeillo, y de la plataforma solar de Almería, que han requerido costosas inversiones para su puesta en marcha, y la utilización de materiales avanzados que originan una tremenda huella ecológica en su fabricación. Por esta razón, en la presente investigación se utiliza un medio óptico natural como es el agua, que al colocarle en una burbuja parabólica, refracta la luz solar de onda corta inferior a 0.3 μm , y lo concentra en el absorbedor, donde se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 2000°C, con diámetros de boca de 4m y superiores.

Sería poco racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente, agotables.

Es preciso, no obstante, señalar que existen algunos problemas que debemos afrontar y superar en nuestro país. Aparte de las dificultades que una política

energética solar avanzada conllevaría por sí misma, 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, precisamente cuando más la solemos necesitar.

Por otra parte, es necesario indicar que en Latinoamérica, no se han fortalecido las labores de investigación en el ámbito de la electricidad termosolar, que está despertando mucho interés en la comunidad científica mundial y en los medios productivos, en vista del cambio climático ocasionado por los gases de efecto invernadero, debido al uso indiscriminado de los combustibles fósiles: carbón, petróleo, gas natural, que a parte de ser deficitarios son contaminantes.

Es de vital importancia por lo tanto proseguir con el desarrollo y perfeccionamiento de la todavía incipiente tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar, para conseguir las condiciones que la hagan definitivamente competitiva, a escala mundial.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Caracterización Energética del Sistema de Hidroconversión de la Luz Solar para Aplicaciones de Mediana Temperatura utilizando una Lente Parabólica Esférica.

1.3.2 ESPECIFICOS

- Determinar la radiación solar directa y la dirección reflejada sobre el absorbedor.
- Analizar el comportamiento óptico de la lente de agua y del cono de radiación térmica.
- Realizar el balance energético del modelo de hidroconversión.

- Determinar las especificaciones técnicas del sistema, con proyección al desarrollo de modelos de utilidad de mayor capacidad

1.4 **ALCANCE**

Obtener los parámetros geométricos y termofísicos del frente de onda cónico producido por la radiación concentrada al atravesar la luz solar desde la lente hacia el cuerpo gris o absorbedor.

1.5 **JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

El consumo de energía en los países industrializados es notable, un elevado incremento anual, y una excesiva dependencia de los combustibles de origen fósil, esta situación origina problemas bien conocidos como el agotamiento del combustible finito en fechas no lejanas, impactos negativos causados sobre el medio ambiente como la lluvia ácida y el efecto invernadero. El actual modelo energético basado en la quema de combustibles fósiles y la energía nuclear es insostenible, y la única alternativa posible viene dada por un modelo energético basado en la eficiencia energética y las energías renovables o limpias. El sistema energético debe someterse a los límites de la Naturaleza. La sociedad actual utiliza la energía como si no existiesen límites, pero existen. Hay un límite que no podemos franquear y es la capacidad de la atmósfera para absorber CO_2 , CO , SO_x y NO_x .

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ANÁLISIS DEL MODELO DE RADIACIÓN DIRECTA

Los intentos de aprovechamiento de la energía solar de forma directa, utilizando la tecnología actualmente disponible, tratarían de emular lo que la naturaleza realiza hace millones de años: convertir la energía electromagnética irradiada por el Sol en otras formas de energía. Casi todas las formas de energía que se conocen proceden directa o indirectamente de la energía solar.

2.1.1 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La Radiación es un proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio o de algún medio. Ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) hasta frecuencias muy bajas (longitudes de onda altas). La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético. Por orden decreciente de frecuencias (o creciente de longitudes de onda), el espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, rayos X duros y blandos, radiación ultravioleta, luz visible, rayos

infrarrojos, microondas y ondas de radio. (Encarta, 2005) La radiación electromagnética procedente del Sol, es la fuente de energía más abundante y limpia, sin embargo su dispersión y discontinuidad dificultan notablemente su aprovechamiento, lo que la sitúa en desventaja en relación a otros tipos de fuentes energéticas. La radiación solar tiene su origen en el Sol, como consecuencia de las reacciones de fusión nuclear que se producen en su interior y llega hasta la Tierra debido a un proceso de transferencia de energía en forma de radiación electromagnética. Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad $c = 299.792 \text{ km/s}$. Todas las radiaciones del espectro electromagnético presentan las propiedades típicas del movimiento ondulatorio, como la difracción y la interferencia.

2.1.2 LA ENERGIA DEL SOL

El Sol se comporta muy aproximadamente como un cuerpo negro emisor con una temperatura superficial efectiva de unos $5800 \text{ }^\circ\text{K}$, y un flujo radiante de $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$, equivalente a una densidad 62.5 MW por cada metro de superficie solar. La distribución espectral de la radiación recibida por la Tierra es amplia (Figura 2.1). La incidencia total sobre la atmósfera terrestre es de:

$$1.3 \text{ kw/m}^2 = 1353 \text{ W/m}^2 = 4.871 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{h}) = 1.94 \text{ ca}/(\text{cm}^2 \text{ min})$$

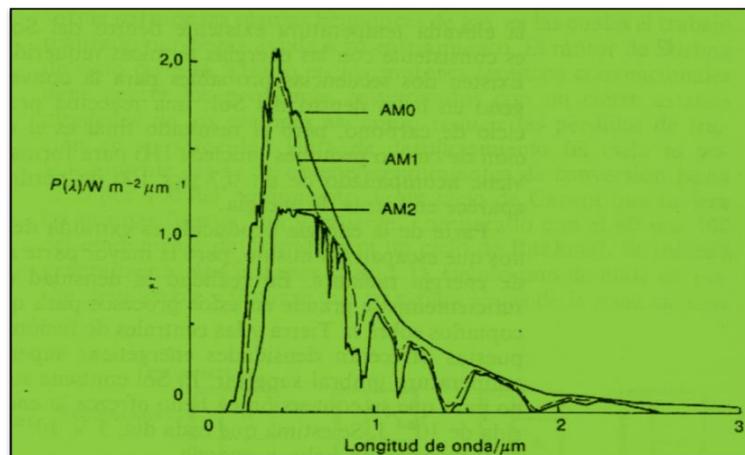


Figura 2.1 Irradiancia espectral solar ($P(\lambda)$) (Wilson, 1982)

Este valor corresponde a lo que se denomina; **la constante solar (I_{sc})**, correspondiendo el 95% a la longitud de onda inferior a 2 μm (luz visible). Gran parte de esta radiación es devuelta, por dispersión al espacio y una gran proporción es absorbida selectivamente por diversos gases en la atmósfera, de tal modo que después de un simple tránsito vertical a través de la capa atmosférica solo 1 kW/m^2 aproximadamente alcanza la superficie terrestre y esto corresponde a lo que se conoce como **la irradiancia**.

La energía incidente sobre la superficie terrestre, por unidad de área, durante un determinado período de tiempo, se denomina **irradiación** y se obtiene de la anterior por integración respecto del tiempo. La irradiación se mide en el sistema internacional en Julios por metro cuadrado (J/m^2) o en ($\text{w-h/ m}^2\text{-día}$)

En la Figura 2.2 se resume el equilibrio de la radiación terrestre con el Sol. La aportación solar es equilibrada por una combinación de radiaciones de corta y larga longitud de onda devueltas por la atmósfera y por la superficie de la Tierra.

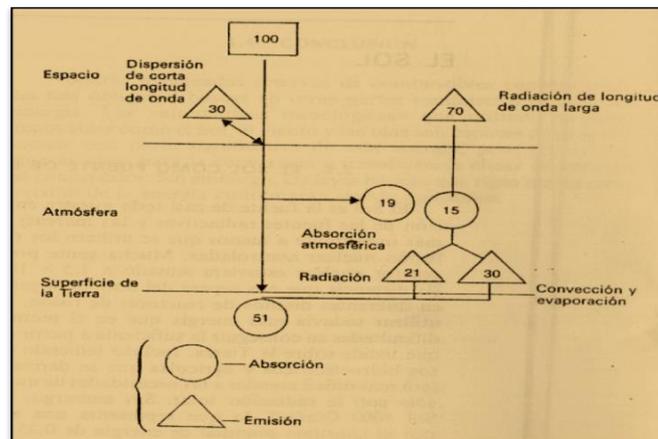


Figura 2.2 Balance de radiación en la Tierra (Wilson, 1982)

2.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

La información de calidad sobre la radiación solar incidente (Wilson, 1982) es un insumo clave para el diseñar cualquier equipamiento para la conversión de energía solar en energía útil(ya sea eléctrica o térmica) o para temas de desarrollo tecnológico. Es una práctica común en el mundo presentar la información sobre la distribución del recurso solar promedio en forma de mapas solares o mapas de irradiación media (Figura 2.3) . Esta presentación visual hace la información mas accesible al usuario, que puede aprovecharla de forma inmediata en todos los casos, estos mapas son el resultado de una actividad incremental que han conllevado décadas de trabajo de varios equipos científicos y a la cual confluyen aportes desde diferentes abordajes.

Los márgenes de error se reducen progresivamente, a medida que se cuenta con series de datos de radiación más largas y confiables y con modelos atmosféricos más detallados y precisos.

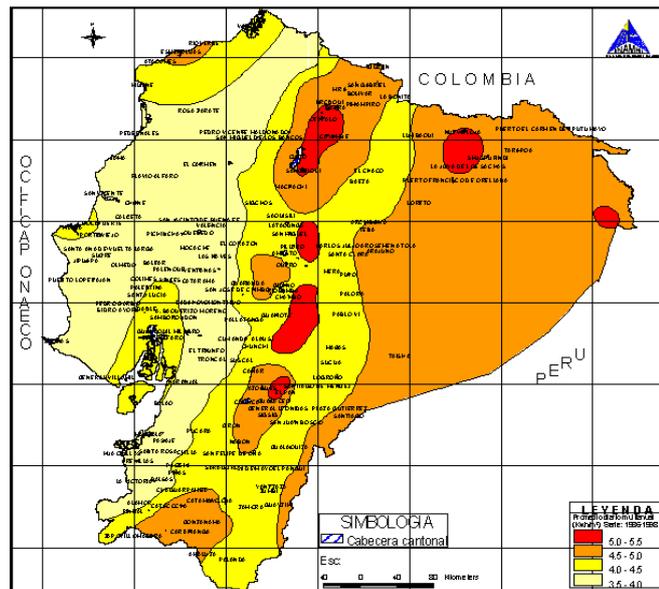


Figura 2.3 Mapa de radiación del Ecuador (Inhami, 1982)

En los últimos años se han comenzado a incorporar los datos de irradiación solar estimados a partir de modelos físicos que describen la interacción entre la radiación incidente y el sistema tierra-atmósfera integrando información obtenida a partir de imágenes satelitales. Esta metodología permite estimar con períodos de horas, o incluso minutos, el grado de nubosidad sobre áreas de territorio con una resolución espacial de unos pocos kilómetros.

La caracterización de la radiación solar incidente en la Tierra no es algo sencillo, debido fundamentalmente a 3 razones:

- La aleatoriedad de la radiación solar, que ha hecho imposible hasta la fecha determinarla de una forma definitiva o exacta.
- El movimiento relativo Sol-Tierra, regido por unas ecuaciones muy complejas que determinan en todo momento la posición del astro respecto de cualquier punto de la superficie terrestre.
- La variedad de modelos existentes para caracterizar la radiación, lo que obliga al usuario a elegir en función de las necesidades de cada caso.

La radiación solar que llega a una superficie se divide en tres partes:

- Radiación directa. Aquella que procede del Sol e incide sobre la superficie sin cambiar de dirección, excepto debida a la refracción atmosférica. Es una radiación que proviene de una dirección claramente definida.
- Radiación difusa. Es aquella parte de la radiación que, por choques sucesivos con moléculas y partículas contenidas en el aire, se ha difundido al atravesar la atmósfera. Es una radiación que procede de toda la bóveda de cielo visible desde la superficie, no es direccional y puede considerarse que su distribución es casi uniforme para todo el hemisferio celeste.
- Radiación reflejada(albedo). Radiación que llega a la superficie considerada, después de haberse reflejado en las superficies del entorno. Dado que el entorno no es especular, esta radiación, que procede de las dos anteriores tampoco es claramente direccional.

Cuando la medida de la radiación se realiza sobre una superficie horizontal y no se tiene en cuenta la reflejada, en este caso a la suma de la directa y la difusa se la denomina **radiación global**. La suma de la directa, de la difusa y la reflejada corresponde a la **radiación total**

2.2 TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

2.2.1 MÉTODO DE AMSTRONG PAGE

Este procedimiento científico, utilizado para determinar el recurso solar local comprende lo siguiente: Se calcula la radiación extraterrestre **H_e** , de acuerdo con la localización geográfica del sector y el día del mes del año, a continuación se utiliza la fórmula de PAGE, para determinar la radiación sobre superficie horizontal **H_o** .

Sin embargo, se debe corregir el valor de radiación **H_o** para superficie inclinada, la misma que depende del ángulo de inclinación de la instalación solar térmica, factor de albedo, y el día del año.

2.2.1.1 Variación de la radiación solar extraterrestre

$$H_e = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left(\left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360z}{365} \right) \right] \left[\cos \phi \cos \delta \sin h_s + \frac{2\pi h_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \right) \quad (2.1)$$

Donde:

H_e : Radiación extraterrestre en kJ/m²hr,

I_{sc} : Constante solar de 4871 kJ/m²hr,

z : número de día del año,

ϕ : latitud,

δ : declinación,

h_s : ángulo horario de la puesta de sol para una superficie horizontal

2.2.1.2 Posición del sol : coordenadas horarias

Un método para indicar la posición del Sol, respecto a un punto situado sobre la superficie terrestre, se basa en utilizar coordenadas horarias.

La posición del Sol se determina mediante tres ángulos:

- **Declinación**(δ). Es el ángulo que forma el plano del Ecuador terrestre con la dirección en la que se encuentra el Sol y varia a lo largo del año.

Una ecuación muy aproximada es la dada por Lokmanhekim (Jutglar, 2004)

$$\delta = 0.302 - 22.93 \cos x - 0.2293 \cos 2x - 0.243 \cos 3x + 3.851 \sin x + 0.002 \sin 2x - 0.0553 \sin 3x \quad (2.2)$$

Donde :

δ : es la declinación en radianes y

$$x = \frac{2\pi z}{365}$$

z es el número del día del año (para el 1 enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre, $z = 365$).

- **Latitud(ϕ).** Es el ángulo comprendido entre el paralelo del lugar y el ecuador, tomándose como positivo para el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur .
- **Angulo horario(h).** Es el ángulo comprendido entre el plano meridiano que pasa por el punto considerado y el plano meridiano que pasa por el Sol.

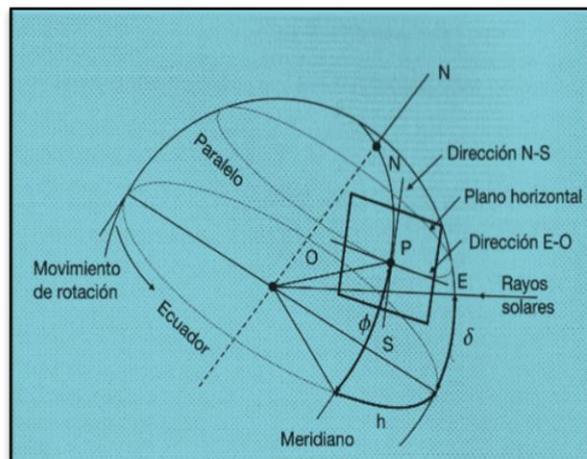


Figura 2.4 Posición del Sol. Coordenadas horarias (Jutglar, 2004)

2.2.1.3 Posición del sol : coordenadas angulares

En este sistema se toma como referencia el plano del horizonte, que es el plano tangente a la superficie de la Tierra en el punto considerado, en un lugar del plano ecuatorial, y se sitúa el Sol mediante dos ángulos:

- **Azimet(α).** Es el ángulo comprendido entre la dirección sur y la dirección de la proyección del Sol sobre el plano horizontal. El origen del ángulo, se sitúa

en la dirección sur y se consideran positivos los medidos hacia el oeste y negativos los medidos hacia el este.

- **Altitud(β)**. Es el ángulo comprendido entre la posición del Sol y su proyección sobre el plano horizontal. El origen está en el horizonte y consideran positivos los medidos en sentido ascendente.
- **Cenital(ψ)**. Es el ángulo comprendido entre la posición del sol y la perpendicular al plano horizontal en el punto considerado.

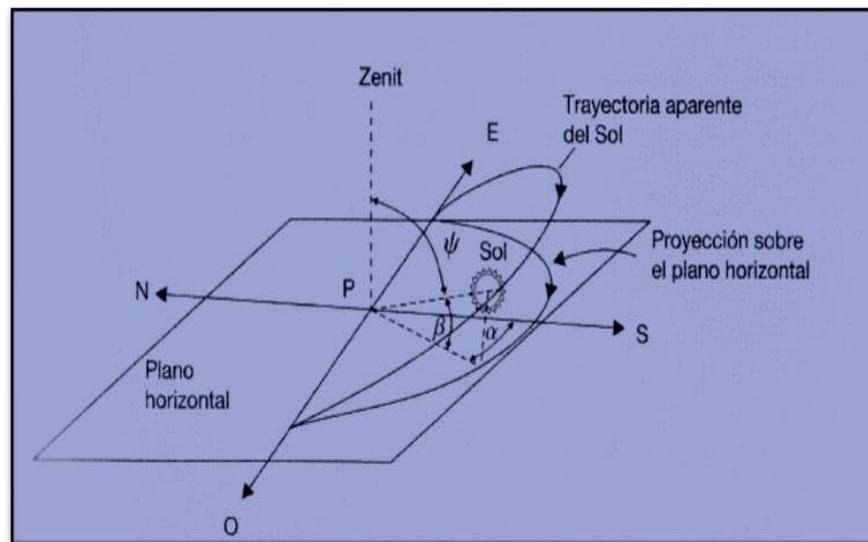


Figura 2.5 Posición del Sol. Coordenadas angulares (Jutglar, 2004)

$$\psi = 90 - \beta \quad (2.3)$$

Las coordenadas angulares, para latitudes superiores a las del trópico se relacionan con las horarias mediante las expresiones siguientes:

$$\cos \psi = \sin \beta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cosh \quad (2.4)$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\cos \beta} (\sin \phi \cos \delta \cosh - \cos \phi \sin \delta) \quad (2.5)$$

$$\text{ó} \quad \sin \alpha = \frac{\cos \delta \sinh}{\cos \beta} \quad (2.6)$$

Para un punto determinado y para un día concreto (se conoce su latitud ϕ y declinación δ) podrá calcularse la hora de puesta del sol, ya que en este instante su altitud es nula $\beta = 0^\circ$. A partir de las fórmulas anteriores podemos calcular el **ángulo horario de puesta del sol para una superficie horizontal** y el azimut correspondiente.

$$\cos h_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.7)$$

$$\sin \alpha_s = \cos \delta \sin h_s \quad (2.8)$$

En consecuencia, la duración del día, horas del sol si no hay nubes, podrá calcularse mediante la siguiente expresión

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.9)$$

Según Page (1964), la irradiación global a nivel del suelo para superficie horizontal se determina con la siguiente expresión:

$$H_o = H_e \left(a + b \frac{n_{real}}{N} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

H_o : es la irradiación global diaria, media mensual sobre una superficie situada bajo la atmósfera

n_{real} : son las horas de insolación

a y **b**: coeficientes que dependen del tipo de clima, para el caso Ecuador se tienen los siguientes valores:

Tabla 2.1 Coeficientes climáticos *a* y *b* para el Ecuador

Región	a	b
Sierra	0.25	0.45
Costa	0.28	0.54

La expresión:

$$K = a + b \frac{n_{real}}{N} \quad (2.11)$$

Se la conoce como índice de nubosidad, y permite calcular la radiación difusa H_d , partiendo de la irradiación global (2.10).

$$\frac{H_d}{H_o} = (1.39 - 4.027K + 5.531K^2 - 3.108K^3) \quad (2.12)$$

Para pasar la irradiación sobre superficie horizontal a inclinada se utiliza el factor R_b , definido por:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.13)$$

Siendo la irradiación H_b , la diferencia entre global y difusa

$$H_b = H_o - H_d \quad (2.14)$$

Por lo que la irradiancia directa sobre superficie inclinada es:

$$H_B = H_b R_b \quad (2.15)$$

2.2.2 METODO DE JUTGLAR

2.2.2.1 Radiación solar extraterrestre

La irradiación diaria extraterrestre sobre una superficie horizontal se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$H_e = \frac{24r^2}{\pi} I_{sc} (h_s \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \sin h_s) \quad (2.16)$$

Donde h_s es el ángulo horario de la salida del sol, en radianes y en valor absoluto dado por la ecuación (2.7).

Es interesante destacar que estos valores se pueden calcular para un punto cualquiera, conociendo su posición geográfica, el día y la hora.

El valor del factor de corrección r^2 , viene dado por :

$$r^2 = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360}{365} z\right) \quad (2.17)$$

z : es el número del día del año (para el 1 enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre, $z = 365$).

2.2.2.2 Estimación de la energía solar global incidente sobre el suelo.

Según Page, puede establecerse una relación sencilla entre la insolación y la radiación solar, válida para una superficie horizontal, que es del tipo

$$H_o = H_e(a + b\sigma) \quad (2.18)$$

H_o : es la irradiación global diaria, media mensual sobre una superficie situada bajo la atmósfera

H_e : es la irradiación solar diaria, media mensual, extraterrestre

a y **b**: coeficientes que dependen del tipo de clima, para el caso Ecuador se tienen los valores indicados en la Tabla 1

σ coeficiente de insolación

$$\sigma = \frac{n_{real}}{N} \quad (2.19)$$

Donde:

n_{real} : son las horas de insolación

N : es la duración del día desde la salida hasta la puesta del sol(2.9)

2.2.2.3 Cálculo del ángulo de incidencia sobre una superficie plana cualquiera.

La radiación incidente sobre una superficie depende del ángulo de incidencia, por lo tanto, es necesario conocer las ecuaciones que permitan calcular el ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre una superficie cualquiera y situado en un punto cualquiera de la superficie terrestre. La posición de una superficie inclinada se identifica mediante dos ángulos (Figura 2.5) :

- **Azimuth(γ)**. Define la orientación de la superficie y se define como el ángulo comprendido entre la proyección de la normal sobre el plano horizontal y la dirección sur. Para una superficie orientada hacia el Sur, su azimuth será cero, el valor del ángulo se considera negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste.
- **Inclinación(s)**. Es el ángulo formado por la superficie considerada y el plano horizontal.

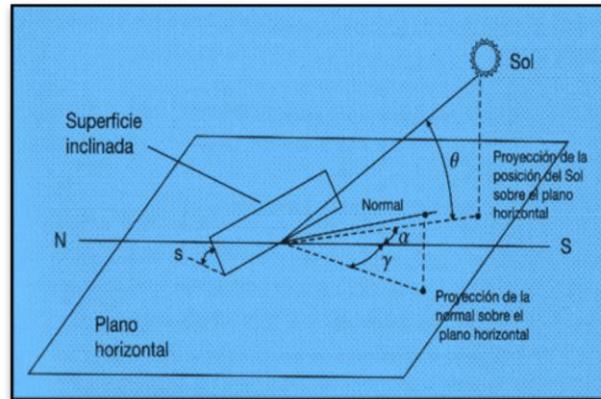


Figura 2.6 Posición de una superficie inclinada (Jutglar, 2004)

El ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre la superficie considerada viene definido por la normal a la superficie y la posición del del Sol y se calcula según:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos s - \sin \delta \cos \phi \sin s \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos s \cosh \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin s \cos \gamma \cosh + \cos \delta \sin s \sin \gamma \sinh \end{aligned} \quad (2.20)$$

Para una superficie fija situada en el hemisferio norte, respecto a la captación de la radiación solar, la orientación sur es la más favorable y es la que suele adoptarse para los colectores solares fijos. Evidentemente, si la superficie está ubicada en el hemisferio sur, la orientación más favorable será la norte.

El número de horas diarias de exposición vendrá dado por la diferencia entre la hora de puesta y salida del sol. Para calcularlo, deberán calcularse previamente los ángulos respectivos, que para una superficie plana, inclinada y orientada serán:

$$h_{r,s,w} = -\cos \left(\frac{ab \pm \sqrt{a^2 - b^2 + 1}}{1 + b^2} \right) \quad (2.21)$$

$$h_{s,s,w} = -\cos \left(\frac{ab \mp \sqrt{a^2 - b^2 + 1}}{1 + b^2} \right) \quad (2.22)$$

Donde

$h_{r,s,w}$ Ángulo de salida del sol

$h_{s,s,w}$ Ángulo de puesta del

$$a = \frac{\sin \phi}{\tan \gamma} + \frac{\cos \phi}{\sin \gamma \tan s} \quad \text{sol} \quad (2.23)$$

$$b = - \left(\frac{\sin \phi}{\sin \gamma \operatorname{tg} s} - \frac{\cos \phi}{\operatorname{tg} \gamma} \right) \operatorname{tg} \delta \quad (2.24)$$

En las ecuaciones anteriores, el doble signo que precede a la raíz cuadrada se interpreta de la forma siguiente: escoger el signo superior si la orientación es oeste (azimut positivo) y el signo inferior si la orientación es este (azimut negativo).

Si la superficie esta inclinada pero orientada al sur, el ángulo horario de puesta del sol viene dado por la expresión:

$$h_{s,s,o} = \operatorname{arc} \cos \left[-\operatorname{tg}(\phi-s) \operatorname{tg} \delta \right] \quad (2.25)$$

2.2.2.4 Cálculo de la irradiación sobre una superficie inclinada a partir de la horizontal cualquiera.

Los datos proporcionados por los observatorios meteorológicos suelen limitarse a superficies horizontales. Sin embargo, los colectores solares suelen colocarse inclinados, en consecuencia será útil disponer de ecuaciones que permitan calcular la radiación sobre una superficie plana cualquiera, a partir de datos válidos para una superficie horizontal.

A continuación se expondrá un método simple para poder estimar, de una forma aproximada, la irradiación solar diaria sobre una superficie inclinada y orientada, a partir de la global diaria mensual, sobre una superficie horizontal.

La irradiación diaria total ($H_{t,s,g}$) vendrá dada por tres componentes ya citadas anteriormente: directa, difusa y albedo

$$H_{t,s,\gamma=0} = H_b R_b + \frac{1 + \cos s}{2} H_d + \rho \frac{1 - \cos s}{2} H_o \quad (2.26)$$

$$H_b = H_o - H_d \quad (2.27)$$

Donde:

H_b la irradiación diaria directa promedio mensual

H_o es la irradiancia diaria global promedio mensual

H_d es la irradiancia diaria difusa promedio mensual

R_b es el factor que relaciona la radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal con la radiación sobre una superficie inclinada cualquiera, que se supone válida también bajo la atmósfera, y

ρ es el factor de albedo en tanto por uno

Para superficies orientadas al Sur y situadas en el hemisferio norte, el factor R_b viene dado por:

$$R_b = \frac{\cos(\phi-s)\cos\delta\sin h_{s,s,o} + h_{s,s,o} \sin(\phi-s)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\sin h_s + h_s \sin\phi\sin\delta} \quad (2.28)$$

Donde

$h_{s,s,o}$ es el ángulo horario de puesta del Sol para una superficie inclinada y orientada al Sur y

h_s es el ángulo horario de puesta del Sol para una superficie horizontal.

Si además, la superficie no está orientada al Sur, el factor R_b , viene dado por:

$$R_b = \frac{c}{d} \quad (2.29)$$

Donde:

$$c = (\sin \delta \sin \phi \cos s - \sin \delta \sin \phi \sin s \cos \gamma)(h_{s,s,\gamma} - h_{r,s,\gamma}) + (\cos \delta \cos \phi \cos s + \cos \delta \sin \phi \sin s \cos \gamma)(\sinh_{s,s,\gamma} - \sin h_{r,s,\gamma}) - \cos \delta \sin s \sin \gamma (\cos h_{s,s,\gamma} - \cos h_{r,s,\gamma}) \quad (2.30)$$

$$d = 2(\cos \delta \cos \phi \sin h_s - h_s \sin \delta \sin \phi) \quad (2.31)$$

2.2.3 MÈTODO DE CIELO ISOTROPO

La radiación absorbida (S) por la placa ($\tau\alpha$) veces la radiación incidente (I). La expresión completa para S, con modelo cielo isótropo, (Lopez, 2011) es:

$$S = I_b R_b(\tau\alpha)_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (\tau\alpha)_d + (I_b + I_d) \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) (\tau\alpha)_g \quad (2.32)$$

Directa Difusa cielo Difusa reflejada suelo

Donde:

τ_a Transmitancia de la cubierta del absorbedor, con un valor de 0.85

α_a absortancia del absorbedor, y corresponde a un valor de 0.9

ρ_i Reflejancia de la lente, con un valor de 0.4

$(\tau \alpha) \approx 1.01 (\tau \alpha)$

2.2.4 OTROS ESTUDIOS REALIZADOS

Para lograr una mejor aproximación a los valores reales de radiación solar en cualquier localidad, se han utilizado las siguientes técnicas:

- Datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA).
- Datos de satélite: www.3tier.com
- Datos HSP

2.2.4.1 Datos del satélite de la NASA

Con la ayuda de los satélites ubicados en la órbita terrestre y los datos de longitud y latitud(\emptyset), podemos obtener los siguientes datos en un lugar determinado, que para el presente proyecto es Sangolquí.

Tabla 2.2 Latitud y longitud de Sangolquí

Lugar	Latitud(decimal grados)	Longitud (decimal grados)
Sangolquí	- 0,316667	-78.45

En el Anexo B, se indican parámetros solares para el Ecuador según, la NASA

2.2.4.2 DATOS DEL SATELITE 3 TIER

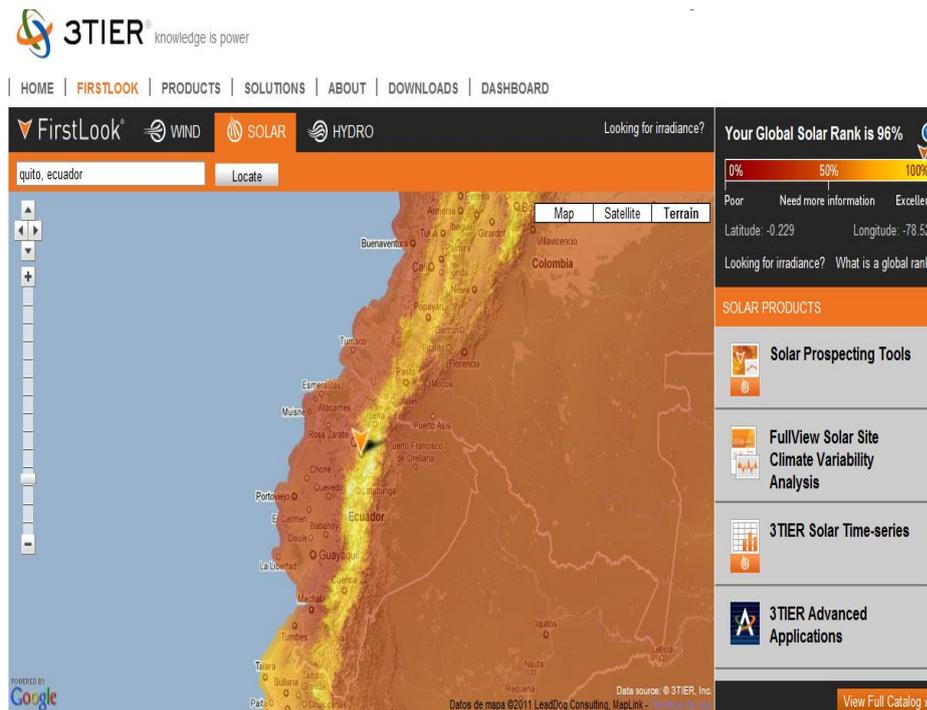


Figura 2.7 Radiación promedio diaria anual (www.3tier.com)

2.2.4.3 Datos hora sol pico(HSP)

Para el cálculo de las HSP, de la gráfica Irradiancia vs Tiempo, vamos ha considerar el área de un rectángulo donde la base es el número de horas sol pico y la

altura el valor de irradiancia máximo que se alcanza en la superficie terrestre que corresponde a un valor de $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$

$$A = b \times h$$

$$E = I \times HSP$$

$$I = \text{irradiancia (w/m}^2\text{)} \quad HSP = \text{horas sol pico(horas)}$$

$$E = \text{irradiación (w-h/m}^2\text{ día)}$$

Despejando :

$$HSP = E / I$$

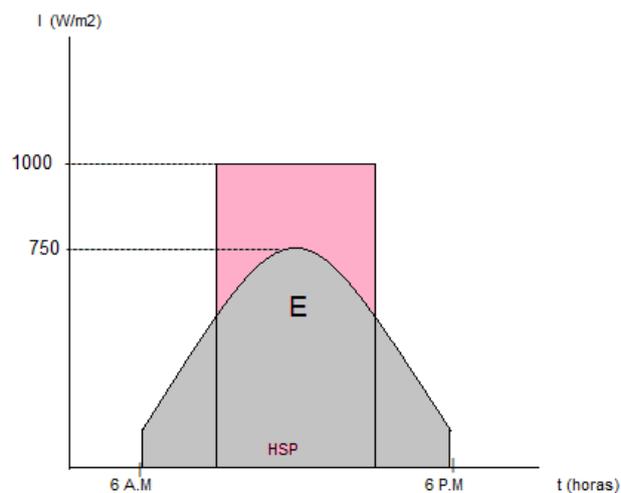


Figura 2.8 Irradiancia vs Tiempo

Para la elaboración de la Tabla 3, se tomaron los datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA), indicados en el Anexo B *Parámetros solares para el Ecuador según la NASA*, en la parte correspondiente a **Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m²/day)**.

Los valores de irradiación indicados en la tabla son el promedio de los últimos 22 años.

Tabla 2.3 Estimación de HSP sobre superficies horizontales

PROYECTO DE GRADO: Caracterización Energética del Sistema de Hidroconversión		CÁLCULO DE HORAS SOL PICO HSP(horas)		
NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables				
Latitude -0.316667 / Longitude -78.45 / $I = 1000 \text{ W/m}^2$				
$E = I \times \text{HSP}$ $\text{HSP} = E/I$				
<i>Mes</i>	<i>E (W-h/m2-day)</i>	<i>HSP(horas)</i>		
Enero	4130	4.13		
Febrero	4340	4.34		
Marzo	4550	4.55		
Abril	4330	4.33		
Mayo	4120	4.12		
Junio	4010	4.01		
Julio	4260	4.26		
Agosto	4460	4.46		
Septiembre	4260	4.26		
Octubre	4240	4.24		
Noviembre	4300	4.3		
Diciembre	3980	3.98		

Fuente: *Suntaxi, J. Sangolquí, 2014*

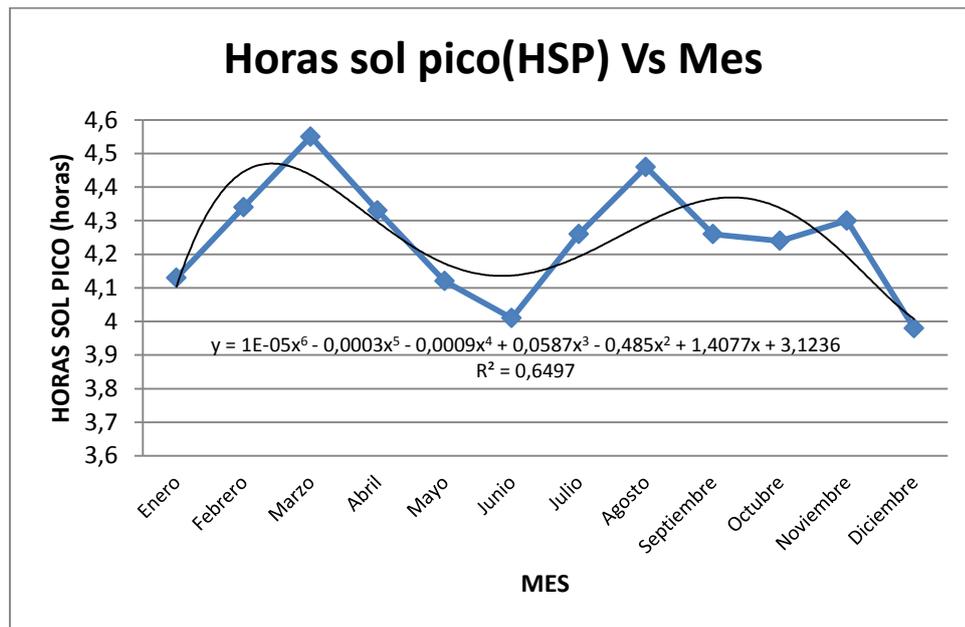


Figura 2.9 Horas sol pico vs mes

De acuerdo a la Figura 2.9 podemos apreciar que los meses del años donde se tienen los mayores valores de HSP, son en los meses de marzo con 4.55 h, y en agosto con un valor de 4.46 h.

2.3 TECNOLOGÍA DE LOS CONCENTRADORES

2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS SOLARES

Existen diversas clasificaciones para los sistemas solares térmicos. Una clasificación común es en función del rango de temperaturas, clasificándose en baja, media y alta temperatura. Cabe destacar, que aunque no se ha definido una frontera clara entre los diferentes sistemas, si que se tiene una aproximación del rango de temperaturas del mismo. A continuación se realiza una breve descripción de los mismos indicando el rango de temperaturas.

- **Baja temperatura:** destinada al calentamiento de agua por debajo de su punto de ebullición($T < 100^{\circ}\text{C}$)

- **Media temperatura:** destinada a aquellas aplicaciones que requieren temperaturas superiores a los 100 °C. Este tipo de sistemas se pueden utilizar para la producción de vapor o para el calentamiento de otro tipo de fluido, pudiéndose alcanzar hasta los 300 °C. ($100\text{ °C} < T < 400\text{ °C}$)
- **Alta temperatura:** está dirigida a aquellas aplicaciones que requieren temperaturas superiores a los 300 °C, fundamentalmente producción de energía eléctrica. ($T > 400\text{ °C}$).

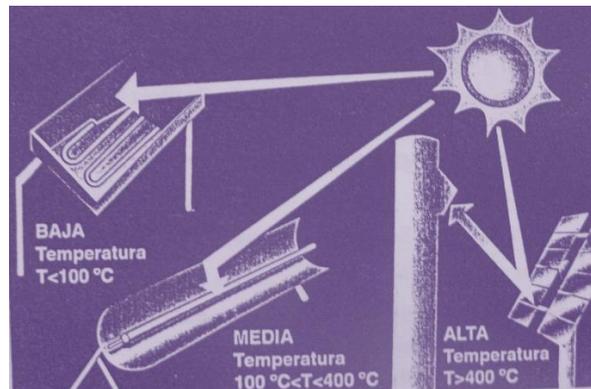


Figura 2.10 Clasificación de los sistemas solares (Jutglar, 2004)

2.3.2 PRINCIPIO DE DISEÑO DE UN CONCENTRADOR SOLAR

La dirección de propagación de una onda se representa mediante líneas que se denominan rayos y según la forma de la superficie en la que inciden así será la dirección de los rayos reflejados. Cuando la forma de dicha superficie es parabólica todos los rayos que llegan paralelos al eje de la parábola se reflejan pasando por un mismo punto que se denomina foco.

Esta es la propiedad fundamental en que se basan todos los diseños parabólicos.

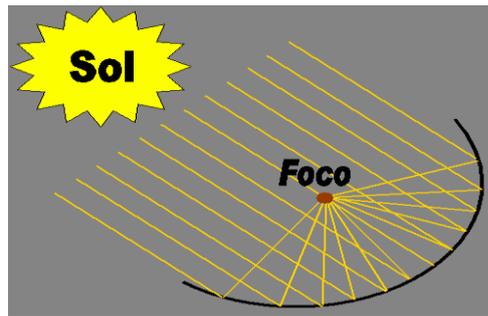


Figura 2.11 Principio de diseño del concentrador (Fernández, 2008)

Un concentrador solar es un instrumento que sencillamente consiste en la concentración en un solo foco de los rayos incidentes en una superficie, consiguiendo de esta manera alcanzar altas temperaturas que permiten varias aplicaciones. Basta con orientarlo adecuadamente en la dirección del sol, para lograr que los espejos cóncavos convenientemente orientados concentren los rayos solares.

Con las superficies selectivas se puede reducir las pérdidas radiativas y, por lo tanto, alcanzar mayores temperaturas, pero para obtener temperaturas verdaderamente altas se debe incrementar la densidad energética incidente concentrando la energía solar.

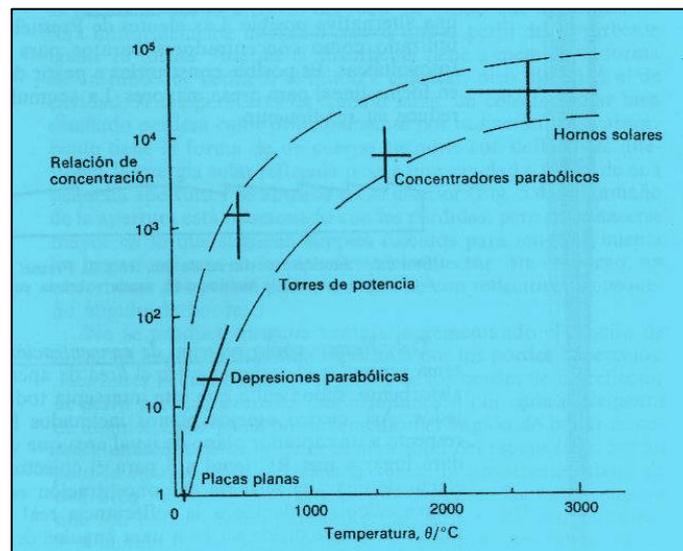


Figura 2.12 Relación de concentración vs Temperatura (Wilson J. , 1982)

Las dificultades en la obtención de grandes elementos ópticos refractantes sugieren que los espejos y no las lentes, serán importantes en los colectores fototérmicos, si bien algunas experiencias realizadas con lentes de plástico llenas de agua indican una alternativa posible, que es precisamente tema del presente Proyecto de Grado.

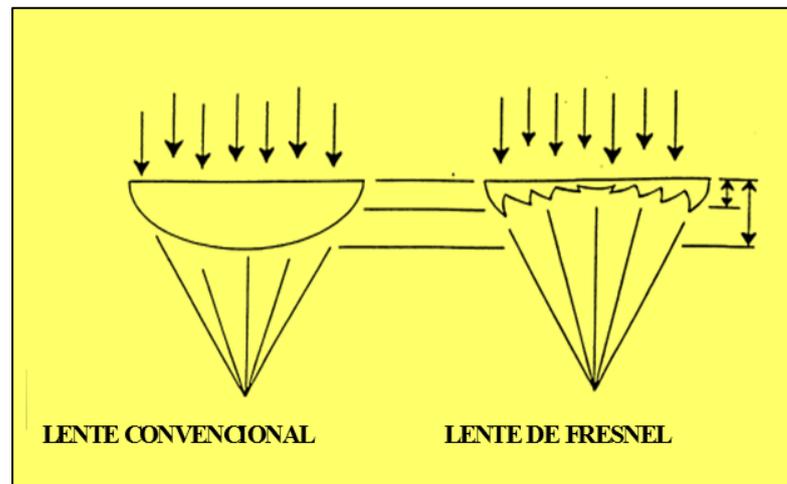


Figura 2.13 Lentes (Guasumba, 2009)

Las “Lentes de Fresnel” se han utilizado como concentradores baratos para pequeñas células fotovoltaicas. Es posible construirlas a partir de plástico estirado en forma lineal para áreas mayores. La acumulación de suciedad reduce su rendimiento.

2.3.3 RELACIÓN DE CONCENTRACIÓN

Definiremos como relación de concentración (RC) de un sistema especular al cociente entre el área de apertura y el área del absorbente, suponiendo que éste intercepta todos los rayos reflejados

2.3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS CONCENTRADORES

Los tres conceptos de concentración solar más utilizados son:

- **Concentradores cilíndrico-parabólicos:** son concentradores de foco lineal con seguimiento en un solo eje. Las concentraciones de la radiación van de 30 a 80 veces y las potencias por campo unitario de 30 a 80 MW.

El captador cilindro parabólico(CCP), debe su nombre a unos de sus componentes principales: la superficie reflectante cilíndrico parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo absorbente colocado en la línea focal de la parábola.

Dicha radiación concentrada sobre el tubo absorbente hace que el fluido que circula por su interior se caliente, transformando de ésta forma la radiación solar en energía térmica, en forma de calor sensible o latente del fluido.

Como cualquier otro captador de concentración, los CCP sólo pueden aprovechar la radiación solar directa , lo que exige que el colector vaya modificando su posición durante el día. Este movimiento se consigue mediante el giro alrededor de un eje paralelo a su línea focal.

- **Sistemas de torre o de receptor central:** consisten en un campo de helióstatos que siguen la posición del sol en todo momento(elevación y azimut) y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre. El orden de concentración se sitúa entre 200 y 1000 y las potencias unitarias de 10 a 200 MW.

En los sistemas de torre o de receptor central el intercambio radiativo/convectivo se produce de forma centralizada en un intercambiador de calor ubicado encima de una torre. Por los altos flujos de radiación incidente(típicamente entre 300 y 1000 kWm^{-2} , permite trabajar a altas temperaturas e integrarse a ciclos más eficientes de forma escalonada,

admiten fácilmente el funcionamiento híbrido en una variedad de opciones y tienen el potencial de generar electricidad con altos factores de capacidad mediante el uso de almacenamiento térmico, pudiéndose plantear ya en la actualidad sistemas superando ya los 4500 horas equivalente al año.

- **Discos parabólicos:** son pequeñas unidades independientes con reflector parabólico habitualmente conectado un motor Stirling situado en el foco. Los niveles de concentración son los más altos (1000 – 4000) y las potencias son del orden de 5 a 25 kw.

Los discos parabólicos han evolucionado hacia la construcción de unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco. Los sistemas disco/Stirling han demostrado la mayor eficiencia de conversión de radiación solar en energía eléctrica con valores máximos del 30% y hasta un 25% de promedio diario en unidades de 7 a 25 kw.

Debido a la curvatura parabólica del concentrador y a la baja relación distancia focal/diámetro ($f/D = 0.6$), se pueden conseguir altas relaciones de concentración por encima de 3.000.

Esto permite alcanzar muy altas temperaturas de operación entre 650 y 800 °C, dando lugar a eficiencias en el motor Stirling del orden del 30 al 40%. La superficie cóncava del concentrador esta cubierta por espejos de vidrio de segunda superficie con su correspondiente curva parabólica o bien por espejos delgados o polímeros metalizados de primera superficie soportados sobre una estructura de fibra de vidrio o de membrana tensionada.

Los receptores para sistemas disco/Stirling son de tipo cavidad, con una pequeña abertura y su correspondiente sistema de aislamiento.

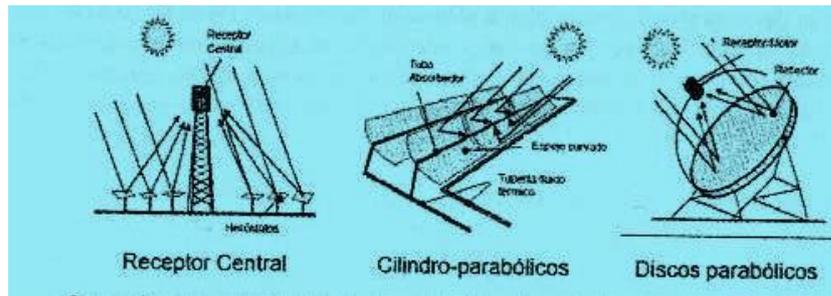


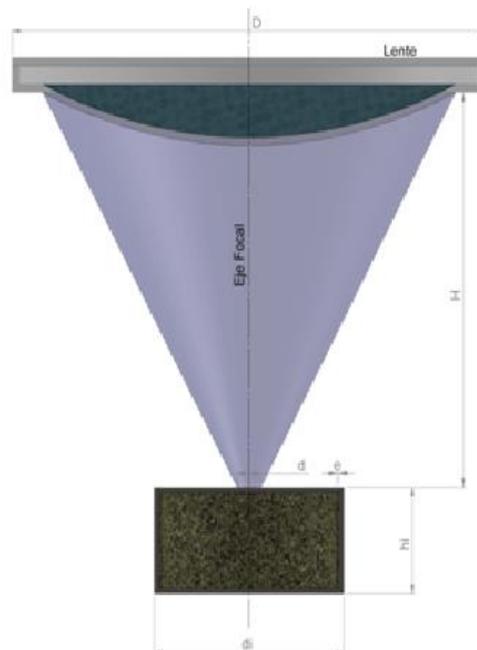
Figura 2.14 Tipos de concentradores solares (Fernández, 2008)

CAPITULO 3

HIDROCONVERSIÓN DE LA LUZ SOLAR

3.1 GEOMETRÍA DEL MODELO EXPERIMENTAL

En lo que tiene que ver con la óptica geométrica, se puede indicar que la luz incidente sobre el plano superior de la lente, se refracta en el interior de la cámara de agua para formar un haz de radiación cónico de alta temperatura que se disipa en la cámara de reacción o absorbedor.



D: Diámetro de la lente	d_i : Diámetro del concentrador
h_i : altura del concentrador	h_r : altura del concentrador
d : Diámetro variable del foco	e : Espesor del recubrimiento cerámico

Figura 3.1: Modelo Experimental : Geometría



Figura 3.2: Modelo Experimental : Isometría

3.2 OPTICA GEOMÈTRICA

3.2.1 REFRACCIÒN EN LAS LENTES DELGADAS

Una lente es un cuerpo transparente limitado por dos superficies esféricas A,C,D,F(Figura 3.2) o por una superficie plana y otra esférica(B,E).

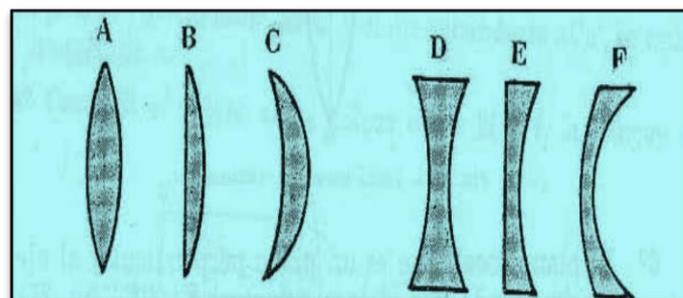


Figura 3.3: Lentes (Vidal, 1984)

Las lentes convergentes hacen converger hacia el eje principal los rayos luminosos que lo atraviesan y son de aumento, las divergentes producen el efecto contrario.

El foco principal F es el punto del eje principal en que convergen, después de refractados, los rayos luminosos paralelos al eje principal.

Si se reciben los rayos solares sobre una lente convergente, un fósforo colocado en el foco principal F se enciende, porque vienen del infinito y son prácticamente paralelos al eje principal SF .

Recibiendo los rayos refractados sobre una pantalla corrediza, el lugar del foco está donde la iluminación se acerque más a un punto luminoso(Figura 3.4), que es el fundamento aplicado para el desarrollo del Presente proyecto de Grado.

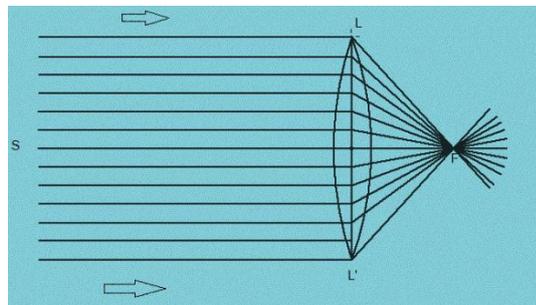


Figura 3.4: Convergencia de los rayos paralelos al eje (Vidal, 1984)

Si los rayos son paralelos a un eje secundario, SC , (Figura 3.4) como 1,2,3,4,5, se refractan pasando por el foco secundario F_1 de dicho eje, que se encuentra en el plano focal PPF_1 . Esta propiedad permite encontrar por donde se refracta cualquier rayo que llega a la lente. Basta trazar un eje secundario, paralelo al rayo considerado y determinar el foco secundario F_1 en el plano focal: por F_1 se refracta el rayo.

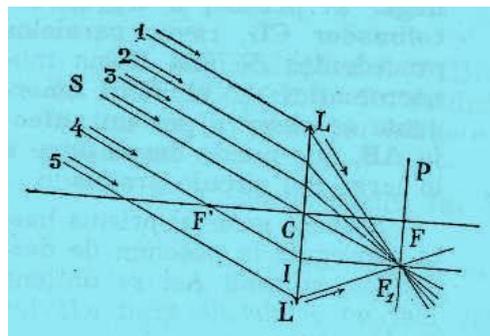


Figura 3.5: Rayos paralelos a un eje secundario (Vidal, 1984)

3.2.2 FÒRMULA DE LAS LENTES CONVERGENTES

Sea la lente biconvexa MN que forma la imagen A'P' del objeto AP, colocado sobre el eje principal PP' y sea también los dos rayos notables (1° y 3°) que emitidos por A, van a cruzarse en A' imagen de A.

Como en los espejos, llamamos (p) la distancia del objeto AP al centro óptico C de la lente; (p') la distancia de la imagen A'P' y (f) la distancia focal.

Los triángulos APC y A'P'C' son semejantes por tener los tres ángulos en C iguales, por opuestos por el vértice, los ángulos en P y P', rectos y los terceros en A y A' iguales también por complementos de ángulos iguales.

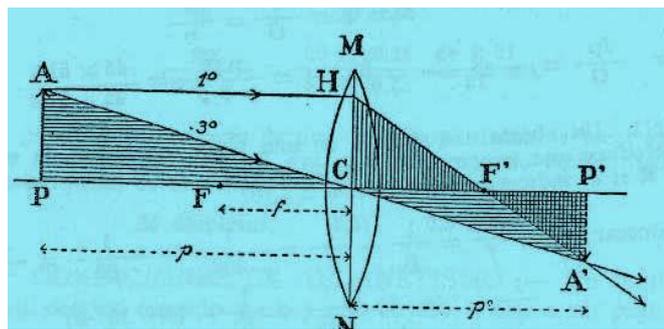


Figura 3.6: Fórmula de las lentes convergentes (Vidal, 1984)

Luego:

$$\frac{AP}{A'P'} = \frac{PC}{P'C} \quad (3.1)$$

Los triángulos CHF' y A'P'F' son también semejantes por las mismas razones.

Luego

$$\frac{CH}{A'P'} = \frac{CF'}{P'F'} \quad (3.2)$$

Pero como CH = AP. Sustituyendo este valor en la igualdad anterior, resultará:

$$\frac{AP}{A'P'} = \frac{CF'}{P'F'}$$

Comparando (3.1) y (3.2) se tiene:

$$\frac{PC}{P'C} = \frac{CF'}{P'F'}$$

O bien reemplazando:

$$\frac{p}{p'} = \frac{f}{p'-f}$$

Y por transformaciones sucesivas se tiene:

$$p(p'-f) = p'f \quad \text{o bien:} \quad pp' - pf = p'f$$

Y dividiendo todos los términos por $pp'f$

$$\frac{pp'}{pp'f} - \frac{pf}{pp'f} = \frac{p'f}{pp'f} \quad \text{o bien:} \quad \frac{1}{f} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{p}$$

Y por último

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

Que se puede enunciar así: *La suma de las inversas de las distancias objeto y su respectiva imagen a la lente es igual a la inversa de la distancia focal de dicha lente.*

La fórmula encontrada es idéntica a la de los espejos cóncavos, sin embargo, hay una diferencia en cuanto al valor de la distancia focal (f) que, a causa del índice de refracción (n) se deduce la fórmula siguiente:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} \right) \quad \text{Donde } r' \text{ y } r'' \text{ representan}$$

los radios de las superficies esféricas y se considera su como valor positivo en las

lentes convergentes y como negativo en las divergentes. Si hay una sola superficie esférica se suprime $\frac{1}{r}$ "

3.2.3 COMPORTAMIENTO ÓPTICO DE LALENTE DE AGUA

Para explicar el índice de refracción en este tipo de medio, se realiza un esquema de superficies compuesto por acrílico, agua, y acrílico donde se observa que la luz sufre interferencias para atravesar los diferentes las sustancias.

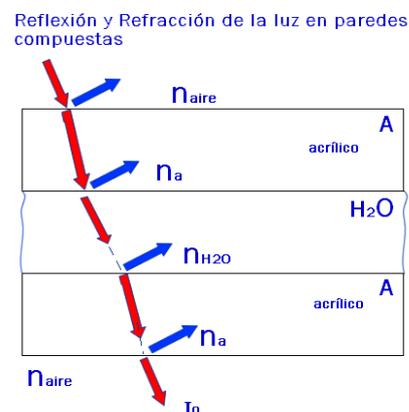


Figura 3.7 Modelo para análisis de reflexión y refracción de la luz (Guasumba J. , 2008)

En forma matemática el índice de refracción para este caso, se expresa así (Guasumba J. , 2008):

$$n_c = \left(\frac{n_a}{n_{H_2O}} \right)^2 \quad (3.3)$$

Donde: n_a Índice de refracción del acrílico, n_{H_2O} índice de refracción del agua.

La ecuación para determinar el foco óptico de la lente dada por el fabricante , se determina por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{f} = (n_c - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \left[\frac{(n_c - 1)}{n_c} \right] \frac{t}{r_1 r_2} \quad (3.4)$$

Donde: f Foco óptico, r_1 radio de la superficie de apertura, r_2 radio de la parábola, t espesor de la lente, n_c índice de refracción para paredes compuestas.

La ecuación de la parábola con eje focal el eje y , cuyo vértice no está en el origen de coordenadas, se define por la ecuación fundamental (Lehmann, 1985)

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3.5)$$

Los puntos de la parábola son: **P1(350,0)**, **P2(-350,0)**, y **P3(0,-88)**

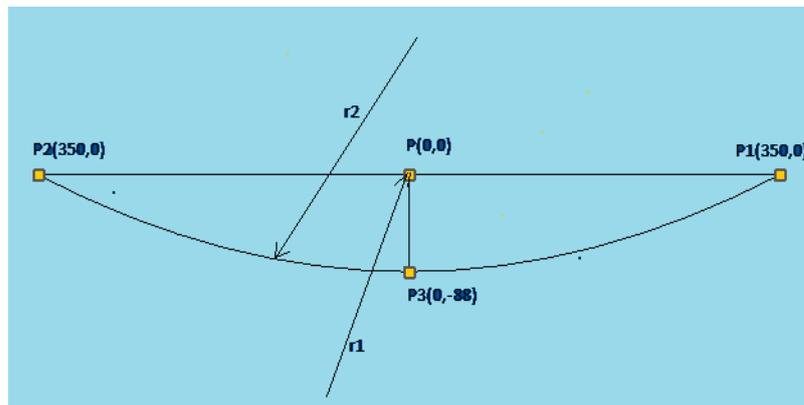


Figura 3.8 Modelo(I) para análisis y obtención de la ecuación

$$[1] \quad 0 = a(350)^2 + b(350) + c$$

$$[2] \quad 0 = a(-350)^2 + b(-350) + c$$

$$[3] \quad -88 = c$$

Resolviendo las ecuaciones [1], [2] y [3] obtenemos la siguiente ecuación:

$$y = 0.00072x^2 - 88$$

Para poder determinar el valor de r_2 radio de la parábola, se aplica la siguiente fórmula (Granville, 1985):

$$r_2 = \frac{(1 + y^2)^{3/2}}{y''} \quad (3.6)$$

Hallamos la primera derivada

$$\frac{dy}{dx} = 0.00072(2x)$$

Para el punto P(0,350), el valor de la primera derivada sería:

$$\frac{dy}{dx} = 0.00072(2(350))$$

$$\frac{dy}{dx} = 0.504$$

Hallamos la segunda derivada

$$\frac{d^2y}{d^2x} = 0.00144$$

Reemplazamos en (3.6)

$$r_2 = \frac{(1 + 0.504^2)^{3/2}}{0.00144}$$

$$r_2 = 975.196 \text{ mm}$$

$$r_1 = \infty$$

De acuerdo a la expresión (3.3)

$$n_a = 1.57 \quad n_{h2o} = 1.330$$

Se obtiene:

$$n_c = \left(\frac{1.57}{1.330} \right)^2$$

$$n_c = 1.393$$

Reemplazando en (3.4)

$$\frac{1}{f} = (1.393 - 1) \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{975.20} \right) + \left[\frac{(1.393 - 1)}{1.393} \right] \frac{8}{\infty(975.20)}$$

$$\frac{1}{f} = (0.393) \left(-\frac{1}{975.20} \right)$$

$$\frac{1}{f} = (0.393) \left(-\frac{1}{975.20} \right)$$

$$f = 2481.42 \text{ mm}$$

También podemos aplicar, la ecuación de la parábola con el eje focal en el eje y, con vértice en el origen de coordenadas.

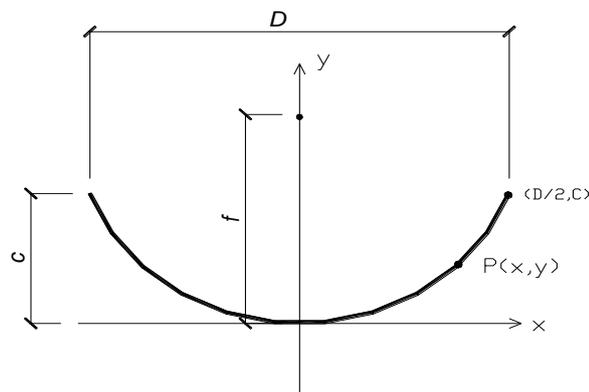


Figura 3.9 Modelo(II) para análisis y obtención de la ecuación

$$x^2 = 4py$$

$$y = x^2/4p$$

$$p = x^2/4y$$

$$p = 348.11$$

$$y = 0.000718 x^2$$

$$y' = 0.001436 x$$

$$y'' = 0.001436$$

Para el punto P(350,0) obtendremos:

$$y' = 0.5026$$

$$y'' = 0.001436$$

Reemplazando en (3.6) y luego en (3.4), obtenemos el valor de :

$$f = 2484.13 \text{ mm}$$

3.2.3.1 Eficiencia óptica

El paraboloide de revolución es una superficie producida al girar una parábola alrededor de su eje. La eficiencia óptica de una lente de agua, se determina por:

$$\eta_o = \rho_L \tau_a \alpha_a \gamma F k_s f \quad (3.7)$$

Donde: τ_a transmitancia de la cubierta del absorbedor, ρ_L reflejancia de la lente, α_a absortancia del absorbedor, γ imperfecciones en la superficie y dispersión de la radiación directa, F fracción de apertura no sombreada, k_s factor de suciedad, f_t error en el seguimiento. Todos estos parámetros son adimensionales y sus valores típicos son del orden de 0,90 a 0,95 con excepción de ρ_L cuyo valor está entre 0,75 y 0,85 según la calidad de medio óptico semitransparente.

3.2.3.2 Razón de concentración

Es la razón entre el área de apertura y el área del absorbedor, es decir

$$R_c = \frac{A_a}{A_r}$$

3.3 VOLUMEN DEL PARABOLOIDE

Para hallar el volumen de un paraboloides de revolución, se necesita restar el volumen del cilindro de diámetro $2a$ y altura c , con el volumen de la región que se encuentra bajo el paraboloides. El modelo geométrico para hallar la fórmula de cálculo del volumen para la región interna, entre cilindro y paraboloides, se presenta a continuación.

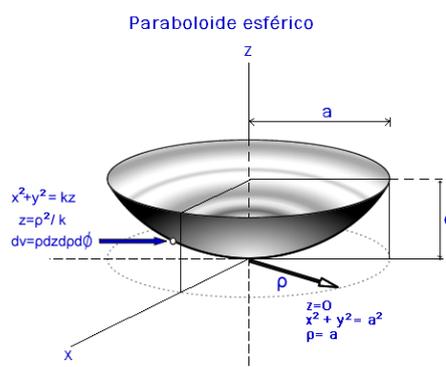


Figura 3.10 Paraboloides de revolución (Guasumba J. , 2008)

Entonces, el volumen buscado es cuatro veces el volumen mostrado en el corte de la Figura 3.10

$$V = 4 \int_0^{\pi/2} \int_0^a \int_0^{\rho^2/k} \rho dz d\rho d\phi \quad (3.8)$$

Al restar el volumen del cilindro con el de la región, se obtendrá el valor para el volumen del paraboloides de revolución.

3.4 ANÁLISIS TÉRMICO

La máxima temperatura que se puede alcanzar en los colectores planos es de 100 °C, la eficiencia de Carnot de una máquina térmica que opere a esta temperatura y la del ambiente es del 20 por ciento. En cambio al trabajar con concentradores que

operen a temperaturas sobre los 300 °C, la eficiencia de Carnot se incrementa al doble.

3.4.1 BALANCE DE ENERGIA

Realizando un balance de energía, se puede determinar que los concentradores son más eficientes que los colectores planos.

El calor útil entregado al fluido de proceso que puede ser agua o aceite térmico, está dado por la energía recibida por el absorbedor menos las pérdidas de calor al medio ambiente es decir:

$$q_u = q_{abs} - q_p = q_{abs} - U_c (T_c - T_a) A_r \quad (3.9)$$

Donde la energía recibida por el absorbedor está dada por:

$$q_{abs} = \eta_o A_a H_b \quad (3.10)$$

Siendo: A_a área de apertura del concentrador, A_r área del absorbedor, H_b radiación solar directa incidente sobre el colector, T_a temperatura ambiente en °C, T_c temperatura del absorbedor en °C, U_c coeficiente global de transferencia de calor y η_o eficiencia óptica. Además, la eficiencia instantánea del colector es:

$$\eta_c = \frac{q_u}{H_b A_a} \quad (3.11)$$

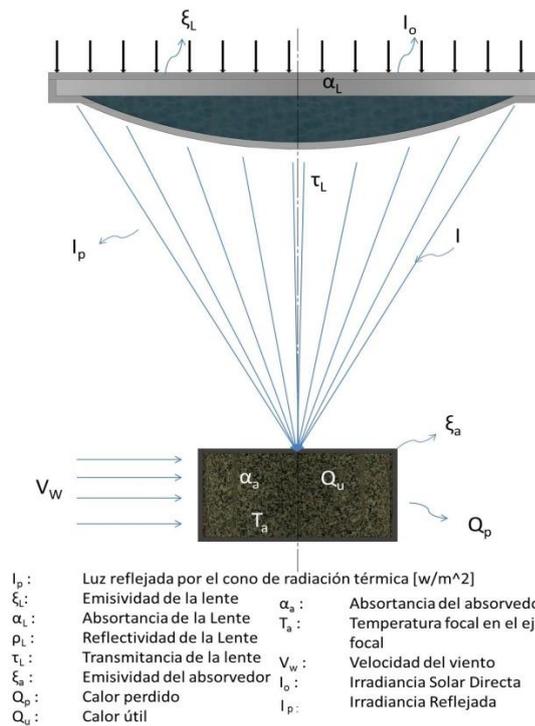


Figura 3.11 Desarrollo Experimental: Balance Energético

3.4.2 TEMPERATURA FOCAL (Guasumba J. , 2008)

Para el caso de concentradores en forma de lente, que utilizan el agua como medio óptico, se puede alcanzar enormes temperaturas en el foco, que dependen de la razón de concentración, la calidad de materiales, y la irradiancia directa incidente sobre la superficie colectora. A continuación, se muestra la expresión matemática desarrollada en la presente investigación.

$$T_f = \sqrt[4]{\frac{R_c H_b \tau_a \rho_L \alpha_a \gamma F k_s f_t}{\epsilon_a \sigma}} \quad (3.12)$$

Donde: T_f Temperatura focal en °K, R_c razón de concentración, H_b irradiancia, ϵ_a emisividad del recubrimiento del absorbedor, σ constante de Stefan- Boltzmann.

3.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES PRELIMINARES

3.5.1 RADIACIÓN SOLAR MEDIANTE EXPRESIONES MATEMÁTICAS

Este tipo de radiación solar se la obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Latitud} = 0^{\circ}18.31'' \text{ SUR}$$

$$\phi = \frac{-18.31}{60}$$

$$\phi = -0.316667^{\circ}$$

$$n = 17$$

$$\delta = 23.45 \cdot \text{sen} \left[\frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \right]$$

$$\delta = -20.917^{\circ}$$

$$W_s = a \cos(-\tan \delta \cdot \tan \phi)$$

$$W_s = 90.117^{\circ}$$

$$N = \frac{2}{15} W_s$$

$$N = 12.016$$

$$I_{sc} = 1354 \text{ W/m}^2$$

$$H_e = \frac{24 \cdot I_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \cdot \left[\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen } W_s + \frac{2 \cdot \pi \cdot W_s}{360} \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta \right]$$

$$H_e = 3.601 \times 10^7 \left(\text{J} / \text{m}^2 \right)$$

$$H_e = 10.003 \times 10^3 \left(\text{Wh} / \text{m}^2 \text{ día} \right)$$

$$n_{real} = 5.7$$

$$a = 0.23$$

$$b = 0.56$$

$$H_o = He \cdot \left[a + b \cdot \frac{n_{real}}{N} \right]$$

$$H_o = 4.956 \times 10^3 \text{ (Wh/m}^2 \text{ día)}$$

Donde:

ϕ = Valor de latitud para Sangolquí

n = Día con radiación promedio de un mes cualquiera.

d = Declinación, Posición angular del sol con relación al plano ecuatorial al medio día.

Ws = Ángulo de ocaso

N = Número teórico de horas de brillo solar.

He = Radiación fuera de la atmósfera terrestre

n_{real} = Horas de brillo solar reales.

a y b = Constantes de la regulación lineal de Armstrong – Page para el Ecuador.

H_o = Radiación en la superficie de la tierra.

El ejemplo de cálculo está realizado para el sitio en el que se va a ubicar el vaporizador solar y tomando en cuenta el día 17 del mes de enero (n) como día que representa un valor promedio de radiación para el mencionado mes.

Adicionalmente se ha utilizado el valor de horas de brillo solar reales proporcionados de igual manera por el INAMHI (Inhami, 1982).

A continuación se presenta una tabla en la que se indica los valores de radiación teóricas para los diferentes meses del año.

Tabla 3.1: Radiación teórica obtenida mediante expresión matemática

<i>Mes</i>	<i>día</i>	<i>n</i>	δ (°)	Φ (°)	W_s (°)	<i>N</i> (día)	<i>Ho</i> (Wh/m ² día)	<i>n_{real}</i> (h)	<i>H</i> (Wh/m ² día)
)Enero	17	17	20,917	0,305	90,117	12,016	9999,160	5,7	4956,142
Febrero	16	47	12,955	0,305	90,070	12,009	10329,813	5,7	5121,446
Marzo	16	77	-1,613	0,305	90,009	12,001	10424,869	5,7	5170,470
Abril	15	107	10,149	0,305	89,945	11,993	10076,733	5,7	4999,686
Mayo	15	137	19,264	0,305	89,893	11,986	9508,330	5,7	4719,130
Junio	11	167	23,354	0,305	89,868	11,982	9160,754	5,7	4547,305
Julio	17	197	21,354	0,305	89,881	11,984	9295,045	5,7	4613,622
Agosto	16	227	13,784	0,305	89,925	11,990	9786,765	5,7	4856,401
Septiembre	15	257	2,618	0,305	89,986	11,998	10231,978	5,7	5075,482
Octubre	15	287	-9,230	0,305	90,050	12,007	10299,902	5,7	5107,243
Noviembre	14	317	18,670	0,305	90,103	12,014	10046,773	5,7	4980,142
Diciembre	10	347	23,242	0,305	90,131	12,017	9838,190	5,7	4875,938
								Prom.	4918,584

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

3.5.1.1 Radiación real

La siguiente tabla indica el valor proporcionado por el INAMHI para los diferentes meses del año.

Tabla 3.2: Radiación real

<i>Mes</i>	<i>H</i> (Wh/m ² día)
Enero	4819,00
Febrero	4786,00
Marzo	4455,00
Abril	4590,00
Mayo	4790,00
Junio	4975,00
Julio	5599,00
Agosto	6038,00
Septiembre	5459,00
Octubre	5128,00
Noviembre	5127,00
Diciembre	5343,00
Promedio	5092,42

Fuente: INAMHI. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

3.5.1.2 Error porcentual entre Radiación teórica y real

La tabla 3.3 proporciona el cálculo del error porcentual correspondiente para cada mes, entre la radiación teórica obtenida mediante expresiones matemáticas y la radiación real con los datos obtenidos del INAMHI.

Tabla 3.3. Radiación real, teórica y error porcentual

<i>Mes</i>	<i>H_{REAL}</i>	<i>H_{TEÓRICA}</i>	<i>Error</i>
	(Wh/m ² día)	(Wh/m ² día)	(%)
Enero	4819,00	4956,14	-2,85
Febrero	4786,00	5121,45	-7,01
Marzo	4455,00	5170,47	-16,06
Abril	4590,00	4999,69	-8,93
Mayo	4790,00	4719,13	1,48
Junio	4975,00	4547,30	8,60
Julio	5599,00	4613,62	17,60
Agosto	6038,00	4856,40	19,57
Septiembre	5459,00	5075,48	7,03
Octubre	5128,00	5107,24	0,40
Noviembre	5127,00	4980,14	2,86
Diciembre	5343,00	4875,94	8,74
Promedio	5092,42	4918,58	3,41

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

Para tener una mejor idea de la variación entre los valores teóricos y reales, los datos tabulados en la tabla anterior lo podemos visualizar en la Figura 3.12, donde podemos apreciar que para los meses de enero, mayo, octubre y noviembre el error porcentual es mínimo mientras en el mes de agosto se tiene el mayor error porcentual.

De lo anterior podemos deducir que, lo ideal debería ser que la diferencia entre la radiación real y teórica debería ser mínima, puesto esto permitirá disponer de datos mas confiables que permitan desarrollar aplicaciones mas eficientes

Con los datos disponibles se han realizado el ajuste o tendencia reflejados en ecuaciones poli nómicas de orden 6, donde el factor R^2 tiene valores de 0,9122 para Hreal y 0,996 para Hteòrica, lo cual implica que las ecuaciones obtenidas reflejan plenamente la tendencia.

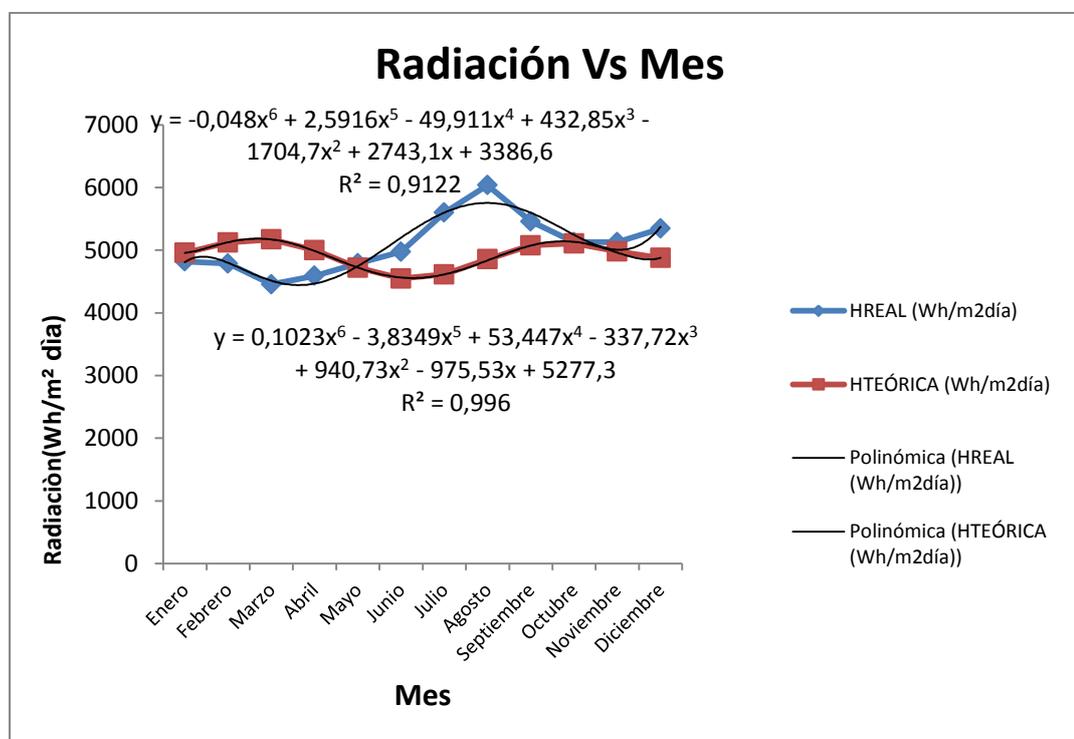


Figura 3.12 Radiación real y teórica vs mes del año

3.5.2 RADIACIÓN SOLAR MEDIANTE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Con el fin de que se pueda visualizar y entender de mejor manera el comportamiento de la lente de agua se procede a realizar las gráficas siguientes:

a) Gráfica de la irradiancia en función de las horas

Tabla 3.4 Datos de Irradiancia tomados a diferentes horas del mes de julio día tipo 22

ORD.	HORA	IRRADIANCIA (W/m²)
1	11h20	891
2	11h25	867
3	11h35	882
4	11h40	875
5	11h45	884
6	11h52	886
7	12h00	882
8	12h08	911
9	12h13	916
10	12h18	932
11	12h23	946
12	12h40	965
13	12h50	1002
14	13h05	972
15	13h10	928
16	13h15	939
17	13h20	977
18	13h25	895
19	13h32	954
20	13h37	947
21	13h42	956
22	13h47	986

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

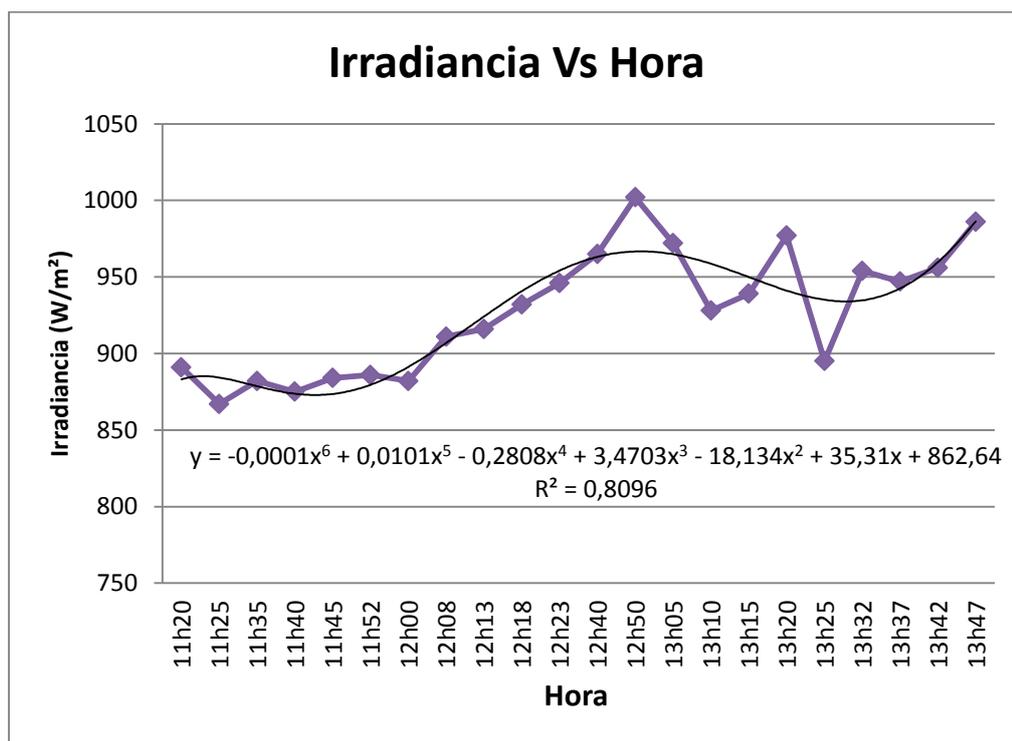


Figura 3.13 Gráfico de la Irradiancia tomados a diferentes horas del mes de julio día tipo 22

De acuerdo a la figura 3.13 se observa que en el inicio de la toma de datos se arranca a las 11h20 con un valor de irradiancia de 891 W/m^2 luego en el transcurso de las mediciones se puede observar fluctuaciones pequeñas hasta las 12h00, a partir de lo cual se tiene un incremento constante en el valor de la irradiancia hasta alcanzar un valor máximo a las 12h50 de 1002 W/m^2 , a partir de la cual se puede apreciar un decremento con fluctuaciones mayores que al inicio de la toma de datos, se termina el día de la toma de datos a las 13h47 con un valor de 986 W/m^2 . Igualmente podemos apreciar la ecuación de tendencia o regresión es una polinómica de grado 6, con un factor $R^2 = 0,896$.

b) Gráfica de la temperatura focal en función de la irradiancia

Tabla 3.5 Datos de la temperatura focal tomados a diferente irradiación del mes de julio del día tipo 22

ORD.	IRRADIANCIA <i>(W/m²)</i>	Tf <i>(° C)</i>
1	891	370
2	867	350
3	882	371
4	875	356
5	884	380
6	886	366
7	882	380
8	911	382
9	916	395
10	932	408
11	946	412
12	965	415
13	1002	419
14	972	325
15	928	329
16	939	350
17	977	318
18	895	340
19	954	330
20	947	320
21	956	303
22	986	250

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

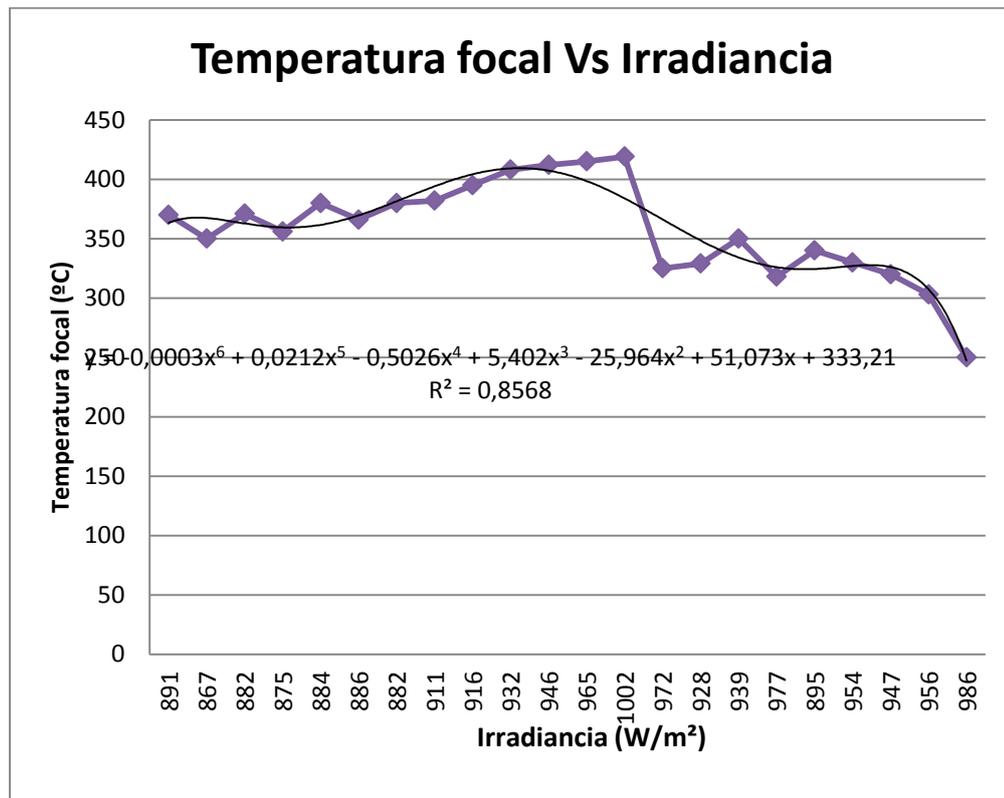


Figura 3.14 Gráfico de la Temperatura focal en función de la irradiancia del mes de julio del día tipo 22

Como se observa en la figura 3.14 mientras la irradiancia es mayor la temperatura focal aumenta. También observamos que al iniciar la toma de datos la temperatura focal es de 370 ° C, hasta alcanzar una temperatura máxima 419 ° C, igualmente con un valor de irradiancia máxima de 1002 W/m², a partir de los cuales tanto como la irradiancia y temperatura focal disminuye hasta cuando se termina el día de la toma de datos con valores de 250 °C y 986 °C.

c) **Gràfica de la temperatura concentrador en función de la irradiancia**

Tabla 3.6 Datos de temperatura en el concentrador tomados a diferente irradiación del mes de julio del día tipo 22

ORD.	IRRADIANCIA (W/m²)	Tc (° C)
1	891	22
2	867	22
3	882	22
4	875	22
5	884	22
6	886	22
7	882	23
8	911	23
9	916	22
10	932	23
11	946	23
12	965	23
13	1002	23
14	972	23
15	928	23
16	939	23
17	977	23
18	895	23
19	954	23
20	947	23
21	956	23
22	986	23

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

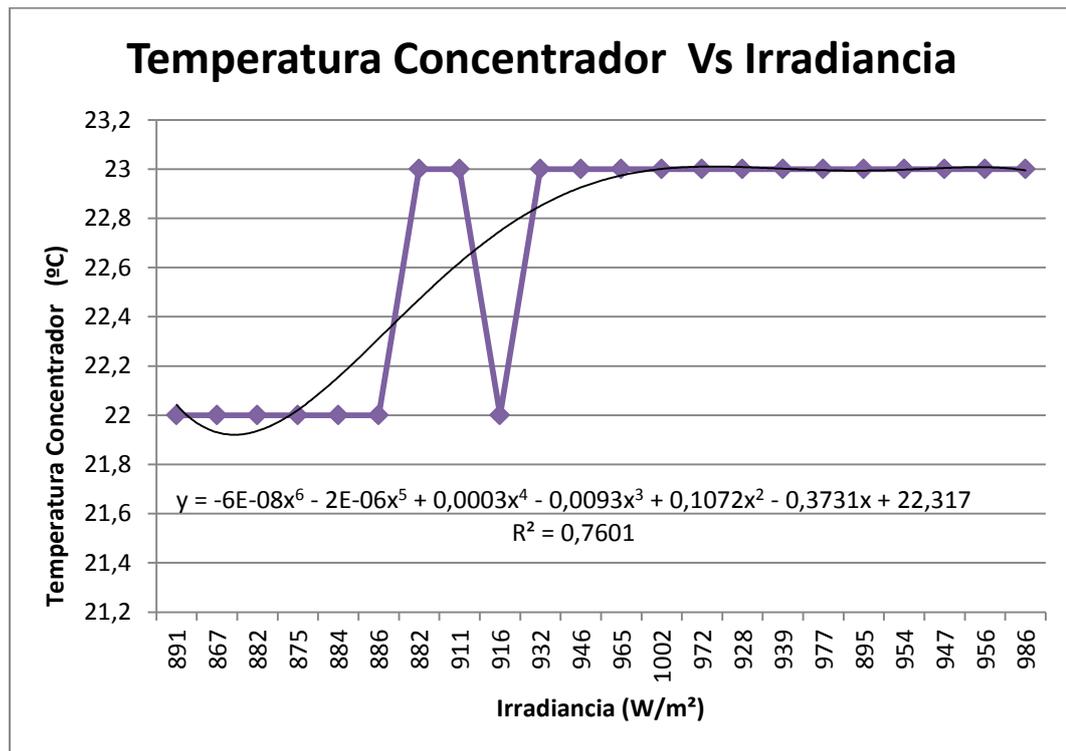


Figura 3.15 Gráfico de la Temperatura en el absorbedor en función de la irradiación del mes julio del día tipo 22

Como se observa en la figura 3.15 se inicia la toma de datos con un valor de irradiación de 891 W/m², para lo cual se tiene un valor de temperatura en el absorbedor de 22 ° C. Es importante indicar que la temperatura en el absorbedor es prácticamente la temperatura ambiente.

A medida que se incrementa el valor de la irradiación la temperatura en el absorbedor aumenta pero en un valor nada significativo de 1 ° C es decir a un valor de 23° C, el cual permanece constante hasta el cierre del día de toma de datos con un valor de irradiación de 986 ° C.

d) Gráfica de la humedad relativa en función de la temperatura ambiente

Tabla 3.7 Datos de la humedad relativa tomado a diferente temperatura ambiente del de julio del día tipo 22

ORD.	Ta (° C)	HR (%)
1	22	35
2	22	36
3	22	34
4	22	34
5	22	32
6	22	35
7	23	34
8	23	31
9	22	33
10	23	34
11	23	34
12	23	34
13	23	35
14	23	37
15	23	36
16	23	36
17	23	35
18	23	35
19	23	34
20	23	35
21	23	36
22	23	33

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

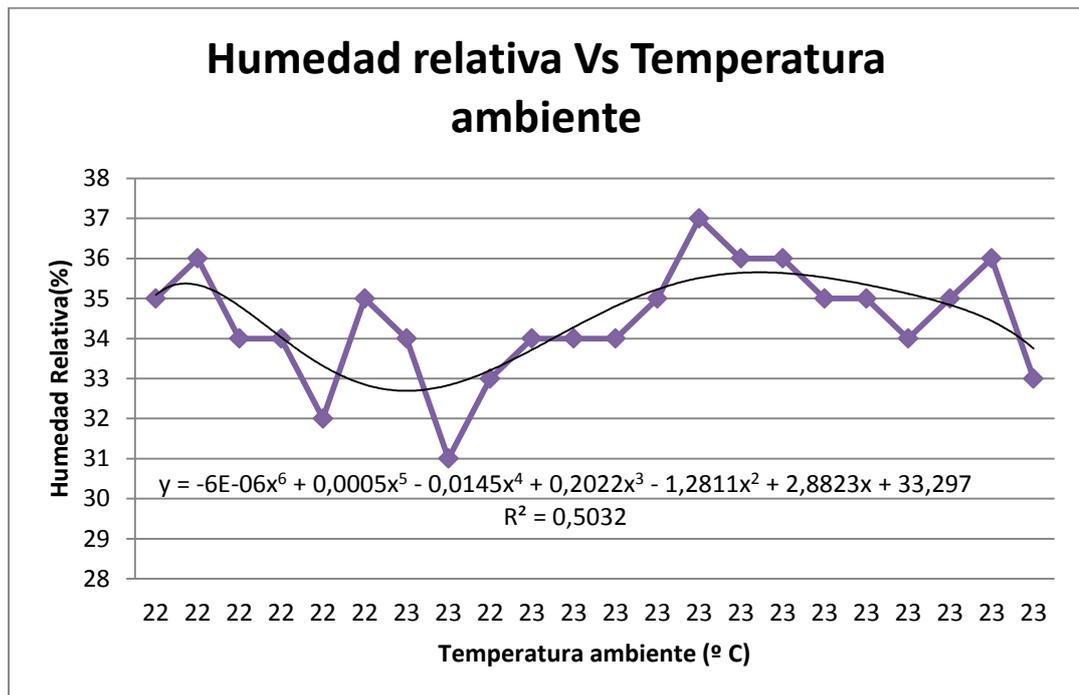


Figura 3.16 Gráfico de la Humedad relativa en función de la temperatura ambiente del mes julio del día tipo 22

Como se puede apreciar en la figura 3.16 mientras aumenta la temperatura ambiente la humedad relativa disminuye y mientras la temperatura ambiente disminuye la humedad relativa aumenta.

Igualmente en la figura podemos apreciar que el valor de R^2 , tiene un valor de 0,5032, que es un valor intermedio entre 0-1, lo que nos indica que la ecuación de tendencia o regresión no es representativo.

3.5.3 DISTANCIA FOCAL

3.5.3.1 Cálculo de la distancia de la distancia focal

En el Apartado 3.2.4, mediante la aplicación de la ecuación 3.4 de realizó el cálculo respectivo, obteniéndose un valor de :

$$f = 2484.13 \text{ mm}$$

3.5.3.2 Medición de la distancia de la distancia focal

Para la obtener esta medida se llenó con agua la lente y esta se fue colocando a diferentes alturas con respecto a un plano horizontal que se tomó como referencia.

La altura correcta se determinó cuando los rayos solares que atravesaron la lente de agua y convergieron en un punto luminoso de 35 mm de diámetro. La medida fue de:

$$f = 2481,82 \text{ mm}$$

Comparando entre lo teórico y experimental podemos apreciar que una diferencia de 2.31 mm, que corresponden al 0,093 %.

3.5.3.3 Cálculo de la Temperatura focal

La expresión matemática para el cálculo de la temperatura focal esta por la ecuación 3.11:

$$T_f = \sqrt[4]{\frac{R_c H_b \tau_a \rho_L \alpha_a \gamma F k_s f_t}{\varepsilon_a \sigma}}$$

Reemplazando los datos correspondientes:

$$R_c = (D/d)^2 = (0.7/0.05)^2 = 196$$

$$H_b = 1002 \text{ W/m}^2 = 0.1002 \text{ W/cm}^2$$

$$\tau_a = 0.90$$

$$\rho_L = 0.75$$

$$\alpha_a = 0.91$$

$$\gamma = 0.90$$

$$F = 0.91$$

$$k_s = 0.91$$

$$f_t = 0.90$$

$$\varepsilon_a = 0.89$$

$$\sigma = 5.7 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4$$

Se obtiene un valor de la temperatura focal teórica o calculada de :

$$T_f = 1 \text{ } ^\circ\text{K} = 1608,81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.5.3.4 Temperatura focal experimental

De acuerdo a la tabla 3.5, el valor máximo de la temperatura focal experimental alcanzada es de 419 C° , mientras la calculada es de 1608,81 °C. Con los datos disponibles inicialmente podemos apreciar que los datos experimentales o medidos no guardan relación en lo absoluto con el valor obtenido mediante la expresión matemática planteada.

CAPITULO 4

HOMOLOGACIÓN DE LA LENTE DE AGUA

4.1 METODOLOGÍA

Para la ejecución del presente proyecto en el cual se utilizará un medio óptico natural como es el caso del agua, se tiene que, calibrar los instrumentos de medición, pesar el fluido y colocarlo en el casquete parabólico, orientar la superficie plana, hasta que el eje normal se encuentre paralelo con la dirección de la radiación solar directa, a continuación, realizar la toma de datos de la temperatura ambiente, temperatura de la pared del absorbedor (temperatura focal), irradiancia solar, irradiancia solar difusa, velocidad del viento, humedad relativa.

Por otra parte, se deben mitigar los riesgos físicos inherentes al experimento, producidos por la radiación, calor, alta temperatura y luminosidad mediante el uso de equipo de protección adecuado, tales como:

- Guantes de amianto
- Ropa(mandil u overol) de un material apropiado para la radiación
- Gafas apropiadas para la luminosidad
- Casco protector

4.2 CRONOGRAMA DE OPERACIONES TECNOLÒGICAS

Para la preparación del concentrador parabólico esférico se determinó inicialmente el proceso de actividades y conforme se fueron desarrollando las mismas, se encontraron problemas e inconvenientes que fueron salvados con soluciones prácticas, sugeridas por los colaboradores y por el elaborador del proyecto. De esta manera se enumera inicialmente las etapas de la preparación del prototipo experimental en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: *Etapas de preparación del concentrador parabólico esférico*

ORD.	ACTIVIDAD
1	Revisión del estado del casquete parabólico
2	Comprobación de las medidas casquete parabólico
3	Realización de perforaciones en el contorno de la tapa y bordes del casquete parabólico para su posterior ensamble
4	Realización de perforaciones y roscado, en la tapa para ingreso y desfogue del agua a la lente
5	Colocación de neoplos de 1 x 2 pulg. , en los lugares indicados en 4
6	Trazado, y corte del material de empaque o sello entre la tapa y cuerpo del casquete parabólico
7	Elaboración de las arandelas de $\frac{3}{4}$ pulg., en duralòn
8	Ensamblaje de la lente
9	Elaboración del bastidor del concentrador
10	Elaboración del sujetador de la lente
11	Elaboración del sujetador concentrador focal

ORD.	ACTIVIDAD
12	Elaboración extensión sujetador concentrador focal
13	Elaboración concentrador focal
14	Instalación de los accesorios necesarios para completar el conjunto
15	Comprobaciones dimensionales del conjunto
16	Llenado con agua, de la lente
17	Comprobaciones de hermeticidad del conjunto
18	Pruebas de funcionamiento
19	Toma de datos
20	Conclusiones y recomendaciones del proyecto

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

4.3 LENTE CONCENTRADOR

4.3.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

A pesar de que el casquete parabólico y la respectiva tapa que conforman la lente de agua se lo recibió ya fabricado es importante conocer el proceso el material y el proceso de producción.

La plancha de acrílico que se la ubica horizontalmente, se la calienta electrónicamente, cuando llega a la temperatura de plasticidad, por efecto de la gravedad y de aire a presión, empieza a tomar forma de una catenaria. En este caso, los únicos parámetros definidos son el diámetro y la profundidad, la catenaria, a pesar de ser muy parecida a la parábola no garantiza el perfil requerido cierto tipo de aplicaciones. Para el presente proyecto vamos ha considerar que el perfil es una parábola



Figura 4.1: Lente del concentrador parabólico esférico

4.4 BASTIDOR O ESTRUCTURA SOPORTANTE

En el diseño de la estructura soporte del concentrador se ha previsto que esta conste de dos partes, la primera que consiste de un cuerpo fijo que servirá de apoyo con el suelo mientras que la segunda, será en la que se apoya la lente concentrador y permite un mecanismo manual de seguimiento al sol; sin embargo ambas partes están unidas entre si con elementos estructurales comunes que forman una sola estructura soporte o bastidor.

Dado que las cargas que soportará la estructura o bastidor son relativamente bajas, tales como los pesos : del concentrador focal, del sujetador de la lupa, del conjunto lente – agua, del sujetador concentrador focal, de la extensión del sujetador concentrador focal y además de existir una pequeña carga de apoyo en el instante de realizar el montaje de la lupa, el llenado, vaciado del agua en la misma, como también en su mantenimiento, permiten, que la estructura sea diseñada respecto al proceso de soldadura, en virtud de lo cual se emplea tubería estructural de acero al carbono ASTM A-36, cuadrado de 2 pulgadas por 1.5 mm. de espesor, el cual permite soldadura eléctrica sin inconvenientes de daños en el material y además,

existente con gran facilidad en el mercado, cumpliendo adicionalmente con las siguientes características:

- Resistencia mecánica alta
- Robustez
- Facilidad de montaje
- Buena apariencia estética
- Bajo costo

En la figura 4.2 se puede apreciar la estructura soportante, sobre el cual se colocaron el resto de elementos componentes del concentrador parabólico esférico y detalles constructivos se los puede apreciar en el Anexo C:



Figura 4.2: Estructura soportante

Además como los elementos que se ensamblan no presentan un peso considerable, la estructura no está sometida a vibraciones, no esta sometida a ningún tipo de esfuerzos, no justificó que se realice análisis estructural alguno.

4.5 SUJETADOR DE LALENTE

Este elemento mecánico permite asegurar el conjunto lente – agua al bastidor o estructura soportante.

La forma geométrica del sujetador fue la de un hexágono, pues permite tener puntos de apoyo y sujeción apropiados a la estructura soportante, que es muy importante durante el movimiento del seguimiento al sol.



Figura 4.3: Sujetador de la lente

Los detalles constructivos se pueden apreciar en el anexo C

4.6 SUJETADOR CONCENTRADOR FOCAL

Este elemento mecánico, que son simplemente una especie de brazos que igualmente están sujetos a la estructura soportante y que permiten sujetar el concentrador focal donde se colocó el cuerpo de prueba y sobre el cual se realizaron las lecturas de temperatura correspondientes



Figura 4.4: Sujetador del concentrador focal

Los detalles constructivos se pueden apreciar en el anexo C

4.7 EXTENSIÓN SUJETADOR DEL CONCENTRADOR FOCAL

Este elemento mecánico inicialmente, no considero su diseño y construcción, pero la distancia focal calculada mediante la expresión matemática correspondiente no proporcionó el punto o foco de máxima temperatura, puesto que distancias sobre o bajo el foco óptimo, registran menores valores de temperatura.

Por lo tanto mediante este elemento podemos variar la posición del cuerpo de prueba a diferentes posiciones en el sentido del eje focal, hasta encontrar el punto luminoso de 35 mm de diámetro que es un indicativo de que en este sitio tendremos el punto focal óptimo.

4.8 CONCENTRADOR FOCAL

Sobre este elemento mecánico se colocó el cuerpo de prueba. Puesto que sobre este elemento va a estar el foco óptimo, el material del cual se fabricó es una placa de 2mm de espesor en acero al carbón.



Figura 4.5: Concentrador focal

4.9 SELECCIÓN DE MATERIALES

Los materiales seleccionados para la construcción del modelo son los que a continuación se detallan, pero debiendo tomar en cuenta que en el transcurso de la construcción se pueden realizar modificaciones en beneficio del mejoramiento del mismo.

4.9.1 LENTE DE AGUA

La lente está constituida por: el casquete parabólico y su respectiva tapa. El material de construcción es acrílico. Tanto en la periferia de la tapa como en los bordes del casquete se realizaron 38 perforaciones de $\frac{1}{4}$ pulg. , de diámetro, en las cuales se colocaron los tornillos y sus respectivas tuercas en acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ x $\frac{3}{4}$ pulg, permitiendo realizar el ensamble de las dos partes.

Para evitar un contacto directo entre las tuercas y la lente se colocó unas arandelas de $\frac{1}{4}$ pulg., elaboradas en un material plástico, conocido como duralón, que permitió absorber las esfuerzos internos debido a la contracción y expansión del material de la lente debido a variaciones de temperatura, lo cual puede ocasionar

fisuras y roturas en la misma. Los tornillos y las tuercas deben ser en acero inoxidable puesto que van a estar expuestos a la intemperie, que puede ocasionar la oxidación de los mismos y contaminar el agua contenida en la lente.

En la tapa de la lente se realizaron dos perforaciones roscadas de 1 pulg., sobre las cuales se colocaron neopros con sus respectivos tapones de 1 pulg x 2 pulg, en pvc., los mismos que permitirán el ingreso y desfogue del agua. Para lograr una hermeticidad adecuada, entre la tapa y el casquete se colocó un material denominado fomix(Figura 4.6), que permitió conseguir el objetivo, no se utilizó un empaque industrial por su costo, o en su defecto un silicone o pegamento, porque es muy necesario realizar el mantenimiento de la lente que básicamente que consiste en la limpieza de las paredes internas y externas como también el cambio de agua, ya que en el tiempo se puede observar el apareamiento de algas.



Figura 4.6: Material de empaque o sello(fomix)

El llenado de la lente se realizó con 25 litros de agua, que corresponden a una masa de 25 kg, y un peso de 245 N.

El agua que se utilizó no fue de la red local, sino más bien los botellones de agua elaborada y distribuida por las envasadoras respectivas. La razón, se pudo apreciar

durante la ejecución del proyecto que la formación de algas es más propensa cuando se usa agua de la red local. La presencia de algas disminuye considerablemente la eficiencia óptica de la lente de agua y consecuente del concentrador.

Debemos recordar que la expresión matemática para la eficiencia óptica esta dada por ecuación 3.6, y la cual es a su vez parte de la expresión matemática 3.11 que nos permite obtener la temperatura focal



Figura 4.7: Llenado de la lente de agua

Los materiales que se han utilizado para la construcción de la lente de agua se especifican en la tabla 4.2:

Tabla 4.2 *Materiales de la lente de agua*

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Casquete parabólico	1
2	Tapa casquete	6
4	Tornillos en acero inoxidable	6
5	Tuercas en acero inoxidable	1
6	Fomix	1
7	Neplos	2
8	Tapones de los neplos	2
9	Agua en litros	5

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

4.9.2 BASTIDOR O ESTRUCTURA SOPORTANTE

Toda la estructura soporte esta construida con tubo cuadrado de 50.8 x 1.5 mm de espesor de acero negro ASTM A-36, soldado sus partes con electrodo E 6011. Consta de un marco rectangular inferior de 1380 mm x 1540 mm y cumple la función de base de la estructura, a este marco van soldados 4 garruchas, que permiten el desplazamiento del sistema concentrador parabólico esférico.

La estructura también tiene dos marcos verticales rectangulares de 788 mm x 3400 mm en cuya parte superior se une el sujetador inferior de la lente de agua, en forma de hexágono mediante pernos de 12.7 mm x 63.5 mm, 1 por lado los cuales permitirán dar el movimiento giratorio necesario para lograr en la lente de agua el sistema de seguimiento al sol. Igualmente a los dos marcos verticales va soldada la estructura en ángulo de 25.4 mm, para las gradas las mismas que permiten llegar a la lente ubicada en la parte superior de la estructura soportante ya sea para llenar o vaciar la lente con agua, como también retirarla y realizar el mantenimiento de la misma.

Los materiales que se han utilizado para la construcción de la estructura soportante se especifican en la tabla 4.3:

Tabla 4.3 *Materiales estructura soportante*

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Tubo cuadrado de 2", ASTM A36, L = 6 m	4
2	Garruchas	4
3	Perno ½ " x 2 ½"	2
4	Tuerca ½ "	2
5	Electrodos 6011 en libras	4

6	Lija para hierro # 150 en pliegos	4
7	Lija para hierro # 240 en pliegos	4
8	Pintura anticorrosivo negro mate en litros	0.5
9	Pintura esmalte negro mate en litros	0.5

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

4.9.2 SUJETADOR DE LALENTE

Esta formado por dos marcos de forma hexagonal de 820 mm entre lados opuestos, no se requiere mayores observaciones a no ser la realización de 6 agujeros de diámetro ¼” en los vértices del hexágono

Los sujetadores están contruidos con tubo rectangular de 1 “ x 2 “. La lente se ubica en la mitad de los dos separadores, los cuales están sujetos entre sí mediante 6 pernos y tuercas de ¼” x 3 ½”. Los materiales que se han utilizado para la construcción del sujetador de la lente se especifican en la tabla 4.4:

Tabla 4.4 *Materiales del sujetador de la lente*

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Tubo rectangular 1 “ x 2”, ASTM A36, L = 6 m	2
2	Perno ¼ “ x 3 ½”	6
4	Tuerca ¼ “	6
5	Electrodos 6011 en libras	1
6	Lija para hierro # 150 en pliegos	2
7	Lija para hierro # 240 en pliegos	2
8	Pintura anticorrosivo negro mate en litros	0.5
9	Pintura esmalte negro mate en litros	0.5

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

4.9.3 SUJETADOR CONCENTRADOR FOCAL

Los dos sujetadores del concentrador focal, están contruidos por tubería cuadrada de 1 “. Cada sujetador tiene dos perforaciones de diámetro ½ “ en los extremos de la misma, lo que le permite acoplarse por el un extremo al sujetador inferior de la lente y por el otro a una extensión que acopla al concentrador focal. Los materiales que se han utilizado para la construcción del sujetador de la lente se especifican en la tabla 4.5:

Tabla 4.5 *Materiales del sujetador concentrador focal*

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Tubo cuadrado de 1 “, ASTM A36, L = 6 m	2
2	Perno ½ “ x 1 ½ “	2
4	Tuerca ½ “	2
5	Electrodos 6011 en libras	0.5
6	Lija para hierro # 150 en pliegos	1
7	Lija para hierro # 240 en pliegos	1
8	Pintura anticorrosivo negro mate en litros	0.25
9	Pintura esmalte negro mate en litros	0.25

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

4.9.4 EXTENSIÓN SUJETADOR DEL CONCENTRADOR FOCAL

Este elemento no estuvo considerado en la fase inicial del diseño del prototipo, mas se lo tuvo que incorporar para poder situar el concentrador focal en el punto óptimo o sea en el punto de máxima temperatura.

Estos elementos que igualmente son dos, estan contruidos por tubería cuadrada de ¾”, con perforaciones o agujeros de diámetro ½ “ en los extremos, lo que le

permite acoplarse por el un extremo al sujetador del concentrador y por el otro al concentrador propiamente.

Los materiales que se han utilizado para la construcción del sujetador de la lente se especifican en la tabla 4.6:

Tabla 4.6 *Materiales extensión del sujetador de la lente*

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Tubo cuadrado $\frac{3}{4}$ “, ASTM A36, L = 6 m	2
2	Perno $\frac{1}{2}$ “ x 1”	2
3	Tuerca $\frac{1}{2}$ “	2
4	Lija para hierro # 150 en pliegos	1
5	Lija para hierro # 240 en pliegos	1
6	Pintura anticorrosivo negro mate en litros	0.25
7	Pintura esmalte negro mate en litros	0.25

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

En la figura 4.8, tenemos el concentrador parabólico esférico en la etapa final de construcción, listo para ensamble definitivo, y para la ejecución de las pruebas respectivas. Cabe indicar que el diseño original de la estructura soportante, se tuvo que modificar y concretamente incrementar su altura, debido a un error en el cálculo de la altura focal óptima



Figura 4.8 Concentrador parabólico esférico

4.10 INSTRUMENTOS DE MEDIDA

4.10.1 TERMÓMETRO INFRAROJO PARA ALTA TEMPERATURA CON PUNTERO LASER – MODELO 42545 ^a.

Características¹

- Este tipo de termómetros IR miden la temperatura de superficie de un objeto. La óptica del termómetro detecta la energía emitida, reflejada y transmitida. La electrónica del termómetro procesa la información a una lectura de temperatura que es indicada en la pantalla LCD.
- La cantidad de energía IR emitida por un objeto es proporcional a la temperatura y capacidad del objeto para emitir energía. Esta habilidad es conocida como emisividad y se basa en el material del objeto y el acabado de la superficie. Los valores de emisividad van desde 0.1 para un objeto muy reflectante hasta 1.00 para un objeto con acabado negro mate. Para la toma de datos del presente Proyecto de Grado se trabajó con 0.97, es decir con una tendencia a un objeto muy reflectante.

¹ <http://www.extech.com.es/instruments/product.asp>



Figura 4.9 Termómetro infrarojo para alta temperatura

4.10.2 TERMÒANEMOMETRO – EXTECH INSTRUMENTS MODELO 407113.

Características²

- Indica el flujo del aire (CFM) o la velocidad del aire más la temperatura.
- Las paletas de metal soportan una temperatura de hasta 175 °F (80 °C) y una velocidad del aire de hasta 6890 ft (2100 m)/min.
- El flujo de aire se muestra en 3 modos: Valor instantáneo, hasta un promedio de 20 puntos o un valor de flujo de 2/3.
- Registro y memoria MÍN. y MÁX.Registro de datos más apagado automático.
- Interfaz RS-232 para PC incorporada
- Se debe evitar la exposición por periodos largos de tiempo a la luz solar, especialmente la parte de la pantalla digital

² <http://www.extech.com.es/instruments/product.asp>

Tabla 4.7 Características termo anemómetro

<i>Mediciones de velocidad del aire</i>	<i>Escala</i>	<i>Resolución</i>	<i>Precisión (% lectura)</i>
m/s (metros por segundo)	0,50 – 35,0 m/s	0.01 m/s < 10 0.1 m/s > 10	± (2% + 0.2m/s)
km/h (kilómetros por hora)	1,8 – 126,0 km/h	0,1 km/h	± (2% + 0.8km/h)
ft/min (pies por minuto)	100 - 6890 ft/min	ft/min	± (2% + 40ft/min)
mph (millas por hora)	1,1 – 78,3 mph	0,1 mph	± (2% + 0.4m/h)
nudos (millas náuticas por hora)	1,0 a 68,0 nudos	0,1 nudos	± (2% + 0.4nudos)

<i>Medición del flujo del aire</i>	<i>Escala</i>	<i>Resolución</i>	<i>Precisión (% lectura)</i>
MCM (metros cúbicos por minuto)	0-999.900 m ³ /min	0,001 a 100	0 a 9.999 m ²
PCM (pies cúbicos por minuto)	0-999.900 ft ³ /min	0,001 a 100	0 a 9.999ft ²

<i>Temperatura del aire</i>	<i>Escala</i>	<i>Resolución</i>	<i>Precisión</i>
	0 a 80 °C (32 a 175°F)	0,1 °F/C	0,8°C (1,5°F)

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

**Figura 4.10** Termoanemómetro

4.10.3 MEDIDOR DE RADIACIÓN – RAYDEC

4.10.4 Características

- Es un instrumento de medición elemental de la radiación solar
- Para realizar la lectura correspondiente, debe encender el medidor , colocar el sensor en el sol y orientado hacia el norte
- La lectura obtenida esta en (W/m^2)
- Se debe evitar la exposición por periodos largos de tiempo a la luz solar, especialmente la parte de la pantalla digital
- Las lecturas son instantáneas
- Los medidores están calibrados en días despejados y con luz solar natural
- Estos instrumentos están diseñados para su uso en campo.

Tabla 4.8 Características medidor de radiación

Precisión	$\pm 3\%$ (0 - 1200 w/m ²)
Calibración	a la luz natural del sol
Resolución	1 watt/m ²
Pantalla lectura	0 - 1999
Sensor	células fotovoltaicas policristalinas
Tamaño del sensor	1 x 4 cm

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*



Figura 4.11 Medidor de radiación

4.10.4 HIGROTÈRMÒMETRO – EXTECH INSTRUMENTS

Características

- La pantalla LCD doble muestra las lecturas de humedad relativa y temperatura simultáneamente
- Evitar exponer directamente al sol la pantalla LCD



Figura 4.12 Higrotermòmetro

4.10.5 CUERPO DE PRUEBA

Características

- Elaborado en plancha metálica embutida
- Pintura electrostática en color negro



Figura 4.13 Cuerpo de prueba

4.10.6 GAFAS PROTECTORAS

Características

- Accesorio apropiados para la luminosidad del sol



Figura 4.14 Gafas protectoras

4.10.7 GUANTES

Características

- Permiten el manipuleo del cuerpo de prueba, que llegó alcanzar una temperatura máxima de 419 °C.



Figura 4.15 Gafas guantes

4.10.8 GORRO PROTECTOR

Características

- Permiten protección de los rayos solares durante la realización de las pruebas



Figura 4.16 Gorro protector

4.11 TOMA DE DATOS

4.11.1 MEDICION DE LA RADIACION SOLAR

La radiación solar medidas se obtuvieron con la ayuda de un radiómetro o medidor de radiación solar indirecta, el cual fue debidamente calibrado (ver figura 4.11).

Tabla 4.9 Radiación solar y temperatura focal 13 julio 2012

Orden	Hora	Irradiancia (W/m ²)	T _{fm} (° C)	T _{fc} (° C)
1	9h22	1115	130	1420,87
2	9h55	1400	140	1488,09
3	10h00	1203	148	1442,88
4	10h12	1422	175	1492,83
5	10h25	852	166	1346,21
6	10h44	1240	208	1451,77
7	10h45	1299	345	1465,55
8	11h00	1303	122	1466,47
9	11h05	1502	158	1236,64
10	11h15	1478	214	1504,67
11	11h20	1525	400	1514,34
12	11h30	1361	420	1479,53
13	11h44	1514	240	1512,10
14	11h50	1622	448	1533,63
15	12h55	1800	320	1566,88
16	13h10	1400	350	1488,09
17	13h15	1300	270	1465,78

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

Tabla 4.10 *Radiación solar y temperatura focal 15 julio 2012*

Orden	Hora	Irradiancia (W/m²)	T_{fm} (° C)	T_{fc} (° C)
1	11h07	780	320	1322,78
2	11h09	750	377	1312,54
3	11h15	800	280	1329,45
4	11h20	900	278	1361,02
5	11h27	940	240	1372,91
6	11h31	600	252	1256,137
7	11h35	950	247	1375,82
8	11h40	950	204	1375,82
9	11h48	940	248	1372,91
10	11h58	650	320	1003,00
11	12h03	1015	293	1121,22
12	12h20	950	211	1102,82
13	12h25	920	173	1367,01
14	12h30	820	370	1355,99
15	12h40	720	270	1028,98
16	12h45	400	210	1161,36

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

Tabla 4.11 Radiación solar y temperatura focal 22 julio 2012

Orden	Hora	Irradiancia (W/m ²)	Tfm (° C)	Tfc (° C)
1	11h20	891	370	1358,29
2	11h25	867	350	1350,90
3	11h35	882	371	1355,53
4	11h40	875	356	1353,38
5	11h45	884	380	1356,15
6	11h52	886	366	1356,76
7	12h00	882	380	1355,53
8	12h08	911	382	1364,33
9	12h13	916	395	1365,82
10	12h18	932	408	1370,56
11	12h23	946	412	1374,66
12	12h40	965	415	1380,15
13	12h50	1002	419	1390,61
14	13h05	972	325	1382,15
15	13h10	928	329	1369,38
16	13h15	939	350	1372,62
17	13h20	977	318	1383,58
18	13h25	895	340	1359,50
19	13h32	954	330	1376,98
20	13h37	947	320	1374,95
21	13h42	956	303	1377,56
22	13h47	986	250	1386,13

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

4.12 ANALISIS DE DATOS Y DISCUSION

Con el propósito de reducir los cálculos, de los datos tomados los días 13, 15 y 22 de julio, vamos a considerar de este último, debido a que los datos del día 13 el radiómetro no estuvo calibrado correctamente, y del 15 se tiene pocas lecturas y las condiciones climáticas no fueron favorables.

4.12.1 MAGNITUDES Y SIMBOLOS RELACIONADOS CON EL MODELO MATEMATICO DEL CONCENTRADOR.

A continuación las magnitudes y los símbolos relacionados con el modelo matemático del concentrador parabólico esférico, que permite el cálculo de la temperatura focal, según la ecuación 3.11.

Tabla 4.12 *Magnitudes y símbolos*

Símbolo	Unidad	Descripción	Valor
R_c		Razón de concentración	Calcular
H_b	W/m ²	Irradiancia	Tabla
τ_a		Transmitancia de la cubierta al absorbedor	0,90
ρ_L		Reflejancia de la lente	0,75
α_a		Absortancia del absorbedor	0,91
γ		Imperfecciones de la superficie	0,90
F		Fracción de apertura no sombreada	0,91
k_s		Factor de suciedad	0,91
f_i		Error en el seguimiento	0,90
ε_a		Emisividad del recubrimiento del absorbedor	0,89
σ	W/cm ² °K ⁴	Constante de Stefan- Boltzmann	5.7 x 10 ⁻¹²

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

4.12.1.1 Propiedades superficiales de los materiales

Las **propiedades superficiales** (SOL.ARQ, 2013) de los materiales pueden afectar de manera significativa su desempeño térmico, por lo que es necesario tomarlas en cuenta en el momento de su elección

- a) La **absortancia**, por otro lado, representa en sí la fracción de radiación incidente que es absorbida por un material, con valores que van de 0.0 a 1.0 (aunque también se puede expresar en términos de porcentaje, de 0% a 100%). La absortancia, en ocasiones denominada absorción superficial, depende fundamentalmente del color y el acabado de los materiales.
- b) La **emisividad** de un material representa la proporción entre la energía radiada por dicho material y la energía que radiaría un **cuerpo negro ideal**, dada la misma temperatura y la misma superficie. En ese sentido se trata de una medida de la capacidad de un material para absorber y radiar energía. Si asignamos al cuerpo negro ideal un valor de 1.0, entonces cualquier objeto real tiene una emisividad mayor a 0.0 y menor a 1.0.
- c) En óptica y termodinámica, la **reflectividad** representa la fracción de la radiación incidente que es reflejada por una superficie. En términos generales la reflectividad se considera una propiedad direccional, ya que además de la longitud de onda, depende de la dirección de la radiación incidente y de la dirección de la radiación reflejada. En ciertos campos, la reflectividad se distingue de la **reflectancia** por el hecho de que la primera es un valor que se aplica para capas reflejantes gruesas, mientras que la segunda aplica para capas delgadas . Cuando la reflexión ocurre en capas delgadas, la reflexión

interna pueden provocar que la reflectancia varíe de acuerdo al grosor de la superficie.

- d)** La **transmitancia** (SOL.ARQ, 2013), se define como la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en determinada cantidad de tiempo. La transmitancia óptica se refiere a la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda. Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo traslúcido, una parte de esa luz es absorbida por el mismo y otra fracción de ese haz de luz atravesará el cuerpo, según su transmitancia

En la captación solar térmica propiamente dicha, lo que interesa es tener un valor alto de la absorptancia y bajo de la reflectancia con cero para la transmitancia en las longitudes de onda del espectro solar, y bajo de la emitancia en las longitudes de onda correspondientes a la temperatura del captador.

4.12.2 CALCULO DE LA TEMPERATURA FOCAL

A continuación los resultados del cálculo de la temperatura focal mediante la aplicación de la ecuación 3.11, la comparación con la temperatura medida y el porcentaje de error, para el 22 julio 2012, que fue el día más representativo y con mejores condiciones climáticas que permitieron obtener las lecturas correspondientes con lo cual se pudo cumplir con los objetivos planteados en el presente proyecto.

Tabla 4.13 *Temperatura focal real, teórica y error porcentual para 22 julio*

Orden	Hora	Irradiancia (W/m²)	T_{fm} (° C)	T_{fc} (° C)	Error (%)
1	11h20	891	370	1358,29	-267,11
2	11h25	867	350	1350,90	-285,97
3	11h35	882	371	1355,53	-265,37
4	11h40	875	356	1353,38	-280,16
5	11h45	884	380	1356,15	-256,88
6	11h52	886	366	1356,76	-270,70
7	12h00	882	380	1355,53	-256,72
8	12h08	911	382	1364,33	-257,15
9	12h13	916	395	1365,82	-245,78
10	12h18	932	408	1370,56	-235,92
11	12h23	946	412	1374,66	-233,66
12	12h40	965	415	1380,15	-232,57
13	12h50	1002	419	1390,61	-166,73
14	13h05	972	325	1382,15	-325,28
15	13h10	928	329	1369,38	-316,22
16	13h15	939	350	1372,62	-292,18
17	13h20	977	318	1383,58	-335,09
18	13h25	895	340	1359,50	-299,85
19	13h32	954	330	1376,98	-317,27
20	13h37	947	320	1374,95	-329,67
21	13h42	956	303	1377,56	-354,64
22	13h47	986	250	1386,13	-454,45

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

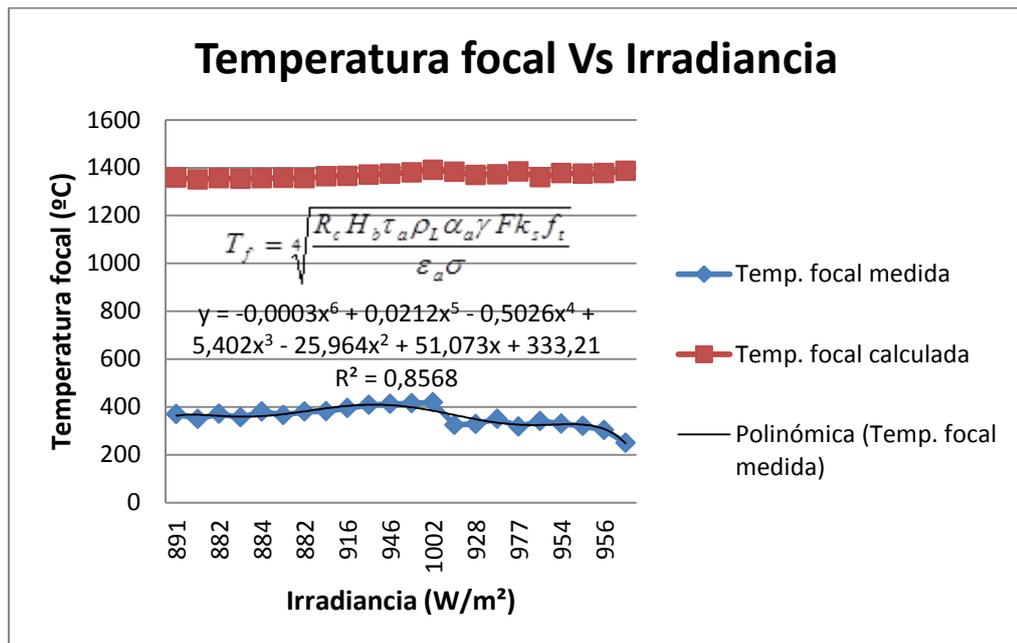


Figura 4.17: Irradiancia Vs Temperaturas focal: medida y calculada 22 julio

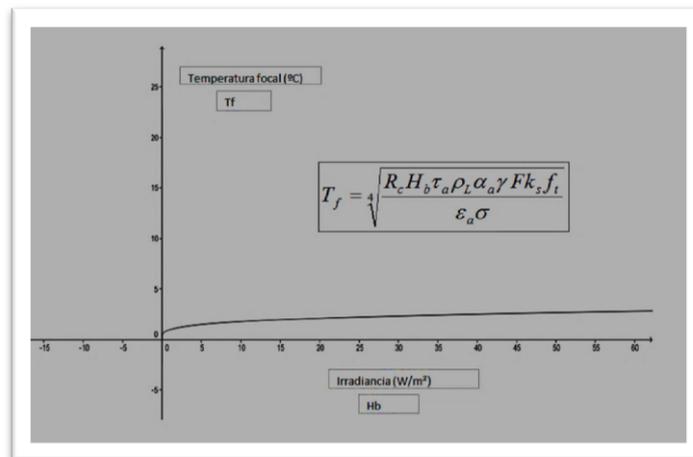


Figura 4.18 Irradiancia Vs Temperaturas focal, ecuación 3.11

En la figura 4.16, donde se tiene la temperatura focal medida vs la irradiancia, podemos apreciar que la ecuación obtenida es del tipo polinomial grado 6.

Para la curva temperatura focal calculada vs la irradiancia, el factor de ajuste R^2 es de 1, puesto que los cálculos parte de la fórmula planteada, mientras que para el de temperatura focal medida vs irradiancia, el valor de R^2 es de 0,8568, lo cual implica que la ecuación de tendencia o regresión obtenida es bastante representativa. Además

Podemos apreciar que para un mismo valor de irradiancia los valores de temperatura focal calculada (ecuación 3.11) y medida difieren en una cantidad apreciable, que de acuerdo a la tabla 4.13 se ve reflejado en el error (%), el mismo que está en el rango de -400 al -300 %, esto implica que la ecuación de modelo matemático planteado no se ha homologado.

Al analizar la ecuación 3.11, la temperatura focal depende en gran medida del coeficiente de Stefan Boltzman y del valor de la irradiancia, lo cual con seguridad va permitir obtener valores de temperatura con 4 dígitos, mientras que la temperatura medida tuvo 3 dígitos.

En la figura 4.17, tenemos la gráfica temperatura focal vs irradiancia, la cual se obtuvo utilizando la ecuación 3.11, y en ella podemos apreciar que una curva del tipo exponencial, mientras que la de la figura 4.16 son del tipo polinomial.

De acuerdo a la tabla 4.13 el valor de temperatura focal máxima medida es de 419 °C, obtenida a las 12h50 y con un valor de irradiancia de 1002 W/m².

CAPITULO 5

APLICACIONES FUTURAS DEL EXPERIMENTO

5.1 VAPORIZACION

Una aplicación del presente trabajo es lo relacionado a procesos de vaporización para lo cual es muy necesario un análisis de un sistema concentrador – absorbedor.

5.1.1 PARÁMETROS TERMO-FÍSICOS

Se deberán tomar en cuenta los siguientes parámetros para el diseño del sistema:

- Temperatura ambiente promedio para el sitio de instalación del sistema.
- Temperatura de ebullición del agua en el sitio de la instalación.
- Temperatura final de la aplicación que se pretenda obtener.
- Presión final de la aplicación.
- Volumen de agua de vaporización.
- Irradiación media del sitio de la instalación.

5.1.2 CONCENTRADOR

Se realiza un análisis termodinámico para conseguir la temperatura de aplicación y la presión de aplicación. El dispositivo térmico está compuesto por una lente agua de tipo parabólico, en el cual la luz incidente sobre el plano superior de la lente, se refracta en el interior de la cámara de agua para formar un haz de radiación cónico de alta temperatura que se disipa en la cámara de reacción o absorbedor cilíndrico colocado a lo largo del eje focal que contiene el fluido en proceso.

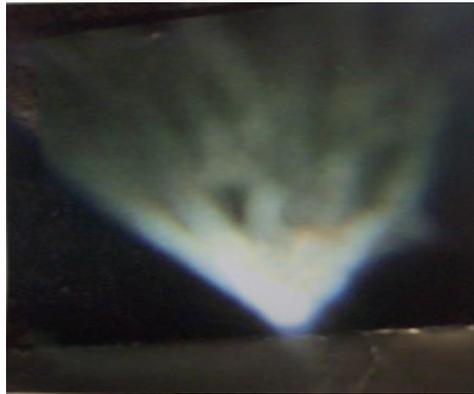


Figura 5.1: Luz concentrada por la lente de agua (Guasumba J. , 2008)

Se realizará el análisis del sistema concentrador-absorbedor y para ello se visualizan los elementos en la figura 5.2, obteniéndose el balance de energía en el absorbedor, de tal manera que se tiene que cumplir que la energía que entra menos la energía que sale será igual a la energía almacenada. Por lo tanto:

$$Q_R = Q_{AGUA} + Q_{ABS} + Q_{PÉRDIDAS} \quad (5.1)$$

a) **Calor por radiación**

Es el calor que emite el concentrador solar parabólico al absorbedor y este se encuentra tabulado mediante una expresión matemática en función de parámetros como: la radiación solar directa, el área efectiva máxima de captación electromagnética y propiedades propias del material, tanto del concentrador como del absorbedor. Se encuentra dada como:

$$Q_R = E \cdot A_{em} \cdot \rho_{em} \cdot \alpha_{ABS} \cdot F \quad (5.2)$$

donde:

E = Radiación electromagnética incidente sobre el colector parabólico (W/m^2)

A_{em} = Área efectiva máxima de captación electromagnética (m^2)

ρ_{em} = Reflectancia del espejo, valor entre 0.75 a 0.85, valor más alto mayor reflectancia y para diseño se deberá tomar un valor más bajo

α_{ABS} = Absortancia del absorbedor, valores entre 0.8 a 0.95

F = Factor de forma que depende del material y de la manufactura.

El absorbedor lo vamos ha considerar como un cuerpo cilíndrico hueco con dos bases en forma de casquetes esféricos, en el cual:

A_{em} es el área efectiva máxima de captación electromagnética o de radiación del sistema parabólico, si el sistema no tiene perdidas representa el área de la boca del paraboloide y es así como se lo considerará para cálculos posteriores.

$$A_{em} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.3)$$

El área efectiva máxima dada por la ecuación 5.3 para el caso real, esta debe restarse del área que ocupa el absorbedor y llamando d al diámetro del absorbedor, se tiene:

$$A_{em} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (5.4)$$

La reflectancia de la lente se tomará un valor promedio de 0.8 del rango dado, por tanto: $\rho_{em}=0.8$. La absortancia del absorbedor se toma como valor 0.85 y finalmente el factor de forma 0.8, entonces tenemos: $\alpha_{ABS}=0.85$; $F=0.8$.

Reemplazando la ecuación 4.8 y los valores dados se obtiene una ecuación en función del diámetro del paraboloide de revolución como sigue:

$$Q_R = 259.02 (D^2 - d^2) (W / m^2) \quad (5.5)$$

b) CALOR PARA VAPORIZAR EL AGUA

Se realiza el análisis de la curva temperatura-entropía para vapor de agua en figura 5.2

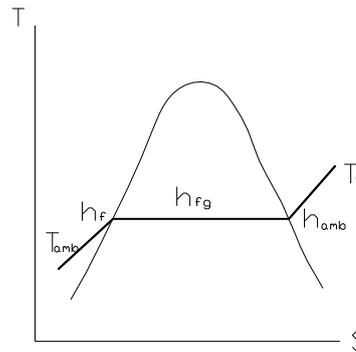


Figura 5.2: Diagrama temperatura-entropía

Q_1 Calor para llegar a la temperatura de saturación del agua (T_f para ubicación del proyecto), desde la temperatura inicial del agua (T_{amb})

$$Q_1 = m C_{p_f} (T_2 - T_1) \quad (5.6)$$

Q_2 Calor latente de vaporización para temperatura T_f

$$Q_2 = m h_{fg}^* \quad (5.7)$$

Q_3 Calor necesario para sobrecalentar el vapor

$$Q_3 = m \cdot C_{p_g} \cdot (T_3 - T_2) \quad (5.8)$$

para obtener el calor específico del vapor sobrecalentado, se aplica la definición para el calor específico a presión constante (**Manrique, 1976**)

$$C_{p_g} = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \quad (5.9)$$

$$C_{p_g} = \frac{h_2 - h_1}{T_2 - T_1} \quad (5.10)$$

y para mantener t minutos requeridos $Q_3 = \frac{Q_3}{t}$

El calor para vaporizar el agua esta dado por la expresión:

$$Q_{AGUA} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (5.11)$$

c) CALOR DEL ABSORBEDOR

Es el calor recibido por el absorbedor desde el concentrador solar y se encuentra dado por la siguiente relación:

$$Q_{ABS} = m_{ABS} \cdot Cp_{ABS} \cdot (T_3 - T_1) \quad (5.12)$$

donde.

m_{ABS} = Masa del absorbedor

Cp_{ABS} = Calor específico del absorbedor

$T_3 - T_1$ = Variación de temperatura entre

Una vez obtenidas las dimensiones externas del absorbedor, se procede a seleccionar el material del mismo, por tal motivo se presentan dos materiales posibles a saber: aluminio y acero galvanizado por sus buenas propiedades conocidas. Para obtener la masa del absorbedor se hace necesario considerar la forma del mismo.

El volumen del cilindro viene dado por el área lateral formada por las paredes del cilindro, dado por la ecuación:

$$Volumen_{cilindro} = \pi \cdot d \cdot h \cdot espesor \quad (5.13)$$

más el volumen de las 2 bases circulares que forman casquetes esféricos viene dado por la ecuación: (**Jutz & Scharkus, 1984**)

$$Volumen_{base} = \left[\pi / 2 \left(d^2 - 4 p^2 \right) \right] \cdot espesor \quad (5.14)$$

donde: p = profundidad de los casquetes esféricos

$$Volumen_{total} = [\pi \cdot d \cdot h + \pi / 2 (d^2 - 4p^2)] \cdot espesor \quad (5.15)$$

A continuación, de las propiedades del material seleccionado obtenemos la densidad del material.

Como por definición de densidad

$$densidad = \frac{masa}{volumen} \quad (5.16)$$

Luego se reemplaza valores en la ecuación para el calor del absorbedor, y este valor se divide para el tiempo estimado que se requiere disponer el proceso.

d) PÈRDIDAS DE CALOR

1) Calor perdido por radiación hacia el cielo

A continuación se detalla cómo se realiza el análisis del calor perdido por radiación, mediante la ecuación:

$$Q_{Rad} = A_{ABS} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_{sky}^4) \quad (5.17)$$

donde: A_{ABS} = área del absorbedor

ε = emisividad del absorbedor

σ = constante de Stefan Boltzman

T_f = temperatura final de esterilizado

T_{sky} = temperatura de cielo

Para definir los parámetros del calor perdido por radiación se consideran los siguientes aspectos para cada uno de los mismos. El área del absorbedor corresponde al área de las paredes laterales del cilindro con bases circulares cóncavas, por tanto:

$$A_{ABS} = \pi d h \quad (5.18)$$

La constante de Stefan Boltzman con unidades de potencia, área y temperatura tiene el siguiente valor:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right)$$

La temperatura final corresponde al valor de la aplicación y la temperatura de cielo se encuentra tabulada con la siguiente expresión:

$$T_{sky} = 0.0522 (T_{amb})^{1.5} \quad (5.19)$$

con T_{amb} = temperatura ambiente (° K)

2) Calor Perdido por convección

El calor perdido por convección viene dado por la expresión:

$$Q_{convección} = A_{ABS} \cdot h \cdot (T_3 - T_1) \quad (5.20)$$

donde: A_{ABS} = Área del absorbedor

h = Coeficiente de transferencia por convección

T_3 = Temperatura final de la aplicación

T_1 = Temperatura ambiente

El área del absorbedor es la misma tanto para radiación como para convección, su valor. El coeficiente de transferencia por convección es un parámetro que depende de la velocidad del viento y viene dado por la expresión:

$$h = 5.7 + 3.8 V_{viento} \quad (5.21)$$

Por motivo de cálculos es necesario disponer de la velocidad del viento. Este parámetro en especial sirve para el cálculo de pérdida de calor por convección con el ambiente. Para el Valle de los chillos este dato presenta un rango de variación entre 0.2 a 1.1 m/s como promedio en los últimos años y para el cálculo en particular se tomará el valor más crítico que proporciona un valor elevado del coeficiente de transferencia por convección

5.1.3 BALANCE DE ENERGÍA FINAL

Finalmente se reemplazan los valores obtenidos en la ecuación 5.1 para obtener finalmente el diámetro del paraboloide, obteniéndose:

$$Q_R = Q_{AGUA} + Q_{ABS} + Q_{PÉRDIDAS} \quad (5.22)$$

$$259.02(D^2 - d^2) = Q_{AGUA} + Q_{ABS} + Q_{PÉRDIDAS} \quad (W)$$

En la práctica del valor obtenido, que es calor neto, se adiciona un 10 % para compensar posibles pérdidas de calor adicionales no consideradas en la misma. Quedando la ecuación anterior como sigue:

5.2 MEJORAMIENTO SUPERFICIAL DE MATERIALES

Dentro de las aplicaciones de la Energía Solar Concentrada(ESC) tenemos:

➤ Fotovoltaica:

- Electricidad, señalización, bombeo de agua, desinfección de agua

➤ **Térmica:**

- Diversas como secado, desalinización, calentamiento de agua, producción de energía eléctrica, refrigeración, eliminación de residuos químicos por foto catálisis

➤ **Modificación de la superficie de materiales (MSM)**

- Temple y revenido, aleación superficial, plaquedo(cladding), reacción gas-sólido, síntesis autopropagada

En la tabla 5.1 se puede apreciar la aplicación de la Energía Solar Concentrada(ESC) al Tratamiento de Materiales (MSM)

Tabla 5.1 *Aplicación de la ESC al MSM*

PROCESO	POTENCIA (kw)	DENSIDAD (kw/cm²)	SUPERFICIE (cm²)	TEMPERATURA (°K)
Laser CO ₂	2 - 5	1 - 1000	< 1	>5000
Nd – Yag	< 0,5	100 - 10 ⁶	< 1	>5000
Horno S.	< 1000	1	10 -100	>3500
L. Fresnel	0,09	0,24	0,36	>1500

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

De acuerdo a la tabla podemos apreciar que los lentes Convencionales y de Fresnel proporcionan los valores más bajos de potencia, densidad y temperatura.

5.2.1 TRATAMIENTO TÉRMICO

Se conoce como **tratamiento térmico** al conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad, presión, etc., de los metales o las aleaciones en estado sólido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza,

la resistencia y la elasticidad. Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero y la fundición, formados por hierro y carbono. También se aplican tratamientos térmicos diversos a los cerámicos.

Las propiedades mecánicas de las aleaciones de un mismo metal, y en particular de los aceros, reside en la composición química de la aleación que los forma y el tipo de tratamiento térmico a los que se les somete. Los tratamientos térmicos modifican la estructura cristalina que forman a los aceros sin variar la composición química de los mismos. Esta propiedad de tener diferentes estructuras de grano con la misma composición química se llama polimorfismo y es la que justifica los tratamientos térmicos. Técnicamente el polimorfismo es la capacidad de algunos materiales de presentar distintas estructuras cristalinas, con una única composición química, el diamante y el grafito son polimorfismos del carbono. La α -ferrita, la austenita y la δ -ferrita son polimorfismos del hierro. Esta propiedad en un elemento químico puro se denomina alotropía.

Por lo tanto las diferentes estructuras de grano pueden ser modificadas, obteniendo así aceros con nuevas propiedades mecánicas, pero siempre manteniendo la composición química. Estas propiedades varían de acuerdo al tratamiento que se le da al acero dependiendo de la temperatura hasta la cual se lo calienta y de como se enfría el mismo. La forma que tendrá el grano y los microconstituyentes que compondrán al acero, sabiendo la composición química del mismo (esto es porcentaje de Carbono y Hierro (Fe_3)) y la temperatura a la que se encuentra, se puede ver en el Diagrama Hierro Carbono. A continuación se adjunta a modo de ejemplo una figura que muestra la profundidad del tratamiento térmico en un acero y el perfil de dureza.

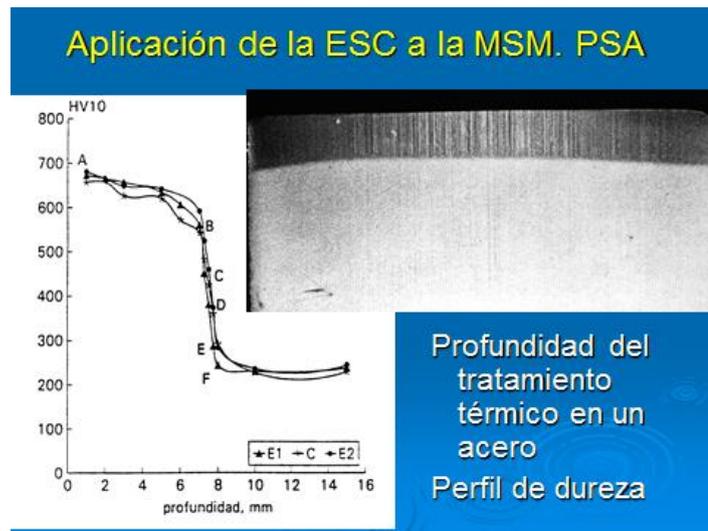


Figura 5.3 Profundidad del tratamiento térmico del acero (Guasumba J. , 2009)

Los elementos constituyentes, según su porcentaje, ofrecen características específicas para determinadas aplicaciones, como herramientas, cuchillas, soportes, etcétera. La diferencia entre los diversos aceros, tal como se ha dicho depende tanto de la composición química de la aleación de los mismos, como del tipo de tratamiento térmico. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecidos.

Para conocer a que temperatura debe elevarse el metal para que se reciba un tratamiento térmico es recomendable contar con los diagramas de cambio de fases como el del hierro-carbono. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase (cambios de estructura cristalina), dependiendo de los materiales diluidos. Los tratamientos térmicos han adquirido gran importancia en la industria en general, ya que con las constantes

innovaciones se van requiriendo metales con mayores resistencias tanto al desgaste como a la tensión. Los principales tratamientos térmicos son:

- **Temple:** Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero.

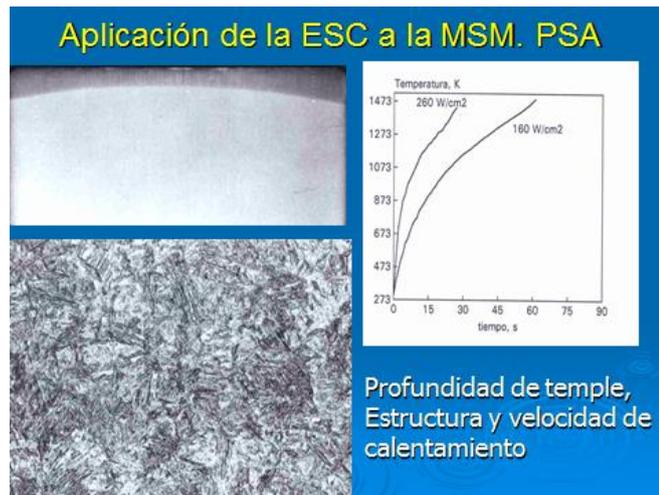


Figura 5.4 Temple

Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior A_c (entre 900-950 °C) y se enfría luego más o menos rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etcétera.

- **Revenido:** Sólo se aplica a aceros previamente templados, para disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y aumentar la tenacidad. El revenido consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento

- **Recocido:** Consiste básicamente en un calentamiento hasta la temperatura de austenización (800-925 °C) seguido de un enfriamiento lento. Con este
- tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material, eliminando la acritud que produce el trabajo en frío y las tensiones internas.
- **Normalizado:** Tiene por objetivo dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.

CLADDING

El cladding o tratamientos termoquímicos son tratamientos térmicos en los que, además de los cambios en la estructura del acero, también se producen cambios en la composición química de la capa superficial, añadiendo diferentes productos químicos hasta una profundidad determinada. Estos tratamientos requieren el uso de calentamiento y enfriamiento controlados en atmósferas especiales. Entre los objetivos más comunes de estos tratamientos están aumentar la dureza superficial de las piezas dejando el núcleo más blando y tenaz, disminuir el rozamiento aumentando el poder lubricante, aumentar la resistencia al desgaste, aumentar la resistencia a fatiga o aumentar la resistencia a la corrosión.

- **Cementación (C):** aumenta la dureza superficial de una pieza de acero dulce, aumentando la concentración de carbono en la superficie. Se consigue teniendo en cuenta el medio o atmósfera que envuelve el metal durante el calentamiento y enfriamiento. El tratamiento logra aumentar el contenido de carbono de la zona periférica, obteniéndose después, por medio de temple y

revenidos, una gran dureza superficial, resistencia al desgaste y buena tenacidad en el núcleo.

- **Nitruración (N):** al igual que la cementación, aumenta la dureza superficial, aunque lo hace en mayor medida, incorporando nitrógeno en la composición de la superficie de la pieza. Se logra calentando el acero a temperaturas comprendidas entre 400 y 525 °C, dentro de una corriente de gas amoníaco, más nitrógeno.
- **Cianuración (C+N):** endurecimiento superficial de pequeñas piezas de acero. Se utilizan baños con cianuro, carbonato y cianato sódico. Se aplican temperaturas entre 760 y 950 °C.
- **Carbonitruración (C+N):** al igual que la cianuración, introduce carbono y nitrógeno en una capa superficial, pero con hidrocarburos como metano, etano o propano; amoníaco (NH₃). En el proceso se requieren temperaturas de 650 a 850 °C y es necesario realizar un temple y un revenido posterior.
- **Sulfurización (S+N+C):** aumenta la resistencia al desgaste por acción del [azufre](#). El azufre se incorporó al metal por calentamiento a baja temperatura (565 °C) en un baño de sales.

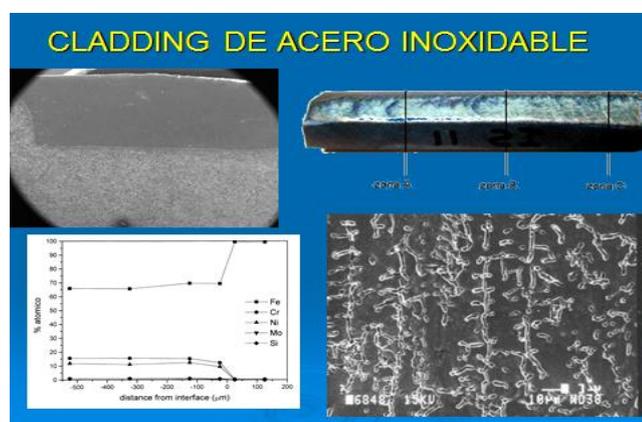


Figura 5.5 Cladding del acero inoxidable

CAPITULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1 COSTOS DIRECTOS

Son los que intervienen directamente en la construcción del concentrador parabólico esférico y en el proyecto se los ha identificado de la siguiente manera:

- Costos de materiales, los que constituyen el modelo del concentrador parabólico esférico, es decir, como ejemplo el tubo cuadrado de 2 pulg. que forma parte de la estructura soporte o bastidor, no así los electrodos, la sierra para cortar, pues estos representan costos indirectos
- Costos de uso de maquinaria y equipo, aquí se incluye por ejemplo; uso de la soldadora, compresor
- Costos de elementos mandados a fabricar, como es el caso de la lente de agua, arandelas de poliéster.
- Costos de mano de obra, en el proyecto, el pago de honorarios al maestro metal-mecánico que elaboró la estructura soporte.

En la tabla 6.1 se detalla los costos directos del proyecto, se incluye también el costo de mano de obra del maestro metal-mecánico que elaboró la estructura soporte, además el uso de herramientas propios para el proceso de soldadura y corte.

Tabla 6.1 Costos directos del proyecto

COSTOS DIRECTOS					
No	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID.	C/U	SUBTOTAL
	Arandelas de pliester de ½				
1	pulgada	34	c/u	0,25	8,50
	Tornillos con tuerca ¼ x 1				
2	pulg. acero inoxidable	34	c/u	0,20	6,80
3	Empaque	2	pliegos	2,00	4,00
4	Agua destilada	30	litros	1,00	30,00
	Tubo cuadrado de 2 pulg.,				
5	acero al carbono A36	18.36	m	8,00	146,88
	Tornillo con tuerca ½ x 2				
6	pulg.	2	c/u	0,35	0,70
	Neplos de pvc de 1 x 3				
7	pulg., con tapones	2	c/u	2,00	4,00
	Tubo rectangular de 1 x 2				
8	pulg., acero al carbono A36	3	m	6,00	18,00
	Tornillos con tuerca ¼ x 1 ½				
9	pulg	6	c/u	0,30	1.80
	Tubo cuadrado de 1 pulg.,				
10	acero al carbono A36	3.15	m	4,00	12,60
	Tubo cuadrado de ¾ pulg.,				
11	acero al carbono A36	2.40	m	3,00	7,20
	Tornillo con tuerca ½ x ¾				
12	pulg.	4	c/u	0,30	1.20

No	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID.	C/U	SUBTOTAL
13	Maestro metal-mecánico	15	usd/día	15,00	225,00
14	Pintura anticorrosiva	0.5	litro	4,00	2,00
15	Pintura esmalte negro brillante	1	litro	8,00	8,00
16	Soldadora, amoladora	2	usd/día	30,00	60,00
Total					536,68

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

6.2 COSTOS INDIRECTOS

Son costos que intervienen en la construcción del proyecto, pero no se encuentran físicamente en el mismo, se pueden mencionar:

- Servicios Básicos, incluyen agua, luz, teléfono
- Gastos Administrativos, los cuales serán tratados posteriormente
- Movilización, el cual se refiere a los viajes que el graduando realizó para actividades inherentes del proyecto
- Imprevistos, se considerará algún gasto adicional que el graduando realizó.

a) MISCELÁNEOS

Se considera básicamente los gastos que el graduando realizó para la construcción del proyecto exclusivamente.

Tabla 6.2 Misceláneos

MISCELÁNEOS					
No.	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNIDAD	C/U	SUBTOTAL
1	Materiales de oficina	1	c/u	70	70,00
2	Internet	100	horas	0.50	50,00
3	Transporte	5	c/u	20,00	100,00
4	Impresiones	300	c/u	0,20	60,00
5	Copias	400	c/u	0,10	40,00
6	Suministros varios	1	c/u	50,00	50,00
Total USD					370,00

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

b) SUMINISTROS Y SERVICIOS

SUMINISTROS Y SERVICIOS					
No.	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNIDAD	UNITARIO	SUBTOTAL
1	Energía eléctrica	40	c/u	1,00	40,00
2	Agua	40	c/u	1,00	40,00
3	Teléfono	20	c/u	1,00	20,00
Total USD					100,00

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

6.3 COSTOS DE PRODUCCIÓN

Son los costos necesarios para la elaboración del proyecto y para el proyecto en particular estos costos incluyen:

- Costos directos
- Costos indirectos
- Costos o gastos administrativos

- Costos de elementos adicionales para llegar a la conclusión del proyecto, como el costo de la fabricación de la lupa o lente de agua.

En la tabla 7.3 se presenta los costos de producción, no se incluyen los gastos administrativos que serán revisados en el punto 7.4

Tabla 6.3 *Costos de producción del proyecto*

COSTOS DE PRODUCCIÓN					
No.	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNIDAD	C/U	SUBTOTAL
1	Costos directos	1	c/u	278,00	536,68
2	Costos indirectos	1	c/u	450,00	470,00
3	Lupa o lente de agua	1	c/u	150,00	150,00
Total USD					1156,68

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

6.4 GASTOS ADMINISTRATIVOS

Corresponde a los gastos del personal que trabaja en actividades administrativas, de coordinación y otras directamente relacionadas con el proyecto, es decir, en el proyecto los sueldos de director y codirector del proyecto. En la tabla 7.4 se presentan los gastos administrativos del proyecto, en los cuales se incluyen los costos al director y codirector del proyecto, rubros que se han calculado tomando en cuenta un tiempo de 4.5 meses-hombre a un valor mes-hombre de 67 dólares.

Estos gastos ya están solventados con los honorarios normales de los profesores, de tal manera que para cálculos definitivos del proyecto no se tomarán en cuenta.

Tabla 6.4 *Gastos administrativos del proyecto*

GASTOS ADMINISTRATIVOS					
No.	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNIDAD	UNITARIO	SUBTOTAL
1	Director del proyecto	4,5	c/u	67,00	301,50
2	Co-director de proyecto	4,5	c/u	67,00	301,50
Total USD					603,00

Fuente: *Suntaxi J., Sangolquí, 2014*

6.5 SERVICIOS ESPECIALIZADOS

Cuando se habla de servicios especializados, se refiere a trabajos especiales que se utilizaron en el proyecto, trabajos tales como: mediciones de propiedades de materiales utilizados, tratamientos térmicos, trabajos con maquinaria especial etc.

En el presente proyecto no se realizó ningún tipo de servicio especializado, todos los elementos que conforman el mismo son fácilmente ejecutables y se los puede realizar en talleres cercanos al sitio de ejecución del proyecto. Así: la lente o lupa de agua fue proporcionada por el Ing. José Guasumba, la estructura soporte se realizó en Industrial Balseca.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Se logro cumplir con el objetivo principal del proyecto el de la caracterización del energética del sistema de hidroconversión de luz solar utilizando una lente de forma parabólica.
- Resulta de vital importancia para este proyecto la ubicación del eje focal del concentrador coincidente hacia la ubicación del sol, de esta manera se evita: en primer lugar la generación de sombra en el concentrador y en segundo lugar, cuando no existe esta coincidencia, cambia la posición del foco, es decir, el calor se concentra en un sitio diferente al teórico, disminuyendo su eficiencia.
- La ubicación del prototipo solar tiene que ser de tal manera que el eje de giro del concentrador sea perpendicular a la orientación este-oeste, en otras palabras, perpendicular a la trayectoria del sol.
- Los concentradores solares al igual que los diversos elementos que utilizan energía solar nunca llegarán a eficiencias del 100%, debido a que una parte de la energía que se capta a través de los mismos es desperdiciada como pérdidas de calor de diferentes tipos, tanto por convección como por radiación.

- El concentrador de forma parabólica que utiliza agua como medio óptico, permite alcanzar altas temperaturas, sobre los 400 °C, en el absorbedor. Dependiendo del diámetro del colector, distancia a lo largo del eje focal, y de la razón de concentración, esta puede alcanzar varios miles de grados centígrados.
- Para el desarrollo de un lente de vidrio de 1 m de diámetro se requiere alta tecnología y un derroche energético en los procesos de fabricación y pulido, por lo que, la lente de agua es una alternativa económica y factible técnicamente, para alcanzar altas temperaturas sin emisión de contaminantes.
- Si para obtener 100 W de forma convencional se deben quemar 10,41 Kg de carbón por hora, este dispositivo de 200 W, evita la combustión de 93,69 Kg de carbón por cada 4,5 horas de funcionamiento por día, con la consecuente eliminación de emisiones de CO₂

7.2.- RECOMENDACIONES

- Durante el tiempo de pruebas se analizó que factores ambientales (polvo y lluvia), afectan con la eficiencia del concentrador, por lo cual se recomienda que al inicio de cualquier aplicación se limpie la lente con un paño ligeramente humedecido y al final de las mismas, el conjunto sea transportado por 2 personas a un lugar fresco y bajo techo. Se recomienda 2 personas, porque el conjunto completo es liviano, este presenta dimensiones que son difíciles de transportar por una sola persona.
- Es recomendable que la ubicación del lente parabólico sea en un área despejada, libre de árboles, arbustos y edificaciones, de tal manera que los rayos solares incidan directamente sobre el mismo, de esta manera se logrará mejores resultados.

- Este nuevo sistema energético puede ser utilizado para aplicaciones de alta temperatura: obtención de vapor sobrecalentado, fusión de materiales ligeros, mejoramiento superficial de materiales, generación de electricidad mediante el acoplamiento de un motor Stirling tipo alfa o beta. Para modelos de utilidad, el diámetro del concentrador debe ser mayor a 4m.

REFERENCIAS**BIBLIOGRÁFICAS:**

-
1. Burgarth, N. (1972). *Ingeniería Termodinámica*. Londres: Whykeham Publications Ltd.
 2. Cejudo, J. (2003). *Modelado térmico del Captador Solar Plano*. Ecuador: Ediespe.
 3. Duffie, J. y Beckman, W. (1976). *Solar Engineering of Thermal Processes*. (2da. ed). EEUU: Wiley-Interscience,
 4. Farrington, D. (1975). *Uso directo de la Energía Solar*. Traducción Enrique Zoido. (2da. ed). Madrid: H. Blume Ediciones
 5. Fernández, J. (2008). *Guía Completa de la Energía Fotovoltàica y Termoelèctrica*. Madrid: A. Madrid Vicente, Ediciones.
 6. Hans, R. (1985). *Energía Solar aplicaciones prácticas. Traducido por Roberto Fuchs. (1ra. ed). España: Marcombo, S.A.*
 7. Manrique, J. (1976). *Termodinámica*. (3ra. ed). México: Oxford University Press.
 8. Romàn, R. (1978). *Aplicaciones Térmicas de la Energía solar. Apuntes del Departamento de Ingeniería Mecánica*. Chile: Universidad de Chile.
 9. Sapag Chain, N. y Sapag Chain, R.(1986). *Preparación y Evaluación de Proyectos*.(4ta. ed). México: McGraw Hill.
 10. Vidal, J. (1984). *Física Segunda Parte*. (8va. ed). Buenos Aires: Stella

11. Van, G. y Sonntag, R. (1970). *Fundamentos de Termodinámica*. Traducido del inglés por Xavier Obregón. (1ra. ed). México: Editorial Limusa-Wiley, S.A.
12. Wilson, J.,(1982). *Energía Solar*. Traducido del Inglés por J. Aguilar Peris. (1ra. ed). Madrid: Alhambra S.A.

TESIS:

1. Duque, J. y Vàsquez, P. (2004). *Diseño e Implementación de un Sistema de Aprovechamiento de la Energía Solar para el Calentamiento de Agua con Colectores Planos, Calefones y Control Automático para el Hotel Real Audiencia*. Tesis Ing. Mec. Quito. Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ingeniería Mecánica. Sangolquí. Ecuador.
2. Dèfaz , G.(2004). *Diseño y Construcción de una Máquina Peladora de Maní Tostado de Rodillos con capacidad de 100 Kg./H para el Departamento de Diseño de Proyectos Mecánicos*. Tesis Ing. Mec. Quito. Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ingeniería Mecánica. Sangolquí. Ecuador.
3. Mena, M. (2013). *Anàlisis del Recurso Solar y Caracterización del Comportamiento Energético entre un Calentador Solar de Agua Importado Marca Helicol y un Nacional de 2 m² en la Espe*. Proyecto de Tesis Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Mecánico. Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ingeniería Mecánica. Sangolquí. Ecuador

PUBLICACIONES:

-
1. GUASUMBA, J. (2004). *Cocina Solar Portátil de Tipo Parabólico para Uso en Campo*. Mérida. Venezuela.
 2. GUASUMBA, J. (2009). *Fotohidroconversión de la Luz Solar para Aplicaciones de Alta Temperatura*. Sangolquí. Ecuador

DIRECCIONES DE INTERNET:

-
1. La Energía Solar(2005, 1 diciembre). Consultado el 29 noviembre 2013 de http://pdf.rincondelvago.com/energia-solar_15.html.
 2. Constante Solar(2005, 12 diciembre). Consultado el 25 de noviembre 2013 de http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar.
 3. Radiación Solar Extraterrestre(2002, 1 julio). Consultado el 2 noviembre 2013 de http://sky.net.co/energia/Radiacion_solar_I.htm#manH.
 4. Instalaciones de media Temperatura(2005, 12 diciembre). Consultado 2 noviembre 2013 de http://www.portalplanetasedna.com.ar/central_solar.htm.
 5. Radiación Electromagnética(2005, 12 octubre). Consultado 1 octubre 2013 http://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica.
 6. Usos posibles de la energía solar(2005, 12 julio 2005). Consultado 11 julio 2013 de <http://www.textoscientificos.com/energia/solar>.
 7. Lentes de Fresnel(2005, junio 28). Consultado 11 julio 2013 de <http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/Instrumentos/fresnel/fresnel.htm>.
 8. <http://www.eosweb.larc.nasa.gov/>

ANEXOS

ANEXO A

PARAMETROS SOLARES PARA EL ECUADOR SEGÚN LA NASA

SSE Homepage	Find A Different Location	Accuracy	Methodology	Parameters (Units & Definition)
------------------------------	---	--------------------------	-----------------------------	---



NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables



Latitude -0.317 / Longitude -78.45 was chosen.

Geometry Information

Elevation: **1686** meters
taken from the
NASA GEOS-4
model elevation

Northern boundary		
0		
Western boundary	Center	Eastern boundary
-79	Latitude -0.5	-78
	Longitude -78.5	
Southern boundary		
-1		

Parameters for Sizing and Pointing of Solar Panels and for Solar Thermal Applications:

Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m ² /day)													
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	4.13	4.34	4.55	4.33	4.12	4.01	4.26	4.46	4.26	4.24	4.30	3.98	4.25

Minimum And Maximum Difference From Monthly Averaged Insolation (%)													
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Minimum	-18	-10	-9	-10	-12	-16	-14	-18	-14	-24	-12	-13	
Maximum	17	11	14	18	15	20	14	13	18	25	13	26	

[Parameter Definition](#)

Average@09	n/a	n/a											
Average@12	0.09	0.08	0.09	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.12	0.15	0.15	0.12	
Average@15	0.47	0.50	0.53	0.53	0.49	0.45	0.48	0.50	0.50	0.52	0.52	0.47	
Average@18	0.50	0.53	0.56	0.52	0.49	0.49	0.52	0.53	0.50	0.49	0.50	0.47	
Average@21	0.26	0.28	0.27	0.24	0.24	0.26	0.28	0.30	0.24	0.22	0.22	0.23	

[Parameter Definition](#)

Monthly Averaged Insolation Clearness Index (0 to 1.0)													
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average K	0.40	0.41	0.43	0.42	0.42	0.43	0.45	0.45	0.41	0.40	0.42	0.39	0.42
Minimum K	0.33	0.37	0.39	0.38	0.37	0.36	0.39	0.37	0.35	0.31	0.37	0.34	0.36
Maximum K	0.47	0.46	0.49	0.50	0.49	0.52	0.51	0.51	0.48	0.51	0.47	0.50	0.49

[Parameter Definition](#)

Monthly Averaged Insolation Normalized Clearness Index (0 to 1.0)													
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
22-year Average	0.37	0.38	0.39	0.38	0.39	0.39	0.41	0.41	0.37	0.37	0.38		0.36

[Parameter Definition](#)

Solar Geometry:

Monthly Averaged Solar Noon (GMT time)													
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Average	1725	1729	1723	1715	1711	1714	1721	1719	1710	1700	1659	1707	

[Parameter Definition](#)

Monthly Averaged Daylight Hours (hours)													
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Average	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1		12.1

[Parameter Definition](#)

Monthly Averaged Daylight Average Of Hourly Cosine Solar Zenith Angles (dimensionless)												
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Average	0.59	0.62	0.63	0.62	0.60	0.58	0.59	0.61	0.63	0.57	0.60	0.58

Parameter Definition

Monthly Averaged Cosine Solar Zenith Angle At Mid-Time Between Sunrise And Solar Noon (dimensionless)												
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Average	0.65	0.68	0.70	0.69	0.66	0.64	0.65	0.68	0.70	0.69	0.66	0.64

Parameter Definition

Monthly Averaged Declination (degrees)												
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Average	-20.7	-12.3	-1.8	9.70	18.8	23.0	21.2	13.7	3.09	-8.45	-18.1	-22.8

Parameter Definition

Monthly Averaged Sunset Hour Angle (degrees)												
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Average	90.0	90.0	90.0	89.9	89.9	89.9	89.9	89.9	89.9	90.0	90.0	90.0

Parameter Definition

Parameters for Tilted Solar Panels:

Monthly Averaged Radiation Incident On An Equator-Pointed Tilted Surface (kWh/m²/day)													
Lat -0.317 Lon 78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
SSE HRZ	4.13	4.34	4.55	4.33	4.12	4.01	4.26	4.46	4.26	4.24	4.30	3.98	4.25
K	0.40	0.41	0.43	0.42	0.42	0.43	0.45	0.45	0.41	0.40	0.42	0.39	0.42
Diffuse	2.16	2.27	2.35	2.23	2.06	1.96	1.99	2.13	2.28	2.28	2.18	2.11	2.17
Direct	2.98	3.00	3.10	3.01	3.07	3.16	3.46	3.38	2.80	2.80	3.15	2.85	3.06
Tilt 0	4.08	4.29	4.49	4.27	4.07	3.97	4.21	4.40	4.21	4.18	4.24	3.93	4.20
Tilt 15	4.19	4.32	4.41	4.30	4.21	4.18	4.42	4.49	4.15	4.18	4.33	4.04	4.27
Tilt 90	2.22	2.02	1.70	1.99	2.35	2.52	2.57	2.23	1.66	1.87	2.22	2.21	2.13
OPT	4.19	4.33	4.49	4.31	4.22	4.21	4.45	4.49	4.22	4.20	4.33	4.04	4.29
OPT ANG	16.0	10.0	2.00	10.0	19.0	24.0	23.0	14.0	2.00	7.00	15.0	17.0	13.2

NOTE:	<i>Diffuse radiation, direct normal radiation and tilted surface radiation are not calculated when the clearness index (K) is below 0.3 or above 0.8.</i>
-------	---

Parameter Definition

Minimum Radiation Incident On An Equator-pointed Tilted Surface (kWh/m²/day)													
Lat -.317 Lon-78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
SSE MIN	3.39	3.92	4.13	3.91	3.61	3.37	3.67	3.66	3.67	3.23	3.80	3.48	3.65
K	0.33	0.37	0.39	0.38	0.37	0.36	0.39	0.37	0.35	0.31	0.37	0.34	0.36
Diffuse	2.08	2.24	2.33	2.20	2.03	1.93	1.99	2.10	2.22	2.12	2.15	2.06	2.12
Direct	1.89	2.39	2.58	2.49	2.38	2.31	2.67	2.32	1.99	1.45	2.45	2.18	2.26
Tilt 0	3.34	3.87	4.08	3.86	3.56	3.32	3.62	3.61	3.62	3.19	3.75	3.43	3.60
Tilt 15	3.40	3.88	4.02	3.87	3.67	3.46	3.76	3.66	3.57	3.17	3.81	3.51	3.65
Tilt 90	1.83	1.87	1.63	1.85	2.06	2.08	2.19	1.88	1.54	1.54	1.98	1.93	1.87
OPT	3.40	3.90	4.09	3.89	3.67	3.47	3.77	3.66	3.62	3.19	3.81	3.51	3.66
OPT ANG	13.0	9.00	2.00	9.00	17.0	21.0	20.0	12.0	2.00	5.00	13.0	15.0	11.5

NOTE:	<i>Diffuse radiation, direct normal radiation and tilted surface radiation are not calculated when the clearness index (K) is below 0.3 or above 0.8.</i>
-------	---

Parameter Definition

Maximum Radiation Incident On An Equator-pointed Tilted Surface (kWh/m²/day)													
Lat -.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
SSE MAX	4.86	4.84	5.20	5.12	4.73	4.84	4.86	5.05	5.01	5.32	4.88	5.01	4.97
K	0.47	0.46	0.49	0.50	0.49	0.52	0.51	0.51	0.48	0.51	0.47	0.50	0.49
Diffuse	2.13	2.26	2.31	2.17	2.01	1.86	1.91	2.06	2.25	2.21	2.15	2.05	2.11
Direct	4.19	3.75	4.05	4.17	4.02	4.47	4.35	4.29	3.95	4.57	4.06	4.51	4.20
Tilt 0	4.80	4.78	5.13	5.05	4.67	4.78	4.80	4.99	4.95	5.25	4.82	4.94	4.91
Tilt 15	4.96	4.82	5.04	5.10	4.88	5.10	5.08	5.12	4.88	5.26	4.95	5.16	5.03
Tilt 90	2.58	2.19	1.77	2.24	2.70	3.10	2.95	2.48	1.77	2.15	2.49	2.79	2.44
OPT	4.96	4.83	5.13	5.11	4.90	5.18	5.13	5.12	4.96	5.29	4.95	5.17	5.06
OPT ANG	18.0	10.0	2.00	11.0	21.0	27.0	24.0	15.0	3.00	8.00	16.0	20.0	14.6

NOTE:	<i>Diffuse radiation, direct normal radiation and tilted surface radiation are not calculated when the clearness index (K) is below 0.3 or above 0.8.</i>
-------	---

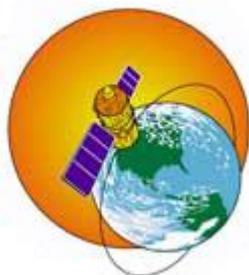
Parameter Definition

Supporting Information:

Monthly Averaged Top-of-atmosphere Insolation (kWh/m ² /day)													
Lat-0.317 Lon-78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	10.1	10.4	10.5	10.1	9.61	9.26	9.38	9.86	10.3	10.3	10.1	9.98	10.0

[Parameter Definition](#)

Monthly Averaged Surface Albedo (0 to 1.0)													
Lat -0.317 Lon -78.45	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	0.22	0.21	0.20	0.19	0.18	0.20	0.18	0.18	0.19	0.18	0.18	0.21	0.19

[Parameter Definition](#)

[Back to
SSE
Data
Set
Home
Page](#)

Responsible NASA Official: John M. Kusterer
 Site Administration/Help: NASA Langley [ASDC](#)
 User
 Services (larc-asdc-uds@lists.nasa.gov)
[\[Privacy Policy and Important Notices\]](#)
 Document generated on Sat Apr 7 14:42:03 EDT
 2012

ANEXO B1**DATOS RECOLECTADOS 13 JULIO 2012**

PROYECTO DE GRADO:
Caracterización Energética del Sistema de
Hidroconversión

TOMA DE DATOS

ORDEN	HORA	TIEMPO (min)	Ta (° C)	Tc (° C)	Tf (° C)	IRRADIANCIA (W/m2)	ALBEDO (W/m2)	Vv (m/s)	HR (%)	ATM
1	9h22	-	21.0	21.0	130	1115	389	0.05	45	D/d
2	9h55	33	21.5	21.5	140	1400	730	0.66	44	D/d
3	10h00	5	22.7	22.7	148	1203	141	0.35	42	D/d
4	10h12	12	22.1	22.1	175	1422	146	0.49	42	D/d
5	10h25	13	22.5	22.5	166	852	146	0.84	43	D/d
6	10h44	19	24.3	24.3	208	1240	380	1.37	38	D/d
7	10h45	1	25.2	25.2	345	1299	226	0.00	38	D/d
8	11h00	15	26.0	26.0	122	1303	149	1.80	31	D/d
9	11h05	5	26.6	26.6	158	1502	385	3.32	28	D
10	11h15	10	26.0	26.0	214	1478	144	1.10	30	D
11	11h20	5	25.9	25.9	400	1525	181	1.20	32	D

PROYECTO DE GRADO:
Caracterización Energética del Sistema de
Hidroconversión

TOMA DE DATOS



ORDEN	HORA	TIEMPO (minutos)	Ta (° C)	Tc (° C)	Tf (° C)	IRRADIANCIA (W/m2)	ALBEDO (W/m2)	Vv (m/s)	HR (%)	ATM
12	11h30	10	27.0	27.0	420	1361	155	1.00	30	D
13	11h44	14	27.8	27.8	240	1514	137	1.20	27	D
14	11h50	6	28.1	28.1	448	1622	168	0.00	26	D
15	12h55	65	30.0	30.0	320	1800	310	0.60	19	D/d
16	13h10	15	28.4	28.4	350	1400	175	0.60	21	D/d
17	13h15	5	29.0	29.0	270	1300	210	0.90	20	D

ANEXO B2

DATOS RECOLECTADOS 15 JULIO 2012

PROYECTO DE GRADO:
Caracterización Energética del Sistema de
Hidroconversión

TOMA DE DATOS



ORDEN	HORA	TIEMPO (minutos)	Ta (° C)	Tc (° C)	Tf (° C)	IRRADIANCIA (W/m2)	ALBEDO (W/m2)	Vv (m/s)	HR (%)	ATM
1	11h07	-	25.9	25.9	320	780	50	0.85	33	D
2	11h09	2	25.5	25.5	377	750	30	0.11	32	D
3	11h15	6	25.3	25.3	280	800	30	2.8	32	D
4	11h20	5	25.7	25.7	278	900	31	1.2	32	D
5	11h27	7	26.4	26.4	240	940	50	0.86	29	D
6	11h31	4	26.7	26.7	252	600	38	0.01	31	D
7	11h35	4	26.2	26.2	247	950	44	0.6	29	D
8	11h40	5	26.8	26.8	204	950	50	0.6	29	D

PROYECTO DE GRADO:
Caracterización Energética del Sistema de
Hidroconversión

TOMA DE DATOS



ORDEN	HORA	TIEMPO (minutos)	Ta (° C)	Tc (° C)	Tf (° C)	IRRADIANCIA (W/m2)	ALBEDO (W/m2)	Vv (m/s)	HR (%)	ATM
9	11h48	3	27.5	27.5	248	940	50	0.25	28	D
10	11h58	10	28.1	28.1	320	650	70	0.3	25	D
11	12h03	5	29.1	29.1	293	1015	100	0.02	24	D
12	12h20	7	28.3	28.3	211	950	144	0.41	25	D
13	12h25	5	29.5	29.5	173	920	145	0.42	24	D
14	12h30	5	30.3	30.3	370	820	118	0.5	24	D
15	12h40	10	30.9	30.9	270	720	68	0.02	23	D/d
16	12h45	5	31.5	31.5	210	400	85	0.75	26	D

ANEXO B3

DATOS RECOLECTADOS 22 JULIO 2012

PROYECTO DE GRADO:
Caracterización Energética del Sistema de
Hidroconversión

TOMA DE DATOS



ORDEN	HORA	TIEMPO (minutos)	Ta (° C)	Tc (° C)	Tf (° C)	IRRADIANCIA (W/m2)	ALBEDO (W/m2)	Vv (m/s)	HR (%)	ATM
1	11h20	-	22	22	370	891	65	3.6	35	D
2	11h25	5	22	22	350	867	40	3.6	36	D
3	11h35	10	22	22	371	882	45	1.6	34	D
4	11h40	5	22	22	356	875	55	4.4	34	D
5	11h45	5	22	22	380	884	51	1.4	32	D
6	11h52	7	22	22	366	886	45	3.6	35	D
7	12h00	8	23	23	380	882	50	1.4	34	D
8	12h08	8	23	23	382	911	50	0.5	31	D
9	12h13	5	22	22	395	916	65	0.5	33	D
10	12h18	5	23	23	419	932	75	2.2	34	D

PROYECTO DE GRADO:
Caracterización Energética del Sistema de
Hidroconversión

TOMA DE DATOS



ORDEN	HORA	TIEMPO (minutos)	Ta (° C)	Tc (° C)	Tf (° C)	IRRADIANCIA (W/m2)	ALBEDO (W/m2)	Vv (m/s)	HR (%)	ATM
11	12h23	5	23	23	408	946	80	2.2	34	D
12	12h40	17	23	23	288	965	97	3	34	D/d
13	12h50	10	23	23	240	1002	98	6	35	D/d
14	13h05	15	23	23	325	972	113	3	37	D
15	13h10	5	23	23	329	928	65	0	36	D
16	13h15	5	23	23	350	939	105	3	36	D
17	13h20	5	23	23	318	977	63	0.5	35	D
18	13h25	5	23	23	340	895	90	0.8	35	D
19	13h32	7	23	23	330	954	115	0.8	34	D
20	13h37	5	23	23	320	947	175	3.8	35	D
21	13h42	5	23	23	303	956	150	3.8	36	D/d
22	13h47	5	23	23	250	986	92	2.8	33	D/d

NEXO C

PLANOS MECANICOS

