



CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES  
AMBIENTALES DE LA UNIVERSIDAD  
INDUSTRIAL DE SANTANDER



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR  
MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR A  
TRAVÉS DE SISTEMAS DE COLECTORES DE CONCENTRACIÓN  
CILÍNDRICO PARABÓLICOS Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO A  
PEQUEÑA ESCALA**

**ALFONSO SÁNCHEZ CELIS  
LEOWALDO SANTOS AMAYA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2008**



CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES  
AMBIENTALES DE LA UNIVERSIDAD  
INDUSTRIAL DE SANTANDER



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR  
MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR A  
TRAVÉS DE SISTEMAS DE COLECTORES DE CONCENTRACIÓN  
CILÍNDRICO PARABÓLICOS Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO A  
PEQUEÑA ESCALA**

**ALFONSO SÁNCHEZ CELIS  
LEOWALDO SANTOS AMAYA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2008**

## DEDICATORIA

A Dios,

A mi familia por todo su amor, su comprensión y su confianza en mí.

A mi novia por todo su cariño y comprensión.

A mis compañeros de la universidad en especial a mi compañero de proyecto por su amistad y apoyo.

*Alfonso Sánchez Celis*

## DEDICATORIA

A Dios,

A mi familia, por su apoyo y afecto,

A todos las personas que han compartido mi camino.

*Leowaldo Santos Amaya*

## **AGRADECIMIENTOS**

De manera especial y sincera agradecemos el apoyo generoso del profesor Omar Gelves, nuestro director de proyecto y amigo.

Al doctor Edgar Fernando Castillo, por su confianza y apoyo, desde el comienzo del proyecto y con él, a todos los amigos y amigas del CEIAM.

A todas las personas que nos acompañaron en este proceso.

*Alfonso Sánchez Celis*

*Leowaldo Santos Amaya*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. RADIACIÓN SOLAR GENERACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR	3
1.2. LA CONSTANTE SOLAR	5
1.3. DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR	6
1.4. ATENUACION DE LA RADAICIÓN SOLAR	7
1.4.1. Difusión de la radiación solar	10
1.4.2. Absorción de la radiación solar	12
1.5. CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA	13
1.5.1 Dirección de la radiación solar directa	14
1.5.2 Ángulos para seguimiento de la trayectoria del sol	17
1.5.3 Relación entre radiación directa sobre superficies inclinadas y radiación directa sobre superficies horizontales	18
1.5.4 Radiación extraterrestre sobre superficie horizontal	19
1.5.5 Componente directa y difusa de la radiación	19
1.6. CANTIDAD APROVECHABLE DE RADIACIÓN SOLAR DIRECTA ANUAL DIARIA EN BUCARAMANGA	21
1.6.1 Tiempo solar	21
1.6.2 Medición de la radiación solar	22

1.6.3.	Origen de los datos	20
1.6.4.	Datos	20
1.6.5.	Cálculo de la cantidad aprovechable de la radiación solar directa en Bucaramanga.	38
1.6.6.	Resultados	42
2.	EFFECTO DE LA ORIENTACIÓN DEL COLECTOR Y SU SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE LA POSICIÓN SOLAR EN LA CANTIDAD DE ENERGÍA COLECTADA.	55
2.1	CÁLCULO COMPARATIVO DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA CAPTADA	56
3.	COLECTORES SOLARES DE CONCENTRACIÓN CILÍNDRICO PARABÓLICOS.	74
3.1	GENERALIDADES	74
3.1.1	Componentes de un colector cilíndrico-parabólico	81
3.2	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS DE LA SUPERFICIE REFLECTORA DEL CONCENTRADOR.	83
3.2.1	Pruebas de brillo	84
3.2.2	Descripción de la prueba	85
3.2.3	Resultados	88
3.3	EFFECTO DE LA GEOMETRÍA DEL REFLECTOR EN LA EFICIENCIA ÓPTICA DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO.	89
3.3.1	Geometría del concentrador parabólico	90
3.3.2	Relación de concentración	91

3.3.3	Tamaño del absorbedor	92
3.3.4	Factor de interceptación	94
3.3.5	Evaluación óptica del CCP	96
3.4	DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN CCP	98
3.4.1	Efecto de las características del tubo absorbedor en el rendimiento térmico del colector cilíndrico parabólico de concentración	103
4.	DESARROLLO DE UN MODELO EXPERIMENTAL DE COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO.	108
4.1	SISTEMA DE SEGUIMIENTO U ORIENTACIÓN DEL COLECTOR	109
4.2	CONCENTRADOR-REFLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO	110
4.3	CONFIGURACIÓN DEL TUBO ABSORBEDOR	117
4.4	ESTRUCTURA METÁLICA	119
4.5	ELEMENTOS AUXILIARES DEL SISTEMA COLECTOR	120
4.6	MONTAJE DEL COLECTOR	122
5.	PUESTA A PUNTO Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO OPERACIONAL DEL COLECTOR.	123
5.1	LECTURA Y ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS	123
5.2	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	128
6.	CONSIDERACIONES ECONÓMICAS DE LA ENERGÍA SOLAR.	145

6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA GENERACIÓN DE VAPOR A PARTIR DE COLECTORES SOLARES DE CONCENTRACIÓN CILÍNDRICO PARABÓLICOS	147
CONCLUSIONES	156
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	161
BIBLIOGRAFÍA	163
ANEXOS	165

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1a. Estructura del sol	4
Figura 1b. Distribución espectral de la radiación solar	7
Figura 2. Componentes de la radiación solar terrestre y extraterrestre	10
Figura 3. Dirección de la radiación directa	14
Figura 4. Incidencia de los rayos solares	76
Figura 5. Campo Acurex	81
Figura 6a. Esquema de montaje para medición de potencia óptica de referencia	87
Figura 6b. Montaje para medición de potencia óptica reflejada	87
Figura 7a. Sección de un concentrador lineal parabólico	90
Figura 7b. Imagen proyectada por un concentrador lineal parabólico	93
Figura 8. Espejo del colector	117
Figura 9. Tubo absorbedor	119
Figura 10. Estructura del colector	120
Figura 11. Montaje sistema colector cilíndrico-parabólico.	122
Figura 12. Diagrama de bloques del programa desarrollado para la adquisición de datos	126
Figura 13. Interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos	127
Figura 14. Diagrama de caja del análisis de costos del sistema CCP	153

## LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de enero de 2003 estación CDMB, UIS	26
Cuadro 2. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de febrero de 2003 estación CDMB, UIS	27
Cuadro 3. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de marzo de 2003 estación CDMB, UIS	28
Cuadro 4. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de abril de 2003 estación CDMB, UIS	29
Cuadro 5. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de mayo de 2003 estación CDMB, UIS	30
Cuadro 6. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de junio de 2003 estación CDMB, UIS	31
Cuadro 7. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de julio de 2003 estación CDMB, UIS	32
Cuadro 8. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de agosto de 2003 estación CDMB, UIS	33
Cuadro 9. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de septiembre de 2003 estación CDMB, UIS	34
Cuadro 10. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de octubre de 2003 estación CDMB, UIS	35
Cuadro 11. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de noviembre de 2003 estación CDMB, UIS	36

Cuadro 12. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de diciembre de 2003 estación CDMB, UIS	37
Cuadro 12a. Resultados radiación día 1 de enero de 2003	42
Cuadro 13. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de enero de 2003, estación CDMB, UIS	43
Cuadro 14. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de febrero de 2003, estación CDMB, UIS	44
Cuadro 15. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de marzo de 2003, estación CDMB, UIS	45
Cuadro 16. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de abril enero de 2003, estación CDMB, UIS	46
Cuadro 17. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de mayo de 2003, estación CDMB, UIS	47
Cuadro 18. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de junio de 2003, estación CDMB, UIS	48
Cuadro 19. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de julio de 2003, estación CDMB, UIS	49
Cuadro 20. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de agosto de 2003, estación CDMB, UIS	50
Cuadro 21. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de septiembre de 2003, estación CDMB, UIS	51
Cuadro 22. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de octubre de 2003, estación CDMB, UIS	52
Cuadro 23. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de noviembre de 2003, estación CDMB, UIS	53
Cuadro 24. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de diciembre de 2003, estación CDMB, UIS	54

Cuadro 24 <sup>a</sup> . Cálculo radiación directa bruta sobre el absorbedor para el día 23 de junio, CASO 1.	63
Cuadro 24b. Radiación directa bruta mes de junio, para el CASO 1.	64
Cuadro 25. Resultados estudio del efecto de la orientación del colector y su sistema de seguimiento de la posición del sol en la cantidad de radiación captada	65
Cuadro 26. Resultados pruebas de reflectividad óptica de materiales	88
Cuadro 27. Resultados Evaluación del Rendimiento de un CCP	104
Cuadro 28. Cálculos para determinación de la geometría del concentrador	112
Cuadro 29. Características de diseño del tubo absorbedor	118
Cuadro 30a. Datos operacionales de pruebas de desempeño CCP con agua dura como fluido de trabajo	128
Cuadro 31a. Condiciones operacionales del CCP con agua dura como fluido de trabajo	134
Cuadro 32a. Resultados evaluación rendimiento del CCP con agua dura como fluido de trabajo	137
Cuadro 33. Presupuesto bruto de fabricación CCP 1 m <sup>2</sup> de apertura	148
Cuadro 34. Costos ajustados construcción de CCP por metro cuadrado	149
Cuadro 35. Costos unitarios de la energía producida	151
Cuadro 36: Calculo del Tiempo de retorno de la inversión	154

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Irradiación directa bruta mes de enero	66
Gráfica 2. Irradiación directa bruta mes de febrero	66
Gráfica 3. Irradiación directa bruta mes de marzo	67
Gráfica 4. Irradiación directa bruta mes de abril	67
Gráfica 5. Irradiación directa bruta mes de mayo	68
Gráfica 6. Irradiación directa bruta mes de junio	68
Gráfica 7. Irradiación directa bruta mes de julio	69
Gráfica 8. Irradiación directa bruta mes de agosto	69
Gráfica 9. Irradiación directa bruta mes de septiembre	70
Gráfica 10. Irradiación directa bruta mes de octubre	70
Gráfica 11. Irradiación directa bruta mes de noviembre	71
Gráfica 12. Irradiación directa bruta mes de diciembre	71
Gráfica 13. Irradiación directa bruta anual	72
Gráfica 14. Irradiación directa bruta promedio anual diaria	72
Gráfica 15. Resultados anuales porcentuales relativos al Caso 1	73
Gráfica 16. Variación de la reflectancia óptica por ensuciamiento	88
Gráfica 17. Angulo de apertura como función de la relación $f/a$	91

Gráfica 18. Razón de concentración como función de la relación $f/a$	92
Gráfica 19. Factor de interceptación como función de la relación $f/a$	95
Gráfica 20. Factor modificador por ángulo de incidencia	97
Gráfica 21. Rendimiento Óptico de un CCP como función de la relación $f/a$	97
Gráfica 22. Efecto de las características del absorbedor en el rendimiento térmico de un CCP	105
Gráfica 23. Variación del rendimiento térmico de un CCP como función del arreglo del absorbedor para diferentes velocidades del viento exterior.	106
Gráfica 24. Variación del rendimiento térmico de un CCP como función del arreglo del absorbedor para diferentes diámetros del tubo	106
Gráfica 25. Rendimiento global del CCP según pruebas de desempeño	138
Gráfica 26. Costos de instalación para plantas de generación eléctricas según fuente primaria	146
Gráfica 27. Tiempo de retorno de la inversión	155

## LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Piranómetro	23
Foto 2. Pirheliómetro	23
Foto 3. Actinógrafo	24
Foto 4. Heliógrafo	25
Foto 5. Principales tipos de Sistemas Termosolares de Concentración a) Sistema de Receptor central; b) Sistema de discos Parabólicos, c) Sistema cilíndrico-parabólicos	75
Foto 6. Campo Acurex	78
Foto 7. Lazo Ace	78
Foto 8. Lazo DISS	79
Foto 9. Lazo Eurotrouhg	79
Foto 10. Sistema DSG	80
Foto 11. Planta SEGS	80
Foto 12. Pruebas de brillo	84

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Especificaciones técnicas instrumentos ópticos empleados en pruebas de brillo	166
Anexo B. PLANOS	167

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G_{sc}$	Constante solar
$G_{on}$	Radiación extraterrestre en el enésimo día del año.
$A$	Área, $m^2$ .
$C_p$	Calor específico a presión constante, $Jul/Kg.^{\circ}K$ .
$D$	Diámetro, $m$ .
$g$	Aceleración gravitacional, $m/s^2$ .
$K_{\theta}$	Factor de Angulo de incidencia.
$G$	Radiación solar, $W/m^2$ .
$I$	Irradiación para un periodo de una hora, $J/m^2$ .
$H$	Irradiación para un día, $J/m^2$ .
$F_{\lambda}$	Factor de difusión de la radiación solar.
$p$	Presión atmosférica, $mmHg$ .
$w$	Cantidad de agua precipitable en la atmósfera.
$m$	Masa atmosférica.
$\sigma$	Coeficiente de turbidez del aire.
$\alpha$	Índice de absortividad.
$\theta$	Angulo de incidencia de la radiación.
$\Phi$	Angulo latitud.
$\delta$	Angulo de declinación.
$\beta$	Angulo de inclinación de la superficie.
$\gamma$	Angulo de azimut de la superficie.
$\omega$	Angulo horario.
$\theta_z$	Angulo cenital.
$\gamma_s$	Azimut del sol.

$n$	Día del año.
$R_b$	Relación entre radiación directa sobre superficies inclinadas y sobre superficies horizontales.
$k_T$	Índice de claridad horario.
$K_T$	Índice de claridad diario.
$L_{st}$	Meridiano estándar para la hora local.
$L_{loc}$	Longitud del sitio.
$R$	Distancia entre centros de la tierra y el sol.
$A_a$	Área de apertura del colector.
$A_r$	Área superficial del receptor absorbedor.
$C_{max}$	Razón de concentración máxima del colector.
$C$	Razón de concentración del colector.
$f$	Distancia focal de la parábola.
$\Phi$	Angulo de apertura de la parábola
$\Phi_r$	Angulo de apertura máximo de la parábola.
$a$	Apertura de la parábola.
$r$	Radio de apertura de la parábola.
$r_r$	Radio de apertura máximo de la parábola.
$D$	Diámetro de un receptor cilíndrico.
$W$	Tamaño de un receptor plano.
$F_\Phi$	Factor de interceptación.
$h$	Coefficiente normal de distribución de flujo.
$S$	Radiación absorbida por unidad de área no sombreada.
$\rho$	Coefficiente de reflectividad óptica de la superficie.
$\tau$	Coefficiente de transmisividad óptica de la superficie.
$Q_u$	Calor transferido al fluido por unidad de superficie.
$U_1$	Coefficiente global de pérdidas.
$F_R$	Factor de flujo para la corrección del gradiente de temperatura.

$T_i$	Temperatura de entrada del fluido al absorbedor.
$T_a$	Temperatura del ambiente.
$h_w$	Coeficiente de pérdidas por convección.
$h_r$	Coeficiente de pérdidas por radiación.
$U_{\text{cond}}$	Coeficiente de pérdidas por conducción.
$Nu$	Número de Nusselt.
$K$	Conductividad térmica.
$Re$	Número de Reynolds.
$\mu$	Viscosidad Dinámica.
$\sigma_s$	Constante de Stefan Boltzmann
$h_f$	Coeficiente de convección.
$F'$	Factor de eficiencia del colector.
$F''$	Factor de flujo del colector.
$T_o$	Temperatura de salida del fluido del absorbedor.
$\dot{m}$	Flujo másico.
$Pr$	Número de Prandlt.
$V$	Velocidad de flujo.
$V_a$	Velocidad del aire.
$D_i$	Diámetro interior del absorbedor.
$D_o$	Diámetro exterior del absorbedor.
$d_i$	Diámetro interior de la cubierta del absorbedor.
$d_o$	Diámetro exterior de la cubierta del absorbedor.
$\varepsilon_c$	Emisividad de la superficie.
$\eta_{\text{ter}}$	Rendimiento térmico del colector.
$CF$	Valor futuro del capital.
$CP$	Valor presente del capital.
$i$	Tasa de interés.

## RESUMEN

### TÍTULO:

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR A TRAVÉS DE SISTEMAS DE COLECTORES DE CONCENTRACIÓN CILÍNDRICO PARABÓLICOS Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO A PEQUEÑA ESCALA \***

### AUTORES:

Alfonso Sánchez Celis.

Leowaldo Santos Amaya. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Colector cilíndrico parabólico, energía solar, vapor

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es profundizar en la investigación sobre aprovechamiento de la energía solar por la vía térmica mediante colectores cilíndrico-parabólicos de concentración (CCP) a fin de evaluar el potencial de esta tecnología en aplicaciones de mediana temperatura que involucren, o no, evaporación en el fluido de trabajo. Para ello se estimó la cantidad disponible de energía con base en los datos de radiación solar proporcionados por la CDMB, desde su estación de monitoreo ubicada en la UIS, observándose que la radiación difusa es cerca del 50% de la radiación total.

También se revisó el estado de desarrollo de los sistemas CCP, esto permitió efectuar un análisis teórico-experimental de sus principales características, así como la cuantificación del efecto de sus parámetros de diseño sobre su eficiencia global. De esta manera se pudo desarrollar un modelo experimental que permitió la adquisición de datos para soporte de la investigación.

Entre los resultados mas importantes, se destaca la evaluación experimental de la eficiencia global del sistema CCP, la cual fue de 25% para temperaturas del fluido de trabajo cercanas a 80°C y de 45% para temperaturas cercanas a 40°C. Esto posibilitó la estimación del costo total de producción incluyendo la instalación, operación y mantenimiento, el cual fue de \$780/kW-h.

Finalmente, se pudo establecer que la viabilidad económica y técnica de esta tecnología depende principalmente de su utilización a mediana y gran escala, debido a la baja eficiencia global del sistema y a la existencia de fuentes más económicas. Sin embargo, su verdadero potencial radica en el bajo impacto ambiental y la disponibilidad ilimitada de la fuente, lo cual en cierto modo mantiene vivo el interés en este campo de la investigación hasta que varios de los inconvenientes actuales sean superados.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gélvez.

## SUMMARY

### TITLE:

ASSESSING THE POTENTIAL FOR THE PRODUCTION OF STEAM THROUGH THE USE OF THE SOLAR SYSTEM THROUGH CYLINDRICAL PARABÓLICOS COLLECTORS OF CONCENTRATION AND DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE TO SMALL SCALE \*

### AUTHORS:

Alfonso Sánchez Celis.

Leowaldo Santos Amaya. \*\*

### KEY WORDS:

Cylindrical parabolic collector, solar energy, steam.

### DESCRIPTION:

The objective of this project is to deepen research on the utilization of solar energy through thermal collectors through cylindrical-parabolic concentration (CPC) in order to assess the potential of this technology in applications involving medium temperature, or not, Evaporation in the working fluid. It estimated the amount of energy available based on the data provided by the solar radiation CDMB from its monitoring station located at UIS, observing that the diffuse radiation is about 50% of the total radiation.

It also reviewed the status of systems development CPC, this allowed Theoretical and experimental analysis of its main characteristics, as well as the quantification of the impact of their design parameters on its overall efficiency. Thus, to develop an experimental model that allowed data acquisition support for the investigation.

Among the most important results, highlighting the experimental evaluation of the efficiency of the overall system CPC, which was 25% for working fluid temperatures close to 80 ° C and 45% for temperatures close to 40 ° C. This enabled the estimate of the total cost of production including installation, operation and maintenance, which was \$ 780/kW-h. Finally, it was able to establish that the economic and technical viability of this technology depends primarily on its use at medium and large scale due to the low overall efficiency of the system and the existence of cheaper sources. But its real potential lies in the low environmental impact and unrestricted availability of the source, which somehow keeps alive the interest in this field of research until several of the current drawbacks are overcome.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gélvez.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el aprovechamiento de los recursos energéticos convencionales y la búsqueda de alternativas que sean económicamente viables y ambientalmente más convenientes, se ha constituido en la primordial preocupación mundial, desde que por primera vez un fenómeno como el desajuste climático global que por estos días aqueja al planeta, ha puesto de acuerdo, tanto a los gobiernos como a la industria y la ciencia, en procura de una solución.

En las últimas décadas se ha hecho un gran esfuerzo por desarrollar técnicas y tecnologías que permitan aprovechar la energía del sol, una de las fuentes más limpias, cuya existencia está ligada a la vida misma, aunque todavía, el entusiasmo de los investigadores es mayor que el interés de la industria.

En nuestro departamento, el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales de la Universidad Industrial de Santander, CEIAM, ha patrocinado algunas iniciativas en materia de aplicaciones para desinfección de agua, con buenos resultados, y otro tanto se ha hecho en otras regiones del país, sin embargo el aprovechamiento de la energía solar mediante sistemas de mediana temperatura para la producción de vapor, o para calentamiento de agua a temperaturas superiores a los 70° C, aunque haya despertado el interés como alternativa social en algunas regiones, no ha sido explorado en nuestro medio como alternativa económica y técnica.

A esto, sumado el alto costo de los combustibles, la creciente demanda de energía en el país, el agotamiento cada vez más próximo de las fuentes

convencionales y fundamentalmente, el elevado impacto ambiental que acarrea la producción y el uso de combustibles, plantean con carácter urgente que se estudien y desarrollen formas alternas de obtener energía, como es el caso particular del aprovechamiento de la energía solar que si bien, aún es bastante ineficiente, constituye un enorme potencial por sus inigualables reservas y bajo costo de las mismas. Por este motivo es de gran importancia el desarrollo de proyectos como el presente, que pretenden además, involucrar a la comunidad científica de las futuras generaciones en la búsqueda de alternativas para que el desarrollo tecnológico y social de nuestra región tenga lugar con el menor impacto posible en el medio ambiente.

## **1. . RADIACIÓN SOLAR**

Cuando se habla de energía solar, desde la perspectiva de su utilización con propósitos industriales o domésticos, dos aspectos son de principal interés, la cantidad o disponibilidad y el modo o vía de aprovechamiento. En cualquiera de los casos es necesario un conocimiento previo del fenómeno de la radiación solar, bien sea empírico o teórico, que posibilite obtener mejores resultados.

Cuatro cosas esencialmente definen las características de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, la estructura del sol, la posición relativa de la tierra respecto a éste, la posición geográfica y las condiciones meteorológicas del sitio. De manera que antes de tratar lo correspondiente a su aprovechamiento, es preciso hacer un recorrido por cada uno de estos tópicos.

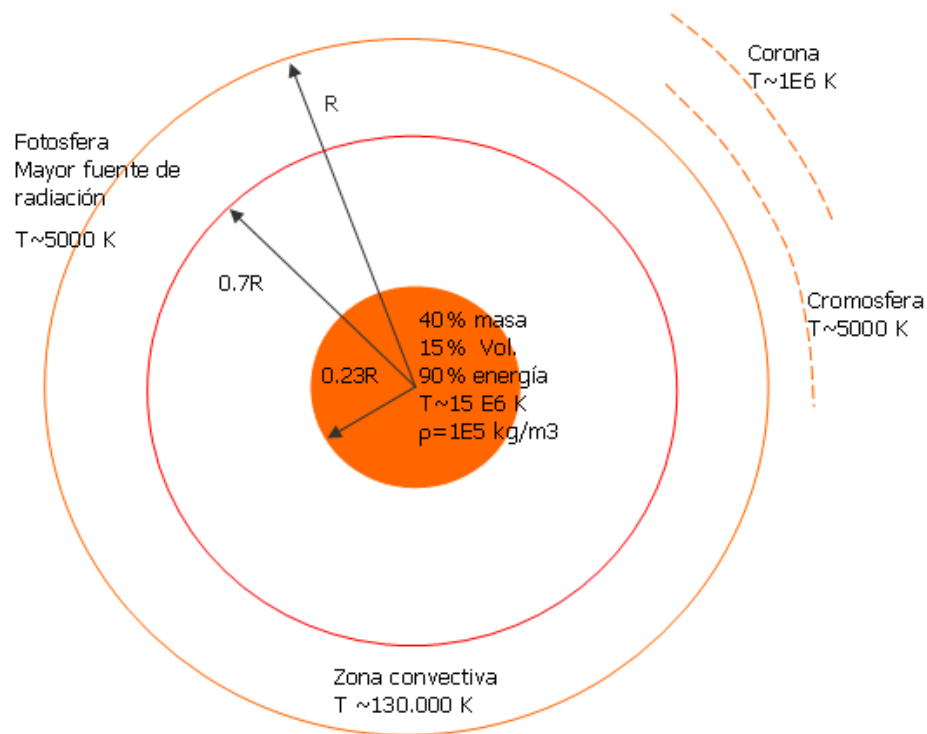
### **1.1 GENERACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR**

La radiación solar es el producto de una serie de reacciones nucleares diversas que ocurren en el interior del sol, el cual funciona como un reactor de fusión a gran escala, donde átomos de hidrógeno se unen para producir átomos más pesados, liberando grandes cantidades de energía en este proceso.

La energía liberada debe ser transferida desde el centro del sol hasta su superficie mediante una sucesión de procesos de convección y radiación y posteriormente irradiada hacia el espacio en forma de ondas electromagnéticas y partículas de alta energía.

Esta gran masa de gases ardientes tiene un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  m y está conformada por diversas capas o zonas que emiten radiación de distintas características, como lo muestra la Figura 1a. La energía total producida es de unos  $5,6 \times 10^{35}$  GeV<sup>1</sup> cada segundo, de los cuales la tierra recibe en el exterior de su atmósfera  $1,73 \times 10^{14}$  kW, y en su superficie, el 31% en forma directa y el 16% de manera difusa; el 53% restante es reflejada o absorbida en el camino.

Figura 1a. Estructura del sol



Fuente: Adaptada de "Solar Engineering of Thermal Process", J. A. Duffie and W. A. Beckman, Capítulo 1, Wiley & Sons, Inc. 1991.

<sup>1</sup> Este dato se refiere a la energía total irradiada al espacio tanto en forma electromagnética como de partículas de alta energía. Equivale a unos  $8.971 \times 10^{25}$  kW.

## 1.2 LA CONSTANTE SOLAR

La radiación solar incidente en el exterior de la atmósfera terrestre resulta una cantidad casi fija, que los científicos ha denominado la constante solar, cuyo valor esta asociado a las relaciones espaciales entre el sol y la tierra. Se define como la energía proveniente del sol, por unidad de tiempo, recibida por una superficie unitaria perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a una distancia media tierra-sol, en el exterior de la atmósfera. Los resultados de su medición por satélites indican un valor promedio<sup>2</sup> de 1367 W/m<sup>2</sup>, con un incertidumbre del orden del 1%.

Las variaciones en la radiación extraterrestre ocurren por dos motivos principales. El primero, alteraciones en la radiación emitida por el sol relacionadas con actividad de manchas solares, las cuales pueden llegar a ser de un orden menor a  $\pm 1.5\%$  y que para propósito de ingeniería suelen despreciarse. Las segundas, están asociadas a las variaciones que la trayectoria elíptica de la tierra alrededor del sol provocan en la distancia tierra-sol, las cuales son del orden de  $\pm 3\%$ . En este caso la corrección correspondiente del valor de la constante solar, se indica en la Ecuación 1.1 como función del día del año.

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 * \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (1.1)$$

Donde:

$G_{on}$ : Constante solar modificada para un día n.

n: Día del año, según el calendario.

$G_{sc}$ : Constante solar cuyo valor es 1,353 kW/m<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Este valor no es realmente una constante, pero sí un parámetro que a corto y medio plazo varía dentro de márgenes estrechos. La WRC (World Radiation Center) adoptó el valor de 1367 W/m<sup>2</sup>.

### 1.3 DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR

La naturaleza diversa de las reacciones que dan origen a la energía solar, producen una gama de radiación electromagnética con distintas características de acuerdo con cantidad y forma de la energía que contiene. Sin embargo, para aplicaciones de ingeniería donde se involucren procesos de carácter térmico<sup>3</sup>, puede adoptarse un modelo más sencillo, asumiendo que el sol se comporta como un cuerpo negro que radia energía a la temperatura de 5777 K<sup>4</sup>, dado que la distribución en cantidad e intensidad de dicha energía es esencialmente la misma de un cuerpo negro en el rango de las longitudes de onda aprovechables, es decir, las correspondientes a la franja infrarroja y visible, que constituyen aproximadamente el 90% del total.

De otra parte, el comportamiento de los distintos medios materiales empleados en los procesos de captación de energía solar, depende de la longitud de onda de la radiación, en mayor o menos grado, por tanto su análisis contribuye a mejorar la técnica de los mismos.

En la Figura 1b se muestra la distribución de la radiación solar en su intervalo correspondiente del espectro, para dos casos de interés, en el exterior de la atmósfera y a nivel del mar. La diferencia se debe a la atenuación producida por fenómenos como la difusión y la absorción al paso por la atmósfera. Del análisis de estas curvas, obtenidas a partir de mediciones hechas en el espacio exterior, puede observarse la distribución de la energía en las distintas bandas, ultravioleta, visible e infrarroja. Así, para longitudes de onda menores a  $0.38\mu\text{m}$  corresponde un 6.36% de la radiación, es decir  $87\text{ W/m}^2$ ,

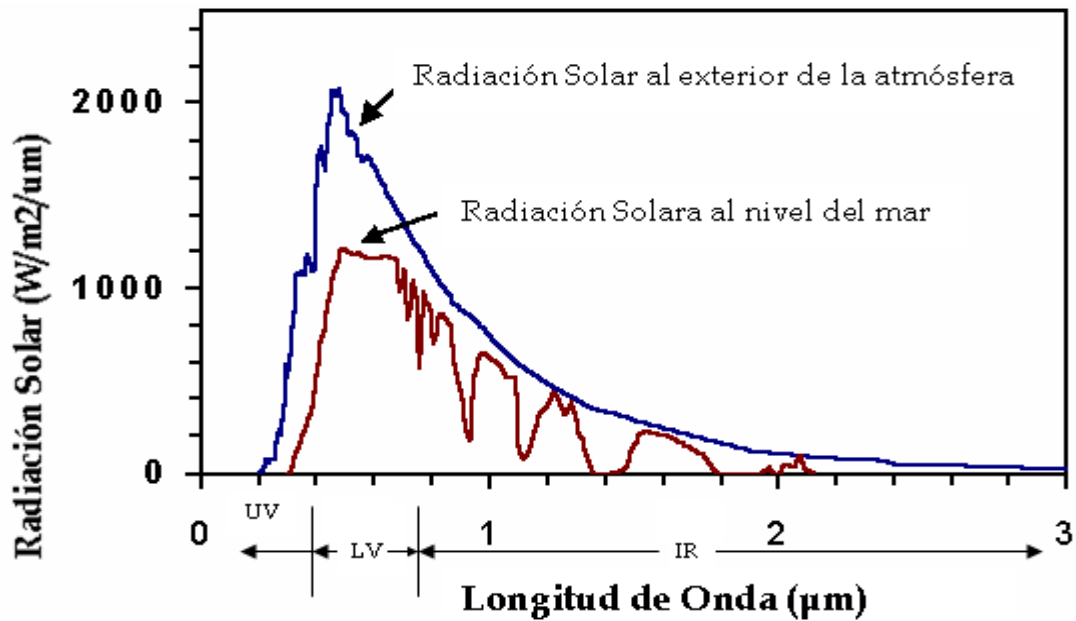
---

<sup>3</sup> En el caso de proceso en los que la longitud de onda y la distribución espectral sea un factor esencial, como los fotovoltaicos y fotoquímicos, resulta preciso un análisis más detallado.

<sup>4</sup> Esta temperatura es la misma de un cuerpo negro que radia la misma cantidad de energía que el sol.

mientras que entre  $0.38\mu\text{m}$  y  $0.78\mu\text{m}$ , es de  $656\text{ W/m}^2$  que constituyen el 48%, el restante 45,64% para longitudes superiores a  $0.78\mu\text{m}$ , unos  $623\text{W/m}^2$ , lo cual sumado compone los  $1367\text{W/m}^2$  de la constante extraterrestre.

Figura 1b. Distribución espectral de la Radiación solar



Fuente: Adaptada de Centre for Remote Imaging, Sensing & Processing

#### 1.4 ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Cuando se habla de radiación solar en la superficie de la tierra, debe asociarse a la porción de la radiación que proveniente del sol viaja en el vacío y posteriormente entra a la atmósfera terrestre, donde su intensidad es disminuida a causa de varios fenómenos que serán explicados a continuación. Se definirán algunos conceptos que ayudarán a una mejor comprensión de estos fenómenos.

**Masa atmosférica (m):** relación entre la masa de aire a través de la cual la radiación directa pasa para llegar a la superficie terrestre y la masa que pasaría si el sol estuviera ubicado justo en el cenit.

**Radiación directa:** radiación recibida proveniente del sol sin cambio de dirección al paso por la atmósfera.

**Radiación difusa:** radiación recibida proveniente del sol, luego de haber cambiado su dirección al paso por la atmósfera.

**Radiación total:** la suma de la radiación solar directa y la difusa.

**Factor de ángulo de incidencia:** la propagación de la imagen en el receptor de un colector concentrador depende del ángulo de incidencia “ $\theta$ ” puesto que su variación provoca cambios en la dirección transversal y longitudinal de la imagen. En la dirección transversal a medida que el ángulo de incidencia se incrementa, el factor de interceptación disminuye y en la dirección longitudinal el efecto es mucho mayor ya que la variación de  $\theta$  conlleva a cambios en la reflectancia, transmitancia y absorptancia, estos efectos no se pueden generalizar fácilmente, pero Gaul y Rabl (1980) han determinado valores experimentales para diferentes configuraciones con resultados satisfactorios. El resultado de la relación obtenida para describir el fenómeno enunciado es llamado factor de ángulo de incidencia “ $k(\theta)$ ” y para un colector cilíndrico parabólico esta dado por:

$$k(\theta) = 1 - 6.74 \times 10^{-5} \theta^2 + 1.64 \times 10^{-6} \theta^3 - 2.51 \times 10^{-8} \theta^4$$

**Radiación solar:** rata a la cual la energía radiada por el sol incide sobre una superficie por unidad de área. El símbolo utilizado para la radiación solar es  $G$  y sus unidades en el Sistema Internacional son  $W/m^2$ .

**Irradiación:** energía incidente sobre una superficie por unidad de área para un tiempo definido, sus unidades son  $J/m^2$ . La irradiación se consigue integrando la radiación solar para un tiempo específico generalmente una hora o un día. El símbolo  $H$  es utilizado para la irradiación de un día. El símbolo  $I$  es utilizado para una hora. Los símbolos  $H$  e  $I$  pueden ser usados para representar irradiación directa, difusa o total y puede estar sobre superficies de cualquier orientación.

**Subíndices utilizados:** a los símbolos  $G$ ,  $H$  e  $I$  se le pueden agregar los siguientes subíndices (ver figura 2):

$o$ : referente a radiación fuera de la atmósfera terrestre, por ejemplo:  $I_o$  es la irradiación fuera de la atmósfera calculada para una hora.

$b$ : Referente a radiación directa.

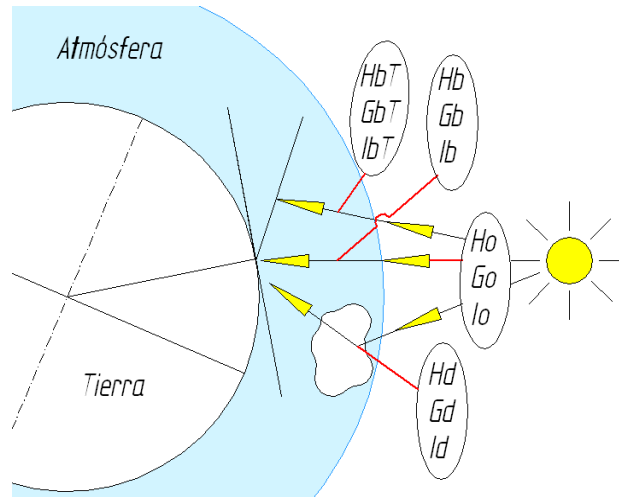
$d$ : Referente a radiación difusa.

$T$ : Referente a la radiación sobre un plano inclinado.

$n$ : Referente a la radiación sobre un plano normal a la dirección de propagación .

Nota: sino aparece ni  $T$  ni  $n$ , la radiación es sobre una superficie horizontal.

Figura 2. Componentes de la radiación solar terrestre y extraterrestre



Antes de llegar a la superficie de la tierra, la radiación normal proveniente del sol debe atravesar la atmósfera, donde varios fenómenos disminuyen su intensidad y cambian su magnitud o dirección. La radiación correspondiente a longitudes de onda corta, el caso de la ultravioleta y rayos X, es casi completamente absorbida por algunos componentes de la atmósfera como el  $O_2$ , el  $N_2$ , y el  $O_3$ , mientras la de mayores longitudes de onda son absorbidas por el  $CO_2$  y el  $H_2O$  en iguales circunstancias. Por esta razón, para propósitos de su aplicación sólo interesa la radiación correspondiente al intervalo entre  $0.25\mu m$  y  $2.5\mu m$ , la cual además sufrirá variaciones por causa de la difusión y absorción.

**1.4.1 Difusión de la radiación solar.** Este fenómeno es causado por los distintos elementos hallados por la radiación solar en su camino desde el exterior de la atmósfera a la superficie de la tierra, que provocan un cambio en su dirección. En este caso se tendrán en cuenta los tres principales a saber,

aire, polvo, vapor de agua. Para cuantificar el efecto que ellos tienen sobre la intensidad de la radiación, se han desarrollado diversos estudios que combinan resultados empíricos con analíticos, posibilitando la determinación de los llamados factores de transmisión, mediante los cuales se pueden cuantificar los efectos del fenómeno de la difusión de la radiación solar.

En el caso del **aire**, cuyas moléculas son mucho más pequeñas que las longitudes de onda de la radiación representativa, el factor de transmitancia monocromática fue determinado con base en la teoría de Rayleigh<sup>5</sup>, como lo indica la Ecuación 1.2, donde  $\lambda$  está en micras y adoptando un valor de referencia para la masa atmosférica  $m = 1$ , y una presión atmosférica de 760 mm de mercurio.

$$F_{\lambda(\text{aire})} = 10^{-0,00389 \lambda^{-4}} \quad (1.2)$$

A diferencia de la anterior, la difusión debida a las partículas de **polvo**, por ser éstas significativamente más grandes y su concentración, como su tamaño cambiantes según las condiciones del sitio, es más difícil de establecer, sin embargo, Moon<sup>6</sup> desarrolló una expresión semejante, considerando que una atmósfera muy limpia contiene unas 200 partículas por  $\text{cm}^3$ , mientras una muy contaminada contiene unas 800 partículas de polvo por  $\text{cm}^3$  a nivel del

---

<sup>5</sup> La dispersión de Rayleigh, en honor a Lord Rayleigh, es la dispersión cualquier radiación electromagnética por partículas mucho menores que la longitud de onda de los fotones dispersados. Ocurre cuando la luz viaja por sólidos y líquidos transparentes, pero se ve con mayor frecuencia en los gases. Esta teoría sugiere que el coeficiente de difusión varía aproximadamente como la inversa de la cuarta potencia de la longitud de onda de la radiación.

<sup>6</sup> El profesor B.P Moon de la Escuela de Física y Astronomía de la Universidad de Birmingham, quien trabajó en numerosos proyectos sobre dispersión de la radiación electromagnética.

suelo; tomando este último como valor de referencia y el sol localizado en su cenit, la ecuación se escribe:

$$F_{\lambda(\text{polvo})} = 10^{0,0353 \lambda^{-0,75}} \quad (1.3)$$

Finalmente para el efecto del **vapor de agua** contenido en la atmósfera se ha procurado una manera también de carácter selectivo respecto a la longitud de onda de la radiación electromagnética, para una masa atmosférica  $m = 1$  y una presión de saturación del vapor de agua de 26mbar, así:

$$F_{\lambda(\text{H}_2\text{O})} = 10^{0,0075 \lambda^{-2}} \quad (1.4)$$

Aunque existen formas alternas de cuantificar el fenómeno de difusión, como es el caso de la teoría Angstrom<sup>7</sup>, su efecto global se puede estimar, combinado los tres factores anteriores para obtener una expresión como sigue:

$$F_{\lambda} = \left( F_{\lambda(\text{aire})} * \frac{p}{760} * F_{\lambda(\text{polvo})} * \frac{r}{800} * F_{\lambda(\text{H}_2\text{O})} * \frac{w}{26} \right) * m \quad (1.5)$$

En la que **p** representa la presión atmosférica en mm de Hg, **r** la concentración de partículas de polvo en cm<sup>3</sup>, **w** la cantidad de agua precipitable sobre el lugar de observación y **m** la masa atmosférica.

**1.4.2 Absorción de la radiación solar.** La absorción de la radiación solar en su paso por la atmósfera es debida principalmente a dos elementos, el ozono

---

<sup>7</sup> Esta teoría propone un modelo en el que el efecto de las partículas de agua y polvo se estima en forma combinada mediante la inclusión de un factor de turbiedad que es menos sensible a la longitud de onda de la radiación.

en la estratosfera y el vapor de agua confinado en las capas bajas; el primero, altamente activo en la franja del ultravioleta ( $\lambda < 0,3 \mu\text{m}$ ) y un poco en ( $0,5 < \lambda < 0,6 \mu\text{m}$ ) y el segundo, en la banda del infrarrojo ( $\lambda > 0,7 \mu\text{m}$ ). De modo que una parte considerable de la radiación solar será retenida y otra parte mayor seguirá su camino a través de la atmósfera hacia el suelo. La cantidad absorbida suele ser expresada como el efecto combinado de todos estos factores en función de un coeficiente que los autores han llamado el coeficiente de turbidez ( $\sigma$ ) que permite relacionar la radiación normal directa transmitida en términos de la radiación entrante en condiciones de aire limpio.

$$I_{ot} = I_o * e^{-\sigma m} \quad (1.6)$$

Donde:

$I_{ot}$ : Irradiación transmitida.

$I_o$ : Irradiación extraterrestre sobre una superficie horizontal.

$\sigma$ : Coeficiente de turbidez.

$m$ : Masa atmosférica.

De modo que la fracción absorbida “ $\alpha$ ” podrá calcularse mediante la expresión:

$$\alpha = \frac{I_o - I_{ot}}{I_o} \quad (1.7)$$

## 1.5 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA

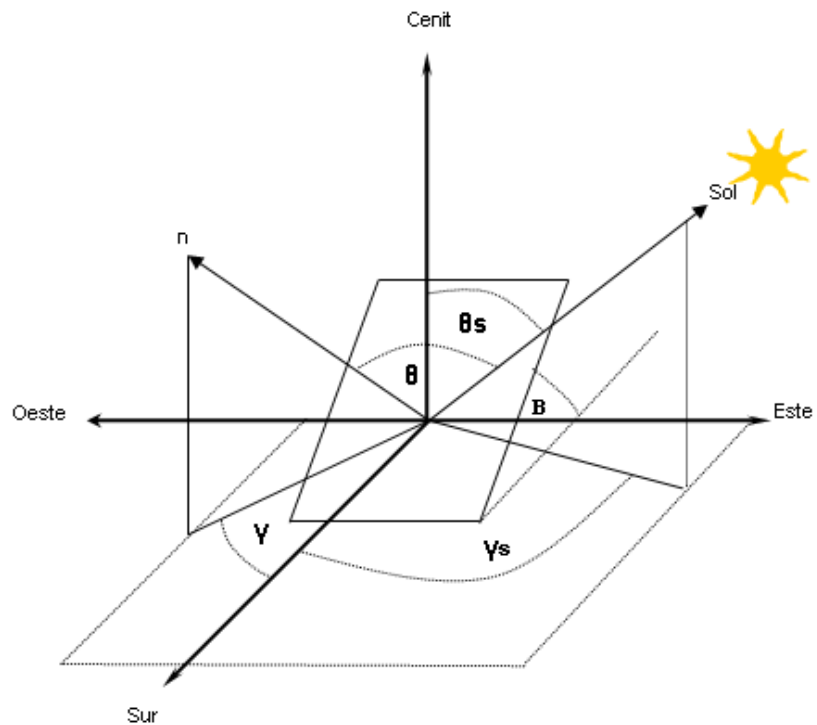
Para efectos del aprovechamiento mediante colectores de concentración, suele considerarse únicamente la porción de la radiación solar directa, por

conservar la mayoría de sus características frente a fenómenos como la reflexión o la transmisión hasta que finalmente pueda ser transmitida al fluido de trabajo.

**1.5.1 Dirección de la radiación solar directa.** La dirección de la radiación solar directa suele caracterizarse mediante el ángulo de incidencia, el cual depende de diversos factores como el día del año, la hora, el sitio y la orientación de la superficie en consideración.

Se definirán las principales variables a tener en cuenta en este análisis, antes de proceder con el mismo.

Figura 3. Dirección de la radiación directa



Fuente: Adaptada de “Procesos Termosolares en baja, media y alta temperatura”, Fernández D. Pedro, Capítulo 1

**Angulo de incidencia ( $\theta$ ):** ángulo entre la dirección de la radiación directa sobre una superficie determinada y la normal de la misma.

**Latitud ( $\phi$ ):** ubicación angular del sitio al norte o sur del ecuador, siendo el norte positivo,  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ .

**Declinación ( $\delta$ ):** posición angular del sol al medio día con respecto al plano del ecuador, norte positivo,  $-23.45 \leq \phi \leq 23.45^\circ$ .

**Inclinación ( $\beta$ ):** ángulo entre el plano de la superficie en consideración y la horizontal,  $0 \leq \beta \leq 180^\circ$ .

**Azimet de la superficie ( $\gamma$ ):** ángulo de la desviación entre la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie y el meridiano local, siendo cero el sur, y oeste positivo,  $-180 \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

**Angulo horario ( $\omega$ ):** desplazamiento angular del sol hacia el este u oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a razón de  $15^\circ$  por hora, mañana positivo, tarde negativo.

**Angulo Cenital ( $\theta_z$ ):** ángulo entre la vertical y la dirección de la radiación solar.

**Azimet del sol ( $\gamma_s$ ):** desplazamiento angular del sur de la proyección en un plano horizontal de la dirección de la radiación solar, hacia el oeste es positivo.

Realizando un análisis geométrico sencillo puede obtenerse una relación para el ángulo de incidencia como función de los anteriores parámetros, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen } \delta \text{ sen } \phi \text{ cos } \beta - \text{sen } \delta \text{ cos } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \gamma \\ & + \text{cos } \delta \text{ cos } \phi \text{ cos } \beta \text{ cos } \omega + \text{cos } \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \gamma \text{ cos } \omega \\ & + \text{cos } \delta \text{ sen } \beta \text{ sen } \gamma \text{ sen } \omega \end{aligned} \quad (1.8)$$

O de un modo alternativo:

$$\text{Cos} \theta = \text{Cos} \theta_z * \text{Cos} \beta + \text{Sen} \theta_z * \text{Sen} \beta * \text{Cos}(\gamma_s - \gamma) \quad (1.9)$$

Esta última expresión es menos común dado que requiere de la determinación del ángulo acimutal del sol, lo cual no siempre es muy sencillo, ya que éste depende una serie de parámetros adicionales.

El ángulo cenital se puede obtener como:

$$\text{Cos} \theta_z = \text{Cos} \phi \text{ Cos} \delta \text{ Cos} \omega + \text{Sen} \phi \text{ Sen} \delta \quad (1.10)$$

El ángulo de declinación está relacionado con la rotación de la tierra sobre un eje inclinado  $23.45^\circ$  y se puede determinar, para el  $n$ ésimo día del año, contado desde el 1 de enero, con la siguiente ecuación propuesta por Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 * \text{Sen} \left( 360 * \frac{284 + n}{365} \right) \quad (1.11)$$

**1.5.2 Ángulos para seguimiento de la trayectoria del sol.** Algunos colectores solares precisan de un sistema de seguimiento de la trayectoria del sol, para minimizar el ángulo de incidencia de la radiación solar directa y de este modo aumentar la energía captada.

Estos sistemas se clasifican de acuerdo a su movimiento, que puede ser alrededor de uno o dos ejes. A continuación se presentan los casos mas comunes<sup>8</sup> de sistemas de seguimiento junto con las formulas que permiten calcular el ángulo de incidencia “ $\theta$ ” mínimo que se puede obtener con dicha configuración a una hora determinada y el ángulo de inclinación “ $\beta$ ” que debe tener el colector consecuentemente.

• **Rotación alrededor de un eje horizontal este-oeste con ajuste continuo.**

$$\text{Cos}\theta = (1 - \text{Cos}^2\delta * \text{Sen}^2\omega)^{1/2} \quad (1.12)$$

$$\text{Tan}\beta = \tan\theta_z |\text{Cos}\gamma_s| \quad (1.13)$$

• **Rotación alrededor de un eje horizontal norte-sur con ajuste continuo.**

$$\text{Cos}\theta = (\text{Cos}^2\theta_z + \text{Cos}^2\delta * \text{Sen}^2\omega)^{1/2} \quad (1.14)$$

$$\text{Tan}\beta = \tan\theta_z |\text{Cos}\gamma - \text{Cos}\gamma_s| \quad (1.15)$$

$$\text{Si } \gamma_s > 0 \quad \gamma = 90^\circ$$

$$\text{Si } \gamma_s < 0 \quad \gamma = -90^\circ$$

• **Rotación alrededor de un eje norte-sur paralelo al eje de la tierra con ajuste continuo**

$$\text{Cos}\theta = \text{Cos}\delta \quad (1.16)$$

---

<sup>8</sup> Para ver una descripción más detallada de estos temas, véase DUFFIE & BECKMAN, 1991.

$$\text{Tan}\beta = \frac{\tan\phi}{\tan\gamma} \quad (1.17)$$

• **Rotación alrededor de dos ejes, con ajuste continuo**

$$\text{Cos}\theta = 1 \quad (1.18)$$

La selección de uno de estos mecanismos de seguimiento debe hacerse de acuerdo a las características del sitio y de la aplicación, incluyendo una evaluación técnica y económica de la alternativa.

**1.5.3 Relación entre radiación directa sobre superficies inclinadas y sobre superficies horizontales.**

La mayoría de los datos de radiación solar obtenidos en las estaciones meteorológicas son medidos a partir de superficies horizontales, mientras que los colectores, ya sean fijos o con sistema de seguimiento de la trayectoria del sol, se diseñan y construyen para funcionar con cierta inclinación. Por este motivo, es útil establecer una relación que permita obtener datos adecuados para el diseño, a partir de la información disponible.

Partiendo de la ecuación 1.8 se puede obtener en forma exacta una relación geométrica que relaciona la cantidad de energía medida o captada en una superficie horizontal con la correspondiente para una superficie inclinada.

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_{b,n}} = \frac{G_{b,n} \text{Cos}\theta}{G_{b,n} \text{Cos}\theta_z}$$

$$R_b = \frac{\text{Cos}\theta}{\text{Cos}\theta_z} \quad (1.19)$$

**1.5.4 Radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal.** La radiación extraterrestre es un parámetro para la evaluación de la energía disponible a partir de una base teórica normalizada, bajo la suposición de que no existe atmósfera que atenúe la radiación entrante.

A partir de las ecuaciones 1.1 y 1.19 se obtiene la siguiente expresión para el flujo de energía instantáneo en (W/m<sup>2</sup>):

$$G_o = G_{sc} \left( 1 + 0.033 * \text{Cos} \frac{360n}{365} \right) * (\text{Cos} \phi \text{Cos} \delta \text{Cos} \omega + \text{Sen} \phi \text{Sen} \delta) \quad (1.20)$$

O para el flujo de energía en una hora, en (J/m<sup>2</sup>)

$$I_o = \frac{12 * 3600 G_{sc}}{\pi} \left( 1 + 0.033 * \text{Cos} \frac{360n}{365} \right) * \left( \text{Cos} \phi \text{Cos} \delta (\text{Sen} \omega_2 - \text{Sen} \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \text{Sen} \phi \text{Sen} \delta \right) \quad (1.21)$$

**1.5.5 Componente directa y difusa de la radiación.** Los datos disponibles sobre radiación solar en la mayoría de los casos, corresponden a radiación total, pero en el proceso de diseño de sistemas solares, es más útil conocer el valor por separado de las componentes directa y difusa.

Debido a que estas cantidades dependen del lugar, el día del año y las condiciones meteorológicas, los métodos empleados para su evaluación son en buen parte experimental y por tanto aproximado, pero lo suficientemente confiables para efectos de su uso en ingeniería.

Los modelos<sup>9</sup> más empleados se basan en la determinación del índice de claridad horaria,  $k_T$  o diaria  $K_T$ , que es la relación entre la radiación solar medida en la superficie de la tierra y la radiación extraterrestre calculada para un periodo de tiempo de una hora o un día respectivamente.

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (1.22)$$

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (1.23)$$

Valores bajos de estos parámetros indican cielo nublado y valores altos, cielo claro. De este modo, la relación entre la componente difusa y la radiación total resulta una función del índice de claridad, como lo han propuesto varios autores en sus investigaciones. Estos estudios realizados con base en datos meteorológicos y de radiación solar de distintos continentes han permitido a los científicos obtener unas correlaciones confiables y cuya utilización es bastante difundida en la actualidad.

Aunque los resultados obtenidos a partir de las distintas correlaciones son semejantes, se propone la hallada por Erbs<sup>10</sup> et al.

$$\frac{I_d}{I} = 1.0 - 0.09 * k_T \quad \text{para } k_T \leq 0.22 \quad (1.24)$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.164k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 \quad \text{para } 0.22 \leq k_T \leq 0.8$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.165 \quad \text{para } k_T > 0.8$$

---

<sup>9</sup> El índice de claridad fue originalmente propuesto por Liu & Jordan (1960).

<sup>10</sup> Erbs et al, 1982. Aunque los resultados obtenidos, para las distintas correlaciones, son muy similares, la de Erbs es más conocida por tener un mejor rango de aplicación.

Estas correlaciones resultan además de útiles, muy apropiadas en la gran mayoría de los casos, tanto para el diseño como para la evaluación del desempeño de los sistemas de colectores solares.

## **1.6 CANTIDAD APROVECHABLE DE RADIACIÓN SOLAR DIRECTA ANUAL DIARIA EN BUCARAMANGA.**

Se ha visto como en su camino hacia la superficie de la tierra, desde el momento de su incidencia en el exterior de la atmósfera, la radiación proveniente del sol ha sufrido el efecto de variados fenómenos de atenuación y disminución de su intensidad, así que la cantidad teórica aprovechable debe estimarse teniendo en cuenta todos estos factores según el lugar específico de la aplicación.

**1.6.1 Tiempo Solar.** La hora del día es una variable importante en la cuantificación de la energía útil. Para efectos de estandarización, todos estos cálculos se hacen con base en el tiempo solar, el cual hace referencia al aparente camino que describe el sol a través del cielo, siendo el medio día el momento en que el sol cruza el meridiano del observador. El tiempo solar no coincide necesariamente con la hora local. Si los datos medidos tienen como referencia el tiempo local, es necesario realizar las correcciones<sup>11</sup> pertinentes mediante la siguiente relación:

$$\text{Hora solar} = \text{Hora local} + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (1.25)$$

---

<sup>11</sup> Estas correcciones contemplan las diferencias en la longitud entre el meridiano del observador y el meridiano en que tiempo estándar local se basa; la segunda corrección tiene en cuenta las perturbaciones en la velocidad de rotación de la tierra que afecta el tiempo en que el sol cruza el meridiano del observador.

Donde  $L_{st}$  es el meridiano estándar para la hora local;  $L_{loc}$  es la longitud del sitio expresada en grados oeste, es decir,  $0^\circ < L < 360^\circ$ .

El tiempo  $E$  en minutos puede calcularse por la expresión siguiente:

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 * \text{Cos}B - 0.032077 * \text{Sen}B - 0.014615 * \text{Cos}2B - 0.04089 * \text{Sen}2B) \quad (1.26)$$

$$B = (n - 1) * \left( \frac{360}{365} \right) \quad (1.27)$$

**1.6.2 Medición de la radiación solar.** Las cartas de radiación solar son empleadas en diversas maneras y para distintos propósitos. La información más completa y detallada disponible en Colombia y específicamente en la ciudad de Bucaramanga, son datos de intensidad de radiación total medida a partir de una superficie horizontal, mediante el uso de **actinógrafos** y **piranómetros** localizados en las estaciones meteorológicas, los cuales miden la radiación total promedio en  $W/m^2$  como la suma de la radiación directa del sol y la difusa del cielo, para cada hora desde la salida hasta la puesta del sol, con una sensibilidad de  $\pm 0.5 \text{ mW/cm}^2$  y una linealidad de  $\pm 2\%$ .

- **Instrumentos utilizados en la medición de la radiación solar.**

**Piranómetro:** Instrumento para medir la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal. Consiste en un sensor con un pila de termocuplas, las cuales generan un voltaje proporcional a la radiación solar.

Foto 1. Piranómetro



Fuente: [www.labsolar.utfsm.cl](http://www.labsolar.utfsm.cl)

**Pirheliómetro:** instrumento para la medición de la radiación solar directa a distintas longitudes de onda. Consiste básicamente en un sensor de radiación dispuesto en el fondo de un tubo largo cuya labor es permitir que sobre el sensor solo incida radiación proveniente del disco solar y del estrecho anillo del tubo.

Foto 2. Pirheliómetro



Fuente: [www.labsolar.utfsm.cl](http://www.labsolar.utfsm.cl)

**Actinógrafo:** instrumento que registra el transcurso de la radiación global en una superficie horizontal, como suma de la radiación directa del sol y de la

radiación difusa del cielo. Consiste en tres tiras bimetálicas ennegrecidas, expuestas a la radiación, y tres tiras bimetálicas blancas, dispuestas debajo de ellas, cuya tarea es compensar la influencia de la temperatura del aire. El alcance de la sensibilidad abarca el espectro total de la radiación del sol y del cielo, a excepción de las zonas absorbidas por la campana de cristal.

Foto 3. Actinógrafo



Fuente: [www.labsolar.utfsm.cl](http://www.labsolar.utfsm.cl)

**Heliógrafo:** instrumento que sirve para registrar automáticamente la duración de la luz solar. Se compone de una esfera maciza de cristal pulimentada conforme a un calibrador, con índice de refracción determinado, así como de un casquete metálico dispuesto concéntricamente a dicha esfera. En las ranuras del lado interior del casquete se introduce cada día una tira nueva de cartulina con división horaria. El sol quema en la tira huellas más o menos fuertes, según la intensidad de sus rayos y de acuerdo con su curso

aparente. Después de haber retirado la tira de cartulina del casquete metálico, se puede determinar retroactivamente cuántas y durante qué horas de cada día ha habido sol.

Foto 4. Heliógrafo



Fuente: [www.labsolar.utfsm.cl](http://www.labsolar.utfsm.cl)

**1.6.3 Origen de los datos.** Los datos empleados para la evaluación de la cantidad aprovechable de radiación solar en Bucaramanga, han sido proporcionados, por la Corporación para de Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, desde de la estación de monitoreo ubicada en la Universidad Industrial de Santander, UIS correspondiente al año 2003.

**1.6.4 Datos.** Los datos proporcionados por la CDMB correspondientes a radiación total diaria medida sobre superficie horizontal, en  $W/m^2$ , se presentan a continuación.

Cuadro 1. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de enero de 2003  
estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Ene-03	30	232	463	699	659	832	325	600	256	238	138	42
02-Ene-03	27	232	474	718	890	781	706	835	366	187	89	26
03-Ene-03	49	237	417	580	855	930	682	544	491	168	114	32
04-Ene-03	23	245	457	703	846	762	958	571	446	157	93	32
05-Ene-03	24	242	467	695	870	1007	810	575	402	217	145	56
06-Ene-03	27	239	463	697	786	628	883	737	407	252	178	32
07-Ene-03	25	217	462	699	895	721	522	759	438	248	138	34
08-Ene-03	36	230	478	687	757	502	712	537	477	228	186	48
09-Ene-03	24	133	310	715	700	656	365	653	452	208	89	19
10-Ene-03	22	231	467	692	867	893	937	695	415	185	131	35
11-Ene-03	31	203	433	661	666	732	735	571	324	203	96	32
12-Ene-03	24	212	455	680	869	950	914	783	434	123	92	29
13-Ene-03	24	190	340	467	843	946	804	396	498	153	95	38
14-Ene-03	15	47	294	677	860	908	874	652	479	173	103	33
15-Ene-03	23	181	307	700	820	847	632	647	271	252	127	45
16-Ene-03	14	126	169	673	796	958	911	736	424	224	144	52
17-Ene-03	23	136	427	676	870	777	713	632	394	164	123	50
18-Ene-03	28	156	371	273	350	710	515	349	376	233	140	11
19-Ene-03	17	74	222	316	392	657	970	742	487	256	112	19
20-Ene-03	40	259	424	660	646	603	484	505	460	219	136	24
21-Ene-03	24	128	424	661	861	969	869	725	429	272	187	68
22-Ene-03	16	149	466	692	897	986	813	525	453	226	179	79
23-Ene-03	17	155	334	371	581	709	536	453	532	243	144	46
24-Ene-03	37	180	309	702	837	960	770	662	396	261	192	63
25-Ene-03	25	162	176	480	727	759	753	546	470	219	111	36
26-Ene-03	22	204	416	666	756	600	511	353	339	199	100	47
27-Ene-03	29	183	416	362	668	453	770	417	349	175	168	50
28-Ene-03	19	224	403	625	787	971	975	537	371	257	168	63
29-Ene-03	29	202	433	638	825	881	861	538	378	170	142	65
30-Ene-03	25	182	434	667	868	1043	972	621	402	177	123	41
31-Ene-03	13	172	288	346	868	711	789	465	401	281	222	70

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 2. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de febrero de 2003  
estación CDMB, UIS

<b>DIA</b>	<b>G (W/m<sup>2</sup>)</b>											
HORA	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Feb-03	11	61	169	316	393	373	521	389	475	249	166	52
02-Feb-03	21	146	361	389	306	741	762	546	440	225	117	34
03-Feb-03	29	203	445	605	867	1041	1014	632	400	184	127	42
04-Feb-03	23	194	425	677	886	867	875	469	350	220	204	78
05-Feb-03	21	150	412	680	887	1035	1005	543	410	144	147	64
06-Feb-03	22	155	415	692	853	992	947	570	418	252	173	65
07-Feb-03	37	181	404	646	918	1007	770	530	473	255	51	73
08-Feb-03	18	63	338	832	770	832	545	398	293	212	125	58
09-Feb-03	17	46	244	438	744	874	609	424	433	230	161	29
10-Feb-03	21	225	472	717	924	916	947	589	405	343	206	42
11-Feb-03	15	208	468	506	641	935	788	461	330	325	215	20
12-Feb-03	9	23	252	373	689	941	1021	566	382	332	204	52
13-Feb-03	29	213	453	682	883	1092	996	599	250	270	236	86
14-Feb-03	22	68	116	541	878	1013	952	627	300	277	204	103
15-Feb-03	25	214	410	699	908	1044	1033	584	327	374	226	86
16-Feb-03	26	222	478	728	907	938	862	569	294	395	279	44
17-Feb-03	18	167	353	555	679	772	858	534	212	440	280	50
18-Feb-03	14	57	85	182	253	399	404	475	407	285	148	36
19-Feb-03	43	158	363	568	684	929	984	519	298	451	281	62
20-Feb-03	17	63	268	625	834	691	648	486	317	351	223	46
21-Feb-03	27	144	392	651	736	968	865	511	388	539	303	56
22-Feb-03	31	187	327	542	899	769	781	467	361	406	287	75
23-Feb-03	34	201	435	692	762	735	897	578	340	263	194	38
24-Feb-03	13	88	108	419	631	356	658	578	470	303	117	57
25-Feb-03	35	192	446	642	895	894	981	480	384	542	212	29
26-Feb-03	47	197	351	559	652	610	502	441	311	147	80	36
27-Feb-03	30	215	442	627	509	665	767	408	359	545	316	75
28-Feb-03	38	247	492	693	725	805	968	463	399	459	191	55

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 3. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de marzo de 2003  
estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Mar-03	34	100	331	682	738	1003	964	373	408	361	141	30
02-Mar-03	33	129	377	657	799	808	845	440	424	227	196	56
03-Mar-03	27	159	361	410	647	870	843	440	477	569	316	56
04-Mar-03	41	148	449	676	513	838	889	415	597	545	238	67
05-Mar-03	30	222	466	717	894	976	899	388	464	453	234	48
06-Mar-03	41	238	497	778	948	1070	938	306	582	537	240	51
07-Mar-03	42	214	444	709	885	1029	894	340	607	459	187	58
08-Mar-03	35	200	455	695	889	1023	889	338	638	388	181	47
09-Mar-03	42	200	419	637	830	976	846	395	592	339	165	40
10-Mar-03	29	120	296	505	734	856	778	493	528	292	173	39
11-Mar-03	18	133	405	533	758	868	842	464	407	304	158	43
12-Mar-03	45	210	449	680	764	806	831	451	401	321	178	59
13-Mar-03	42	200	312	596	873	614	668	473	399	425	183	44
14-Mar-03	17	103	351	627	801	783	681	394	430	329	134	46
15-Mar-03	25	140	177	576	817	787	779	418	365	47	20	62
16-Mar-03	15	76	110	254	518	467	364	376	541	310	206	56
17-Mar-03	16	95	203	472	824	840	597	179	189	257	285	57
18-Mar-03	44	123	307	414	725	1112	774	349	177	267	565	105
19-Mar-03	7	85	411	704	557	566	489	318	352	173	114	31
20-Mar-03	73	264	420	364	302	750	698	466	489	441	259	87
21-Mar-03	28	240	437	708	643	616	517	498	353	591	321	104
22-Mar-03	78	180	469	814	1020	864	624	560	482	506	360	78
23-Mar-03	43	209	488	712	751	721	579	594	430	497	303	77
24-Mar-03	49	275	552	744	807	807	609	556	411	491	272	73
25-Mar-03	9	32	89	159	328	451	518	465	459	574	308	81
26-Mar-03	10	42	109	72	304	697	692	464	229	267	119	22
27-Mar-03	40	151	332	507	706	603	437	429	623	623	402	153
28-Mar-03	43	100	436	517	562	723	529	448	632	525	178	50
29-Mar-03	12	165	357	695	806	918	536	418	729	581	266	64
30-Mar-03	51	178	310	620	952	1031	539	485	752	382	120	27
31-Mar-03	45	132	369			688	563	245	210	135	68	8

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 4. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de abril de 2003  
estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Abr-03	59	255	505	762	942	814	386	385	242	294	148	49
02-Abr-03	70	277	501	751	936	985	351	864	686	518	283	57
03-Abr-03	71	276	529	772	827	957	509	899	599	485	318	61
04-Abr-03	56	308	471	584	871	744	590	539	723	501	247	59
05-Abr-03	58	262	537	783	982	1050	722	969	791	550	284	80
06-Abr-03	67	221	452	740	920	838	661	795	778	670	418	84
07-Abr-03	76	285	520	750	916	734	824	825	336	248	101	30
08-Abr-03	62	217	356	560	779	735	615	525	414	363	217	48
09-Abr-03	59	235	388	147	339	684	539	737	371	276	166	15
10-Abr-03	60	318	524	816	1011	822	691	1046	810	533	160	133
11-Abr-03	95	318	532	666	923	726	747	859	700	502	126	36
12-Abr-03	75	87	95	65	350	271	303	444	369	194	45	7
13-Abr-03	13	27	165	247	336	269	241	431	637	473	135	21
14-Abr-03	49	315	476	332	825	1040	1171	945	757	427	148	37
15-Abr-03	30	73	178	368	679	1048	1182	849	653	616	385	38
16-Abr-03	48	137	186	646	837	880	1054	966	630	627	437	128
17-Abr-03	5	24	107	64	58	128	393	648	771	599	201	61
18-Abr-03	106	210	353	496	1019	611	629	531	802	637	418	76
19-Abr-03	16	143	359	660	740	401	715	271	163	153	130	37
20-Abr-03	101	166	515	416	856	872	1064	691	855			
21-Abr-03									207	101	35	10
22-Abr-03	80	335	510	848	903	354	314	388	245	223	413	77
23-Abr-03	44	138	280	451	515	863	599	736	704	637	398	202
24-Abr-03	77	297	543	650	884	755	617	347	270	158	101	39
25-Abr-03	18	69	171	289	354	557	813	803	591	200	70	69
26-Abr-03	116	359	594	848	968	596	243	859	586	263	88	15
27-Abr-03	88	180	349	598	562	478	609	325	549	354	45	5
28-Abr-03	122	314	574	824	975	902	1111	991	698	592	471	59
29-Abr-03	117	263	275	361	536	548	605	774	850	619	369	84
30-Abr-03	73											

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 5. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de mayo de 2003  
estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-May-03	79	358	602	795	921	926	1036	851	670	433	116	33
02-May-03	155	376	577	735	858	849	1068	1003	684	447	296	49
03-May-03	112	219	562	863	702	619	507	637	595	270	74	18
04-May-03	71	221	409	745	811	918	1101	884	857	453	161	20
05-May-03	66	254	255	735	904	1012	1104	912	560	393	298	119
06-May-03	87	235	560	824	949	971	1106	973	860	83	19	9
07-May-03	71	253	563	776	775	509	929	764	692	640	343	32
08-May-03	23	68	182	287	757	890	712	397	271	159	104	17
09-May-03	82	341	580	810	848	625	785	570	177	62	18	3
10-May-03	156	199	581	708	899	1056	772	437	311	223	194	26
11-May-03	90	299	602	756	920	685	789	569	651	441	264	128
12-May-03	41	89	126	279	458	380	337	315	348	276	143	34
13-May-03	60	298	499	812	833	708	320	418	307	173	105	23
14-May-03	124	358	477	790	922	680	418	558	624	135	55	12
15-May-03	51	239	520	637	343	320	344	642	420	377	97	17
16-May-03	78	323	584	745	308	573	611	315	502	169	106	14
17-May-03	93	230	479	761	698	232	271	493	444	189	202	45
18-May-03	71	206	334	530	698	270	105	244	310	29	65	10
19-May-03	118	155	259	424	611	720	805	333	323	350	209	22
20-May-03	65	81	250	556	375	383	235	389	269	172	53	31
21-May-03	127	363	566	774	707	970	942	856	809	605	226	24
22-May-03	52	134	190	310	627	925	854	769	466	425	149	49
23-May-03	136	358	578	804	719	824	934	904	464	187	95	26
24-May-03	79	236	299	691	716	863	538	655	673	526	305	64
25-May-03	14	96	313	594	473	420	442	545	392	483	238	49
26-May-03	128	353	575	815	774	1037	890	863	555	439	90	13
27-May-03	87	359	580	531	693	870	939	628	389	415	231	50
28-May-03	123	348	547	781	753	890	1002	744	558	142	31	29
29-May-03	60	193	404	563	683	975	949	767	480	220	156	46
30-May-03	30	112	303	688	654	919	1030	743	194	144	228	125
31-May-03	84	306	542	577	551	464	211	205	167	84	58	30

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 6. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de junio de 2003  
estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
HORA	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Jun-03	146	353	564	643	655	481	396	270	309	183	38	8
02-Jun-03	83	265	472	663	562	346	408	421	616	277	98	23
03-Jun-03	10	37	87	151	343	393	559	483	638	319	181	37
04-Jun-03	62	159	363	559	780	988	1048	929	850	654	390	91
05-Jun-03	135	360	605	692	572	403	359	236	149	84	47	14
06-Jun-03	97	210	608	613	866	969	859	654	254	127	62	8
07-Jun-03	62	212	451	563	816	944	1139	957	708	460	54	17
08-Jun-03	70	256	488	709	723	961	1056	721	631	558	425	184
09-Jun-03	83	339	491	465	563	835	734	547	658	496	106	12
10-Jun-03	63	168	670	783	710	1009	966	841	608	338	87	4
11-Jun-03	103	354	501	666	793	570	844	745	709	483	219	31
12-Jun-03	88	276	520	721	667	651	633	655	293	115	58	44
13-Jun-03	29	172	313	464	618	776	542	412	146	150	205	178
14-Jun-03	46	242	314	715	453	402	666	291	348	298	215	111
15-Jun-03	95	253	413	569	546	679	673	428	253	176	132	37
16-Jun-03	57	376	565	635	631	1028	889	633	368	477	262	27
17-Jun-03	52	164	252	526	563	846	656	394	185	76	73	13
18-Jun-03	22	88	247	385	574	581	667	318	349	175	100	32
19-Jun-03	100	410	589	773	579	759	574	954	945	360	340	177
20-Jun-03	55	183	589	782	707	982	1034	946	395	129	108	66
21-Jun-03	56	142	323	302	277	267	407	711	645	531	287	78
22-Jun-03	64	138	217	365	277	227	512	371	182	206	85	25
23-Jun-03	116	359	597	782	768	451	663	928	596	212	131	73
24-Jun-03	67	168	532	762	649	1029	642	906	650	420	129	36
25-Jun-03	66	333	512	759	584	446	582	268	256	219	175	36
26-Jun-03	66	192	303	258	348	300	438	707	576	518	84	30
27-Jun-03	90	271	533	719	760	1028	975	990	803	651	385	127
28-Jun-03	101	278	526	716	380	421	498	478	632	120	48	21
29-Jun-03	79	157	354	475	484	323	274	570	455	425	188	26
30-Jun-03	117	345	495	730	751	900	875	799	577	399	268	44

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 7. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de julio de 2003  
estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Jul-03	22	108	236	300	530	576	445	525	438	228	180	87
02-Jul-03	98	191	530	781	758	1040	1003	770	804	632	490	144
03-Jul-03	113	314	553	552	684	954	741	862	823	624	304	35
04-Jul-03	24	82	161	246	273	589	425	358	348	257	174	61
05-Jul-03	118	319	449	642	543	659	709	899	595	679	379	22
06-Jul-03	105	316	376	625	763	1036	816	901	845	688	463	142
07-Jul-03	146	263	363	649	711	715	717	557	533	323	132	49
08-Jul-03	115	275	524	647	710	427	443	244	240	368	149	10
09-Jul-03	101	331	524	394	644	727	327	441	209	163	92	19
10-Jul-03	122	344	564	810	825	1093	710	633	261	237	401	137
11-Jul-03	63	157	88	59	81	102	163	188	217	174	151	65
12-Jul-03	58	288	590	733	762	294	267	226	206	225	96	22
13-Jul-03	50	252	555	696	569	375	361	242	146	97	45	30
14-Jul-03	61	311	568	793	820	719	352	414	453	282	335	45
15-Jul-03	107	334	560	760	694	698	479	470	194	95	318	51
16-Jul-03	100	311	337	646	308	284	381	352	342	68	89	74
17-Jul-03	85	136	233	224	462	433	303	338	202	319	61	14
18-Jul-03	71	129	423	405	439	1123	889	622	750	603	405	194
19-Jul-03	97	336	546	763	776	970	755	354	197	154	128	61
20-Jul-03	62	303	413	343	275	413	247	230	239	249	278	27
21-Jul-03	68	204	366	437	286	423	637	176	392	467	142	42
22-Jul-03	39	118	335	292	300	391	190	412	538	199	112	33
23-Jul-03	62	187	374	606	644	616	1097	758	399	139	187	17
24-Jul-03	24	112	278	572	560	704	375	408	592	429	87	50
25-Jul-03	43	158	491	733	644	433	299	288	309	252	114	24
26-Jul-03	60	123	248	462	451	444	655	143	113	125	187	104
27-Jul-03	95	329	526	713	558	449	437	433	181	152	52	18
28-Jul-03	149	326	576	808	828	607	1031	875	765	336	148	94
29-Jul-03	104	326	496	735	873	650	398	736	471	208	97	43
30-Jul-03	19	66	304	354	453	447	808	592	345	121	57	16
31-Jul-03	67	231	378	652	584	357	316	684	678	264	137	74

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 8. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de agosto de 2003  
estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Ago-03	32	110	107	81	266	421	528	245	494	266	106	33
02-Ago-03	52	234	471	495	732	400	482	635	402	130	104	42
03-Ago-03	17	104	248	269	456	393	450	383	304	130	107	18
04-Ago-03	96	333	562	820	664	897	774	369	168	117	69	31
05-Ago-03	102	326	567	787	914	647	490	476	640	568	169	34
06-Ago-03	101	333	585	753	520	482	844	957	611	231	182	157
07-Ago-03	97	313	554	721	850	937	1083	937	811	446	139	15
08-Ago-03	82	261	410	393	514	645	351	684	460	549	172	56
09-Ago-03	77	376	442	747	857	547	708	593	249	131	111	43
10-Ago-03	104	353	584	664	696	1005	874	878	694	309	148	56
11-Ago-03	124	332	510	777	733	426	409	458	744	468	250	56
12-Ago-03	76	220	449	658	984	752	384	220	249	75	31	6
13-Ago-03	77	314	584	803	967	604	544	572	362	313	182	14
14-Ago-03	46				971	828	500	361	252	116	147	62
15-Ago-03	86	337	538	814	606	570	460	480	323	229	260	71
16-Ago-03	44	159	422	751	652	614	817	808	493	375	109	24
17-Ago-03	103	347	597	773	628	745	622	468	702	505	232	34
18-Ago-03	91	283	597	789	964	880	822	727	601	92	31	22
19-Ago-03	117	347	604	835	989	895	947	793	538	129	32	18
20-Ago-03	75	215	359	516	714	650	475	858	614	205	82	48
21-Ago-03	89	388	530	612	958	730	476	361	691	541	293	85
22-Ago-03	85	364	582	828	982	1009	899	630	401	324	193	33
23-Ago-03	105	333	609	693	965	634	693	456	213	551	293	146
24-Ago-03	84	263	372	736	462	459	536	389	700	406	394	150
25-Ago-03	78	356	601	811	998	984	791	443	533	451	100	13
26-Ago-03	101	355	563	806	988	988	817	314	332	66	55	24
27-Ago-03	55	190	335	732	1049	506	368	695	497	160	27	14
28-Ago-03	113	357	616	806	778	598	1066	1012	565	142	60	18
29-Ago-03	73	143	170	361	762	666	554	356	213	383	147	19
30-Ago-03	102	333	572	753	555	315	341	256	293	108	99	32
31-Ago-03	116	357	617	806	627	554	539	673	386	140	86	42

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 9. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de septiembre de 2003 estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Sep-03	41	214	275	342	688	790	496	379	388	415	260	83
02-Sep-03	59	158	320	833	1036	921	1011	525	520	490	240	42
03-Sep-03	77	331	542	836	978	572	593	591	226	202	75	14
04-Sep-03	61	308	461	690	839	896	179	89	281	375	127	31
05-Sep-03	70	309	606	525	799	387	138	412	475	203	262	86
06-Sep-03	63	319	584	569	791	801	589	492	675	332	64	15
07-Sep-03	103	241	637	871	762	856	647	545	321	216	29	5
08-Sep-03	109	356	634	794	932	838	324	172	244	139	66	54
09-Sep-03	58	154	278	661	905	804	519	648	429	373	114	26
10-Sep-03	125	218	558	854	682	981	470	274	457	284	158	64
11-Sep-03	65	144	116	271	429	389	414	433	586	617	266	91
12-Sep-03	110	360	610	782	961	713	460	309	193	72	61	15
13-Sep-03	106	356	575	772	975	946	454	317	144	238	98	29
14-Sep-03	103	354	625	856	564	342	187	190	208	253	192	44
15-Sep-03	110	354	606	704	894	959	440	291	323	145	72	23
16-Sep-03	77	259	381	604	396	268	356	363	352	177	132	42
17-Sep-03	148	358	554	792	886	550	451	341	251	285	170	20
18-Sep-03	48	130	283	364	647	509	183	169	311	362	209	16
19-Sep-03	107	351	580	786	942	523	419	578	409	448	106	22
20-Sep-03	12	37	153	328	482	727	611	555	325	411	225	7
21-Sep-03	120	169	254	532	843	962	513	568	438	232	84	11
22-Sep-03	114	378	367	823	772	406	290	38	5	6	7	4
23-Sep-03	82	323	454	773	717	221	344	486	391	168	102	22
24-Sep-03	16	114	304	458	778	573	602	392	370	238	55	19
25-Sep-03	72	276	567	837	1033	1100	403	342	266	118	33	4
26-Sep-03	122	338	609	842	934	1121	427	205	164	185	19	4
27-Sep-03	126	374	655	864	882	774	443	382	345	257	109	20
28-Sep-03	98	354	547	871	355	359	398	470	199	116	132	27
29-Sep-03	37	117	524	740	446	364	279	255	259	129	38	7
30-Sep-03	127	226	340	594	921	979	288	210	390	283	154	39

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 10. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de octubre de 2003 estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
HORA	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Oct-03	61	145	286	447	857	608	556	368	162	217	105	13
02-Oct-03	124	365	616	806	1040	664	466	554	382	260	72	17
03-Oct-03	119	297	554	759	692	1002	447	149	223	231	110	17
04-Oct-03	120	266	590	678	937	1048	461	565	402	151	133	19
05-Oct-03	32	69	45	253	451	561	424	412	206	187	108	14
06-Oct-03	73	214	341	551	602	584	369	408	497	236	133	12
07-Oct-03	62	196	363	517	830	330	216	163	132	76	23	4
08-Oct-03	39	123	185	353	434	313	369	394	114	232	255	33
09-Oct-03	54	154	284	489	840	979	719	297	266	191	163	40
10-Oct-03	61	236	413	729	829	935	473	409	432	144	115	23
11-Oct-03	131	318	420	603	1012	602	196	123	411	124	79	43
12-Oct-03	116	358	619	844	748	732	840	354	279	96	72	14
13-Oct-03	108	245	572	759	882	664	668	448	238	208	124	10
14-Oct-03	74	191	403	779	868	1091	664	266	555	667	304	26
15-Oct-03	6	34	127	309	365	310	365	423	446	282	135	28
16-Oct-03	81	196	358	593	931	733	878	445	344	281	57	15
17-Oct-03	94	220	385	659	722	907	864	317	482	547	155	16
18-Oct-03	49	358	633	831	1052	416	435	297	439	574	154	18
19-Oct-03	29	14	12	12	17	89	92	309	387	289	112	11
20-Oct-03	93	263	530	843	978	890	351	365	309	175	26	2
21-Oct-03	25	101	197	486	725	688	844	554	403	259	66	9
22-Oct-03	78	368	621	834	980	1050	864	409	308	113	73	28
23-Oct-03	111	369	612	813	787	1104	806	461	282	342	162	30
24-Oct-03	87	350	486	855	678	542	75	59	99	175	137	15
25-Oct-03	126	383	585	465	331	253	584	325	277	340	153	22
26-Oct-03	87	288	582	804	956	972	656	257	226	215	86	14
27-Oct-03	80	182	491	259	227	463	480	440	238	328	102	16
28-Oct-03	46	153	398	814	955	949	906	441	312	387	137	24
29-Oct-03	7	43	80	194	382	409	482	383	307	261	119	11
30-Oct-03	53	241	271	314	699	255	504	488	305	237	194	28
31-Oct-03	32	176	264	552	472	529	1118	532	327	321	105	7

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 11. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de noviembre de 2003 estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
HORA	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Nov-03	123	104	79	154	419	375	587	554	285	307	97	15
02-Nov-03	97	360	533	816	980	1093	630	377	258	365	131	20
03-Nov-03	32	156	320	396	397	548	225	356	246	203	93	6
04-Nov-03	99	397	521	791	847	659	402	307	313	162	79	5
05-Nov-03	112	318	578	718	758	575	601	314	238	154	66	7
06-Nov-03	62	211	531	799	945	1088	865	379	340	244	70	2
07-Nov-03	3	15	56	307	508	884	860	504	313	285	184	6
08-Nov-03	106	244	464	598	579	700	770	444	298	240	106	11
09-Nov-03	85	192	418	687	880	800	852	392	236	180	173	15
10-Nov-03	59	308	342	884	715	1055	468	471	295	258	74	10
11-Nov-03	56	168	359	477	456	428	462	466	287	144	143	12
12-Nov-03	71	283	324	543	878	973	675	560	328	198	140	21
13-Nov-03	95	342	590	825	974	1028	595	183	164	144	49	13
14-Nov-03	102	318	569	752	785	217	668	516	250	142	86	19
15-Nov-03	106	226	343	328	357	556	325	272	197	103	137	22
16-Nov-03	99	325	595		835	891	845	415	299	161	139	15
17-Nov-03	83	333	567	798	775	836	716	466	342	174		4
18-Nov-03	52	199	407	766	526	544	322	432	364	202	132	32
19-Nov-03	80	326	579	800	558	1028	908	578	297	120	113	34
20-Nov-03	90	192	692	844	986	1057	893	550	361	153	54	7
21-Nov-03	87	296	597	819	975	845	741	377	313	176	113	15
22-Nov-03	19	114	174	229	409	507	376	258	312	139	78	10
23-Nov-03	72	318	563	793	946	854	669	439	415	193	66	8
24-Nov-03	97	180	299	473	826	1061	459	346	221	216	120	12
25-Nov-03	33	144	439	505	613	582	521	355	353	162	152	33
26-Nov-03	91	327	555	771	939	979	904	470	243	216	42	3
27-Nov-03	69	293	536	764	885	854	973	503	329	155	29	14
28-Nov-03	62	296	525	764	874	489	320	318	343	224	73	12
29-Nov-03	50	134	150	317	449	792	965	468	533	173	84	26
30-Nov-03			290	500	711	533	781	620	359	163	106	16

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

Cuadro 12. Radiación total promedio en Bucaramanga mes de diciembre de 2003 estación CDMB, UIS

DIA	G (W/m <sup>2</sup> )											
HORA	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
01-Dic-03	84	271	391	643	846	656	484	323	452	253	99	8
02-Dic-03	25	72	239	444	828	927	766	538	438	158	77	14
03-Dic-03	10	56	126	185	313	330	437	516	248	179	66	3
04-Dic-03	32	223	502	727	891	1012	951	570	414	75	63	16
05-Dic-03	71	203	545	594	872	902	748	424	78	141	93	10
06-Dic-03	21	81	182	459	348	631	408	483	352	247	78	8
07-Dic-03	35	220	467	398	483	773	567	451	377	237	91	20
08-Dic-03	55	190	298	744	691	848	967	230	242	95	83	19
09-Dic-03	49	287	394	728	914	1027	917	563	308	163	117	13
10-Dic-03	50	271	495	655	829	956	467	569	449	137	69	14
11-Dic-03	71	114	119	297	369	451	490	430	396	238	116	14
12-Dic-03	49	269	500	703	656	889	684	564	397	149	87	14
13-Dic-03	57	230	488	708	796	761	539	508	387	254	159	27
14-Dic-03	47	271	502	683	914	1059	693	347	386	196	74	15
15-Dic-03	60	240	343	744	678	574	776	550	342	151	76	21
16-Dic-03	38	272	502	717	855	787	584	770	375	103	66	17
17-Dic-03	35	266	502	716	897	919	998	697	338	215	99	13
18-Dic-03	47	144	372	707	899	974	940	517	324	230	159	13
19-Dic-03	76	227	413	563	736	782	872	591	344	180	95	20
20-Dic-03	9	9	44	214	336	543	491	589	292	93	64	22
21-Dic-03	18	106	261	504	627	847	699	410	370	229	140	20
22-Dic-03	47	167	338	586	722	721	672	428	596	172	69	9
23-Dic-03	28	252	480	672	689	710	566	626	413	218	91	28
24-Dic-03	28	89	206	561	712	981	813	713	496	229	94	26
25-Dic-03	81	305	579	623	595	724	436	427	316	199	109	26
26-Dic-03	56	239	529	469	542	510	541	634	363	310	102	12
27-Dic-03	26	81	385	689	574	563	433	328	335	358	157	29
28-Dic-03	23	115	450	544	819	950	867	749	346	164	69	22
29-Dic-03	39	216	393	732	830	762	623	563	340	138	101	26
30-Dic-03	33	236	433	668	733	717	724	532	473	281	80	20
31-Dic-03	41	252	455	703	899	1004	850	553	485	208	167	46

Fuente: Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, CDMB, Estación Meteorológica UIS.

**1.6.5 Cálculo de la cantidad aprovechable de radiación solar directa en Bucaramanga.** En el contexto de los colectores solares de concentración se denomina cantidad aprovechable a la porción de radiación directa bruta que independientemente del tipo u orientación del colector puede ser captada. La estimación de este valor se realiza con base en la radiación total medida para una superficie horizontal y teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas.

A continuación se resume el procedimiento de cálculo tomando como ejemplo los valores correspondientes a las 11:00 a.m. del día 1 de enero.

*Datos del lugar:*

***Latitud ( $\phi$ ): 7.14° N***

***Longitud ( $L_{loc}$ ): 73.119° O***

***Meridiano local ( $L_{st}$ ): 75° O***

*Datos de tiempo:*

***Hora: 11:00 a.m.***

Día del año (n): 1

Declinación ( $\delta$ ):

Se calcula a partir de la Ecuación 1.11 para n = 1

$$\delta = 23.45 * \text{Seno}\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right)$$

$$\delta = 23.45 * \text{Seno}\left(360 * \frac{284 + 1}{365}\right)$$

$$\delta = -23.06^\circ$$

Hora local: 11:00 a.m.

Ecuación del tiempo (E):

A partir de las Ecuaciones 1.26 y 1.27

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 * \text{Cos}B - 0.032077 * \text{Sen}B - 0.014615 * \text{Cos}2B - 0.04089 * \text{Sen}2B)$$

$$B = (n - 1) * \left( \frac{360}{365} \right)$$

$$B = (1 - 1) * \left( \frac{360}{365} \right)$$

$$B = 0$$

$$E = -2.90 \text{ minutos}$$

*Hora solar:*

Se obtiene a partir de la ecuación 1.25

$$\text{Horasolar} = \text{Horalocal} + 4(L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E$$

$$\text{Horasolar} = 11 + 4(75 - 73.119) - 2.9$$

$$\text{Hora solar} = 11:05$$

*Angulo horario medio ( $\omega_{\text{med}}$ ):*

Se determina asumiendo que el valor de radiación promedio medido corresponde al punto medio del intervalo de tiempo entre la hora del día en consideración y la hora siguiente, tomando un valor de  $15^\circ$  por cada hora hasta el medio día solar, negativo para la mañana y positivo para la tarde.

Para las 11:05 a.m. corresponde un ángulo

$$\omega_{\text{med}} = -6.3^\circ$$

*Angulo Cenital ( $\theta_z$ ):*

Se calcula mediante la Ecuación 1.10

$$\text{Cos} \theta_z = \text{Cos} \phi \text{Cos} \delta \text{Cos} \omega + \text{Sen} \phi \text{Sen} \delta$$

$$\cos\theta_z = \cos(7.14) * \cos(-23.06) * \cos(-6.3) + \sin(7.14) * \sin(-23.06)$$

$$\theta_z = 84.91^\circ$$

*Angulo de incidencia ( $\theta$ ):*

Se obtiene a través de la ecuación 1.8 para  $\beta = 0$ ,  $\gamma = 0$  puesto que se trata de una superficie es horizontal, por tanto la ecuación se convierte en:

$$\cos\theta = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta$$

$$\theta = 84.91$$

*Radiación solar total promedio ( $G_T$ ):*

Tomada del cuadro 1 para el día 1 de enero a las 11:00 a.m.

$$G_T = 832 \text{ W/m}^2$$

*Irradiación en la superficie terrestre ( $I$ ):*

Corresponde a la energía recibida durante una hora a razón de 832 W/m<sup>2</sup>

$$I = 832 * 3.6 \text{ (kJ/m}^2\text{)}$$

$$I = 2995.2 \text{ kJ/m}^2$$

*Irradiación extraterrestre ( $I_o$ ):*

Se obtiene a partir de la ecuación 1.21, siendo  $\omega_1 = 16.2^\circ$ ,  $\omega_2 = 1.2^\circ$ , los ángulos horarios correspondiente a la hora solar inicial y final del intervalo de tiempo, es decir, para las 11:05 y 12:05.

$$I_o = \frac{12 * 3600 G_{sc}}{\pi} \left( 1 + 0.033 * \cos \frac{360n}{365} \right) * \left( \cos\phi \cos\delta (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin\phi \sin\delta \right)$$

$$I_o = \frac{12 * 3600 * 1367}{\pi} \left( 1 + 0.033 * \cos \frac{360 * 1}{365} \right) * \left( \cos(7.14) \cos(-23.06) * (\sin(1.2) - \sin(-13.8)) + \frac{\pi(1.2 + 13.8)}{180} * \sin(7.14) \sin(-23.06) \right)$$

$$I_o = 4379.32 \text{ kJ/m}^2$$

*Índice de claridad (k<sub>T</sub>):*

Se calcula a partir de la Ecuación 1.22

$$k_T = \frac{I}{I_o}$$

$$k_T = \frac{2995.2}{4379.32}$$

$$k_T = 0.68$$

*Irradiación difusa (I<sub>d</sub>):*

Se calcula a partir de la correlación 1.24

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.164k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.164(0.68) + 4.388(0.68)^2 - 16.638(0.68)^3 + 12.336(0.68)^4$$

$$I_d = 809.52 \text{ kJ/m}^2 \text{ por hora}$$

*Irradiación directa (I<sub>b</sub>):*

$$I_b = I - I_d$$

$$I_b = 2995.2 - 809.52$$

$$I_b = 2185.68 \text{ kJ/m}^2 \text{ por hora}$$

El cálculo presentado corresponde a un tiempo de una hora, entre las 11:00 am y las 12:00 m para un día específico como ya se señaló. Para obtener los

valores de radiación diarios, se procede para cada hora como se hizo anteriormente y se suman los resultados parciales. A continuación se presentan un ejemplo para el día 1 de enero.

Cuadro 12a. Resultados radiación día 1 de enero de 2003

RADIACION UTIL DIARIA										
DIA (n)	$\delta$ (°)	$\phi$ (° N)	L (°O)	Lst (°)	B	$\beta$	$\gamma$			
1	-23,06	7,14	73,12	75	0	0	0			
Hora	Hora solar	$\omega$ med (°)	G prom (W/m <sup>2</sup> )	$\theta$ (°)	I (kJ/m <sup>2</sup> )	Io (kJ/m <sup>2</sup> )	KT (I / Io)	Id (kJ/m <sup>2</sup> )	Ib (kJ/m <sup>2</sup> )	IT (kW-h/m <sup>2</sup> )
6,00	6,08	-81,3	30	84,91	108,0	1040,0	0,10	107,0	1,0	0,03
7,00	7,08	-66,3	232	71,48	835,2	2146,6	0,39	714,7	120,5	0,23
8,00	8,08	-51,3	463	58,56	1666,8	3090,1	0,54	957,4	709,4	0,46
9,00	9,08	-36,3	699	46,63	2516,4	3806,1	0,66	784,6	1731,8	0,70
10,00	10,08	-21,3	659	36,71	2372,4	4245,8	0,56	1260,7	1111,7	0,66
11,00	11,08	-6,3	832	30,83	2995,2	4379,3	0,68	809,5	2185,7	0,83
12,00	12,08	8,7	325	31,37	1170,0	4197,5	0,28	1124,9	45,1	0,33
13,00	13,08	23,7	600	38,04	2160,0	3712,8	0,58	1036,7	1123,3	0,60
14,00	14,08	38,7	256	48,38	921,6	2958,2	0,31	866,4	55,2	0,26
15,00	15,08	53,7	238	60,50	856,8	1985,1	0,43	676,6	180,2	0,24
16,00	16,08	68,7	138	73,52	496,8	860,7	0,58	477,6	19,2	0,14
<b>Total diario</b>								8816,14	7283,06	4,47

**1.6.6 Resultados.** Aunque los valores de radiación varían un poco entre un año y otro, se eligieron los datos correspondientes al año 2003 porque de los disponibles, son los más completos; de cualquier modo, estos datos son de buena utilidad para propósitos de ingeniería.

Al realizar el procedimiento anterior con la ayuda de una hoja de cálculos para cada hora del día y para los 365 días del año se obtuvo lo siguientes:

Cuadro 13. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de enero de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	Hd (kJ/m <sup>2</sup> )	Hb (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Ene-03	8816,14	7283,79	4,47
02-Ene-03	7527,04	11570,96	5,31
03-Ene-03	8331,78	9909,42	5,07
04-Ene-03	7756,25	11183,35	5,26
05-Ene-03	7609,88	12024,52	5,45
06-Ene-03	7882,87	11186,33	5,30
07-Ene-03	8242,28	10204,12	5,12
08-Ene-03	9063,73	8324,27	4,83
09-Ene-03	8876,90	6621,10	4,31
10-Ene-03	7106,27	12819,73	5,54
11-Ene-03	9331,45	7426,55	4,66
12-Ene-03	6616,54	13313,06	5,54
13-Ene-03	8101,25	9020,35	4,76
14-Ene-03	6765,09	11530,11	5,08
15-Ene-03	8384,04	8921,06	4,81
16-Ene-03	6743,00	11887,00	5,18
17-Ene-03	8334,99	9431,01	4,94
18-Ene-03	9897,46	2706,14	3,50
19-Ene-03	8196,68	7085,32	4,25
20-Ene-03	10474,28	5495,32	4,44
21-Ene-03	7239,81	12736,59	5,55
22-Ene-03	7717,95	11729,25	5,40
23-Ene-03	10353,09	4316,91	4,08
24-Ene-03	8073,73	11087,87	5,32
25-Ene-03	9348,80	6592,00	4,43
26-Ene-03	10012,68	4984,92	4,17
27-Ene-03	10083,99	4280,01	3,99
28-Ene-03	8532,08	10681,12	5,34
29-Ene-03	8586,69	9752,51	5,09
30-Ene-03	7873,87	11976,53	5,51
31-Ene-03	9263,89	7137,71	4,56
<b>PROMEDIO (kW-h/m<sup>2</sup>)</b>	<b>2,34</b>	<b>2,54</b>	<b>4,88</b>

Cuadro 14. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de febrero de 2003, estación CDMB, UIS

<b>DIA</b>	<b>Hd (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Hb (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>H (kW-h/m<sup>2</sup>)</b>
01-Feb-03	9491,35	1751,45	3,12
02-Feb-03	9902,88	4691,52	4,05
03-Feb-03	8232,21	11736,99	5,55
04-Feb-03	8479,21	10204,79	5,19
05-Feb-03	7883,54	11678,86	5,43
06-Feb-03	8167,99	11592,41	5,49
07-Feb-03	8621,28	10357,92	5,27
08-Feb-03	8872,43	7061,17	4,43
09-Feb-03	9581,66	5610,34	4,22
10-Feb-03	8118,73	12635,17	5,76
11-Feb-03	9840,45	7770,75	4,89
12-Feb-03	8483,49	8767,71	4,79
13-Feb-03	8078,78	12452,02	5,70
14-Feb-03	7442,48	10550,32	5,00
15-Feb-03	8934,03	11024,37	5,54
16-Feb-03	8107,46	12405,34	5,70
17-Feb-03	9436,68	8088,12	4,87
18-Feb-03	8612,10	1140,30	2,71
19-Feb-03	8942,81	10057,99	5,28
20-Feb-03	9279,54	7723,26	4,72
21-Feb-03	8822,15	11064,25	5,52
22-Feb-03	9753,25	8451,95	5,06
23-Feb-03	9997,25	8474,35	5,13
24-Feb-03	10064,95	3402,65	3,74
25-Feb-03	8594,42	11936,38	5,70
26-Feb-03	11153,11	2876,09	3,90
27-Feb-03	10616,05	6972,65	4,89
28-Feb-03	9644,79	10083,21	5,48
<b>PROMEDIO</b> (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,51	2,39	4,90

Cuadro 15. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de marzo de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	Hd (kJ/m <sup>2</sup> )	Hb (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Mar-03	8877,86	9608,14	5,14
02-Mar-03	9948,55	7817,45	4,94
03-Mar-03	9880,36	8548,04	5,12
04-Mar-03	9236,81	10019,59	5,35
05-Mar-03	8537,03	12137,77	5,74
06-Mar-03	7314,52	14915,48	6,18
07-Mar-03	8268,14	12647,86	5,81
08-Mar-03	8406,03	12225,57	5,73
09-Mar-03	9493,42	10094,18	5,44
10-Mar-03	10472,11	6822,29	4,80
11-Mar-03	10427,01	7176,99	4,89
12-Mar-03	10734,00	7690,80	5,12
13-Mar-03	10973,51	6252,49	4,79
14-Mar-03	10645,14	6094,86	4,65
15-Mar-03	9096,27	5847,33	4,15
16-Mar-03	9456,43	2196,77	3,24
17-Mar-03	8726,10	5519,10	3,96
18-Mar-03	10937,52	6547,68	4,86
19-Mar-03	10636,82	2956,78	3,78
20-Mar-03	10804,24	5456,96	4,52
21-Mar-03	11475,89	6351,31	4,95
22-Mar-03	10454,22	10990,98	5,96
23-Mar-03	10803,17	8374,03	5,33
24-Mar-03	10271,12	9761,68	5,56
25-Mar-03	8533,16	3678,04	3,39
26-Mar-03	8396,05	2421,95	3,01
27-Mar-03	15101,31	2369,49	4,85
28-Mar-03	10734,58	6160,22	4,69
29-Mar-03	8681,34	12137,46	5,78
30-Mar-03	9174,78	10337,22	5,42
31-Mar-03	10090,26	2552,94	3,51
PROMEDIO (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,75	2,11	4,86

Cuadro 16. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de abril de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	H <sub>d</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H <sub>b</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Abr-03	9889,01	7362,19	4,79
02-Abr-03	7624,59	14774,61	6,22
03-Abr-03	8900,39	13570,81	6,24
04-Abr-03	10296,22	9842,18	5,59
05-Abr-03	7464,13	17692,17	6,99
06-Abr-03	17636,90	5979,10	6,56
07-Abr-03	8866,71	8917,29	4,94
08-Abr-03	11522,57	5912,23	4,84
09-Abr-03	10381,67	3805,93	3,94
10-Abr-03	9008,04	15439,56	6,79
11-Abr-03	9049,74	13248,66	6,19
12-Abr-03	7636,41	564,39	2,28
13-Abr-03	7331,26	3375,14	2,97
14-Abr-03	8549,39	14760,61	6,48
15-Abr-03	12724,89	9094,71	6,06
16-Abr-03	9596,72	13583,68	6,44
17-Abr-03	5554,44	5238,36	3,00
18-Abr-03	12703,55	8219,65	5,81
19-Abr-03	9619,23	3884,37	3,75
20-Abr-03	9482,87	11465,53	5,82
21-Abr-03	8476,65	9609,75	5,02
22-Abr-03	10496,54	6110,26	4,61
23-Abr-03	11794,59	7519,41	5,37
24-Abr-03	10437,76	6478,64	4,70
25-Abr-03	8182,23	5983,77	3,94
26-Abr-03	8775,74	11396,26	5,60
27-Abr-03	11003,83	3889,37	4,14
28-Abr-03	9561,19	17705,21	7,57
29-Abr-03	12708,85	6432,35	5,32
30-Abr-03	12589,65	6393,15	5,27
PROMEDIO (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,76	2,48	5,24

Cuadro 17. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de mayo de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	H <sub>d</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H <sub>b</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-May-03	8312,92	16840,28	6,99
02-May-03	8627,96	16744,84	7,05
03-May-03	10297,35	8278,65	5,16
04-May-03	9018,51	14853,09	6,63
05-May-03	7866,98	15507,82	6,49
06-May-03	8205,64	15791,96	6,67
07-May-03	8191,03	14542,97	6,32
08-May-03	8574,03	5285,97	3,85
09-May-03	8771,35	8861,45	4,90
10-May-03	9217,75	10711,85	5,54
11-May-03	8681,13	13156,47	6,07
12-May-03	9149,98	901,22	2,79
13-May-03	9834,61	6484,19	4,53
14-May-03	9434,82	9072,78	5,14
15-May-03	10001,77	4362,23	3,99
16-May-03	10210,24	5320,16	4,31
17-May-03	9662,05	5069,15	4,09
18-May-03	8394,38	1908,82	2,86
19-May-03	10186,98	5318,22	4,31
20-May-03	9176,42	1004,38	2,83
21-May-03	8927,21	16074,69	6,94
22-May-03	7934,19	9709,41	4,90
23-May-03	8540,49	13070,31	6,00
24-May-03	9402,30	10689,30	5,58
25-May-03	9930,12	4505,88	4,01
26-May-03	7325,52	16142,88	6,52
27-May-03	9163,53	11435,67	5,72
28-May-03	7812,24	13496,15	5,92
29-May-03	8755,58	10864,42	5,45
30-May-03	7612,60	10549,40	5,05
31-May-03	9121,62	2574,78	3,25
PROMEDIO (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,48	2,68	5,16

Cuadro 18. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de junio de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	Hd (kJ/m <sup>2</sup> )	Hb (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Jun-03	10510,59	4026,21	4,04
02-Jun-03	10471,69	4687,91	4,21
03-Jun-03	7920,22	3603,38	3,20
04-Jun-03	10843,07	13572,13	6,78
05-Jun-03	9088,46	4022,74	3,64
06-Jun-03	7803,96	11344,44	5,32
07-Jun-03	8815,15	14102,45	6,37
08-Jun-03	8321,69	15431,11	6,60
09-Jun-03	9636,75	9504,45	5,32
10-Jun-03	6647,87	15826,93	6,24
11-Jun-03	8413,12	13140,08	5,99
12-Jun-03	9985,74	6851,46	4,68
13-Jun-03	9828,27	4056,93	3,86
14-Jun-03	10192,74	4171,26	3,99
6/15/2 3	11082,05	4099,15	4,22
16-Jun-03	8421,53	12894,07	5,92
17-Jun-03	9224,10	4409,10	3,79
18-Jun-03	10007,06	2614,54	3,51
19-Jun-03	14412,60	8566,20	6,38
20-Jun-03	7710,23	13565,77	5,91
21-Jun-03	7945,84	6266,96	3,95
22-Jun-03	8992,28	706,12	2,69
23-Jun-03	8996,69	11174,11	5,60
24-Jun-03	7951,26	13483,14	5,95
25-Jun-03	10224,53	4895,47	4,20
26-Jun-03	8671,07	4972,93	3,79
27-Jun-03	8805,84	17132,16	7,21
28-Jun-03	9718,11	5394,69	4,20
29-Jun-03	10083,60	3538,90	3,78
30-Jun-03	7745,30	14776,30	6,26
<b>PROMEDIO (kW-h/m<sup>2</sup>)</b>	<b>2,58</b>	<b>2,34</b>	<b>4,92</b>

Cuadro 19. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de julio de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	H <sub>d</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H <sub>b</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Jul-03	9979,36	2469,44	3,46
02-Jul-03	8452,15	17097,05	7,10
03-Jul-03	9545,79	12907,41	6,24
04-Jul-03	9599,81	973,39	2,94
05-Jul-03	10428,23	11139,37	5,99
06-Jul-03	8293,10	16669,30	6,93
07-Jul-03	12063,35	6329,05	5,11
08-Jul-03	10254,17	4657,03	4,14
09-Jul-03	9996,23	4234,57	3,95
10-Jul-03	8287,25	8629,15	4,70
11-Jul-03	5044,53	150,27	1,44
12-Jul-03	8100,02	4913,98	3,62
13-Jul-03	9828,00	2368,80	3,39
14-Jul-03	12774,35	5614,45	5,11
15-Jul-03	9582,71	7369,69	4,71
16-Jul-03	9327,00	2257,80	3,22
17-Jul-03	8537,88	840,12	2,61
18-Jul-03	8545,21	12547,19	5,86
19-Jul-03	8863,85	9409,75	5,08
20-Jul-03	9700,69	1286,51	3,05
21-Jul-03	10203,93	2748,87	3,60
22-Jul-03	8995,89	1537,71	2,93
23-Jul-03	9838,81	8409,59	5,07
24-Jul-03	9576,87	5017,53	4,05
25-Jul-03	9949,73	3600,67	3,76
26-Jul-03	8993,45	1846,15	3,01
27-Jul-03	11347,89	2782,11	3,93
28-Jul-03	11682,14	11534,26	6,45
29-Jul-03	10105,63	8232,77	5,09
30-Jul-03	8832,65	4004,95	3,57
31-Jul-03	11162,55	4889,85	4,46
PROMEDIO (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,67	1,67	4,34

Cuadro 20. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de agosto de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	Hd (kJ/m <sup>2</sup> )	Hb (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Ago-03	8130,00	1431,60	2,66
02-Ago-03	10481,60	4375,60	4,13
03-Ago-03	9229,37	685,03	2,75
04-Ago-03	8929,22	8899,18	4,95
05-Ago-03	9665,07	8644,53	5,09
06-Ago-03	11450,48	7265,92	5,20
07-Ago-03	10477,67	14319,13	6,89
08-Ago-03	10862,01	5413,59	4,52
09-Ago-03	9624,92	7799,08	4,84
10-Ago-03	7867,22	14312,04	6,16
11-Ago-03	13509,60	5322,00	5,23
12-Ago-03	8678,89	6073,91	4,10
13-Ago-03	11576,93	7546,27	5,31
14-Ago-03	6680,23	3475,37	2,82
15-Ago-03	10908,00	6058,80	4,71
16-Ago-03	9445,48	9576,92	5,28
17-Ago-03	9523,80	10240,20	5,49
18-Ago-03	8867,04	12290,16	5,88
19-Ago-03	7525,80	14887,80	6,23
20-Ago-03	10448,35	6698,35	4,76
21-Ago-03	11337,21	8927,19	5,63
22-Ago-03	8316,84	14352,36	6,30
23-Ago-03	9523,49	10402,51	5,54
24-Ago-03	10182,69	5682,51	4,41
25-Ago-03	10242,01	11883,59	6,15
26-Ago-03	7653,59	13152,41	5,78
27-Ago-03	9311,56	7298,84	4,61
28-Ago-03	12600,73	9406,07	6,11
29-Ago-03	10059,27	3721,53	3,83
30-Ago-03	10935,29	2481,91	3,73
31-Ago-03	14290,26	3425,34	4,92
PROMEDIO (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,76	2,20	4,97

Cuadro 21. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de septiembre de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	H <sub>d</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H <sub>b</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Sep-03	10448,64	4916,16	4,27
02-Sep-03	7476,96	14529,84	6,11
03-Sep-03	9635,39	8213,41	4,96
04-Sep-03	9171,37	6330,23	4,31
05-Sep-03	9943,43	5126,17	4,19
06-Sep-03	11690,95	7313,45	5,28
07-Sep-03	13476,88	5343,92	5,23
08-Sep-03	8191,68	8393,12	4,61
09-Sep-03	9669,62	8125,18	4,94
10-Sep-03	9468,30	8182,50	4,90
11-Sep-03	12496,01	931,99	3,73
12-Sep-03	9391,38	7280,22	4,63
13-Sep-03	10142,25	7789,35	4,98
14-Sep-03	12414,38	1532,02	3,87
15-Sep-03	9338,82	8293,98	4,90
16-Sep-03	10242,33	1871,67	3,37
17-Sep-03	10165,32	6452,28	4,62
18-Sep-03	10270,60	1303,40	3,22
19-Sep-03	10334,04	8562,36	5,25
20-Sep-03	9358,74	4558,86	3,87
21-Sep-03	10501,90	6472,10	4,72
22-Sep-03	7157,53	4384,07	3,21
23-Sep-03	9143,03	4432,57	3,77
24-Sep-03	10464,84	3377,16	3,85
25-Sep-03	8259,05	9910,15	5,05
26-Sep-03	7523,53	8410,07	4,43
27-Sep-03	11684,33	7075,17	5,21
28-Sep-03	12931,60	1104,80	3,90
29-Sep-03	9194,77	2642,03	3,29
30-Sep-03	9054,48	7188,72	4,51
PROMEDIO (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,77	1,67	4,44

Cuadro 22. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de octubre de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	H <sub>d</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H <sub>b</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Oct-03	10076,04	3647,16	3,81
02-Oct-03	9890,99	9365,41	5,35
03-Oct-03	8577,48	7057,35	4,34
04-Oct-03	10045,12	9218,48	5,35
05-Oct-03	8808,43	1084,37	2,75
06-Oct-03	11177,12	3251,68	4,01
07-Oct-03	8353,40	2115,40	2,91
08-Oct-03	8719,39	1400,21	2,81
09-Oct-03	8804,95	7164,65	4,44
10-Oct-03	9445,12	7334,48	4,66
11-Oct-03	9487,75	4980,65	4,02
12-Oct-03	9702,64	7426,16	4,76
13-Oct-03	10925,47	6750,53	4,91
14-Oct-03	10103,86	10999,34	5,86
15-Oct-03	8187,76	1899,44	2,80
16-Oct-03	9000,17	8989,03	5,00
17-Oct-03	8744,34	9964,86	5,20
18-Oct-03	11030,00	7826,80	5,24
19-Oct-03	3698,28	1204,92	1,36
20-Oct-03	9274,85	8087,95	4,82
21-Oct-03	9415,81	6236,99	4,35
22-Oct-03	7555,23	12957,57	5,70
23-Oct-03	8547,28	12473,12	5,84
24-Oct-03	7473,42	4788,18	3,41
25-Oct-03	10932,41	2826,79	3,82
26-Oct-03	8177,02	10287,38	5,13
27-Oct-03	9899,16	1944,84	3,29
28-Oct-03	9244,23	10548,57	5,50
29-Oct-03	8099,25	1501,95	2,67
30-Oct-03	9770,14	2689,46	3,46
31-Oct-03	11180,04	4760,76	4,43
PROMEDIO (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,55	1,71	4,26

Cuadro 23. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de noviembre de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	Hd (kJ/m <sup>2</sup> )	Hb (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Nov-03	8352,99	2749,41	3,08
02-Nov-03	8228,44	12075,56	5,64
03-Nov-03	9314,90	1049,50	2,88
04-Nov-03	969,73	6807,47	2,16
05-Nov-03	10163,93	5787,27	4,43
06-Nov-03	8572,48	11349,92	5,53
07-Nov-03	7010,94	7097,46	3,92
08-Nov-03	10316,94	6059,46	4,55
09-Nov-03	8360,16	9261,84	4,90
10-Nov-03	8867,01	8610,99	4,86
11-Nov-03	10409,97	1608,51	3,34
12-Nov-03	8901,82	9000,98	4,97
13-Nov-03	8627,15	9333,25	4,99
14-Nov-03	11599,55	4258,45	4,41
15-Nov-03	9375,51	1244,49	2,95
16-Nov-03	6965,68	9608,72	4,60
17-Nov-03	8397,05	9926,95	5,09
18-Nov-03	10554,92	3650,68	3,95
19-Nov-03	8078,35	11314,85	5,39
20-Nov-03	8550,53	12588,67	5,87
21-Nov-03	11213,74	8006,66	5,34
22-Nov-03	8505,65	865,15	2,60
23-Nov-03	7835,74	11345,06	5,33
24-Nov-03	8917,11	6123,69	4,18
25-Nov-03	10464,86	3457,24	3,87
26-Nov-03	6432,51	11977,89	5,11
27-Nov-03	8636,47	10757,63	5,39
28-Nov-03	11666,20	3770,60	4,29
29-Nov-03	7768,99	7045,01	4,12
30-Nov-03	8299,94	6326,87	4,06
PROMEDIO (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,42	1,97	4,39

Cuadro 24. Radiación directa y difusa diaria mensual promedio en Bucaramanga mes de diciembre de 2003, estación CDMB, UIS

DIA	H <sub>d</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H <sub>b</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	H (kW-h/m <sup>2</sup> )
01-Dic-03	9777,57	6829,63	4,61
02-Dic-03	7171,67	9071,53	4,51
03-Dic-03	7479,66	1160,34	2,40
04-Dic-03	7447,75	12208,25	5,46
05-Dic-03	7330,72	9484,88	4,67
06-Dic-03	9204,10	2639,90	3,29
07-Dic-03	10654,87	4101,53	4,10
08-Dic-03	7370,47	8624,33	4,44
09-Dic-03	7287,07	12394,13	5,47
10-Dic-03	7941,73	9619,27	4,88
11-Dic-03	9980,32	1147,28	3,09
12-Dic-03	8614,88	9194,32	4,95
13-Dic-03	9568,08	8025,12	4,89
14-Dic-03	10653,46	7965,74	5,17
15-Dic-03	8996,02	7326,38	4,53
16-Dic-03	7360,81	10887,59	5,07
17-Dic-03	6818,14	13280,66	5,58
18-Dic-03	7897,00	11229,80	5,31
19-Dic-03	8695,22	8869,18	4,88
20-Dic-03	7516,08	2146,32	2,68
21-Dic-03	9226,87	5932,73	4,21
22-Dic-03	8783,80	7481,00	4,52
23-Dic-03	8975,97	8106,03	4,75
24-Dic-03	8927,56	7826,84	4,65
25-Dic-03	10003,17	5815,23	4,39
26-Dic-03	8846,32	4963,28	3,84
27-Dic-03	9420,63	4723,77	3,93
28-Dic-03	8115,61	10229,99	5,10
29-Dic-03	8559,93	8493,27	4,74
30-Dic-03	9476,06	8199,94	4,91
31-Dic-03	9526,69	10694,51	5,62
PROMEDIO (kW-h/m <sup>2</sup> )	2,40	2,14	4,54

## **2. EFECTO DE LA ORIENTACIÓN DEL COLECTOR Y SU SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE LA POSICIÓN SOLAR, EN LA CANTIDAD DE ENERGÍA COLECTADA**

La radiación solar se mide generalmente con referencia a una superficie horizontal, con el propósito principal de estandarizar los datos, sin embargo como ya se ha visto, la cantidad de radiación colectada depende, entre otras cosas, del ángulo de incidencia, y por tanto de la orientación que el colector tenga respecto a la dirección de la radiación solar, la cual es cambiante durante el transcurso del día.

Para mejorar el proceso de captación, se pueden emplear sistemas mecánicos auxiliares que posibiliten un seguimiento continuo de la trayectoria del sol y de esta manera mantener el ángulo de incidencia en un rango aceptable.

De acuerdo a la ubicación geográfica del sitio y a los propósitos de la energía colectada, son mas convenientes algunos sistemas que otros, incluso para sitios cercanos al ecuador es factible elegir una orientación fija del colector, sin que la eficiencia del sistema sea inconveniente. De modo que, antes de optar por una de las alternativas, es oportuno realizar un análisis detallado de la conveniencia técnica de cualquiera de estos sistemas, sea de seguimiento continuo o de orientación fija.

Con este propósito se analizará el efecto de algunos de los sistemas de seguimiento continuo y orientaciones fijas más comunes, sobre la cantidad de energía captada en el transcurso de un año.

## 2.1 CÁLCULO COMPARATIVO DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA CAPTADA

La evaluación del efecto del ángulo de incidencia en la energía colectada, pasa por un procedimiento de cálculo semejante al descrito en la sección 1.6.5, con algunas variaciones como se verá a continuación.

Los casos que se evaluarán son 10:

- *CASO 1: Sistema de seguimiento continuo de la trayectoria del sol sobre un eje horizontal norte-sur.* Este caso considera un sistema de seguimiento automático de la posición del sol de manera que el colector gire alrededor de un eje horizontal con alineación norte-sur procurando mantener un ángulo de incidencia tan bajo como sea posible.
- *CASO 2: Seguimiento continuo alrededor de un eje norte-sur paralelo al eje terrestre.* A diferencia del anterior, en el caso actual, el colector gira alrededor de un eje que se encuentra inclinado un ángulo de  $23,45^\circ$  respecto a la horizontal, paralelo al eje terrestre.
- *CASO 3: Orientación fija horizontal ( $\beta=0$ ;  $\gamma=0$ ).* Este caso supone un colector fijo en posición horizontal de manera que recibe principalmente la radiación correspondiente al medio día y el resto del día, únicamente la componente directa normal a la superficie.
- *CASO 4: Orientación Sur fija con inclinación  $15^\circ$  respecto a la horizontal, ( $\beta=15$ ;  $\gamma=0$ ).* Dada la ubicación de la ciudad de Bucaramanga al norte del ecuador,

por lo cual el sol siempre surcará el cielo en un plano inclinado levemente hacia el sur, resulta conveniente conocer cómo esto afecta la cantidad de la radiación captada por una superficie fija. En este primer caso se trata de un colector inclinado  $15^\circ$  a partir del horizonte terrestre y orientado al sur.

- CASO 5: *Orientación Sur fija con inclinación  $30^\circ$  respecto a la horizontal ( $\beta=30$ ;  $\gamma=0$ ).* Es una variación del caso anterior, consiste en suponer un colector orientado al sur e inclinado respecto a la horizontal un ángulo de  $30^\circ$  de tal manera que solo reciba la componente normal de la radiación directa que llega a la superficie terrestre.

- CASO 6: *Orientación Sur fija con inclinación  $45^\circ$  respecto a la horizontal ( $\beta=45$ ;  $\gamma=0$ ).* Una segunda variación del caso 4, supone una inclinación de  $45^\circ$  del colector desde la horizontal.

- CASO 7: *Orientación Este fija con inclinación  $15^\circ$  respecto a la horizontal ( $\beta=15$ ;  $\gamma= -90$ ).* Dado que el sol describe una trayectoria aparente sobre la tierra en sentido Este-Oeste, resulta importante conocer el comportamiento de un colector inclinado levemente y orientado en una de estas direcciones. En este caso particular, se supone una inclinación de  $15^\circ$  de la horizontal y orientado hacia el Este.

- CASO 8: *Orientación Oeste fija con inclinación  $15^\circ$  respecto a la horizontal ( $\beta=15$ ;  $\gamma=90$ ).* En este caso se considera una superficie inclinada  $15^\circ$  a partir de la horizontal y orientada al Oeste de manera que reciba la componente normal de la radiación directa, con cierta selectividad hacia las horas inmediatas pasado el mediodía.

- *CASO 9: Orientación Norte fija con inclinación 15° respecto a la horizontal ( $\beta=15$ ;  $\gamma=180$ ). Como parámetro de control para los demás casos, al orientar una superficie hacia el norte con una inclinación de 15°, se espera una respuesta opuesta a la obtenida en los casos claramente contrarios, como los orientados al sur, por ejemplo.*

- *CASO 10: Orientación Sur fija con inclinación 7.14° respecto a la horizontal ( $\beta=7.14$ ;  $\gamma=0$ ). Un último caso surge a partir de las observaciones hechas sobre los anteriores. Se trata de una superficie inclinada un ángulo igual a la latitud del lugar y orientada hacia el sol, que en este caso es 7.14° de inclinación con orientación sur.*

Para cada uno de los casos se busca estimar la radiación directa bruta que incidiría en un receptor teórico, es decir que no se tienen en cuenta las características geométricas ni el diseño del colector, por cuanto se pretende únicamente observar el efecto del sistema de seguimiento y orientación del mismo.

A modo de ilustración se realizará un ejemplo de cálculo con el CASO 1 para el día 23 de junio a las 2:00 p.m.

*Datos del lugar:*

***Latitud ( $\phi$ ): 7.14° N***

***Longitud ( $L_{loc}$ ): 73.119° O***

***Meridiano local ( $L_{st}$ ): 75° O***

*Datos de tiempo:*

***Hora: 2:00 p.m.***

Día del año (n): 174

Declinación ( $\delta$ ):

Se calcula a partir de la Ecuación 1.11 para  $n = 174$

$$\delta = 23.45 * \text{Seno}\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right)$$

$$\delta = 23.45 * \text{Seno}\left(360 * \frac{284 + 174}{365}\right)$$

$$\delta = 23.48^\circ$$

Hora local: 2:00 p.m.

*Ecuación del tiempo (E):*

A partir de las Ecuaciones 1.26 y 1.27

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 * \text{Cos}B - 0.032077 * \text{Sen}B - 0.014615 * \text{Cos}2B - 0.04089 * \text{Sen}2B)$$

$$B = (n - 1) * \left(\frac{360}{365}\right)$$

$$B = (174 - 1) * \left(\frac{360}{365}\right)$$

$$B = 170.63$$

$$E = -1.7635 \text{ minutos}$$

*Hora solar:*

Se obtiene a partir de la ecuación 1.25

$$\text{Horasolar} = \text{Horalocal} + 4(L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E$$

$$\text{Horasolar} = 2 + 4(75 - 73.119) - 1.7635$$

$$\text{Hora solar} = 2:06 \text{ p.m.}$$

*Angulo horario medio ( $\omega_{\text{med}}$ ):*

Para las 2:36 p.m.

$$\omega_{\text{med}} = 38.9^\circ$$

*Angulo Cenital ( $\theta_z$ ):*

Se calcula mediante la Ecuación 1.10

$$\text{Cos}\theta_z = \text{Cos}\phi \text{Cos}\delta \text{Cos}\omega + \text{Sen}\phi \text{Sen}\delta$$

$$\text{Cos}\theta_z = \text{Cos}(7.14) * \text{Cos}(23.48) * \text{Cos}(38.9) + \text{Sen}(7.14) * \text{Sen}(23.48)$$

$$\theta_z = 40.77^\circ$$

*Angulo de incidencia ( $\theta$ ):*

Se obtiene a través de la ecuación 1.14

$$\text{Cos}\theta = (\text{Cos}^2\theta_z + \text{Cos}^2\delta * \text{Sen}^2\omega)^{1/2}$$

$$\text{Cos}\theta = (\text{Cos}^2(40.77) + \text{Cos}^2(23.48) * \text{Sen}^2(38.9))^{1/2}$$

$$\theta = 17.87^\circ$$

*Relación Rb*

Se determina a partir de la ecuación 1.19

$$Rb = \frac{\text{Cos}\theta}{\text{Cos}\theta_z}$$

$$Rb = \frac{\text{Cos}(17.87)}{\text{Cos}(40.77)}$$

$$Rb = 1.26$$

*Factor de ángulo de incidencia:*

$$K_\theta = 1 - 6.74 \times 10^{-5} * \theta^2 + 1.64 \times 10^{-6} * \theta^3 - 2.51 \times 10^{-8} * \theta^4$$

$$K_\theta = 1 - 6.74 \times 10^{-5} * (17.87)^2 + 1.64 \times 10^{-6} * (17.87)^3 - 2.51 \times 10^{-8} * (17.87)^4$$

$$K_\theta = 0.985$$

*Radiación solar total promedio ( $G_T$ ):*

Tomada del cuadro 1.1 para el día 23 de junio a las 2:00 p.m.

$$G_T = 596 \text{ W/m}^2$$

*Irradiación en la superficie terrestre ( $I$ ):*

Corresponde a la energía recibida durante una hora a una tasa de 596 W/m<sup>2</sup>

$$I = 596 * 3.6 \text{ kJ/m}^2$$

$$I = 2145.6 \text{ kJ/m}^2$$

*Irradiación extraterrestre ( $I_o$ ):*

Se obtiene a partir de la ecuación 1.21, siendo  $\omega_1 = 31.5^\circ$ ,  $\omega_2 = 46.5^\circ$  los ángulos horarios correspondientes a la hora solar inicial y final del intervalo de tiempo, es decir, para las 2:06 y 3:06.

$$I_o = \frac{12 * 3600 G_{sc}}{\pi} \left( 1 + 0.033 * \cos \frac{360n}{365} \right) * \left( \cos \phi \cos \delta (\text{Sen} \omega_2 - \text{Sen} \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \text{Sen} \phi \text{Sen} \delta \right)$$

$$I_o = \frac{12 * 3600 * 1367}{\pi} \left( 1 + 0.033 * \cos \frac{360 * 174}{365} \right) * \left( \cos(7.14) \cos(23.48) * (\text{Sen}(46.5) - \text{Sen}(31.5)) + \frac{\pi(46.5 + 31.5)}{180} * \text{Sen}(7.14) \text{Sen}(23.48) \right)$$

$$I_o = 3212.75 \text{ kJ/m}^2$$

*Índice de claridad ( $k_T$ ):*

Se calcula a partir de la Ecuación 1.22

$$k_T = \frac{I}{I_o}$$

$$k_T = \frac{2145.6}{3212.75}$$

$$k_T = 0.67$$

*Irradiación difusa (I<sub>d</sub>):*

Se calcula a partir de la correlación 1.24, para  $k_T = 0.67$

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.164k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.164(0.67) + 4.388(0.67)^2 - 16.638(0.67)^3 + 12.336(0.67)^4$$

$$I_d = 704.31 \text{ kJ/m}^2$$

*Irradiación directa (I<sub>b</sub>):*

$$I_b = I - I_d$$

$$I_b = 2145.6 - 704.31$$

$$I_b = 1503.72 \text{ kJ/m}^2$$

*Irradiación directa para superficie inclinada*

Se calcula a partir de la ecuación 1.14

$$I_{b\beta} = I_b * R_b$$

$$I_{b\beta} = 1503.72 * 1.24$$

$$I_{b\beta} = 1889.7 \text{ kJ/m}^2$$

*Irradiación directa bruta sobre absorbedor*

$$I_{b\beta\theta} = I_{b\beta} * K_\theta$$

$$I_{b\beta\theta} = 1503.72 * 0.985$$

$$I_{b\beta\theta} = 1861.9 \text{ kJ/m}^2$$

$$I_{b\beta\theta} = 0.517 \text{ kW-h/ m}^2$$

Cuadro 24a. Cálculo radiación directa bruta sobre el absorbedor para el día 23 de junio, CASO 1

RADIACIÓN UTIL DIARIA						
DIA (n)	$\delta$ (°)	$\varphi$ (°)	L (°O)	Lst (°)	B	E
174	23,4893	7,141569	73,119286	75	170,6301	-1,7635
Hora	Hora solar	$\omega$ med	G prom (W/m <sup>2</sup> )	$\theta_s$	$\theta$	Rb (G $\beta$ /G)
6,00	6,10	-81,1	116	78,99	22,20	4,85
7,00	7,10	-66,1	359	65,24	20,44	2,24
8,00	8,10	-51,1	597	51,57	18,89	1,52
9,00	9,10	-36,1	782	38,26	17,66	1,21
10,00	10,10	-21,1	768	26,00	16,80	1,07
11,00	11,10	-6,1	451	17,35	16,39	1,01
12,00	12,10	8,9	663	18,47	16,43	1,01
13,00	13,10	23,9	928	28,20	16,93	1,09
14,00	14,10	38,9	596	40,77	17,87	1,26
15,00	15,10	53,9	212	54,18	19,17	1,61
16,00	16,10	68,9	131	67,88	20,76	2,48

Hora	I (kJ/m <sup>2</sup> )	I <sub>o</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	K <sub>T</sub> (I / I <sub>o</sub> )	I <sub>d</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	I <sub>b</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	G $\beta$ prom (W/m <sup>2</sup> )	I $\beta$ (kJ/m <sup>2</sup> )	K $\theta$	I $\beta\theta$ (kJ/m <sup>2</sup> )
6,00	417,60	1458,44	0,29	406,84	10,76	562,43	52,18	0,979	51,064
7,00	1292,40	2489,12	0,52	1232,01	60,39	803,21	135,12	0,981	132,620
8,00	2149,20	3366,25	0,64	767,34	1381,86	908,82	2103,62	0,984	2069,570
9,00	2815,20	4030,06	0,70	693,21	2121,99	948,99	2575,14	0,986	2538,020
10,00	2764,80	4435,29	0,62	1074,70	1690,10	818,00	1800,14	0,987	1776,298
11,00	1623,60	4554,35	0,36	1456,40	167,20	453,31	168,06	0,987	165,925
12,00	2386,80	4379,10	0,55	1341,20	1045,60	670,44	1057,33	0,987	1043,861
13,00	3340,80	3921,51	0,85	700,75	2640,05	1007,35	2865,79	0,987	2827,329
14,00	2145,60	3212,75	0,67	641,88	1503,72	748,98	1889,70	0,985	1861,906
15,00	763,20	2301,12	0,33	704,31	58,89	342,17	95,04	0,983	93,467
16,00	471,60	1248,74	0,38	410,82	60,78	325,29	150,93	0,981	148,054

Cuadro 24b. Radiación directa bruta mes de junio, para el CASO 1

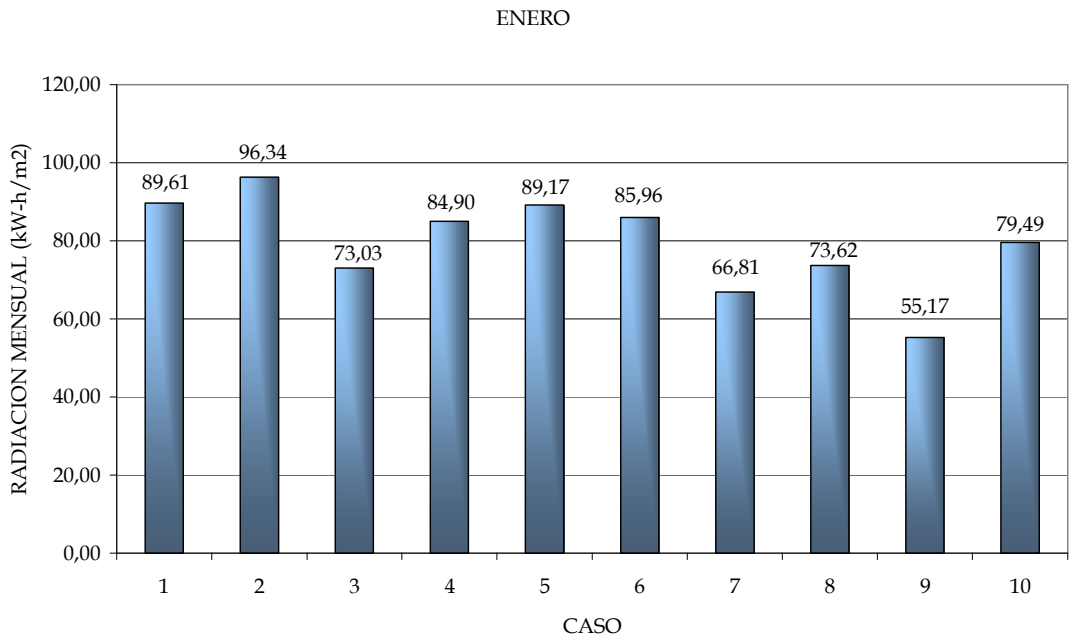
RADIACIÓN DIRECTA BRUTA MES DE JUNIO CASO 1		
DIA (n)	H $\beta$ d (kJ/m <sup>2</sup> )	H $\beta$ ob (kJ/m <sup>2</sup> )
152	4664,76	4604,58
153	5875,08	5798,13
154	4903,74	4836,04
155	2274,32	2245,32
156	4772,41	4706,32
157	12597,92	12439,26
158	16324,09	16110,33
159	16709,27	16487,47
160	11305,66	11149,03
161	18344,52	18097,2
162	16127,02	15896,32
163	7802,13	7695,77
164	4737,54	4767,39
165	5573,03	5488,76
166	4607,7	4544,31
167	15631,11	15401,59
168	4640,9	4580,23
169	2798,86	2761,66
170	9645,71	9505,32
171	15198,83	14989,98
172	9196,13	9049,13
173	819,78	808,23
174	12893,04	12708,11
175	15931,8	15705,74
176	5935,11	5846,61
177	6492,1	6394,94
178	13252,78	13108,67
179	6681,54	6583,99
180	5005,18	4926,14
181	17637,88	17387,64
Irradiación mensual (kW-h/m <sup>2</sup> )		76,28

A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos sobre el estudio comparativo del efecto del sistema de seguimiento y orientación del colector en la cantidad de energía aprovechable, para cada uno de los 10 casos señalados anteriormente. Los valores en cada una de las casillas del cuadro 25 corresponden a la Irradiación mensual directa bruta en kW-h/m<sup>2</sup>

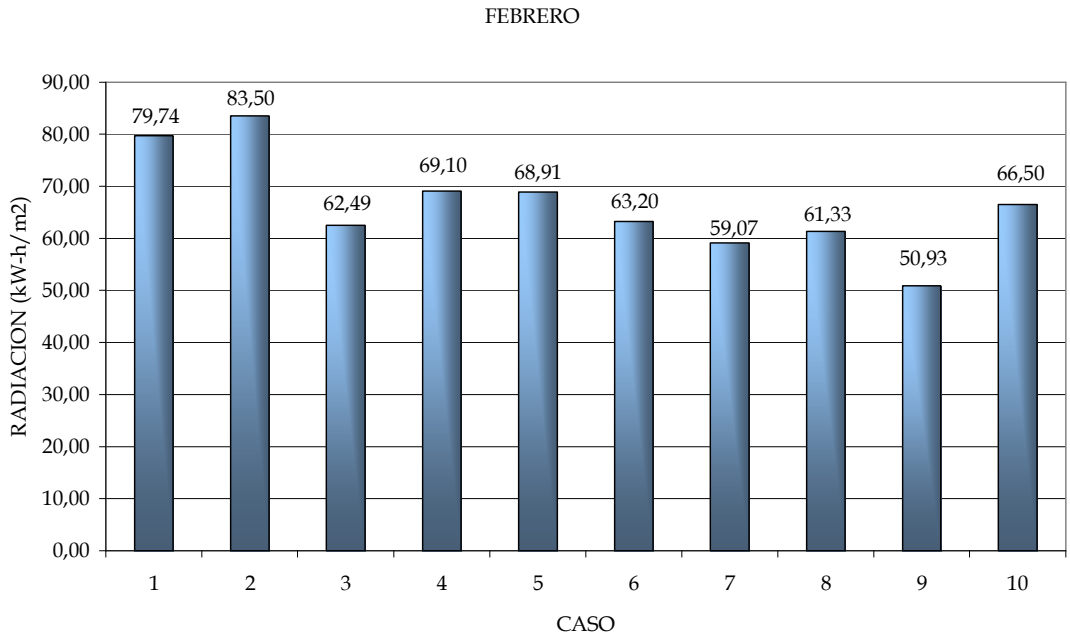
Cuadro 25. Resultados estudio comparativo del efecto de la orientación del colector y su sistema de seguimiento de la posición del sol en la cantidad de radiación captada.

CASO	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10
ENERO	89,61	96,34	73,03	84,90	89,17	85,96	66,81	73,62	55,17	79,49
FEBRERO	79,74	83,50	62,49	69,10	68,91	63,20	59,07	61,33	50,93	66,50
MARZO	46,68	48,20	52,98	64,73	50,47	42,76	42,33	57,36	47,55	64,79
ABRIL	39,15	40,03	60,23	69,81	51,43	39,23	46,34	65,55	56,96	73,40
MAYO	95,53	92,47	77,69	67,69	51,55	31,51	74,83	74,49	81,28	73,97
JUNIO	76,28	66,94	62,13	54,01	37,89	20,54	57,36	61,41	66,63	60,46
JULIO	43,13	49,23	43,32	39,79	29,49	20,41	42,41	48,14	46,73	44,05
AGOSTO	88,28	81,60	64,78	61,50	49,07	29,94	64,84	71,56	72,40	65,64
SEPTIEMBRE	67,39	63,83	47,37	48,33	43,47	24,26	48,37	60,00	58,01	49,41
OCTUBRE	31,35	32,20	42,00	49,47	47,92	23,24	47,58	56,03	54,78	48,16
NOVIEMBRE	70,55	69,25	54,62	64,74	67,28	25,99	49,61	61,28	59,34	61,09
DICIEMBRE	78,13	78,04	61,16	72,30	77,53	26,12	51,40	58,61	58,72	67,20
TOTAL	800,21	801,64	701,79	746,38	664,19	433,14	650,95	749,40	708,51	754,17
Promedio diaria	2,19	2,20	1,92	2,04	1,82	1,19	1,78	2,05	1,94	2,07
Comparativa respecto al CASO 1	1,00	1,00	0,88	0,93	0,83	0,54	0,81	0,936	0,89	0,942

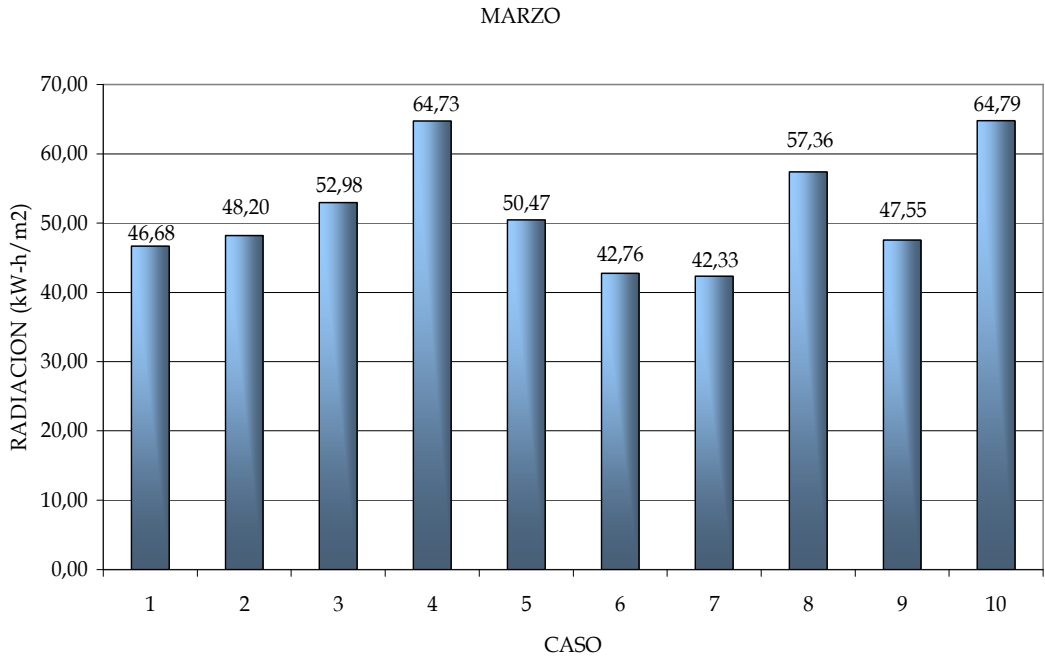
Gráfica 1. Irradiación directa bruta mes de enero



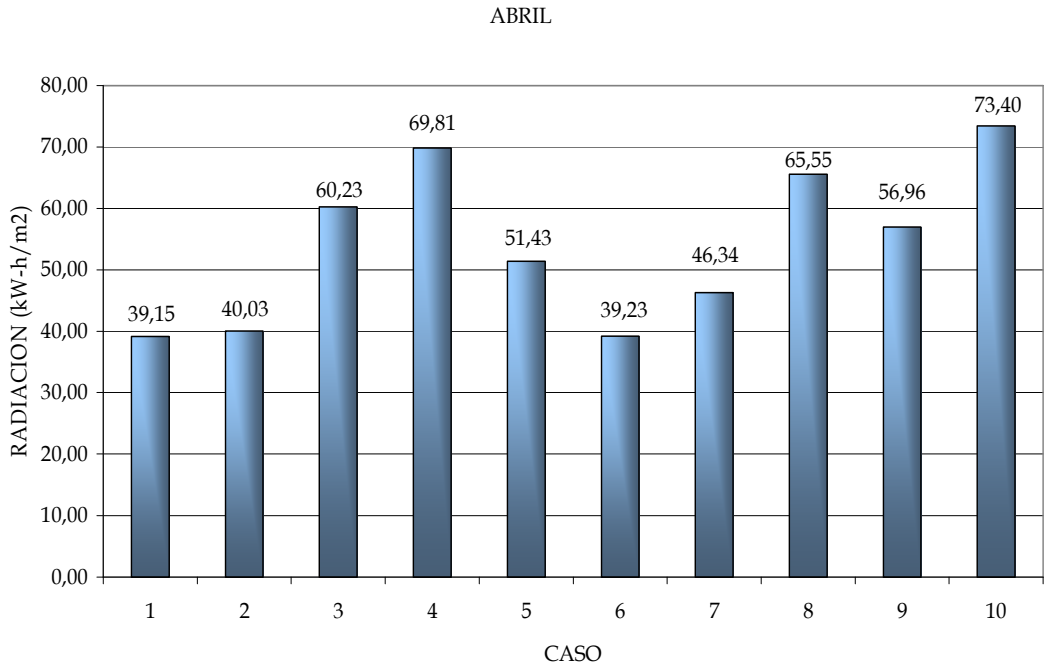
Gráfica 2. Irradiación directa bruta mes de febrero



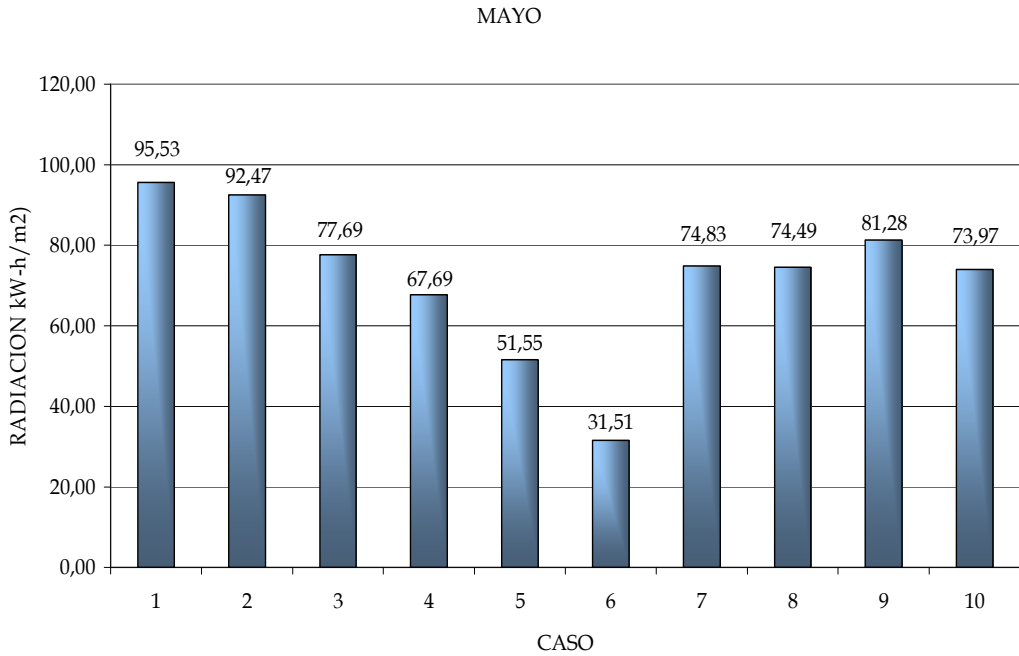
Gráfica 3. Irradiación directa bruta mes de marzo



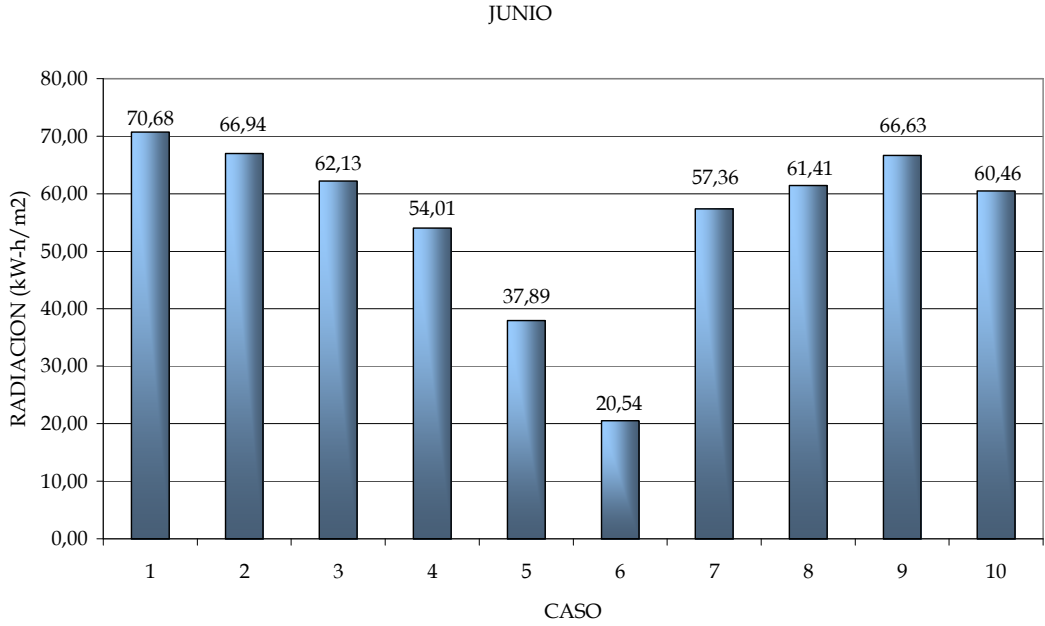
Gráfica 4. Irradiación directa bruta mes de abril



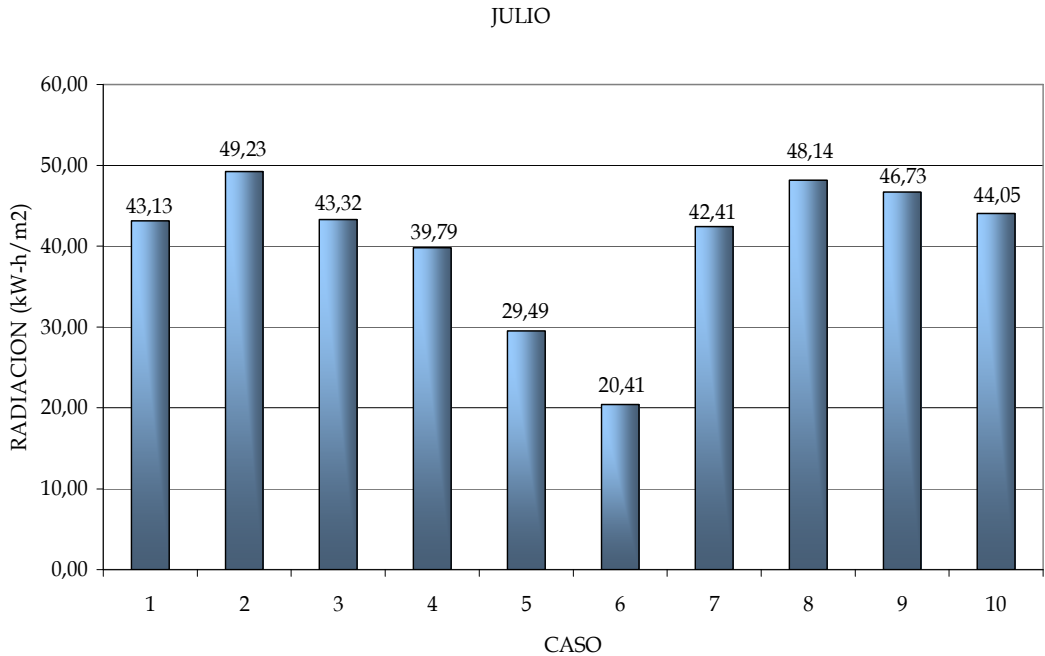
Gráfica 5. Irradiación directa bruta mes de mayo



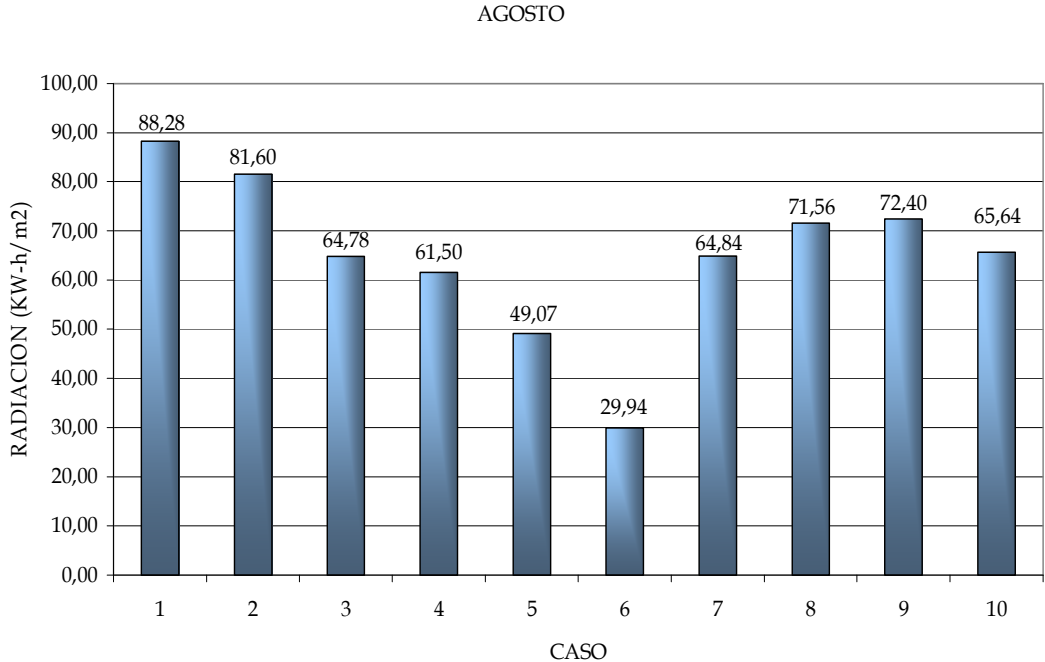
Gráfica 6.: Irradiación directa bruta mes de junio



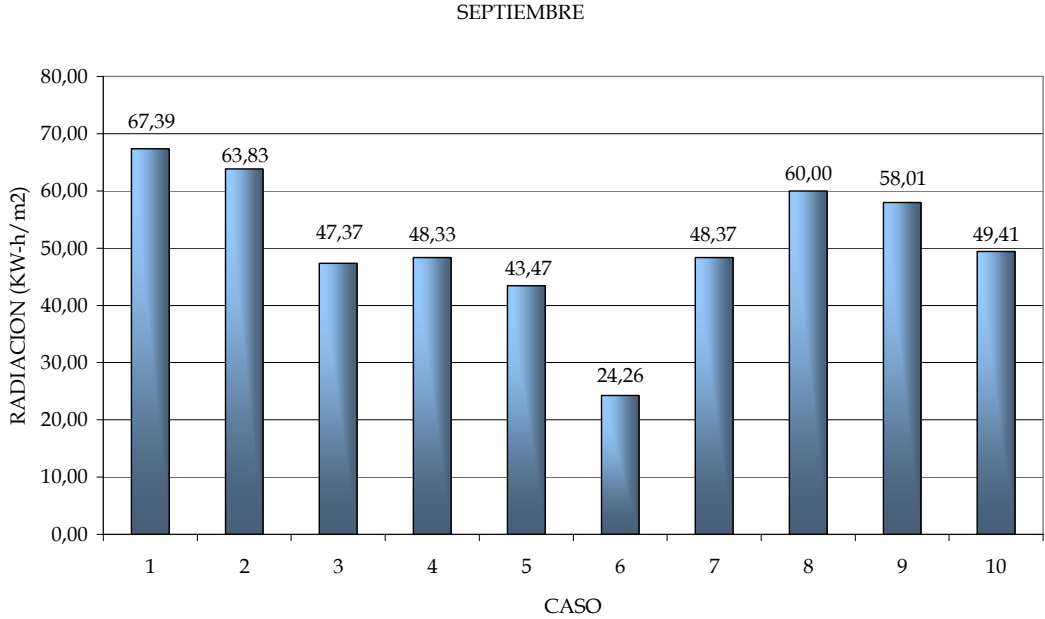
Gráfica 7. Irradiación directa bruta mes de julio



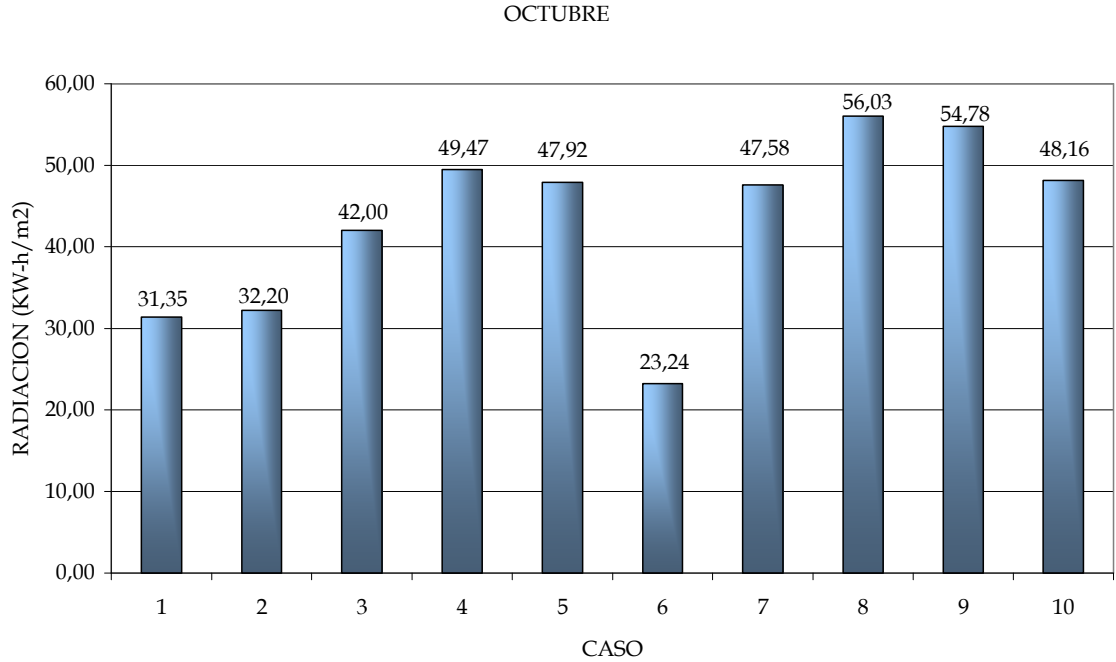
Gráfica 8. Irradiación directa bruta mes de agosto



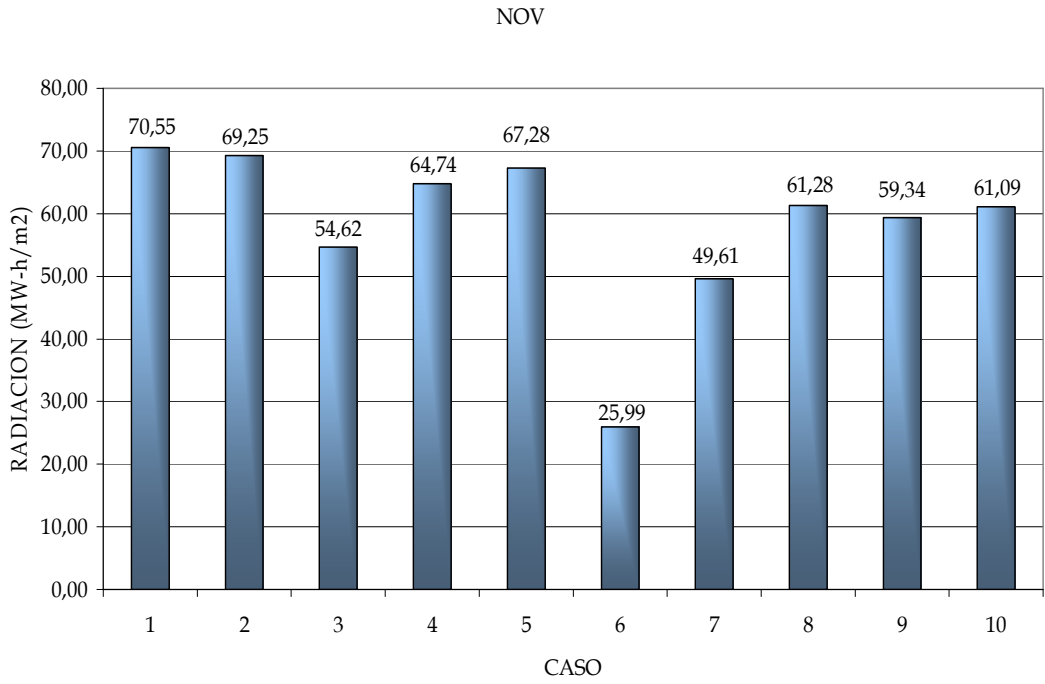
Gráfica 9. Irradiación directa bruta mes de septiembre



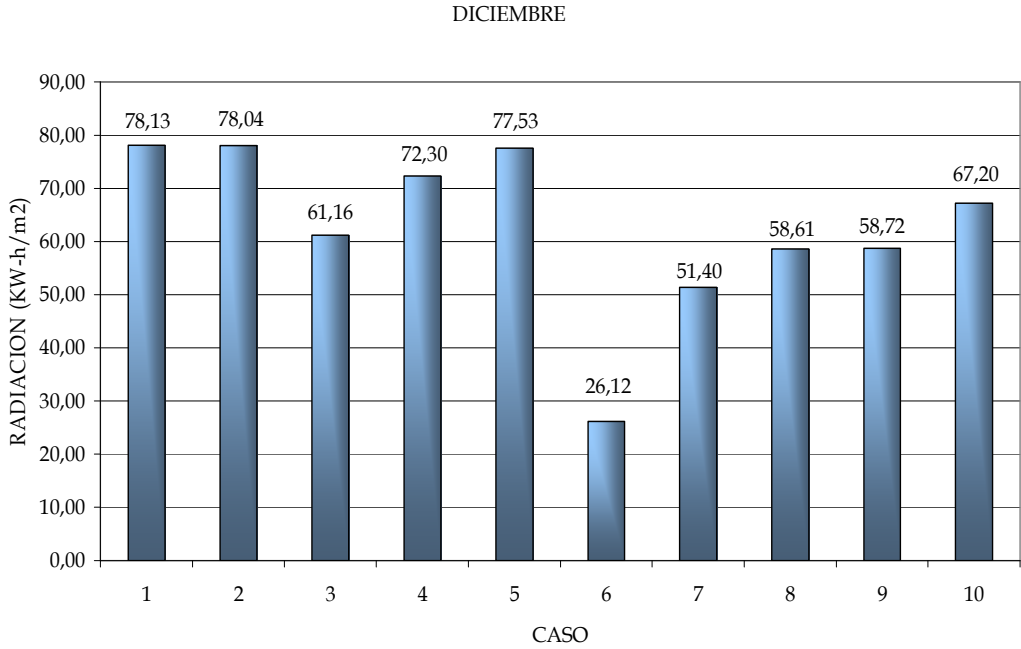
Gráfica 10. Irradiación directa bruta mes de octubre



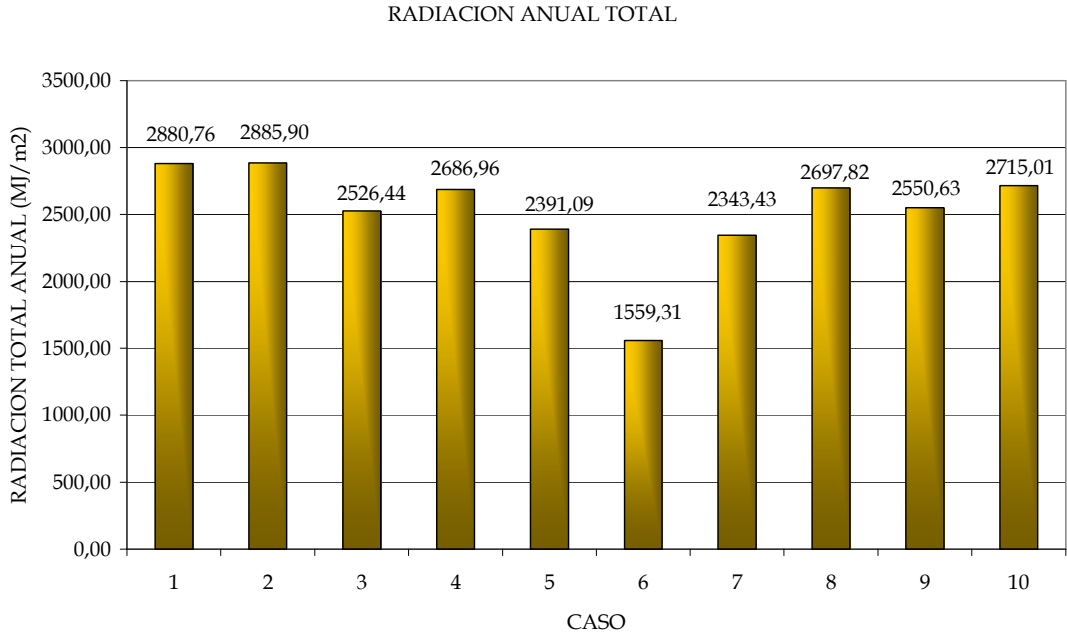
Gráfica 11. Irradiación directa bruta mes de noviembre



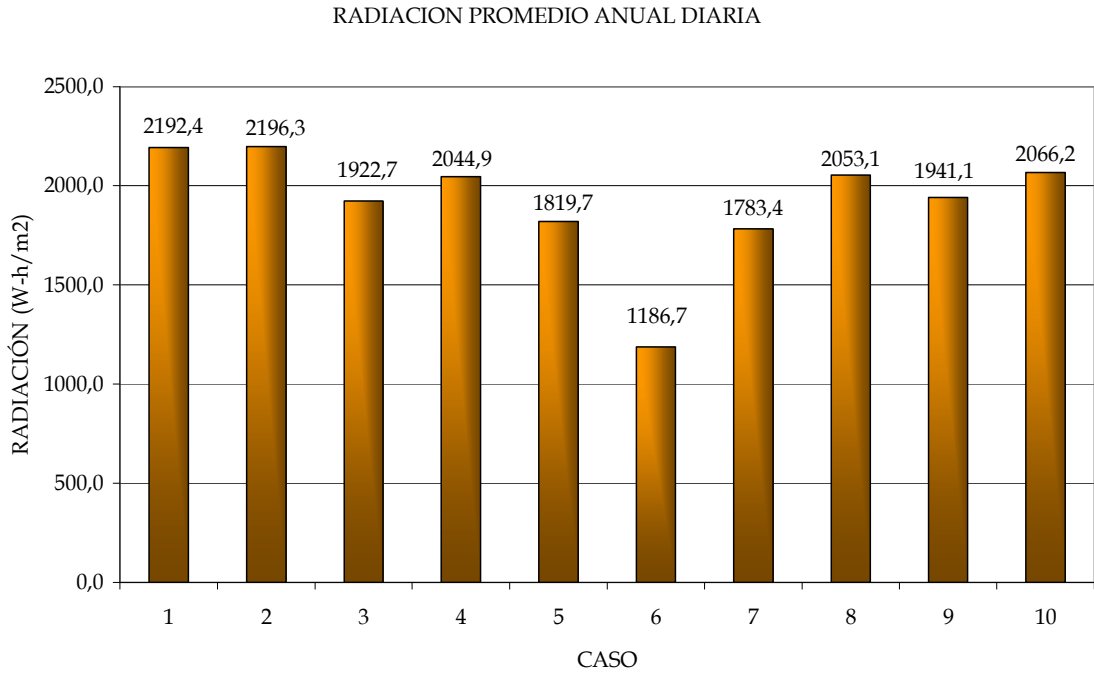
Gráfica 12. Irradiación directa bruta mes de diciembre



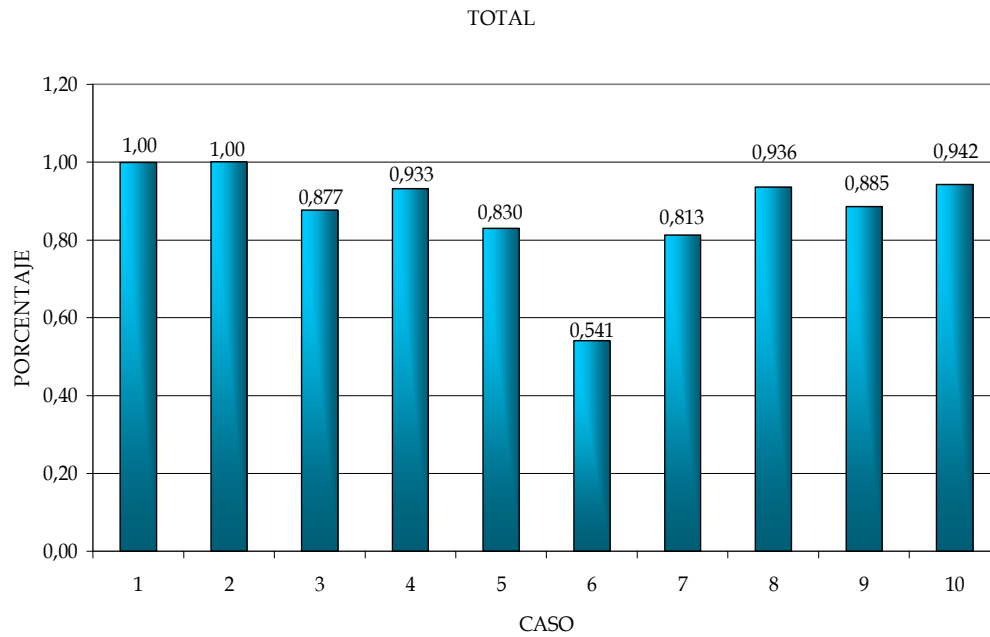
Gráfica 13. Irradiación directa bruta anual



Gráfica 14. Irradiación directa bruta promedio anual diaria



Gráfica 15. Resultados anuales porcentuales relativos al Caso 1.



Los anteriores resultados dejan ver que los sistemas de seguimiento continuo de la trayectoria del sol, Casos 1 y 2, permiten captar una mayor cantidad de energía, por unidad de metro cuadrado, para un año de radiación solar.

De los sistemas de orientación fija, el que mejor desempeño presenta es el correspondiente al Caso 10, es decir, con orientación al sur e inclinado  $7.14^\circ$ , que corresponde a la latitud local, seguido del Caso 8, orientación fija al Oeste e inclinado  $15^\circ$  respecto a la horizontal.

La diferencia entre los dos primeros y los últimos es de 5.8% y 6.4 % respectivamente, lo cual es bastante aceptable, por tratarse de sistemas estructuralmente mas sencillos y menos costosos en términos operacionales y de construcción, sin embargo estos aspectos deben analizarse en conjunto dependiendo de la aplicación específica.

### **3. COLECTORES SOLARES DE CONCENTRACIÓN CILÍNDRICO PARABÓLICOS.**

Un sistema termosolar de concentración es un dispositivo empleado para la conversión de la componente directa de la radiación solar en otra forma de energía aprovechable, mediante el uso de concentradores. Se caracterizan por el uso de elementos que redireccionan, bien sea por reflexión o refracción, la radiación incidente sobre una superficies de captación y la concentran sobre una de menor tamaño, denominada absorbedor. De esta manera se pueden obtener temperaturas más elevadas en el fluido, proporcionando una mayor posibilidad de aprovechamiento de la energía solar en aplicaciones de media y alta temperatura.

#### **3.1 GENERALIDADES**

Los colectores de concentración pueden clasificarse en dos grandes grupos; los que concentran la energía en un punto también llamados colectores circulares o concentradores en tres dimensiones y los que concentra la energía en una línea, llamados lineales o concentradores en dos dimensiones.

Los tres tipos principales de sistemas de concentración son los Colectores Cilíndrico-parabólicos (CCP, los Discos Parabólicos y los sistemas de Receptor Central. Los dos últimos pertenecen al grupo de los concentradores en tres dimensiones y posibilitan obtener temperaturas superiores a los 500°C , pero se hallan aún en fase de experimentación, mientras que el primero

pertenece al grupo de los concentradores en dos dimensiones y su desarrollo ha alcanzado casi la madurez.

Foto 5.a. Principales tipos de Sistemas Termosolares de Concentración, a) Sistema de Receptor Central; b) Sistema de Discos Parabólicos, c) Sistema Cilíndrico- parabólico.



a) SRC



b) DP



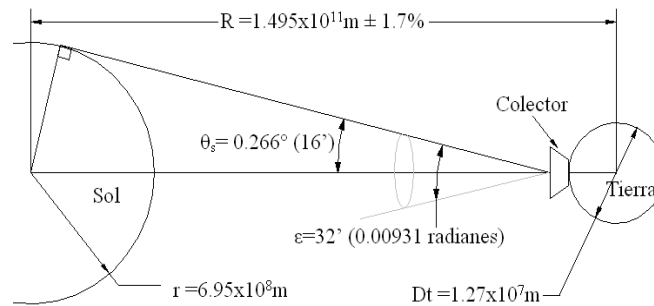
c) CCP

Fuente: Sistemas Termosolares de concentración, Manuel Silva Pérez

La eficiencia de los sistemas de concentración varía dependiendo del mecanismo de concentración empleado y en general esta asociada a la razón de concentración, es decir a la relación entre el área del concentrador y la del absorbedor. El valor máximo de esta relación es una función del semiángulo

de apertura del ángulo sólido que subtiende el rayo cónico de la radiación proveniente del sol (ver figura 4).

Figura 4. Incidencia de los rayos solares



Si un concentrador es perfecto, la radiación del sol sobre su superficie es la fracción de la emitida por el sol e interceptada por la misma. Asumiendo el sol como un cuerpo negro el calor radiado por sobre la superficie estaría dado por:

$$Q_{s \rightarrow r} = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4$$

Donde:

$Q_{s \rightarrow r}$  = calor radiado por el sol sobre el colector.

$A_a$  = área de apertura.

$R$  = distancia de la tierra al sol.

$r$  = radio del disco solar.

$T_s$  = temperatura de la superficie del sol en kelvin.

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzman, equivale a  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ .

Un receptor perfecto recibiría una energía igual a:

$$Q_{r \rightarrow s} = A_r \sigma T_r^4 E_{r \rightarrow s}$$

Donde:

$Q_{r \rightarrow s}$  : Calor captado por la superficie.

$A_r$  : Área del receptor.

$E_{r \rightarrow s}$  : Emisividad de la superficie.

$T_r$ : temperatura del receptor.

Cuando  $T_r$  iguala a  $T_s$ , el calor radiado es igual al calor recibido, resolviendo

$Q_{r \rightarrow s} = Q_{s \rightarrow r}$ , tenemos.

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} E_{r \rightarrow s}$$

El máximo valor que puede tomar  $E_{r \rightarrow s}$  en uno, en consecuencia el máximo radio de concentración circular esta dado por:

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\text{Sen}^2 \theta_s}$$

Donde:

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{r}{R}\right) \approx 0.266^\circ$$

Luego para sistemas concentradores en tres dimensiones tenemos:

$$C_{\text{max},3D} = \frac{1}{(\text{sen } 0.266^\circ)^2} = 46000 \quad (3.1)$$

De forma similar para sistemas que concentran la radiación en dos direcciones se puede obtener por la expresión:

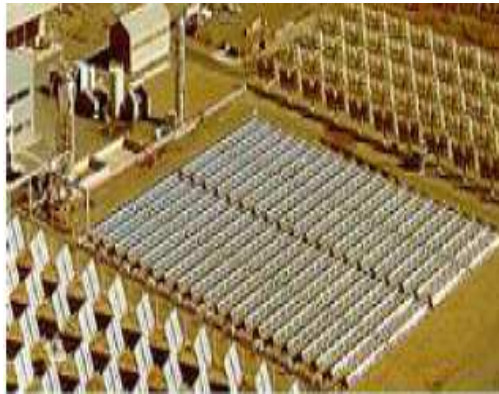
$$C_{\text{max},2D} = \frac{1}{\text{sen } 0.266^\circ} = 273 \quad (3.2)$$

En la actualidad los sistemas de concentración son empleados para la generación de energía eléctrica en plantas térmicas híbridas, donde la energía solar llega a constituir hasta un 75% de la capacidad de las mismas. Existen

en varios sitios del mundo plantas de este tipo que suman una capacidad total de del orden de los 365 MWe, de los cuales el 95% tiene propósitos comerciales y el restante 5% experimentales.

Hasta la fecha, además de numerosas pequeñas instalaciones con carácter de investigación y demostrativo, se han levantado un total de 9 plantas de producción eléctrica con tecnología de colectores cilindro-parabólicos que suman un total de 350 MWe instalados:

Foto 6. Campo Acurex



Fuente: SILVA P, Manuel. Sistemas Termosolares de concentración. 2005.

Foto 7. Lazo Ace



Fuente: SILVA P, Manuel. Sistemas Termosolares de concentración. 2005.

España. Campo Acurex, 0.5MWe, Almería: Este campo consta de 20 filas de 80m de longitud cada una con orientación Este-Oeste y sistema de seguimiento al sol en un eje. La apertura de los colectores Acurex 3001 es de 1.83 m, y la superficie de captación de este campo es de 2674 m<sup>2</sup>.

Lazo Ace 20, 50kWe, Almería: Este lazo de captadores tipo Ace 20 de 2.5 m de apertura y 132.5 de longitud fue construido en la Plataforma Solar de Almería con objeto de alcanzar temperaturas cercanas a los 300°C mediante un colector cilindro-parabólico de bajo costo.

Foto 8. Lazo DISS



Fuente: SILVA P, Manuel. Sistemas Termosolares de concentración. 2005.

Lazo DISS, 0.5MWe, Almería: Este colector cilindro-parabólico de 500m de longitud está compuesto por módulos de 12.5m de estructura LS3 de 5.76 m de apertura. La superficie de captación de este campo es de 2880 m<sup>2</sup>.

Foto 9. Lazo Eurotrough



Fuente: SILVA P, Manuel. Sistemas Termosolares de concentración. 2005.

Lazo Eurotrough, 50kWe, Almería. Un consorcio de empresas europeas desarrolló un nuevo concepto de estructura metálica denominada Eurotrough, de módulos de 12.5m de longitud con apertura de 5.76m sobre las que se pueden utilizar los espejos de Pilkington y los tubos de Solel.

Foto 10. Sistema DSG



Fuente: SILVA P, Manuel. Sistemas Termosolares de concentración. 2005.

Israel. DSG System, 0.5Mwe, Ben Gurion: Instalación compuesta por 20 módulos LS3 de 2x12.5m de longitud cada uno y 5.76 m de apertura para ensayos de tubos absorbedores de Solel y producción directa de vapor.

Foto 11. Planta SEGS

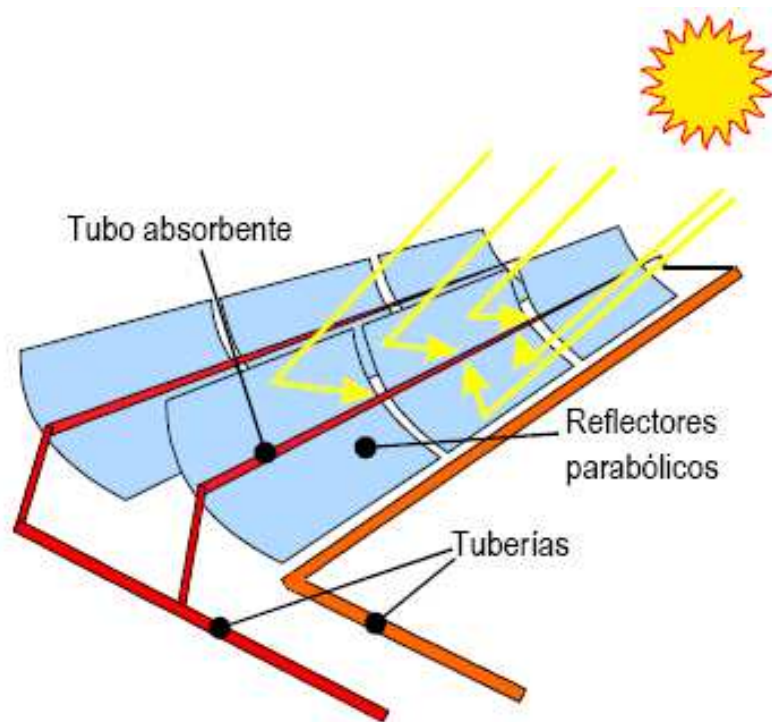


Fuente: SILVA P, Manuel. Sistemas Termosolares de concentración. 2005. USA

Plantas SEGS, 354 MWe, California. Las 9 plantas SEGS de la compañía Luz International Ltd. son un buen ejemplo de continuo desarrollo tecnológico y reducción de costes. Así, desde la primera planta hasta las últimas LS3 de 80MWe y casi 6 m de apertura se han incorporado importantes mejoras en estructuras espejos y tubos absorbedores.

**3.1.1 Componentes de un colector cilíndrico-parabólico.** Un CCP está compuesto básicamente por un espejo cilíndrico-parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor colocado en la línea focal de la parábola. La radiación solar concentrada produce el calentamiento (aumento de energía termodinámica) del fluido que circula por el interior del tubo receptor.

Figura 5. Componentes de un CCP



Fuente: Fuente: SILVA P, Manuel. Sistemas Termosolares de concentración. 2005.

Los elementos principales de un CCP son:

**El reflector cilindro parabólico.** La misión del reflector cilindro parabólico es reflejar y concentrar sobre el tubo absorbente la radiación solar directa que incide sobre su superficie. Consiste en un espejo curvado en una de sus dimensiones con forma de parábola, que concentra sobre su línea focal toda la radiación solar que atraviesa su plano de apertura. La superficie especular se consigue a base de películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da la suficiente rigidez. En la actualidad se utilizan diferentes medios soportes para la película reflectante, tales como chapa metálica, vidrio o plástico.

**El tubo absorbente.** El tubo absorbente es uno de los elementos fundamentales de todo CCP, ya que de él depende en gran medida el rendimiento global del colector. Consta de un tubo o, más frecuentemente, de dos tubos concéntricos. En este último caso, el tubo interior, por el que circula el fluido que se calienta, es metálico y el exterior de cristal. El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorptividad y una baja emisividad en el espectro infrarrojo, lo que le proporciona un elevado rendimiento térmico. El tubo de cristal que rodea al tubo interior metálico tiene la doble misión de reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo metálico y de proteger de las inclemencias meteorológicas su recubrimiento selectivo. El ambiente entre los dos tubos puede ser aire o en el mejor de los casos vacío.

**El sistema de seguimiento del sol.** Un CCP, como cualquier sistema solar de concentración, solo puede aprovechar la radiación solar directa y esto exige que el colector vaya provisto de un mecanismo de seguimiento solar que lo

mueva a lo largo del día conforme el sol describe su trayectoria diaria en el cielo. El sistema de seguimiento solar más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del colector alrededor de un eje.

**La estructura metálica.** La misión de la estructura del colector es la de dar rigidez al conjunto de elementos que lo componen, a la vez que actúa de interfase con la cimentación del colector.

### **3.2 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS DE LA SUPERFICIE REFLECTORA DEL CONCENTRADOR.**

Las características ópticas del material empleado como reflector en un colector de concentración juegan un papel de alta importancia en el desempeño global del sistema. El espejo debe tener una reflectividad apropiada aún en las condiciones normales de funcionamiento del colector, el cual está siempre expuesto al ensuciamiento por agua y polvo suspendido en el aire, y al deterioro por el ambiente mismo.

Comercialmente existen varias posibilidades en esta materia, según el propósito y el tamaño del colector. Los materiales más comunes son el acero inoxidable, el espejo de vidrio, el aluminio pulido, el espejo de plástico, entre otros. Aunque su uso está en algunos casos limitado por el costo o su alto índice de ensuciamiento y deterioro, el criterio más importante es la reflectividad del material.

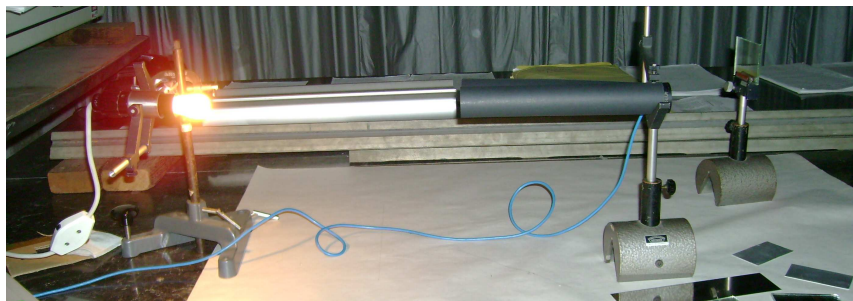
Teóricamente la determinación de la reflectancia óptica de un espejo es un procedimiento complejo y cuyos resultados en la práctica están afectados por los procesos de fabricación y otras variables, algunas veces difíciles de

controlar, por esta causa, es de mayor utilidad un procedimiento experimental que permita evaluar muestras de los materiales candidatos bajo unas condiciones controladas.

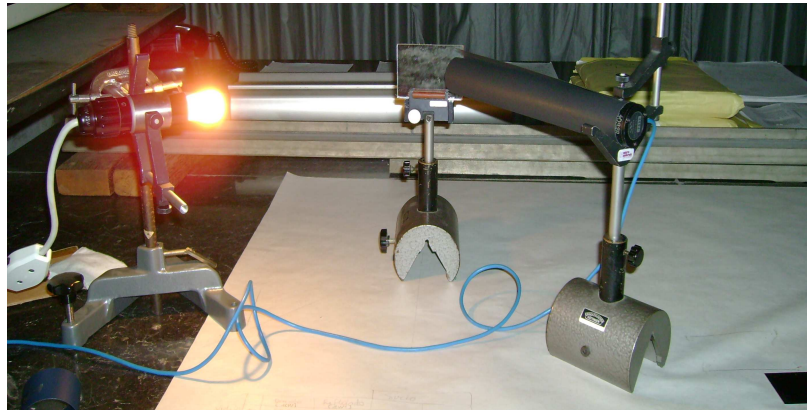
**3.2.1 Pruebas de brillo.** Si bien existen varias formas de realizar un análisis comparativo de la reflectividad de una serie de materiales, las pruebas de brillo son las más comunes, pues combinan la simplicidad en su realización, con una precisión adecuada para la mayoría de los casos.

Una prueba de brillo para determinación de la reflectividad de un material consiste básicamente en la medición por dos vías de la potencia emitida por una fuente de luz, generalmente una lámpara de resistencia. En primer lugar se mide la potencia transmitida directamente de la lámpara al sensor óptico ubicado a una cierta distancia, siendo este el valor de referencia teórica, luego se mide la potencia reflejada por el espejo de manera que el recorrido de la luz sea equivalente al del primer caso. La comparación entre estos dos valores es un indicador de la reflectividad del espejo, sin ser estrictamente la reflectancia óptica del material.

Foto 12. Pruebas de brillo



(a)Potencia transmitida directamente



(b) Potencia reflejada

**3.2.2 Descripción de la prueba.** La prueba se realizó en el laboratorio de Óptica de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander. Se usaron tres probetas de diferente especificación buscando evaluar el efecto del ensuciamiento en la reflectividad del espejo. Las tres probetas empleadas para cada material corresponden al material limpio, expuesto al ambiente por 1 y 3 semanas respectivamente.

En cuanto al espejo de vidrio se usarán probetas de tres espesores distintos, para observar como este parámetro afecta la reflectividad del material.

• Materiales:

- ✓ 3 probetas de espejo de vidrio de 50x70x5 mm.
- ✓ 3 probetas de espejo de vidrio de 50x70x3 mm.
- ✓ 3 probetas de espejo de vidrio de 50x70x2 mm.
- ✓ 3 probetas de espejo de plástico de 50x70x3 mm.
- ✓ 3 probetas de chapa de acero inoxidable 430 de 50x70x1.2 mm.
- ✓ 3 probetas de chapa de aluminio pulido de 50x70x0.5 mm.

- Instrumentos:

- ✓ Medidor de potencia óptica modelo 1815-C marca Newport<sup>12</sup>
- ✓ Sensor óptico modelo 818-SL marca Newport
- ✓ Fuente de luz, lámpara tipo resistencia de 20 Watts
- ✓ Base porta objetos

- Procedimiento:

- 1) Realizar el montaje de los diferentes elementos como lo muestra la Figura 6 para medición de la potencia óptica transmitida directamente.
- 2) Realizar la medición de la potencia óptica correspondiente montaje anterior, según la escala adecuada en el medidor.
- 3) Realizar el montaje indicado en la Figura 6a para medición de la potencia reflejada para cada una de las 18 probetas.
- 4) Medir la potencia óptica correspondiente al montaje anterior, para cada uno de los 18 casos.

---

<sup>12</sup> Optical Power Meter, model 1815-C. Para detalle de las especificaciones técnicas ver Anexo A.

Figura 6a. Esquema de montaje para medición de potencia óptica de referencia

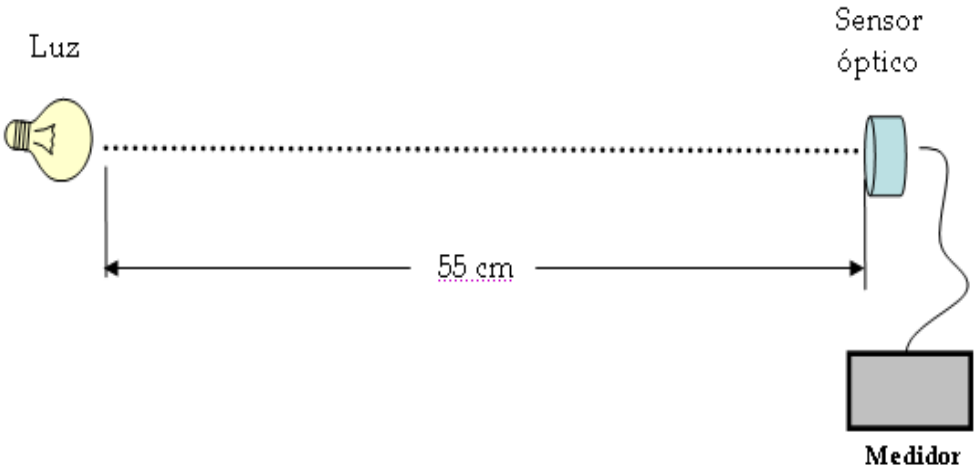
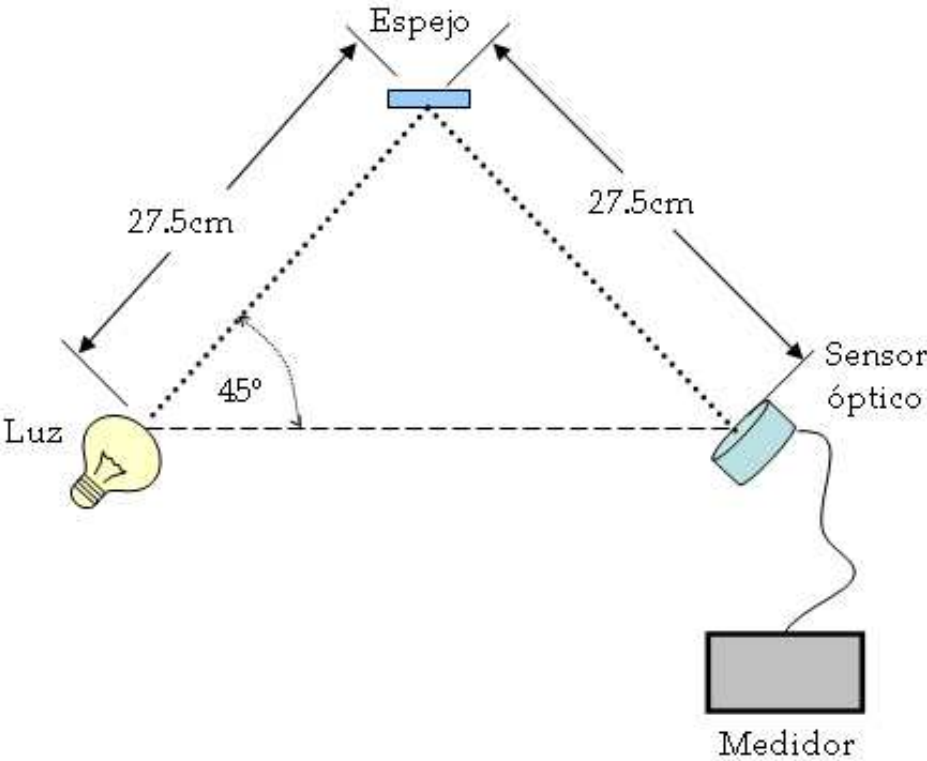


Figura 6b. Esquema de montaje para medición de potencia óptica reflejada

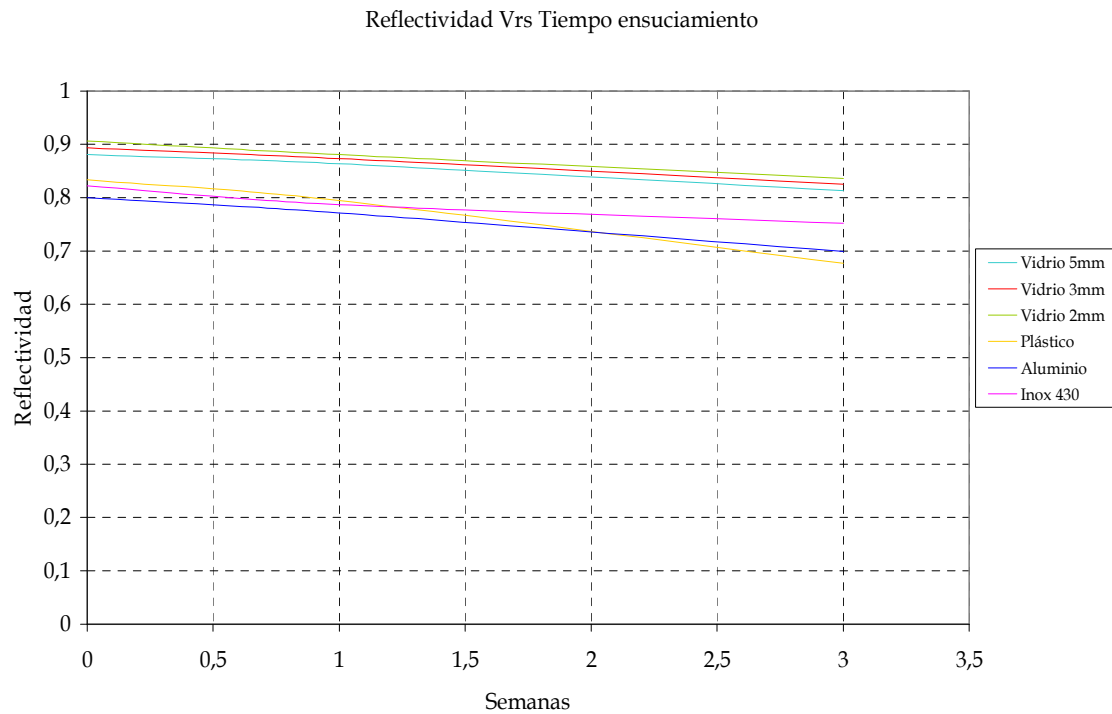


### 3.2.3 Resultados

Cuadro 26. Resultados pruebas de reflectividad óptica de materiales

PRUEBAS OPTICAS REFLECTIVIDAD MATERIALES							
MATERIAL	DIRECT ( $\mu\text{W}$ )	NUEVO		SUCIO 1 SEM		SUCIO 3 SEM	
		REFLEJ ( $\mu\text{W}$ )	$\rho$	REFLEJ ( $\mu\text{W}$ )	$\rho$	REFLEJ ( $\mu\text{W}$ )	$\rho$
Vidrio 5 mm	53,5	47,1	0,88	46,2	0,86	43,5	0,813
Vidrio 3 mm	53,5	47,8	0,893	46,7	0,87	44,15	0,825
Vidrio 2 mm	53,5	48,5	0,907	47,1	0,88	44,7	0,836
Plástico	53,5	44,6	0,834	42,5	0,79	36,2	0,677
Alum pulido	53,5	42,8	0,8	41,25	0,77	37,4	0,699
Acero Inox 430	53,5	44	0,822	42,1	0,79	40,2	0,751

Gráfica 16. Curva de variación de la reflectancia óptica por ensuciamiento



Las pruebas realizadas permiten hacer varias observaciones interesantes. El espejo de vidrio presenta la mayor reflectancia óptica de los materiales ensayados, evidenciándose, además que hay variaciones de la propiedad según el espesor del espejo, con valores cercanos a 0.91 para el de 2 mm y 0.88 para el de 5mm. Respecto al ensuciamiento, el vidrio presentó una disminución casi constante de 0.3% por cada día de exposición a la intemperie.

El espejo de plástico, aunque posee una reflectividad relativamente alta, ésta disminuye bastante rápido por efecto del ensuciamiento; la causa más probable de este fenómeno es la mayor facilidad para rayarse al contacto con las partículas suspendidas en el aire del ambiente.

Algo semejante sucede con el aluminio, que pierde su especularidad con mayor velocidad al verse expuesto al ambiente, pero además posee una reflectividad comparativamente baja.

Finalmente, el acero inoxidable, parece una buena opción para aplicaciones de larga vida, puesto que tiene una curva de ensuciamiento casi constante, similar a la del vidrio, y además una buena resistencia a los daños del ambiente.

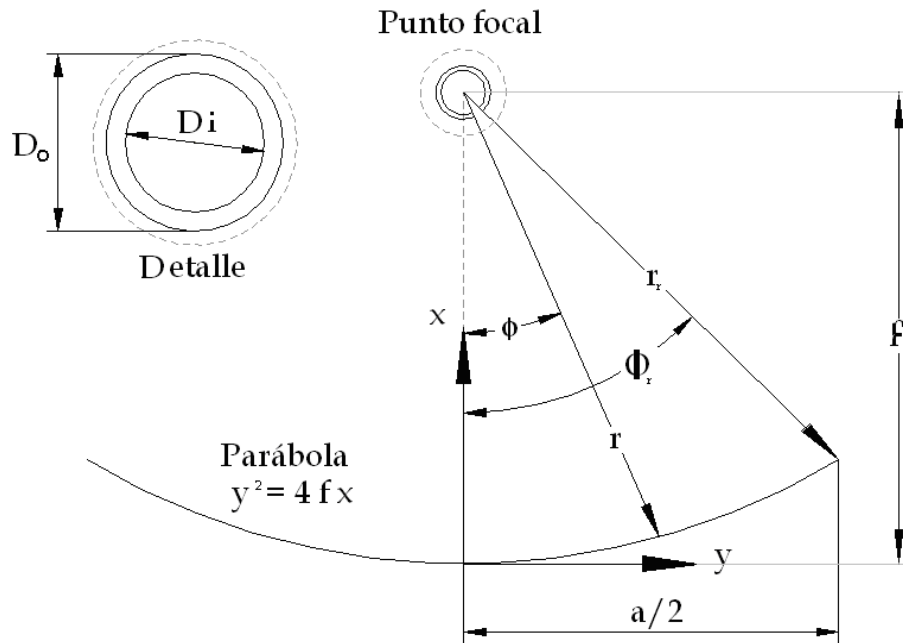
### **3.3 EFECTO DE LA GEOMETRÍA DEL REFLECTOR EN LA EFICIENCIA ÓPTICA DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO.**

El colector cilíndrico parabólico recibe su nombre de la forma del espejo reflector y una buena parte de su desempeño global está ligada a las dimensiones de los parámetros geométricos del mismo.

Para conocer la manera como este tipo de colectores funciona es preciso entender las propiedades ópticas y la clase de imágenes que ellos producen, que principalmente están asociadas a su geometría.

### 3.3.1 Geometría del concentrador cilíndrico parabólico

Figura 7a. Sección de un concentrador lineal parabólico en coordenadas x,y.



Fuente: adaptada de “Solar Engineering of Thermal Process”, J. A. Duffie and W. A. Beckman, Capítulo 7, Wiley & Sons, Inc. 1991.

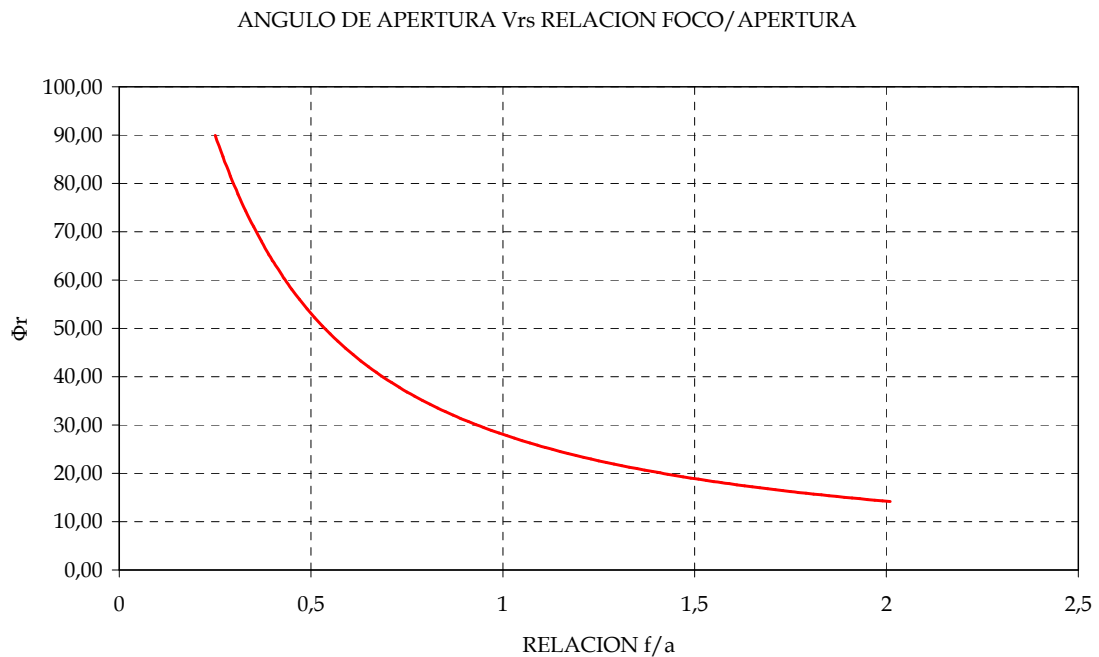
En la anterior se muestran los principales parámetros geométricos del concentrador parabólico, la apertura  $a$ , la distancia focal  $f$  y el ángulo de apertura  $\Phi_r$ , los cuales están relacionados mediante las expresiones:

$$\Phi_r = \tan^{-1} \left[ \frac{8(f/a)}{16(f/a)^2 - 1} \right] \quad (3.3)$$

$$\Phi_r = \text{sen}^{-1}\left(\frac{a}{2r_r}\right) \quad (3.4)$$

El radio mayor de la sección parabólica del concentrador,  $r_r$ , es además un parámetro de referencia empleado en el dimensionamiento del colector, como se verá más adelante.

Gráfica 17. Angulo de apertura como función de la relación f/a



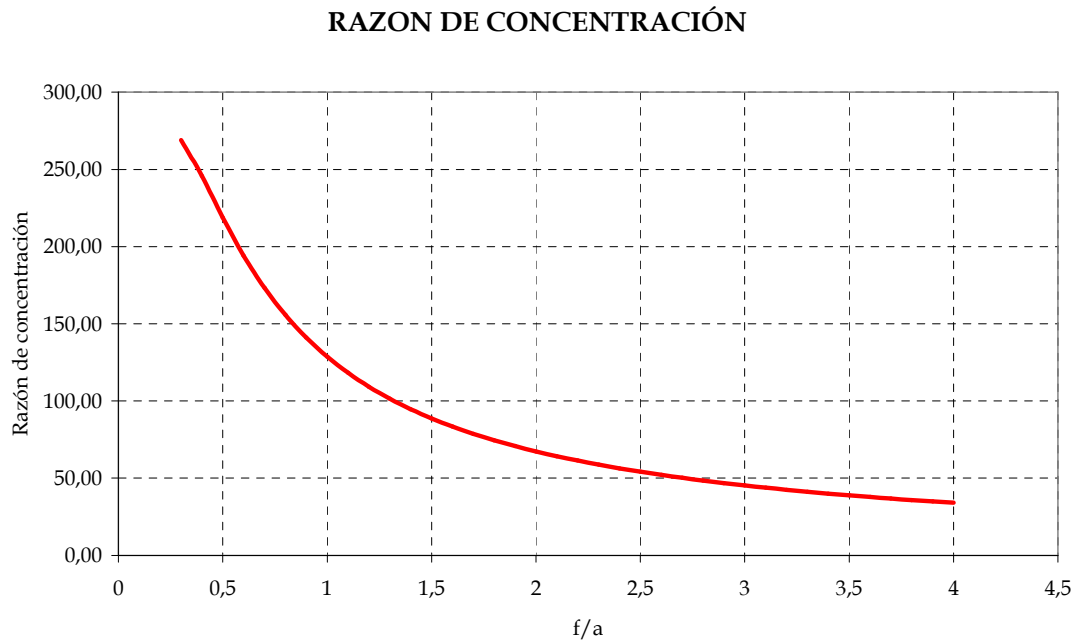
**3.3.2 Relación de concentración.** Se llama así a la razón entre el área de apertura del concentrador y el área de la superficie del absorbedor, y puede obtenerse por la ecuación siguiente:

$$C = \frac{8 * \text{sen}\Phi_r}{\pi * \epsilon} \quad (3.5)$$

Donde  $\epsilon$  es el ancho angular del rayo de luz incidente y tiene un valor de 0.00931 radianes (ver Foto 4).

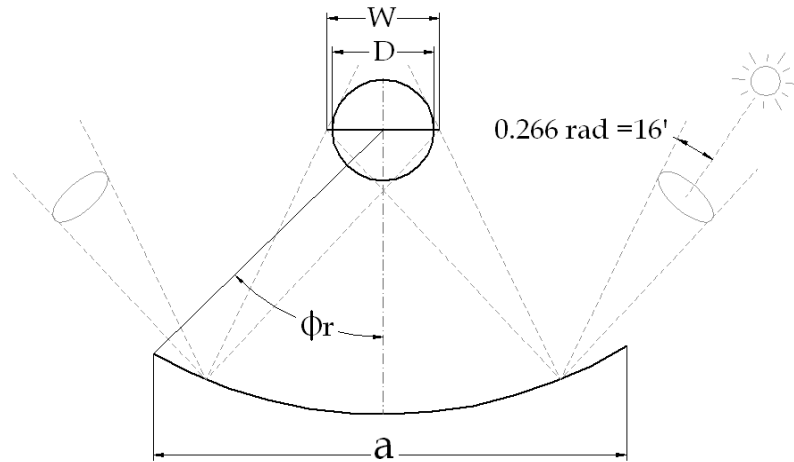
Una razón de concentración grande garantiza la posibilidad de obtener temperaturas mayores, pero también genera mayores pérdidas térmicas desde el absorbedor hacia el ambiente, disminuyendo con esto la eficiencia global del sistema. Por este motivo existen valores adecuados de  $C$  para obtener el mejor beneficio deseable.

Gráfica 18. Razón de concentración como función de la relación  $f/a$



**3.3.3 Tamaño del Absorbedor.** Un rayo incidente de radiación solar es un cono con un ancho angular de  $16'$  (ver figura 4), es decir,  $0.266^\circ$ , de modo que al ser reflejado su imagen tendrá un tamaño que varía según el punto de incidencia en el espejo, siendo mayor, cuanto más alejado se esté del vértice de concentrador.

Figura 7b. Imagen proyectada por un concentrador lineal parabólico



Una superficie localizada en el punto focal deberá tener un tamaño mínimo requerido para interceptar la mayor cantidad de la radiación reflejada. Para reflectores especulares ideales, puede obtenerse a partir de la expresión siguiente, si el receptor es cilíndrico o plano respectivamente:

$$D = \frac{a * \text{sen } 0.266}{\text{sen } \Phi_r} \quad (3.6)$$

$$W = \frac{a * \text{sen } 0.266}{\text{sen } \Phi_r * \cos(\Phi_r + 0.267)} \quad (3.7)$$

Donde:

D: es el diámetro para un receptor cilíndrico.

W: es el ancho para un receptor plano.

a: es la apertura del colector.

$\Phi_r$ : es el ángulo de apertura.

Se ha dicho que la cantidad de energía captada depende directamente de la apertura del colector, sin embargo, distancias focales muy grandes, resultan poco adecuadas en términos del tamaño de la imagen formada, motivo por lo

cual, la eficiencia óptica de un colector, depende en buena parte de estos parámetros.

De manera semejante, el tamaño de la imagen, determina las dimensiones del absorbedor y por consiguiente la relación de concentración, que a su vez, está estrechamente ligada a la eficiencia térmica del sistema, de modo que el desempeño global de un colector cilíndrico parabólico resulta una función de la relación  $f/a$  del concentrador.

**3.3.4 Factor de interceptación.** Es una medida de la porción de la imagen solar formada en el foco del concentrador parabólico, que es interceptada por el absorbedor. Este parámetro es empleado para evaluar el desempeño óptico un colector solar de concentración, asociado a factores como las características ópticas, geométricas y térmicas del mismo. Puede calcularse según la expresión siguiente:

$$F_{\varphi} = 1 - e^{-\left(\frac{h \cdot r}{r_r}\right)^2} \quad (3.8)$$

Donde  $r$  y  $r_r$  son el radio del absorbedor y el radio mayor del concentrador parabólico respectivamente y  $h$  es el coeficiente normal de distribución de flujo en el foco del concentrador dado por la ecuación,

$$h = \frac{I_{m \text{ ax}} \cdot a \cdot \sqrt{\pi}}{2} \quad (3.9)$$

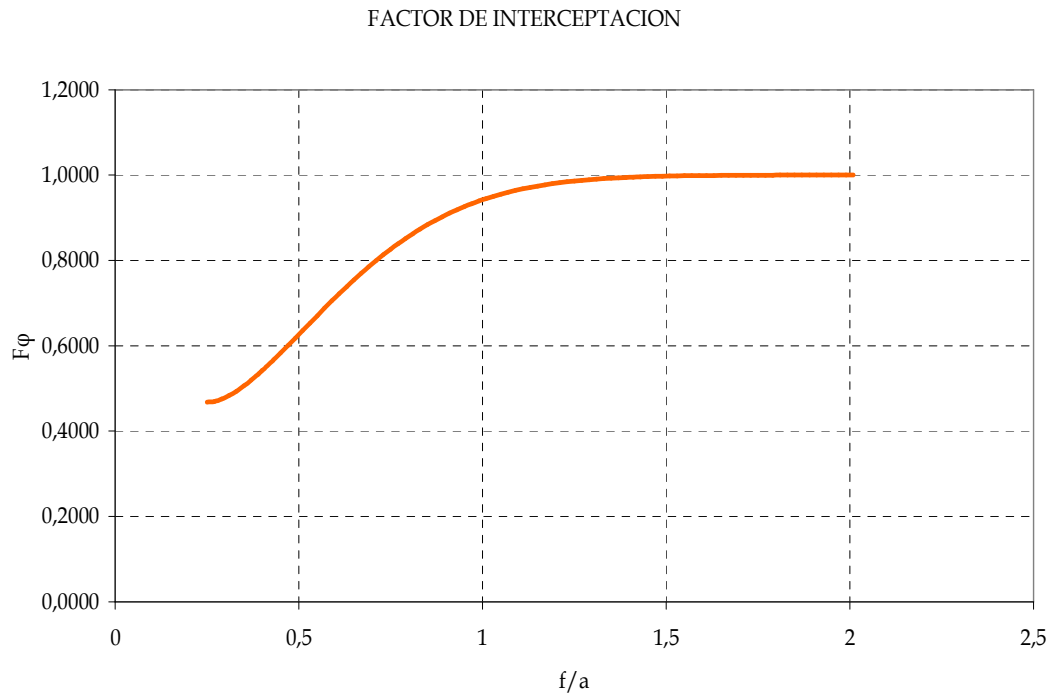
La densidad de flujo máxima concentrada,  $I_{m \text{ ax}}$ , se calcula como

$$I_{m \text{ ax}} = \frac{I \cdot \rho}{\pi}$$

Con  $I = 636 \text{ W/m}^2$  para la ciudad de Bucaramanga.

En la gráfica siguiente se observa mejor la relación entre la geometría del concentrador y el factor de interceptación.

Gráfica 19. Factor de interceptación como función de la relación  $f/a$



Desde una perspectiva puramente óptica sería deseable tener una relación  $f/a$  cercana a 2, para obtener un factor de interceptación del 100%, sin embargo, en la práctica esto implicaría un tamaño del absorbedor mayor al requerido y además distancias focales muy grandes. En este sentido, varios estudios<sup>13</sup> han mostrado que para relaciones de concentración entre 12 y 60 lo recomendable es un valor de  $F\phi$  entre 90-95%. Valores mayores sólo son aconsejables en colectores con relaciones de concentración elevadas.

---

<sup>13</sup> Lóf & Duffie en 1963 demostraron que para un amplio rango de condiciones, valores de  $F\phi$  cercanos al 95% permiten un buen equilibrio entre las ganancias térmicas y las pérdidas ópticas.

### 3.3.5 Evaluación óptica del colector cilíndrico parabólico de concentración.

La evaluación óptica de un colector de concentración busca estimar el efecto de las características ópticas de sus componentes principales, el reflector, el absorbedor con su cubierta de cristal, las cuales varían de manera sustancial dependiendo de su geometría, y arreglo.

Para evaluar teóricamente el rendimiento óptico de un concentrador se puede de manera relativa o absoluta, en este último caso se procede a partir del concepto general de radiación absorbida por unida de área sin sombra, definido por la relación siguiente

$$S = I_b * (\rho * \tau * \alpha) * F_{\Phi} * K_{\theta} \quad (3.10a)$$

donde  $\rho$  es la reflectancia especular del concentrador,  $\tau$ , la trasmisividad de la cubierta de vidrio,  $\alpha$ , la absortancia del absorbedor y  $F_{\Phi}$  es el factor de interceptación.

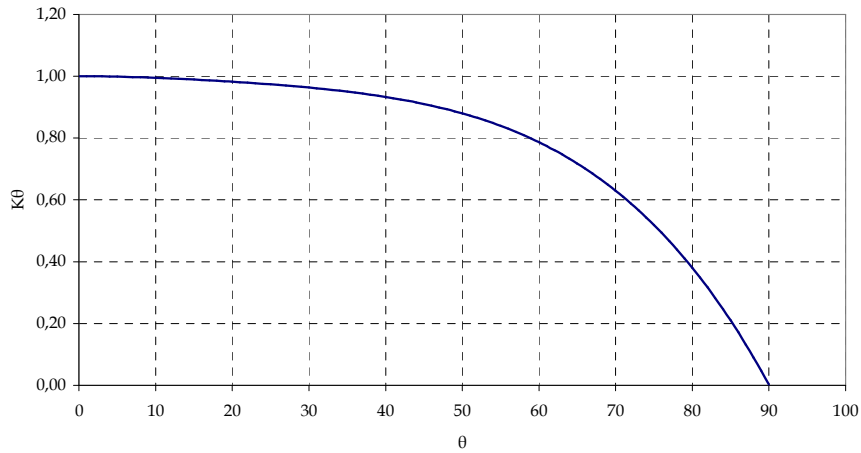
El término  $K_{\theta}$ , (Ver Gráfica 20) es un coeficiente de corrección debido al efecto que tiene el ángulo de incidencia en las propiedades ópticas del absorbedor y la cubierta de vidrio, el cual ha sido estimado experimentalmente<sup>14</sup> como función de  $\theta$ , de la forma

$$K_{\theta} = 1 - 6.74 \times 10^{-5} * \theta^2 + 1.64 \times 10^{-6} * \theta^3 - 2.51 \times 10^{-8} * \theta^4$$

---

<sup>14</sup> Sandia Excel (1980) empleando un colector con cubierta de vidrio y absorbedor con recubrimiento selectivo a partir de negro cromo, con relación de concentración de 67, obtuvo, para diferentes condiciones, una ecuación experimental que relacionaba el ángulo de incidencia con las características ópticas del colector.

Gráfica 20. Factor modificador por ángulo de incidencia



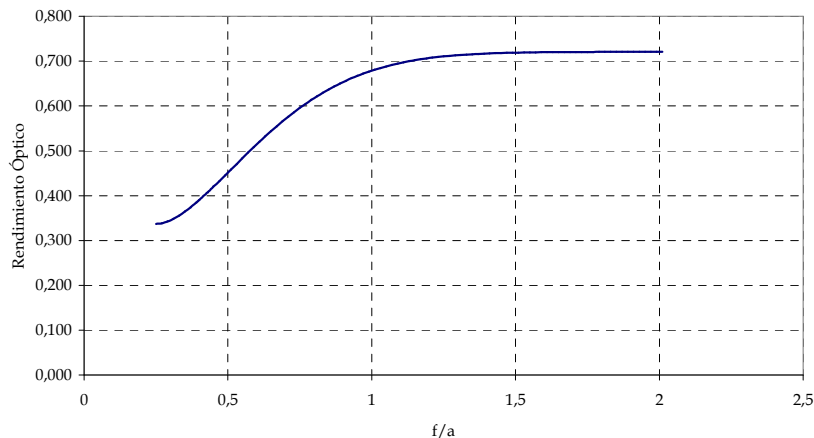
Fuente: adaptada de Gaul and Rabl (1980)

De otro modo, si lo que se desea es determinar el rendimiento óptico de manera relativa respecto a la energía incidente en la apertura del colector en un tiempo determinado, la relación será la siguiente:

$$\eta_{optico} = \frac{S}{I_b} \quad (3.10b)$$

Y puesto que S resulta ser función de la relación  $f/a$ , será posible expresar el rendimiento óptico del colector como función de estos parámetros geométricos del colector, resultando la siguiente gráfica.

Gráfica 21. Rendimiento Óptico de un CCP como función de la relación  $f/a$ , para  $\rho = 0.88$ ,  $\alpha = 0.91$ ,  $\tau = 0.9$  y  $\theta = 0^\circ$  de 1m de apertura.



En esta gráfica se observa que el rendimiento óptico máximo para un colector de 1m de apertura se obtiene para  $f/a = 2$ , lo cual es recomendable cuando se desean razones de concentración elevadas, es decir temperaturas en el absorbedor superiores a los 500° C. Cabe recordar que en estos casos las pérdidas térmicas suelen ser elevadas dada la mayor diferencia entre la temperatura del absorbedor y la del ambiente.

La decisión de optar por un rendimiento óptico elevado, depende del servicio del colector, es decir de los requerimientos en términos de la temperatura del fluido y de la posibilidad de mantener las pérdidas térmicas en niveles aceptables sin incrementar excesivamente los costos del sistema.

### **3.4 DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN CCP**

Para evaluar el rendimiento térmico de un colector de concentración cilíndrico parabólico, se tienen en cuenta, tanto pérdidas ópticas como térmicas. Las primeras estimadas como se mostró en la sección anterior y las últimas como se verá a continuación.

En términos generales cada colector presenta un comportamiento característico según su configuración geométrica, haciendo que la evaluación detallada de pérdidas y ganancias energéticas sea complicado, no obstante, existe un procedimiento<sup>15</sup> aplicable la mayoría de los casos, donde las ganancias y pérdidas son evaluadas en función de las características del absorbedor mediante la utilización de un coeficiente global de pérdidas  $U_L$  un

---

<sup>15</sup> Para ver con detalle el procedimiento de evaluación térmica de un colector de concentración, remítase a Diffie & Beckman, Capítulos 3 y 7.

factor de flujo  $F_R$ , para la corrección del gradiente de temperatura del absorbedor.

El que el calor útil transferido al fluido en términos de la temperatura de entrada al absorbedor y la del ambiente se puede obtener como

$$Q_u = F_R A_a \left[ S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_i - T_a) \right] \quad (3.11)$$

Las pérdidas térmicas son debidas a la transferencia de calor desde el absorbedor hacia los alrededores por, convección, radiación y conducción.

$$U_L = h_w + h_r + U_{cond} \quad (3.12)$$

La convección se calcula en función de las características del flujo de la manera tradicional, a partir de la expresión

$$h_w = Nu \frac{k}{D} \quad (3.13)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica del material,  $D$  el diámetro del tubo y  $Nu$ , el número de Nusselt, que debe calcularse según el caso como

$$Nu = 0.4 + 0.54 Re^{0.52} \quad \text{para } 0.1 < Re < 1000 \quad (3.14)$$

$$Nu = 0.3 Re^{0.6} \quad \text{para } 1000 < Re < 50000 \quad (3.15)$$

El número de Reynolds se obtiene mediante

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (3.16)$$

Siendo  $\rho$ ,  $V$ ,  $\mu$  la densidad, velocidad y viscosidad dinámica del aire, respectivamente.

Las pérdidas por radiación, asumiendo que no hay gradiente de temperatura en el tramo de tubo, son de la forma

$$h_r = 4 * \sigma * \epsilon * \bar{T}^3 \quad (3.17)$$

T es la temperatura media del absorbedor y  $\epsilon$ , la emisividad de la superficie.

La constante de Stefan-Boltzmann es  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

Si el espacio anular entre el absorbedor y la cubierta de cristal es evacuado, la convección entre estos dos elementos es despreciables y el coeficiente global de pérdidas se reduce a

$$U_L = \left[ \frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a}) * A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (3.18)$$

Los términos  $h_{r,c-a}$  y  $h_{r,r-a}$  son las perdidas por radiación desde la cubierta de vidrio hacia el ambiente y desde el absorbedor hacia la cubierta, respectivamente.

Inicialmente debe asumirse una temperatura de la cubierta unos 20° C por encima de la temperatura del ambiente y al final del proceso hacer un chequeo, suponiendo que la radiación absorbida por ésta es despreciable de modo que

$$T_c = \frac{A_r h_{r,r-c} T_r + A_c (h_{r,c-a} + h_w) T_a}{A_r h_{r,r-c} + A_c (h_{r,c-a} + h_w)} \quad (3.19)$$

Esta temperatura es aproximada y de ser necesario debe realizarse una segunda iteración.

Conocida la temperatura de la cubierta del receptor, se calculan las perdidas por radiación desde la cubierta hacia el ambiente como

$$h_{r,c-a} = 4 * \epsilon * \sigma * \bar{T}_{ca}^3 \quad (3.20)$$

En este caso como la temperatura de la cubierta y la ambiente son cercanas, se emplea una temperatura promedio entre las dos.

Las pérdidas desde el receptor hacia la cubierta deben calcularse por

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma (T_c^2 + T_r^2)(T_c * T_r)}{\frac{1 - \epsilon_r}{\epsilon_r} + \frac{1}{F_{r-c}} + \frac{(1 - \epsilon_c)A_r}{\epsilon_c A_c}} \quad (3.21)$$

Los coeficiente r, c hacen referencia al receptor y la cubierta respectivamente. El termino  $F_{r-c}$  es el factor de visión del receptor hacia la cubierta, que en este caso por tratarse de cilindros concéntricos, es  $F_{r-c} = 1$ .

Si la temperatura a lo largo del tubo presenta un gradiente, como sucede en la mayoría de los casos, excepto cuando hay cambio de fase en su interior, debe aplicarse al cálculo anterior una corrección mediante un factor de flujo  $F_R$  tal como se presenta a continuación.

En primer lugar, se calcula el coeficiente de transferencia global desde los alrededores hacia el fluido en función de los diámetros interno  $D_i$  y externo  $D_o$  del tubo, mediante la expresión

$$U_o = \left[ \frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o / D_i)}{2 k} \right]^{-1} \quad (3.22)$$

$h$  es el coeficiente de convección por el interior del tubo y  $k$  es la conductividad del material. La relación entre el coeficiente global de transferencia hacia el fluido y el coeficiente global de pérdidas se denomina factor de eficiencia del colector  $F'$  y tiene la forma

$$F' = \frac{U_o}{U_L} = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o / D_i)}{2 k}} \quad (3.23)$$

De esta manera el factor de corrección por gradiente de temperatura, resulta

$$F_R = F'' * F' \quad (3.24)$$

Donde  $F''$  es el factor de flujo del colector dado por la expresión

$$F'' = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L F'} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{A_r U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (3.25)$$

Si se desea calcular la temperatura de salida del fluido a la salida del absorbedor se puede emplear la expresión

$$T_o = T_i + \frac{Q_u}{\dot{m} C_p} \quad (3.26)$$

Para el cálculo del coeficiente de convección al interior del absorbedor  $h_{fi}$  se pueden emplear las correlaciones<sup>16</sup> tradicionales de la transferencia de calor

$$h_{fi} = \frac{Nu * k}{Di} \quad (3.27a)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3.27b)$$

Para flujo turbulento completamente desarrollado en tubería lisa y números de Prandtl entre 0.6 y 100.

Una forma, un poco más precisa, de calcular el número de Nusselt es

$$Nu = 0.0214(Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4} \quad (3.28)$$

para  $0.5 < Pr < 1.5$        $10^4 < Re < 5 \times 10^6$

$$Nu = 0.012(Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} \quad (3.29)$$

para  $1.5 < Pr < 500$        $3000 < Re < 10^6$

Las propiedades del fluido se pueden calcular a la temperatura promedio entre la entrada y la salida del tubo absorbedor.

---

<sup>16</sup> Para ver con detalle el cálculo del coeficiente de convección forzada, remítase a J. P. Holman, Transferencia de Calor.

**3.4.1 Efecto de las características del tubo absorbedor en el rendimiento térmico del colector cilíndrico parabólico de concentración.** Se ha visto que el absorbedor juega un papel importante en el desempeño global del colector cilíndrico parabólico, tanto por sus características geométricas, como por su configuración.

El absorbedor empleado en este tipo de colectores es generalmente de geometría circular, de modo que las variaciones esenciales están relacionadas con su diámetro, material y arreglo. Un arreglo típico consiste de un tubo único con recubrimiento selectivo para mejorar su absorptividad, provisto de una cubierta de cristal de manera que no esté expuesto directamente al ambiente. El espacio entre el absorbedor y la cubierta puede estar evacuado en aquellos casos en que las características del recubrimiento lo exijan o simplemente servir como aislamiento contra las pérdidas convectivas.

A fin de observar el efecto de dichos elementos en el desempeño global del un colector con características dadas, se evaluarán las siguientes configuraciones:

- A. Tubo de acero al carbono sin cubierta.
- B. Tubo de cobre aleado sin cubierta.
- C. Tubo de acero al carbono con recubrimiento selectivo y cubierta de cristal.
- D. Tubo de cobre aleado con recubrimiento selectivo y cubierta de cristal.

En todos los casos se emplearán unas mismas características del sistema resumidas a continuación:

Irradiación directa incidente,  $I_b = 500 \text{ W/m}^2$

Temperatura ambiente  $T_a = 25^\circ\text{C}$

Temperatura de entrada  $T_i = 40^\circ\text{C}$

Temperatura del receptor  $T_r = 150$

Flujo másico de agua  $\dot{m} = 0.02 \text{ kg/seg}$

Reflectancia óptica del concentrador,  $\rho = 0.9$

Diámetro interior del absorbedor  $D_i = 9 \text{ mm}$

Diámetro exterior del absorbedor  $D_o = 10 \text{ mm}$

Diámetro interior cubierta  $d_i = 22 \text{ mm}$

Diámetro exterior cubierta  $d_o = 25 \text{ mm}$

Área del colector  $A_a = 1 \text{ m}^2$

Velocidad del viento  $V = 5 \text{ m/seg}$

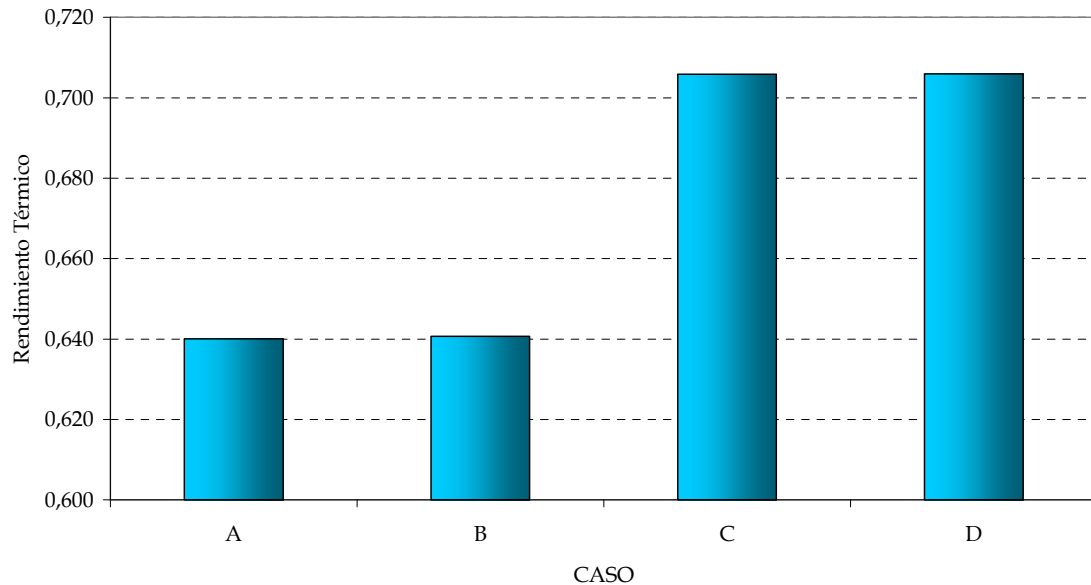
Cuadro 27. Resultados Evaluación del Rendimiento de un CCP

DESEMPEÑO TERMICO DE UN CCP																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Gb</th> <th>Ta</th> <th>Ti</th> <th>Tr</th> <th>mfi</th> <th>Va</th> <th><math>\rho</math></th> <th><math>D_i</math></th> <th><math>D_o</math></th> <td colspan="2"></td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>500</td> <td>25</td> <td>40</td> <td>150</td> <td>0,02</td> <td>5</td> <td>0,9</td> <td>0,009</td> <td>0,01</td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>											Gb	Ta	Ti	Tr	mfi	Va	$\rho$	$D_i$	$D_o$			500	25	40	150	0,02	5	0,9	0,009	0,01													
Gb	Ta	Ti	Tr	mfi	Va	$\rho$	$D_i$	$D_o$																																			
500	25	40	150	0,02	5	0,9	0,009	0,01																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Características del flujo interno</th> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <th>Cp</th> <th><math>\rho</math></th> <th><math>\mu_{fi}</math></th> <th>kfi</th> <th>Prfi</th> <th>Refi</th> <th>Nufi</th> <th>hfi</th> <td colspan="3"></td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4179</td> <td>997</td> <td>6,6E-04</td> <td>0,63</td> <td>4,34</td> <td>4320</td> <td>25,4</td> <td>1769,8</td> <td colspan="3"></td> </tr> </tbody> </table>											Características del flujo interno											Cp	$\rho$	$\mu_{fi}$	kfi	Prfi	Refi	Nufi	hfi				4179	997	6,6E-04	0,63	4,34	4320	25,4	1769,8			
Características del flujo interno																																											
Cp	$\rho$	$\mu_{fi}$	kfi	Prfi	Refi	Nufi	hfi																																				
4179	997	6,6E-04	0,63	4,34	4320	25,4	1769,8																																				
CASO				Conveccion			Radiacion																																				
	$\alpha$	$\tau$	S	Rea	Nua	hw	$\epsilon_r$	kr	hr,ca	hr,rc																																	
A	0,91	1,00	401,3	2,3E+03	31,0	93,55	0,98	48	16,82	0,0																																	
B	0,91	1,00	401,3	2,3E+03	31,0	93,55	0,98	385	16,82	0,0																																	
C	0,91	0,90	361,2	8,0E+03	65,9	69,06	0,98	48	5,39	10,8																																	
D	0,91	0,90	361,2	8,0E+03	65,9	69,06	0,98	385	5,39	10,8																																	

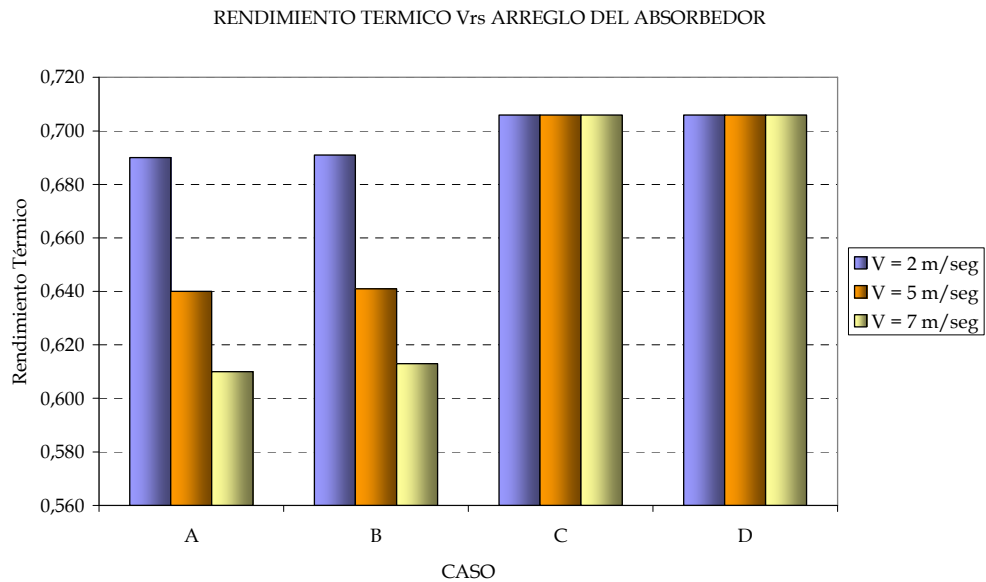
$d_i$	$d_o$	$F_\Phi$	$A_r$	$A_c$	$\epsilon_c$				
0,022	0,025	0,98	0,031	0,079	0,88				
<b>Propiedades del aire exterior</b>									
$T_f$	$\rho_a$	$\mu$	$k_a$	$P_{ra}$					
87,5	0,950	2,1E-05	0,030	0,700					
26	1,177	1,8E-05	0,026	0,708					
<b>Indicadores de desempeño Térmico</b>									
$UL$	$U_o$	$F'$	$q'$	$F''$	$FR$	$Q_u$	$\eta_{ter}$	$T_o$	
110,38	103,1	0,934	25,8	0,981	0,92	320,0	0,640	43,83	
110,38	103,2	0,935	25,8	0,981	0,92	320,4	0,641	43,83	
10,80	10,73	0,993	248,0	0,998	0,99	352,9	0,706	44,22	
10,80	10,73	0,993	248,0	0,998	0,99	353,0	0,706	44,22	

Gráfica 22. Efecto de las características del absorbedor en el rendimiento térmico de un CCP para una velocidad del viento  $V=5\text{m/s}$

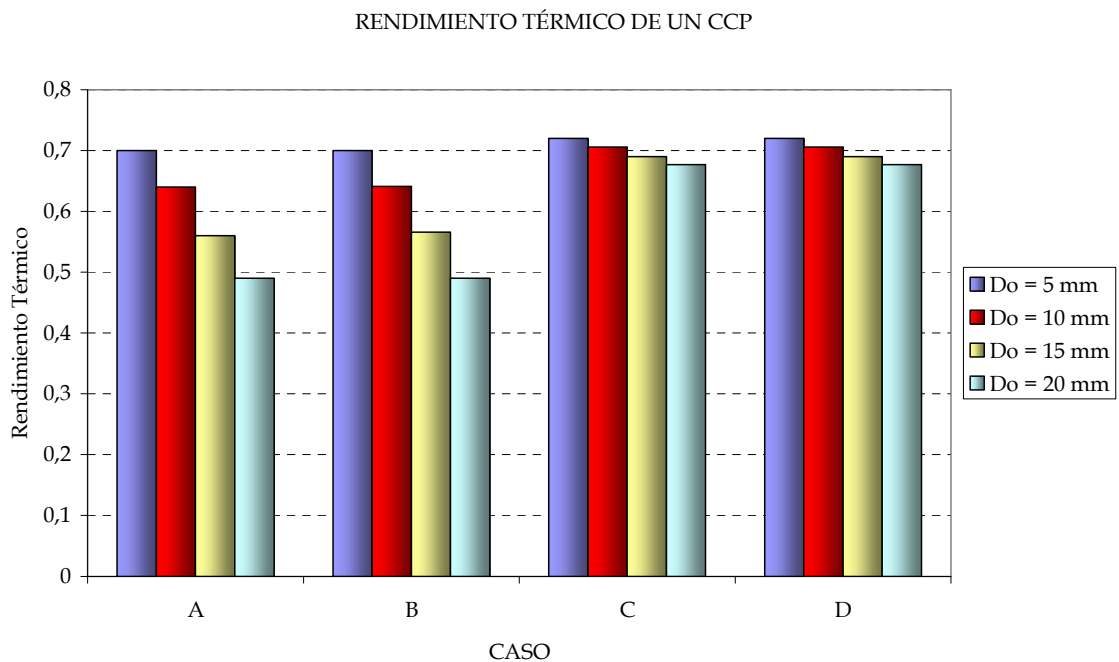
DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN CCP



Gráfica 23. Variación del rendimiento térmico de un CCP como función del arreglo del absorbedor para diferentes velocidades del viento exterior, para un diámetro exterior del absorbedor  $D_o = 10\text{mm}$



Gráfica 24. Variación del rendimiento térmico de un CCP como función del arreglo del absorbedor para diferentes diámetros del tubo para una velocidad del viento  $V = 5\text{m/s}$



Los resultados anteriores permiten observar claramente varias situaciones respecto al efecto de la configuración del tubo absorbedor en el rendimiento global de un Colector de concentración cilíndrico parabólico.

La más evidente de todas, esta asociada al empleo de una cubierta de cristal para disminuir las pérdidas por convección desde el tubo absorbedor hacia el ambiente, efecto que se incrementa cuando la velocidad del aire crece. Para una velocidad del aire de 2 m/seg, en los casos A y B donde el absorbedor está expuesto directamente al ambiente, se presentó un rendimiento máximo cercano al 68% frente al 71% obtenido al emplear una cubierta de vidrio, casos C y D. Si la velocidad del aire exterior aumenta hasta 7m/s, la diferencia en el rendimiento térmico será cercana al 10%.

Otra situación que se evidencia es la disminución del rendimiento térmico a medida que aumenta el diámetro del absorbedor, debido al incremento del área expuesta a las pérdidas térmicas. Este comportamiento es menos relevante si se emplea cubierta de cristal, es decir en los casos C y D.

#### **4. DESARROLLO DE UN MODELO EXPERIMENTAL DE COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO.**

Se ha visto cómo las características de los elementos constitutivos del Colector cilíndrico parabólico afectan su desempeño, juntándose así, las herramientas necesarias para abordar el desarrollo de un modelo que permita la adquisición de suficiente información experimental para evaluar la viabilidad de esta tecnología en aplicaciones de mediana temperatura.

En años anteriores<sup>17</sup> se han desarrollado prototipos que permitieron obtener temperaturas cercanas a los 60°C, empleando las herramientas y recursos disponibles en la industria local. En esta oportunidad se pretende desarrollar un modelo a pequeña escala, de fácil operación, que incluya algunas mejoras constructivas respecto a los anteriores, con el interés principal de conseguir mayores temperaturas del fluido de trabajo.

Algunas restricciones en cuanto al tamaño, presupuesto y al carácter desarmable del modelo son determinantes desde el inicio en su diseño y construcción. A continuación se presenta un resumen de este proceso, cuyas bases son el trabajo de investigación realizado en meses anteriores y la experiencia de quienes han abierto brecha en esta línea de trabajo.

---

<sup>17</sup> En 2003 el CEIAM patrocinó el desarrollo de un modelo experimental como herramienta para la desinfección térmica del agua, lográndose temperaturas cercanas a los 60°C. En 2006 otro colector fue construido para aplicaciones foto- catalíticas, consiguiéndose aumentar en unos 6°C la temperatura de fluido de trabajo.

#### 4.1 SISTEMA DE SEGUIMIENTO U ORIENTACIÓN DEL COLECTOR

La primera situación que debió definirse es si el colector emplearía un sistema de seguimiento de la trayectoria del sol, o si tendría una orientación fija. Para determinar esto se consideraron principalmente el rendimiento, los costos y la facilidad operacional de las principales opciones.

El efecto de la orientación del colector en el rendimiento, se mide por la cantidad de energía que llega al absorbedor, que a su vez está relacionada con el ángulo de incidencia, como se determinó en la sección 2.1 y se muestra en la Gráfica 15.

Es un hecho que un sistema de seguimiento continuo de la trayectoria del sol, permite aprovechar una mayor cantidad de energía que cualquier otra opción, sin embargo los resultados muestran una diferencia no tan significativa (5.8%) respecto a un sistema con orientación fija inclinado un ángulo igual a la latitud del sitio, que en este caso, para la ciudad de Bucaramanga, es de  $7.14^\circ$  hacia el sur.

Ahora bien, en términos de los costos de instalación, el sistema de seguimiento implica un aumento del 20%, que equivale a unos \$300.000 por cada metro cuadrado de colector. Estos costos se mantienen casi fijos independientemente de la capacidad o tamaño del colector, solo disminuyen comparativamente cuando se trata de sistemas de generación de energía eléctrica.

Finalmente, en cuanto al costo y facilidad de operación, el sistema de seguimiento requiere de un suministro de energía eléctrica para su

funcionamiento, que para sistemas a pequeña escala podría representar el 30% de la energía aprovechada, lo cual es poco eficiente. En aplicaciones a gran escala estos costos se reducen al 2%, haciéndolo mucho más viable.

Así pues, tratándose de un trabajo con intereses investigativos, la elección de la alternativa se ha hecho con el criterio del menor costo de instalación-operación y con el ánimo de explorar alternativas distintas a las utilizadas.

Se optó por un sistema con orientación fija inclinado un ángulo de  $7.14^\circ$  respecto a la horizontal y la posibilidad ajustarlo manualmente para mejorar los resultados.

#### **4.2 CONCENTRADOR - REFLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO**

Como se ha dicho, el concentrador, es el elemento más importante del colector cilíndrico parabólico, por cuanto de su diseño y construcción depende la posibilidad de aprovechar la energía solar de manera eficiente y acorde a los requerimientos de la aplicación. Dos características fundamentales hacen de un espejo el concentrador correcto, la forma y el material más apropiados según el servicio específico del sistema.

En cuanto al material, diversas alternativas reúnen los requisitos principales. La selección del tipo de espejo a utilizar tuvo como presupuesto primario el estudio de reflectividad y ensuciamiento documentado en la sección 3.2. Los resultados de dichas pruebas, condensados en el cuadro 26 y la Gráfica 16, mostraron que el espejo de vidrio y el acero inoxidable tienen las dos características indispensables en un buen colector solar, una excelente reflectividad óptica y una buena capacidad de mantener su specularidad al ser expuestos a la intemperie. Ambos poseen una pendiente baja en la curva

de reflectividad contra tiempo de ensuciamiento, pero el vidrio aventaja al acero inoxidable en su reflectividad óptica en cerca de un 8%.

En términos económicos, la diferencia no es muy representativa, en los dos casos, el costo real es de unos \$300.000 por cada metro cuadrado de reflector. De modo que sólo factores como el peso, que solo es importante cuando se trata de colectores móviles, y la disponibilidad en el mercado local, juegan en contra del espejo de vidrio. El primer aspecto es salvado por el carácter fijo del colector desarrollado, mientras que el último, es un reto importante en el momento de la construcción, pero no un limitante para descartar esta opción.

La decisión que se tomó inicialmente fue la de emplear vidrio de 3mm con electro-plateado posterior conformado en caliente, sin embargo debido a las posibilidades de manufactura local, debió cambiarse por uno de 5mm con características semejantes al inicial. Esto le dio mejores características estructurales, pero introdujo mayores aberraciones ópticas en el espejo, reduciendo así su reflectividad efectiva a 0.89, frente a 0.92 del espejo de 3mm.

Pasando ahora al diseño de la forma del espejo concentrador, han de satisfacerse varias condiciones, unas de tipo tecnológico y otras de carácter económico.

La forma del espejo concentrador es responsable de buena parte del rendimiento óptico del colector, como se probó en la sección 3.3. Como criterio general, todo depende de la relación de concentración que la aplicación requiera, por cuanto de ella depende la temperatura máxima que se pueda alcanzar en la superficie del absorbedor y por consiguiente la

posibilidad de alcanzar temperaturas altas en el fluido de trabajo, pero además, como se muestra en el cuadro 27, a medida que ésta aumenta, disminuye la eficiencia óptica, crecen las pérdidas térmicas y aumenta el tamaño del concentrador, lo cual se traduce en costos excesivos.

En definitiva se deben tomar decisiones en procura de las características deseadas del colector sin sacrificar demasiado su rendimiento y los costos de fabricación.

En el diseño del modelo se partió de una dimensión conocida, que es la apertura del colector de 1m. Establecido esto, se procedió con los cálculos de rigor, según se mostró en la sección 3.3, obteniéndose en el cuadro siguiente.

Cuadro 28. Cálculos para determinación de la geometría del concentrador y receptor.

CÁLCULOS GEOMETRIA DEL CONCENTRADOR								
f/a	$\Phi r$	f	r	R	h	F $\Phi$	C	$\eta$ óptica
0,2501	89,98	0,2501	0,00233	0,5000	170,3955	0,4677	273,5	0,337
0,27	85,59	0,27	0,00234	0,5015	170,9004	0,4697	272,7	0,338
0,29	81,53	0,29	0,00236	0,5055	172,2757	0,4751	270,5	0,342
0,31	77,77	0,31	0,00238	0,5116	174,3531	0,4832	267,3	0,348
0,33	74,29	0,33	0,00242	0,5194	177,0047	0,4936	263,3	0,356
0,35	71,08	0,35	0,00246	0,5286	180,1323	0,5057	258,7	0,364
0,37	68,09	0,37	0,00251	0,5389	183,6587	0,5193	253,8	0,374
0,39	65,32	0,39	0,00256	0,5503	187,5224	0,5340	248,5	0,385
0,4	64,01	0,4	0,00259	0,5562	189,5649	0,5417	245,8	0,390
0,43	60,35	0,43	0,00268	0,5753	196,0736	0,5661	237,7	0,408
0,45	58,11	0,45	0,00274	0,5889	200,6879	0,5830	232,2	0,420
0,47	56,02	0,47	0,00281	0,6030	205,4896	0,6003	226,8	0,433

**CÁLCULOS GEOMETRIA DEL CONCENTRADOR**

<b>f/a</b>	<b>Φr</b>	<b>f</b>	<b>r</b>	<b>R</b>	<b>h</b>	<b>FΦ</b>	<b>C</b>	<b>ηóptica</b>
0,49	54,06	0,49	0,00288	0,6176	210,4557	0,6178	221,4	0,445
0,51	52,23	0,51	0,00295	0,6325	215,5669	0,6354	216,2	0,458
0,53	50,51	0,53	0,00302	0,6479	220,8067	0,6531	211,1	0,471
0,55	48,89	0,55	0,00309	0,6636	226,1612	0,6707	206,1	0,483
0,57	47,36	0,57	0,00317	0,6796	231,6182	0,6881	201,2	0,496
0,59	45,93	0,59	0,00324	0,6959	237,1673	0,7052	196,5	0,508
0,61	44,57	0,61	0,00332	0,7125	242,7995	0,7220	191,9	0,520
<b>0,63</b>	<b>43,29</b>	<b>0,63</b>	<b>0,00340</b>	<b>0,7292</b>	<b>248,5068</b>	<b>0,7384</b>	<b>187,5</b>	<b>0,532</b>
0,65	42,08	0,65	0,00348	0,7462	254,2824	0,7544	183,3	0,544
0,67	40,92	0,67	0,00356	0,7633	260,1200	0,7699	179,2	0,555
0,69	39,83	0,69	0,00364	0,7806	266,0144	0,7849	175,2	0,566
0,71	38,80	0,71	0,00372	0,7980	271,9607	0,7993	171,4	0,576
0,73	37,81	0,73	0,00380	0,8156	277,9546	0,8132	167,7	0,586
0,75	36,87	0,75	0,00388	0,8333	283,9923	0,8265	164,1	0,596
0,77	35,97	0,77	0,00397	0,8512	290,0705	0,8391	160,7	0,605
0,79	35,12	0,79	0,00405	0,8691	296,1860	0,8512	157,3	0,613
0,81	34,30	0,81	0,00413	0,8872	302,3361	0,8626	154,1	0,622
0,83	33,53	0,83	0,00422	0,9053	308,5183	0,8734	151,1	0,629
0,85	32,78	0,85	0,00430	0,9235	314,7303	0,8836	148,1	0,637
0,87	32,06	0,87	0,00439	0,9418	320,9701	0,8932	145,2	0,644
0,89	31,38	0,89	0,00447	0,9602	327,2357	0,9022	142,4	0,650
<b>0,91</b>	<b>30,72</b>	<b>0,91</b>	<b>0,00456</b>	<b>0,9787</b>	<b>333,5256</b>	<b>0,9107</b>	<b>139,7</b>	<b>0,656</b>
0,93	30,09	0,93	0,00465	0,9972	339,8380	0,9186	137,1	0,662
0,95	29,49	0,95	0,00473	1,0158	346,1717	0,9259	134,6	0,667
0,97	28,90	0,97	0,00482	1,0344	352,5252	0,9327	132,2	0,672
0,99	28,34	0,99	0,00491	1,0531	358,8974	0,9390	129,9	0,677
1,01	27,81	1,01	0,00499	1,0719	365,2872	0,9448	127,6	0,681
1,03	27,29	1,03	0,00508	1,0907	371,6935	0,9502	125,4	0,685
1,05	26,79	1,05	0,00517	1,1095	378,1155	0,9552	123,3	0,688
1,07	26,30	1,07	0,00526	1,1284	384,5521	0,9597	121,2	0,692
1,09	25,84	1,09	0,00535	1,1473	391,0027	0,9638	119,2	0,695
1,11	25,39	1,11	0,00543	1,1663	397,4664	0,9676	117,3	0,697
1,13	24,95	1,13	0,00552	1,1853	403,9426	0,9711	115,4	0,700

**CÁLCULOS GEOMETRIA DEL CONCENTRADOR**

<b>f/a</b>	<b><math>\Phi_r</math></b>	<b>f</b>	<b>r</b>	<b>R</b>	<b>h</b>	<b>F<math>\Phi</math></b>	<b>C</b>	<b><math>\eta</math>óptica</b>
1,15	24,53	1,15	0,00561	1,2043	410,4306	0,9742	113,5	0,702
1,17	24,12	1,17	0,00570	1,2234	416,9298	0,9771	111,8	0,704
1,19	23,73	1,19	0,00579	1,2425	423,4397	0,9796	110,1	0,706
1,21	23,35	1,21	0,00588	1,2617	429,9597	0,9819	108,4	0,708
1,23	22,98	1,23	0,00597	1,2808	436,4892	0,9840	106,8	0,709
1,25	22,62	1,25	0,00606	1,3000	443,0280	0,9859	105,2	0,711
1,27	22,27	1,27	0,00615	1,3192	449,5755	0,9876	103,7	0,712
1,29	21,94	1,29	0,00624	1,3384	456,1313	0,9891	102,2	0,713
1,31	21,61	1,31	0,00633	1,3577	462,6950	0,9904	100,7	0,714
1,33	21,29	1,33	0,00642	1,3770	469,2663	0,9916	99,3	0,715
1,35	20,98	1,35	0,00651	1,3963	475,8449	0,9927	97,9	0,715
1,37	20,68	1,37	0,00660	1,4156	482,4304	0,9936	96,6	0,716
1,39	20,39	1,39	0,00669	1,4350	489,0225	0,9944	95,3	0,717
1,41	20,11	1,41	0,00678	1,4543	495,6210	0,9952	94,0	0,717
1,43	19,83	1,43	0,00687	1,4737	502,2255	0,9958	92,8	0,718
1,45	19,56	1,45	0,00696	1,4931	508,8359	0,9964	91,6	0,718
1,47	19,30	1,47	0,00705	1,5125	515,4518	0,9969	90,4	0,718
1,49	19,05	1,49	0,00714	1,5319	522,0732	0,9973	89,3	0,719
1,51	18,80	1,51	0,00723	1,5514	528,6996	0,9977	88,1	0,719
1,53	18,56	1,53	0,00732	1,5708	535,3311	0,9980	87,1	0,719
1,55	18,32	1,55	0,00741	1,5903	541,9672	0,9983	86,0	0,719
1,57	18,10	1,57	0,00750	1,6098	548,6080	0,9985	84,9	0,720
1,59	17,87	1,59	0,00759	1,6293	555,2532	0,9988	83,9	0,720
1,61	17,65	1,61	0,00768	1,6488	561,9026	0,9989	82,9	0,720
1,63	17,44	1,63	0,00777	1,6683	568,5561	0,9991	82,0	0,720
1,65	17,23	1,65	0,00787	1,6879	575,2135	0,9992	81,0	0,720
1,67	17,03	1,67	0,00796	1,7074	581,8747	0,9994	80,1	0,720
1,69	16,83	1,69	0,00805	1,7270	588,5396	0,9995	79,2	0,720
1,71	16,64	1,71	0,00814	1,7465	595,2080	0,9995	78,3	0,720
1,73	16,45	1,73	0,00823	1,7661	601,8798	0,9996	77,4	0,720
1,75	16,26	1,75	0,00832	1,7857	608,5549	0,9997	76,6	0,720
1,77	16,08	1,77	0,00841	1,8053	615,2332	0,9997	75,7	0,721
1,79	15,90	1,79	0,00850	1,8249	621,9146	0,9998	74,9	0,721

CÁLCULOS GEOMETRIA DEL CONCENTRADOR								
f/a	$\Phi_r$	f	r	R	h	F $\Phi$	C	$\eta_{\text{óptica}}$
1,81	15,73	1,81	0,00860	1,8445	628,5989	0,9998	74,1	0,721
1,83	15,56	1,83	0,00869	1,8642	635,2861	0,9998	73,4	0,721
1,85	15,39	1,85	0,00878	1,8838	641,9761	0,9999	72,6	0,721
1,87	15,23	1,87	0,00887	1,9034	648,6688	0,9999	71,8	0,721
1,89	15,07	1,89	0,00896	1,9231	655,3641	0,9999	71,1	0,721
1,91	14,91	1,91	0,00905	1,9427	662,0619	0,9999	70,4	0,721
1,93	14,76	1,93	0,00914	1,9624	668,7621	0,9999	69,7	0,721
1,95	14,61	1,95	0,00924	1,9820	675,4648	1,0000	69,0	0,721
1,97	14,46	1,97	0,00933	2,0017	682,1697	1,0000	68,3	0,721
1,99	14,32	1,99	0,00942	2,0214	688,8768	1,0000	67,7	0,721
2,01	14,18	2,01	0,00951	2,0411	695,5862	1,0000	67,0	0,721

Los criterios principales que permiten dimensionar adecuadamente un concentrador parabólico, están relacionados con el factor de interceptación y con la relación  $f/a$  de la parábola. En el primer caso se ha dicho que la recomendación consiste en adoptar un valor comprendido entre 0.9 y 0.95 de manera que las pérdidas térmicas y las ganancias ópticas por efecto del factor de interceptación sean equilibradas, esto daría como resultado los valores mostrados en la **fila 34** del cuadro anterior (resaltada en color cian). Sin embargo, se nota inmediatamente un inconveniente respecto a la relación  $f/a=0.91$ , la cual implica una posición focal de casi 1m y un ángulo de apertura  $\Phi_r = 30.7^\circ$ . Estos dos últimos valores, especialmente, son muy inconvenientes, una distancia focal de 1 m en un colector de 1 m de apertura produciría imágenes reales del doble del tamaño teórico, que en este caso es de 9 mm y por otro lado, un ángulo de apertura de  $30^\circ$  involucra una curva casi plana de la parábola, aumentando el efecto en el tamaño de la imagen,

mencionado anteriormente, y disminuyendo la relación de concentración real del colector, que sería alrededor de 0.8 veces la teórica.

Para resolver estos inconvenientes bastaría con adoptar un valor de  $\Phi_r$  entre 40 y 70°, según las prácticas más comunes<sup>18</sup> en la construcción de colectores cilíndrico-parabólicos, para conseguir un balance aceptable entre lo deseado y lo impuesto por la naturaleza.

Adoptando una relación  $f/a = 0.63$  (fila 20 del cuadro, resaltada en color amarillo) se obtienen valores más adecuados para los parámetros geométricos del concentrador.

Para corregir el factor de interceptación se puede emplear un diámetro del receptor mayor al tamaño teórico de la imagen. De esta manera la geometría básica del colector es:

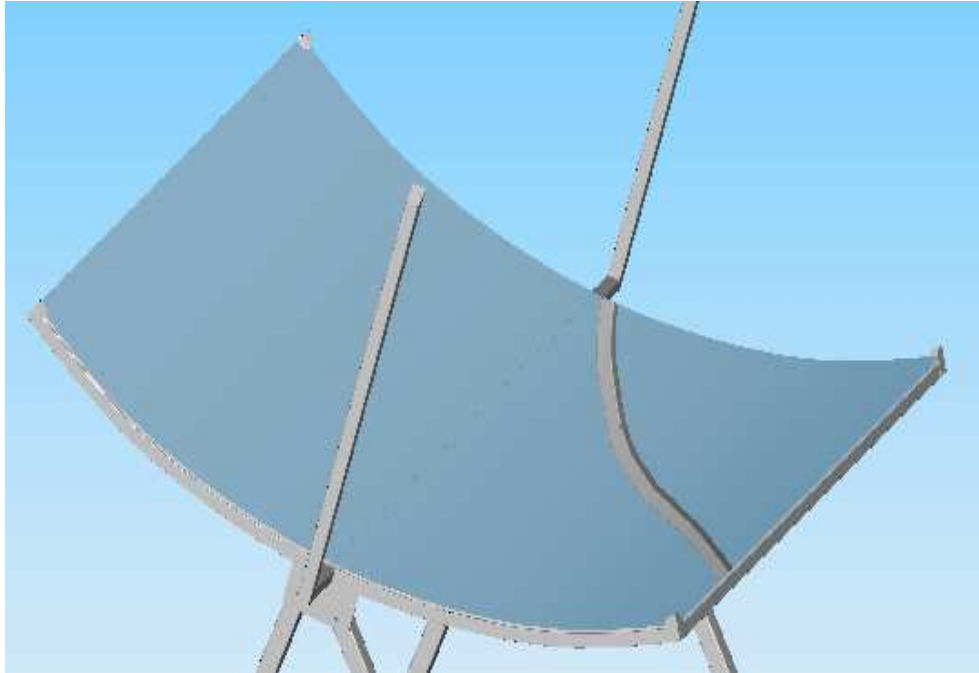
$f/a=0,63$	$\Phi_r =43,29$	$f=0,63$	$r=0,00340$	$R=0,7292$
------------	-----------------	----------	-------------	------------

El valor  $r = 3.4\text{mm}$  es la mitad del tamaño teórico de la imagen en el foco del concentrador, sin embargo el diámetro del receptor seleccionado es de 10mm (3/8") por ser este un diámetro estándar común en el mercado y además satisface los criterios anteriormente citados.

---

<sup>18</sup> Valores menores de 40° para  $\Phi_r$ , producen en la práctica imágenes muy dispersas y por tanto pérdidas ópticas elevadas, mientras que valores superiores a 70° aumentan excesivamente el tamaño de la superficie del concentrador, lo cual genera costos adicionales de instalación.

Figura 8. Espejo del Colector



Con estas dimensiones se ha iniciado la configuración de las dimensiones restantes del modelo.

### **4.3 CONFIGURACIÓN DEL TUBO ABSORBEDOR**

En la sección 3.4 se realizó un estudio de las características ideales de un tubo absorbedor, en términos de las eficiencias térmica y óptica del colector, cuyos resultados se resumen en las Gráficas 22, 23 y 24.

Con estos presupuestos, resulta sencillo elegir la configuración más adecuada para el tubo absorbedor. Las características principales del absorbedor están asociadas al material del tubo, su tamaño y a la cubierta de vidrio.

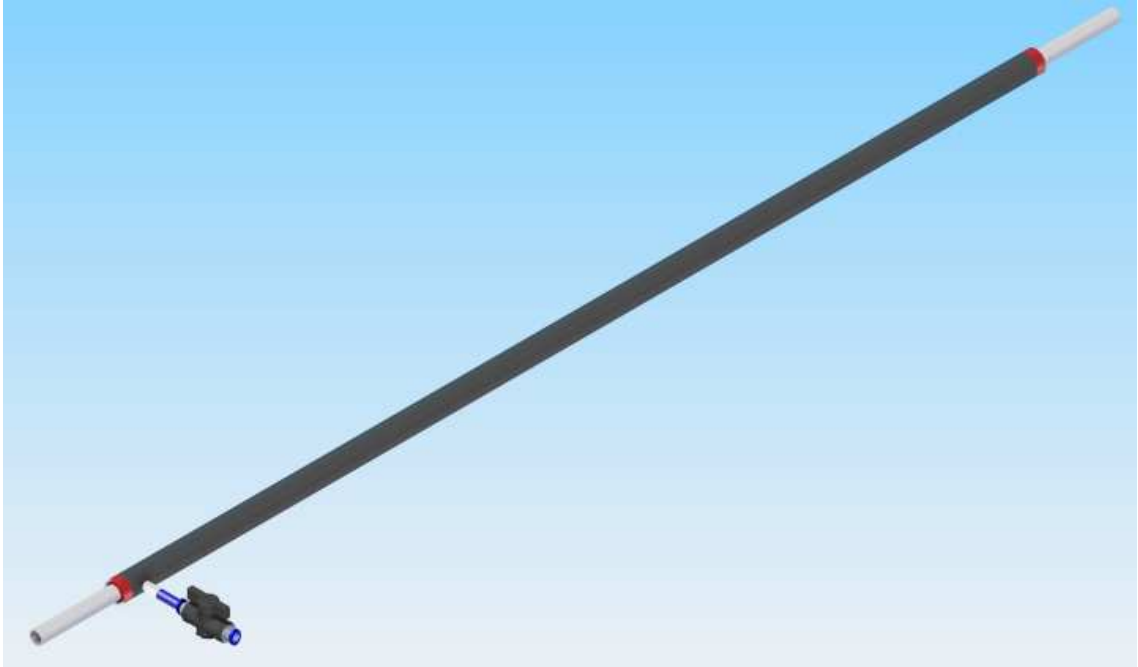
La opción D, resulta por evidentes razones la más idónea, de modo que el tubo absorbedor seleccionado es de aleación de cobre comercial, con recubrimiento selectivo negro y cubierta de vidrio. Las dimensiones<sup>19</sup> y característica se resumen a continuación.

Cuadro 29. Características de diseño del tubo absorbedor

<b>CARACTERÍSTICAS TUBO ABSORBEDOR</b>	
<b>Parte</b>	<b>Especificación</b>
Material del absorbedor	Cobre comercial
Pintura de recubrimiento	Negro cromo mate
Conductividad térmica teórica	$k = 385 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
Absortividad del tubo	$\alpha = 0.96$
Diámetro interior del absorbedor	$D_i = 9 \text{ mm}$
Diámetro exterior del absorbedor	$D_o = 10 \text{ mm}$
Material de la cubierta	Vidrio Pirex comercial
Trasmisividad del vidrio	0.92
Diámetro interior cubierta	$d_i = 21 \text{ mm}$
Diámetro exterior cubierta	$d_o = 24 \text{ mm}$

<sup>19</sup> Para ver los detalles constructivos del tubo absorbedor, remitirse al anexo B, planos del absorbedor.

Figura 9. Tubo absorbedor



#### 4.4 ESTRUCTURA METÁLICA

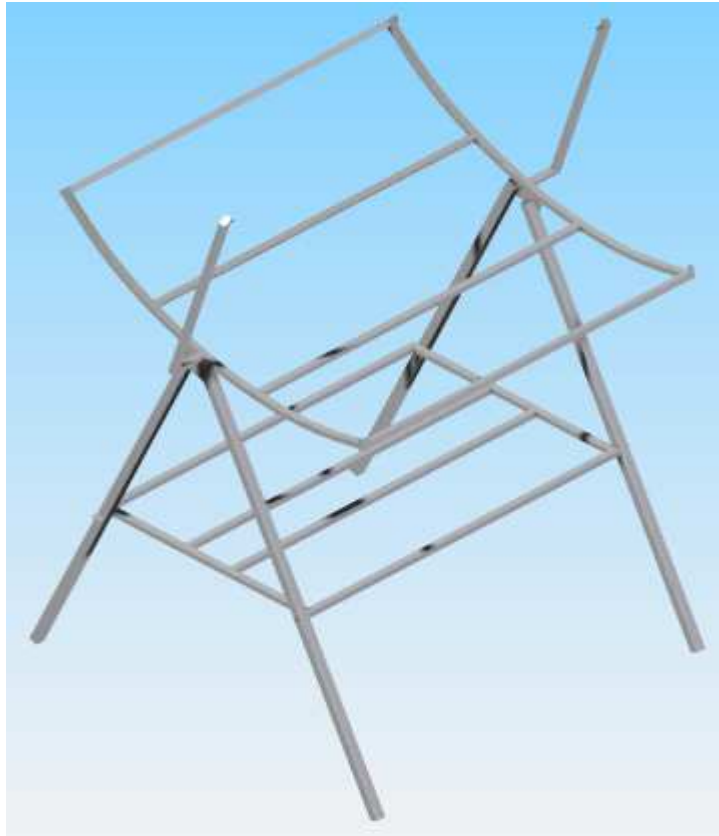
Las características del concentrador y el receptor, sus dimensiones y materiales son factores determinantes de la forma, dimensiones y materiales de la estructura. Ésta debe soportar adecuadamente el peso del colector y las cargas debidas al viento, entre otras. También debe ser lo más ligera posible y facilitar la instalación de cada uno de los elementos del sistema, que en este caso por tratarse de un modelo con fines investigativos, deben estar montados en la estructura del colector.

Luego de probar algunas alternativas, se optó por el diseño<sup>20</sup> mostrado en la figura siguiente.

---

<sup>20</sup> Para ver detalles dimensionales y constructivos de la estructura véase en anexo B los planos correspondientes.

Figura 10. Estructura del colector



#### **4.5 ELEMENTOS AUXILIARES DEL SISTEMA COLECTOR CILÍNDRICO-PARABÓLICO**

Algunos componentes del sistema obedecen a la aplicación específica del colector. En este caso se busca calentar un fluido a la temperatura más alta posible a partir de un colector de 1 m<sup>2</sup> de apertura, para lo cual se requiere, además de los componentes básicos de un colector, una serie de elementos o subsistemas.

*Sistema de recirculación del fluido de trabajo.* El fluido que circula por el tubo absorbedor hace parte de un sistema cerrado constituido por un

depósito que además hace las veces de domo para el vapor producido después de cierta temperatura en el fluido. De esta manera, una vez el fluido pasa por el receptor, retorna para mezclarse con aquel que se encuentra en el depósito, de donde es nuevamente bombeado a través de una tubería hacia el absorbedor. Este sistema ha sido debidamente aislado para disminuir al máximo las pérdidas de calor.

*Instrumentos.* Con el fin de recopilar información acerca de las condiciones del fluido de trabajo, se ha dotado al sistema de varios sensores de temperatura, localizados en los puntos de interés, como son la entrada y salida del absorbedor, entrada del agua fría al tanque, parte superior del domo y en el exterior para registrar la temperatura del ambiente. Además existe un manómetro que mide la presión en el interior del tanque.

*Sistema de control de la presión de vapor.* Para la salida del vapor formado en el domo del depósito, se ha dispuesto de una válvula solenoide accionada por un control presostático que registra la presión en el interior de modo que las condiciones permanezcan lo más estables posible.

*Conexiones eléctricas.* El sistema requiere de alimentación eléctrica a 110 V para el funcionamiento de la bomba de recirculación y el control de presión. Dos interruptores dan el paso de la corriente hacia la bomba y hacia el control de presión de manera independiente.

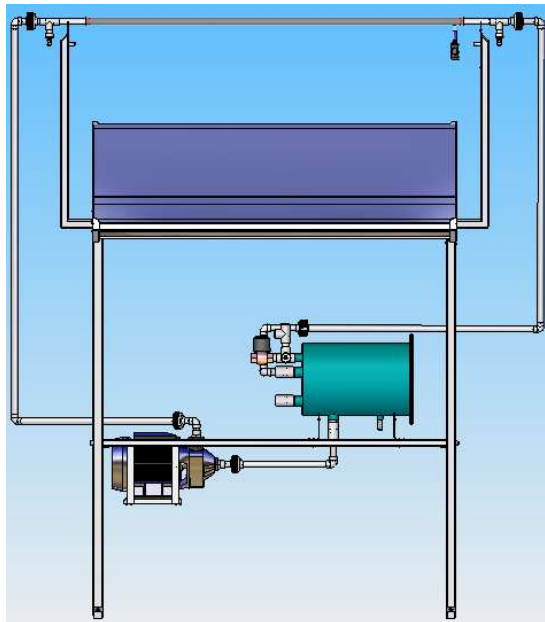
*Sistema de adquisición de datos en línea.* La medición y registro de las temperaturas de interés se logra mediante el acople de un sistema de adquisición tipo "field point" que permiten, desde una computadora visualizar y almacenar los datos en línea de manera segura y precisa. A partir

de las características anteriores se realizó un modelo con la ayuda de una herramienta CAD (Solid Edge), y se posteriormente se inició el proceso de fabricación y compra de los diferentes elementos del colector.

#### 4.6 MONTAJE DEL COLECTOR

Una vez listas cada una de las partes, se procedió con el montaje del sistema. El resultado se muestra en la figura siguiente.

Figura 11. Montaje sistema colector cilíndrico-parabólico.



Un inconveniente insalvable relacionado con errores en la fabricación de los espejos reflectores, hizo necesaria la introducción de algunas modificaciones en el diseño original del montaje del colector, generando además mayores pérdidas ópticas en el colector, no obstante, el resultado final sigue siendo adecuado para los propósitos que originalmente fueron trazados.

## **5. PUESTA A PUNTO Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO OPERACIONAL DEL COLECTOR CONSTRUIDO.**

Concluido el montaje del colector, se procedió con la realización de una serie de pruebas preliminares con el fin de poner a punto el sistema antes de iniciar la adquisición de los datos que serían empleados en la evaluación del desempeño operacional. Durante este proceso se introdujeron algunas mejoras constructivas al diseño original, con la finalidad de conseguir un rendimiento superior del sistema, lo cual permitió aumentar progresivamente la temperatura del fluido.

### **5.1 LECTURA Y ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS**

Para la adquisición de datos en las pruebas se utilizaron los recursos de hardware del laboratorio de máquinas térmicas de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander listados a continuación.

- Módulo de comunicación serial “Field Point FP-1000”.
- Módulo de entradas análogas para termocuplas “Field Point TC-120”
- Cable de comunicación serial RS-232.
- Fuente regulada de voltaje (0 a 30 Voltios de DC).
- Computadora portátil con el software proporcionado por National Instruments “LabVIEW 8.0”.
- Piranómetro con constante de  $89.56 \text{ W/mV}\cdot\text{m}^2$

El hardware debió configurarse mediante el software Measurement & Automation Explorer desarrollando un programa de interfaz en LabView 8.0. La programación se realiza con objetos (bloques) utilizando dos ventanas llamadas panel frontal (Front panel) y diagrama de bloques (Block Diagram), en la primera se efectúa la presentación del programa y en la otra, el código, como se observa en las figuras 12 y 13 respectivamente.

El programa consta de los siguientes bloques:

1. While loop: se encarga de repetir todo el subdiagrama que se encuentra dentro de su cuadro de programación dependientemente de una variable, que en este caso es el tiempo.
2. Field point IO point control (ver figura 12): es un elemento que permite decidir el canal del modulo de termocuplas TC-120 que se quiere leer.
3. FP read (polymorphic): elemento encargado de realizar la lectura de los datos.
4. Salidas: son elementos de visualización que se introducen desde el panel frontal y aparecen automáticamente en el diagrama de bloques.
5. Fórmula node: es un cuadro en el cual se pueden escribir formulas utilizando los valores leídos por el TC-120 como datos de entrada.
6. Control de tiempo "wait until next": es el bloque encargado de controlar el tiempo de muestreo, el cual puede ser cambiado desde el panel frontal. El tiempo se contabiliza en múltiplos de milisegundos.

7. Get date / time string: a través de este bloque se puede registrar la fecha y hora de medición.
  
8. Elementos para el almacenamiento continuo de datos en Microsoft Excel: los bloques mostrados en la figura 12 dentro del recuadro 8 tiene como función transformar los datos de tipo array a string, ya que es necesario tener datos de tipo string para poder almacenarlos en un archivo .xls.
  
9. Write to text file: Bloque encargado de escribir los datos en el archivo de almacenamiento creado por el "create file" (figura 12, punto 11) a través de "file dialog" (figura 12 punto 12).
  
10. Close file: este bloque se encarga de detener el registro de los datos en caso de que se detecte un error por el bloque "simple error handler" que es el encargado de comandar el bloque de cierre de archivo.

Figura 12. Diagrama de bloques del programa desarrollado para la adquisición de datos

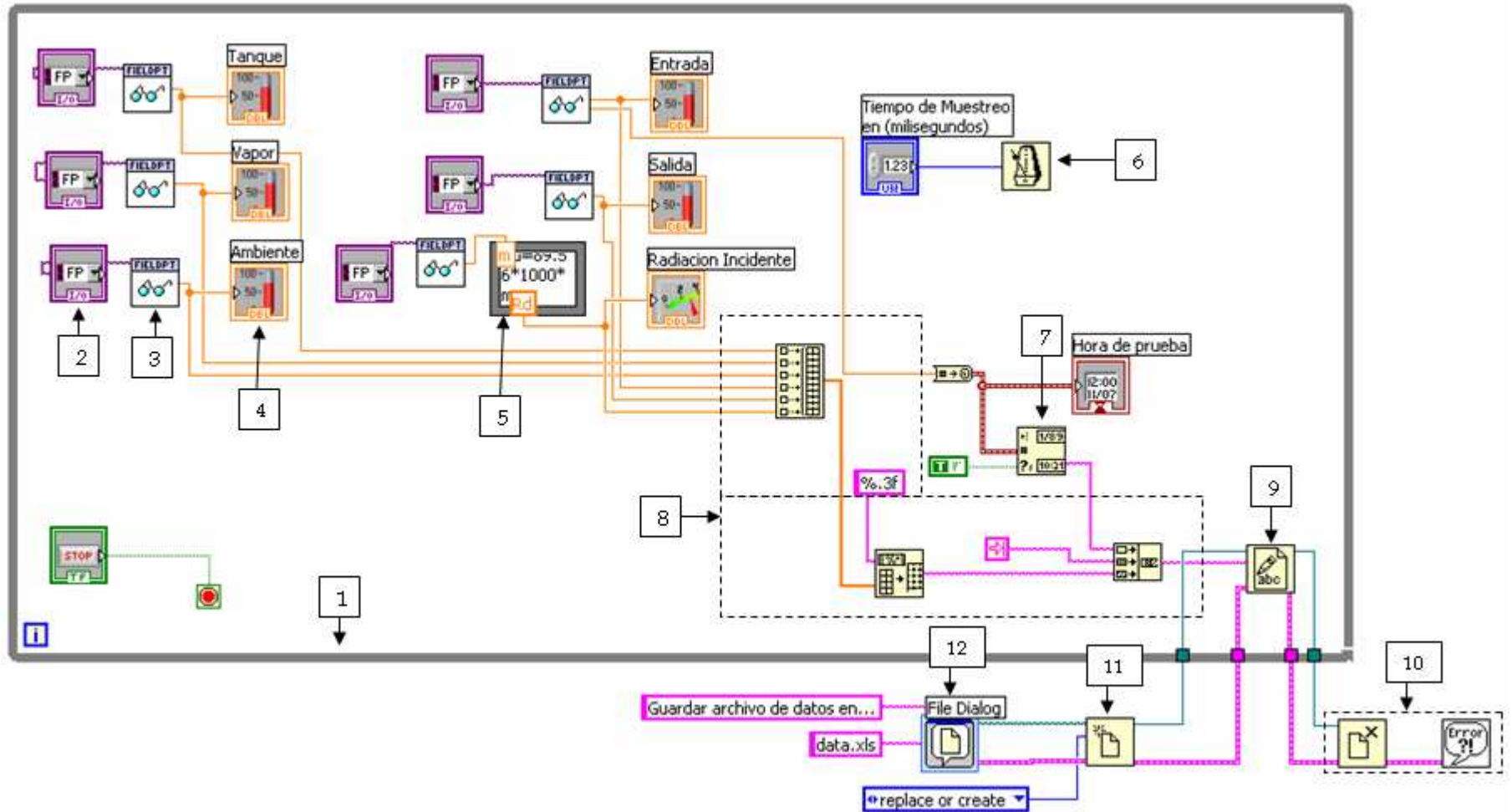
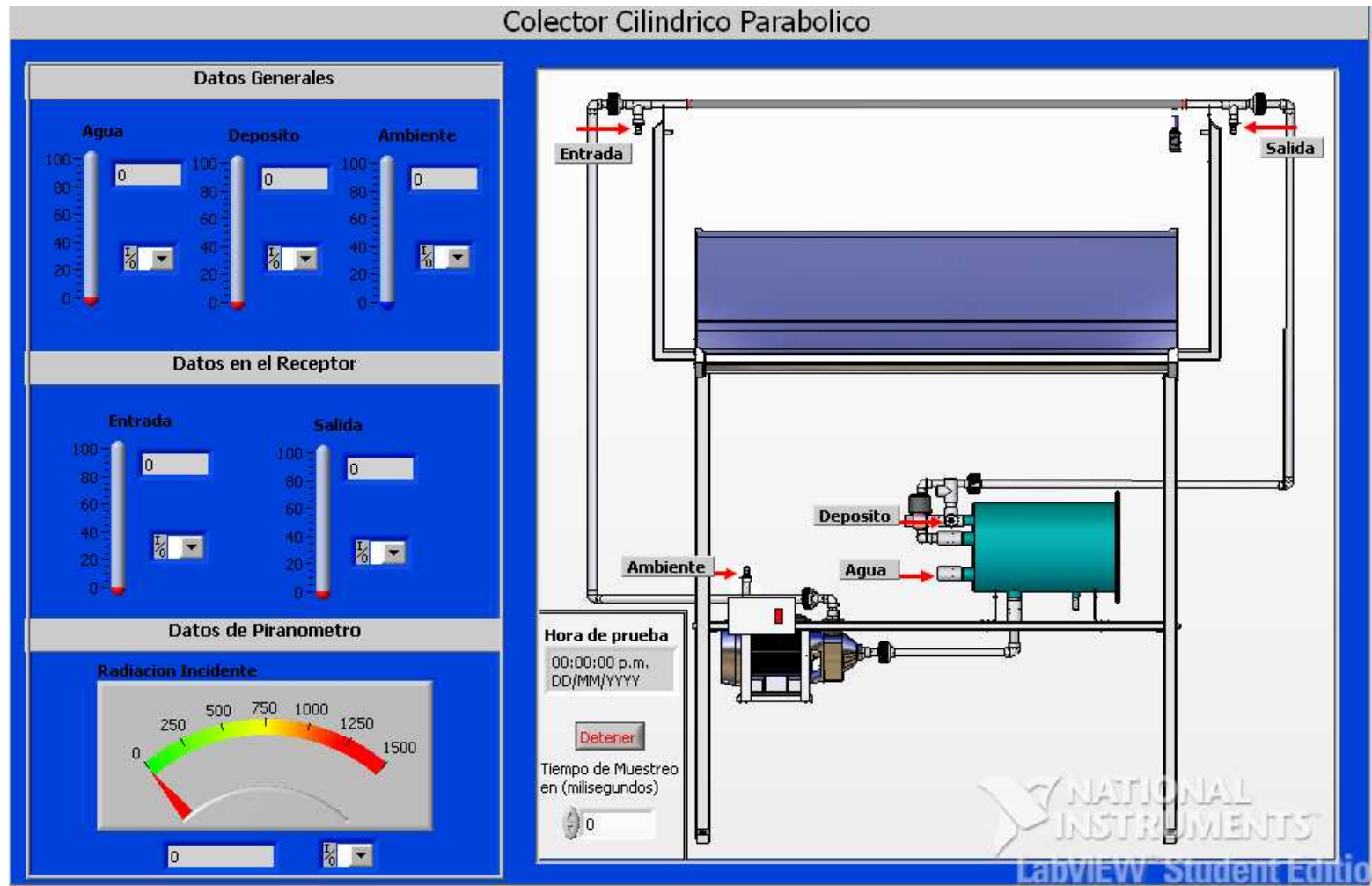


Figura 13. Interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos



## 5.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Las pruebas formales se llevaron a cabo los días 14 de noviembre y 14 de diciembre de 2007 en las instalaciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

**Pruebas del 14 de noviembre.** Se registró información por un tiempo de 2,5 horas, entre las 10:00 a.m. y las 12:30 p.m. con intervalos de 1 segundo, sin embargo, se emplearán principalmente los datos correspondientes a los primeros 90 minutos por ser este el tiempo que tardó en obtenerse la temperatura máxima en el sistema.

A continuación se presenta un resumen de los datos obtenidos en dichas pruebas.

Cuadro 30a. Datos operacionales de pruebas de desempeño CCP con agua dura como fluido de trabajo

Hora	T° Agua °C	T° Depósito °C	T° Ambiente °C	T° Entrada °C	T° Salida °C	Radiación W/m <sup>2</sup>
09:57:39 a.m.	23,51	23,07	31,07	24,817	30,321	889,25
09:58:00 a.m.	23,82	23,23	31,07	27,494	35,158	898,27
09:58:30 a.m.	24,13	23,51	31,88	27,837	35,691	917,40
09:59:00 a.m.	24,48	23,82	32,35	28,148	34,761	909,74
09:59:30 a.m.	24,60	24,13	32,16	28,521	34,431	901,27
10:00:00 a.m.	23,51	24,48	32,13	28,926	34,308	890,07
10:00:30 a.m.	23,82	24,60	32,32	29,019	34,192	926,69
10:01:00 a.m.	24,13	24,66	32,63	28,054	34,222	912,75
10:01:30 a.m.	24,48	24,69	31,85	28,335	36,528	907,83
10:02:00 a.m.	24,60	24,66	31,23	28,833	36,802	920,40

Hora	T° Agua °C	T° Depósito °C	T° Ambiente °C	T° Entrada °C	T° Salida °C	Radiación W/m <sup>2</sup>
10:03:30 a.m.	24,66	24,23	31,42	29,984	35,712	926,42
10:04:00 a.m.	24,51	24,60	32,16	30,887	36,521	931,61
10:04:30 a.m.	24,38	24,54	31,63	31,136	36,553	932,16
10:05:00 a.m.	23,42	24,41	32,16	31,230	36,366	928,06
10:05:30 a.m.	23,67	23,76	32,63	31,261	36,553	935,98
10:06:00 a.m.	23,67	23,32	32,79	31,479	36,584	938,99
10:06:30 a.m.	23,73	22,89	33,38	31,759	36,553	861,91
10:07:00 a.m.	24,13	22,55	33,22	31,914	36,615	942,00
10:07:30 a.m.	24,16	22,17	33,13	31,977	36,739	943,91
10:08:00 a.m.	24,01	22,11	34,90	32,599	37,237	945,28
10:08:30 a.m.	24,01	22,70	32,32	33,907	38,732	946,92
10:09:00 a.m.	24,35	22,95	32,63	34,654	39,852	955,12
10:09:30 a.m.	24,29	23,42	31,85	35,650	40,132	945,55
10:10:00 a.m.	24,07	23,67	31,23	36,428	40,973	957,30
10:10:30 a.m.	23,82	23,67	32,01	36,926	41,377	955,94
10:11:00 a.m.	24,07	23,73	32,01	37,424	42,405	954,02
10:11:30 a.m.	24,41	24,13	31,42	38,296	42,778	483,91
10:12:00 a.m.	24,54	24,16	32,16	38,669	43,058	935,44
10:12:30 a.m.	25,25	24,01	31,63	38,887	43,214	934,62
10:13:00 a.m.	25,53	24,01	32,16	39,292	43,183	892,80
10:13:30 a.m.	25,56	24,35	32,63	39,946	44,179	925,87
10:14:00 a.m.	25,88	24,29	32,79	40,257	44,584	928,33
10:14:30 a.m.	25,97	24,07	33,38	40,381	44,117	939,54
10:15:00 a.m.	26,50	23,82	33,22	40,537	44,397	950,74
10:15:30 a.m.	27,37	24,07	35,81	41,346	45,673	958,67
10:16:00 a.m.	28,05	24,41	35,62	42,062	45,891	964,68
10:16:30 a.m.	28,02	24,54	36,02	42,436	46,109	884,60
10:17:00 a.m.	27,65	24,48	36,24	42,747	46,265	960,31
10:17:30 a.m.	27,71	24,41	36,90	42,996	45,860	956,76
10:18:00 a.m.	27,21	24,79	36,80	43,774	46,669	952,11

Hora	T° Agua °C	T° Depósito °C	T° Ambiente °C	T° Entrada °C	T° Salida °C	Radiación W/m <sup>2</sup>
10:18:30 a.m.	27,03	25,07	36,27	44,428	46,732	948,56
10:19:00 a.m.	27,28	25,25	35,71	44,833	47,136	946,10
10:19:30 a.m.	27,34	25,28	35,28	45,113	47,167	939,26
10:20:00 a.m.	27,21	25,22	35,25	45,300	47,074	932,43
10:20:30 a.m.	27,00	25,07	31,07	45,362	47,043	928,88
10:21:00 a.m.	26,84	25,04	31,07	45,704	47,572	921,50
10:21:30 a.m.	26,84	25,25	31,88	46,202	48,381	916,30
10:22:00 a.m.	26,90	25,53	32,35	46,763	48,568	909,47
10:22:30 a.m.	26,69	25,56	32,16	47,043	48,848	859,73
10:23:00 a.m.	26,75	25,88	32,13	47,665	49,658	878,31
10:23:30 a.m.	27,09	25,97	32,32	47,852	48,911	488,56
10:24:00 a.m.	27,31	26,50	32,63	48,444	48,512	172,60
10:24:30 a.m.	27,31	27,37	31,85	49,253	49,357	138,16
10:25:00 a.m.	24,07	28,05	31,23	50,000	50,202	352,72
10:25:30 a.m.	24,41	28,02	32,01	49,409	51,047	799,32
10:26:00 a.m.	24,54	27,65	32,01	49,284	49,380	883,78
10:26:30 a.m.	24,48	27,71	31,42	49,595	50,000	940,08
10:27:00 a.m.	24,41	27,21	32,16	49,315	49,377	980,26
10:27:30 a.m.	24,79	27,03	31,63	49,471	50,125	992,56
10:28:00 a.m.	25,07	27,28	32,16	50,031	50,778	994,47
10:28:30 a.m.	25,25	27,25	32,63	50,249	50,591	992,56
10:29:00 a.m.	25,28	27,34	32,79	50,591	50,778	988,73
10:29:30 a.m.	24,07	27,21	32,32	50,654	51,276	967,14
10:30:00 a.m.	24,41	27,00	32,63	50,623	50,996	952,93
10:30:30 a.m.	24,54	26,84	31,85	51,023	51,758	915,21
10:31:00 a.m.	24,48	26,84	31,23	50,809	51,164	867,11
10:31:30 a.m.	24,41	26,90	32,01	50,903	51,570	843,87
10:32:00 a.m.	24,79	26,69	32,01	50,623	50,721	782,38
10:32:30 a.m.	25,07	26,75	31,42	50,840	51,038	748,49
10:33:00 a.m.	25,25	27,09	32,16	51,307	51,734	749,31

Hora	T° Agua °C	T° Depósito °C	T° Ambiente °C	T° Entrada °C	T° Salida °C	Radiación W/m <sup>2</sup>
10:33:30 a.m.	25,28	27,31	31,63	51,556	52,430	789,48
10:34:00 a.m.	25,22	27,31	32,16	51,525	51,678	835,68
10:34:30 a.m.	24,48	27,03	32,63	51,463	51,567	868,20
10:35:00 a.m.	24,41	26,90	32,79	51,588	51,735	873,12
10:35:30 a.m.	24,79	27,21	33,38	52,086	52,352	907,56
10:36:00 a.m.	25,07	27,40	33,22	52,490	52,670	928,60
10:36:30 a.m.	25,25	27,18	33,13	53,860	53,879	914,94
10:37:00 a.m.	25,28	26,81	32,32	51,837	52,970	949,38
10:37:30 a.m.	26,84	26,90	32,63	52,210	52,457	963,59
10:38:00 a.m.	26,84	26,81	31,85	52,397	52,569	971,51
10:38:30 a.m.	26,90	27,15	31,23	53,082	53,321	978,62
10:39:00 a.m.	26,69	27,34	32,01	53,518	54,514	987,37
10:39:30 a.m.	26,75	27,59	32,01	54,202	54,887	966,05
10:40:00 a.m.	27,09	28,21	31,42	55,105	55,946	942,27
10:40:30 a.m.	27,31	28,74	32,16	55,479	55,794	991,74
10:41:00 a.m.	27,31	29,36	31,63	55,883	55,990	993,38
10:41:30 a.m.	24,07	29,61	32,16	56,350	56,467	980,53
10:42:00 a.m.	24,41	30,08	32,63	56,755	56,983	992,56
10:42:30 a.m.	24,54	29,83	32,79	56,475	56,783	985,18
10:43:00 a.m.	24,48	29,58	33,38	56,506	56,859	978,62
10:43:30 a.m.	24,41	29,52	33,22	56,879	56,934	989,01
10:44:00 a.m.	24,79	29,05	31,88	56,630	56,815	989,01
10:44:30 a.m.	25,07	28,86	32,35	56,599	56,765	996,39
10:45:00 a.m.	25,25	28,96	32,16	57,097	57,231	1001,85
10:45:30 a.m.	25,28	29,05	32,13	57,253	57,321	1009,23
10:46:00 a.m.	24,07	28,93	32,32	57,377	57,457	998,85
10:46:30 a.m.	24,41	28,77	32,63	57,377	57,874	999,12
10:47:00 a.m.	24,54	28,90	31,85	57,595	57,679	998,57
10:47:30 a.m.	24,48	29,33	31,23	58,093	58,138	998,57
10:48:00 a.m.	24,41	29,86	32,01	58,467	58,562	1001,31

Hora	T° Agua °C	T° Depósito °C	T° Ambiente °C	T° Entrada °C	T° Salida °C	Radiación W/m <sup>2</sup>
10:48:30 a.m.	24,79	30,23	32,01	58,623	58,794	995,84
10:49:00 a.m.	25,07	30,70	31,42	58,840	58,926	988,19
10:49:30 a.m.	25,25	30,79	32,16	58,872	58,975	718,69
10:50:00 a.m.	25,28	31,04	31,63	58,685	58,762	333,59
10:50:30 a.m.	25,22	31,20	32,16	58,218	58,176	221,53
10:51:00 a.m.	26,34	31,57	32,63	56,444	56,421	224,26
10:51:30 a.m.	25,22	32,13	32,79	55,541	55,560	286,85
10:52:00 a.m.	24,91	32,10	33,38	54,233	54,171	512,34
10:55:30 a.m.	27,62	29,52	33,22	57,066	57,258	979,44
10:56:00 a.m.	27,62	29,61	33,13	57,533	57,639	974,52
10:56:30 a.m.	27,68	29,61	34,90	57,689	57,987	922,32
10:57:00 a.m.	27,53	29,80	32,32	58,062	58,312	968,78
10:57:30 a.m.	27,65	29,74	32,63	58,249	58,543	962,22
10:58:00 a.m.	27,81	29,80	31,85	58,436	58,583	989,28
10:58:30 a.m.	27,81	29,92	31,23	58,654	58,874	976,16
10:59:00 a.m.	27,71	30,08	32,01	58,996	59,013	964,14
10:59:30 a.m.	27,06	30,61	32,01	59,525	59,649	820,37
11:00:00 a.m.	26,62	30,86	31,42	59,805	59,984	878,59
11:00:30 a.m.	26,44	30,83	32,16	59,899	59,895	875,03
11:01:00 a.m.	26,09	31,14	31,63	60,272	60,289	886,51
11:01:30 a.m.	25,69	31,17	32,16	60,304	60,385	929,70
11:02:00 a.m.	25,25	31,45	32,63	60,802	60,982	984,63
11:02:30 a.m.	24,88	31,57	32,79	61,144	61,284	1042,30
11:03:00 a.m.	24,54	31,95	33,38	61,704	61,874	788,12
11:03:30 a.m.	23,98	32,48	33,22	62,109	62,231	557,44
11:04:00 a.m.	23,95	32,54	35,18	61,922	62,143	311,17
11:04:30 a.m.	23,60	32,76	35,62	61,922	62,430	282,20
11:05:00 a.m.	23,20	33,00	34,81	60,459	60,547	299,42
11:05:30 a.m.	23,04	33,07	34,25	58,374	58,453	428,98
11:06:00 a.m.	23,07	32,97	33,91	56,973	57,032	974,79

Hora	T° Agua °C	T° Depósito °C	T° Ambiente °C	T° Entrada °C	T° Salida °C	Radiación W/m <sup>2</sup>
11:06:30 a.m.	23,54	32,57	34,59	55,479	55,543	1014,70
11:07:00 a.m.	23,95	32,48	32,32	59,899	59,967	1069,09
11:07:30 a.m.	24,44	32,16	32,63	60,428	60,517	1056,52
11:08:00 a.m.	25,04	31,91	31,85	60,563	61,067	1113,09
11:08:30 a.m.	25,50	31,79	31,23	60,821	61,617	1074,01
11:09:00 a.m.	26,00	31,51	32,01	61,102	61,690	1012,79
11:09:30 a.m.	26,50	31,11	32,01	61,452	61,763	936,26
11:10:00 a.m.	26,75	30,79	31,42	61,731	61,836	1102,16
11:10:30 a.m.	26,75	30,67	32,16	62,210	62,323	1113,09
11:11:00 a.m.	27,28	30,23	31,63	62,873	62,943	1122,93
11:11:30 a.m.	27,37	30,17	32,16	62,954	63,136	1136,33
11:12:00 a.m.	27,40	30,23	32,63	63,328	63,456	1151,36
11:12:30 a.m.	27,09	30,48	32,79	63,851	63,947	1148,63
11:13:00 a.m.	27,03	30,42	33,38	63,973	64,012	1133,87
11:13:30 a.m.	26,90	30,48	33,22	64,138	64,251	1062,26
11:14:00 a.m.	26,62	30,64	32,01	64,359	64,462	1099,70
11:14:30 a.m.	26,34	30,89	31,42	64,672	64,712	1011,42
11:15:00 a.m.	26,44	30,83	32,16	64,832	64,972	1043,12
11:15:30 a.m.	26,75	30,70	31,63	64,951	65,095	1010,33
11:16:00 a.m.	26,28	31,26	32,16	65,274	65,316	1008,41
11:16:30 a.m.	26,00	31,60	32,63	65,372	65,413	989,01
11:17:00 a.m.	25,94	31,63	32,79	66,013	66,215	989,55
11:17:30 a.m.	25,81	31,85	33,38	66,654	66,771	948,56
11:18:00 a.m.	25,56	32,07	33,22	67,128	67,294	880,77
11:18:30 a.m.	25,50	32,20	33,13	67,456	67,417	839,78
11:18:46 a.m.	25,44	32,29	34,90	68,023	68,321	1124,02
11:19:00 a.m.	25,28	32,38	35,12	67,556	67,512	1012,25
11:19:15 a.m.	25,07	32,54	35,53	67,734	67,791	1059,58
11:19:30 a.m.	24,82	32,66	36,05	67,873	67,912	997,02
11:20:00 a.m.	24,76	32,57	34,93	68,216	68,231	1150,26

Con base en esta información obtenida, es posible realizar una evaluación operacional del sistema en términos de su rendimiento global para diferentes instantes de la prueba, para lo cual se emplearán datos correspondientes a intervalos de 5 minutos.

Cuadro 31a. Condiciones operacionales del CCP con agua dura como fluido de trabajo

CONDICIONES OPERACIONALES DEL CCP														
$G_b$ W/m <sup>2</sup>	$T_a$ °C	$T_i$ °C	$T_r$ °C	$m_{fi}$ kg/s	$V_a$ m/s	$\eta$ opt	$D_i$ m	$D_o$ m	$d_i$ m	$d_o$ m	$A_a$ m <sup>2</sup>	$A_r$ m <sup>2</sup>	$A_c$ m <sup>2</sup>	$\epsilon_c$
744,5	30	24-68	130	0,022	4	0,72	0,009	0,01	0,022	0,025	0,96	0,031	0,079	0,88
Características del flujo interno								Propiedades del aire exterior						
$C_p$	$\rho$	$\mu_{fi}$	$k_{fi}$	$Pr_{fi}$	$Re_{fi}$	$Nu_{fi}$	$h_{fi}$	$T_f$	$\rho_a$	$\mu$	$k_a$	$Pr_a$		
4179	997	6,6E-04	0,628	4,34	4752	28,1	1959,3	80	0,950	2,1E-05	0,030	0,700		
								26	1,177	1,8E-05	0,026	0,708		

En el cuadro de resultados se muestra el rendimiento global del colector evaluado de tres maneras distintas:

**Método teórico:** consiste en la determinación de la eficiencia del colector a partir de un valor instantáneo del calor máximo transferido al fluido en forma transversal, relacionando las temperatura ambiente y de entrada al absorbedor, con los coeficientes de pérdidas (radiación, convección), calculados a partir de las características de diseño de los diferentes componentes del colector (ver Sección 3.4). Por tanto el resultado será un valor teórico de la máxima eficiencia posible según la configuración del

sistema, sin tener en cuenta las pérdidas geométricas. Se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$\eta_{i,ar} = \frac{Q_{ui,ar}}{G_b * A_a} \quad (5.1)$$

$\eta_{i,ar}$  es el rendimiento global instantáneo del colector. Siendo  $Q_{ui, ar}$  el calor útil instantáneo calculado mediante la Ecuación 3.11 como función de radiación absorbida por unidad de área no sombreada,  $S$  (Ecuación 3.10) y las temperaturas del ambiente y de entrada al tubo receptor,  $T_a$  y  $T_i$  respectivamente.

$G_b$  es la Radiación directa disponible en la superficie del concentrador calculada como:  $G_b = I_b/3600$  (W/m<sup>2</sup>). Donde  $I_b$  se obtiene mediante el procedimiento mostrado en la sección 1.6.5

**Método práctico del calor instantáneo:** consiste en evaluar la eficiencia real a través del absorbedor a partir del calor transferido longitudinalmente al fluido como función del calor específico del fluido, el flujo másico y las temperaturas medidas a la entrada y salida del absorbedor (Ecuación 5.3). Este método tiene en cuenta todas las pérdidas reales presentes en el tubo absorbedor, incluyendo las geométricas.

$$\eta_{i,r} = \frac{Q_{u,ar}}{G_b * A_a} \quad (5.2)$$

$$Q_{u,ar} = \dot{m} Cp (Ts - Ti) \quad (5.3)$$

$\eta_{i,r}$  es el rendimiento global instantáneo a través del tubo absorbedor calculado como función de la Radiación directa disponible en la superficie del concentrador,  $G_b$ .  $T_s$ ,  $T_i$  son las temperaturas de salida y entrada del absorbedor respectivamente.

**Método práctico de la eficiencia global:** consiste en la determinación de la eficiencia del sistema a partir de el calor almacenado por el fluido en un intervalo de tiempo determinado, como función de las temperaturas medidas a la salida del absorbedor en un tiempo  $t_1$  y un tiempo  $t_2$ . En este caso  $t_2-t_1 = 5$  minutos. De esta manera se evalúan, además de las pérdidas en el absorbedor, las que ocurren durante el proceso de recirculación del fluido.

$$\eta = \frac{Q_u}{\bar{G}_b * A_a} \quad (5.4)$$

$$Q_u = \dot{m}_p Cp (T_{s2} - T_{s1}) \quad (5.5)$$

$\eta$  es el rendimiento global medio del colector calculado como función de la Radiación directa promedio disponible en la superficie del concentrador,  $\bar{G}_b$  es la media aritmética de los valores de  $G_b$  durante el intervalo de tiempo.

$T_{s1}$ ,  $T_{s2}$  son las temperaturas del fluido a la salida del absorbedor para el inicio y final del intervalo de tiempo.  $\dot{m}_m$  es el cociente entre la masa que se encuentra en el sistema y tiempo en el que ocurre el incremento de su temperatura de  $T_{s1}$  a  $T_{s2}$  (5 minutos).

Cuadro 32a. Resultados evaluación rendimiento del CCP con agua dura como fluido de trabajo

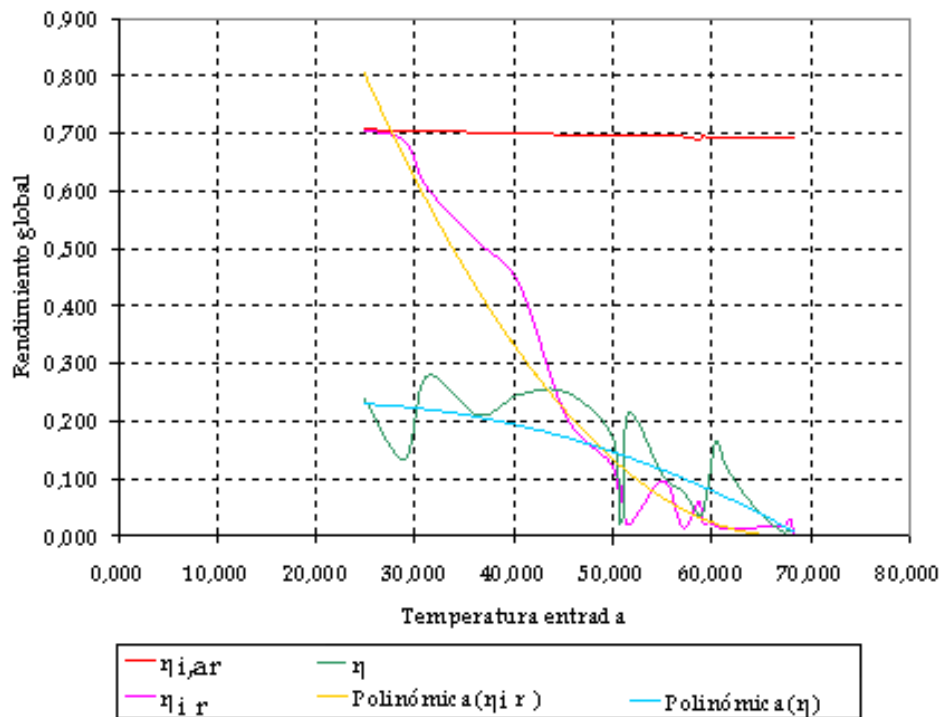
Hora	Radiacion directa G <sub>b</sub> (w/m <sup>2</sup> )	T° Entrada °C	T° Salida °C	Q <sub>ui, ar</sub> (W) Eq.3.11	η <sub>i, ar</sub> Eq. 5.1	Q <sub>u a, r</sub> (W) Eq. 5.2	η <sub>i, r</sub> Eq. 5.3	Q <sub>u</sub> (W) Eq. 5.4	η Eq. 5.5
09:57:39	716,53	24,817	30,321	506,5	0,707	506,03	0,71	171,72	0,24
10:00:00	719,39	28,926	34,300	505,0	0,705	494,07	0,69	96,28	0,13
10:05:00	780,00	31,230	36,366	549,5	0,704	472,19	0,61	217,22	0,28
10:10:00	818,33	36,428	40,973	574,6	0,702	417,86	0,51	171,72	0,21
10:15:00	810,56	40,537	44,397	567,5	0,701	354,88	0,44	199,05	0,25
10:20:00	786,39	45,300	47,074	549,0	0,698	163,10	0,21	196,41	0,25
10:25:00	153,33	50,000	50,202	547,0	0,697	18,57	0,12	26,04	0,17
10:30:00	813,33	50,623	50,996	566,0	0,697	34,29	0,04	16,72	0,02
10:30:30	760,28	51,023	51,758	528,9	0,696	67,57	0,09	23,61	0,03
10:35:00	687,50	51,588	51,735	484,1	0,695	13,51	0,02	146,98	0,21
10:40:00	799,72	55,105	55,946	554,9	0,695	77,32	0,10	83,25	0,10
10:45:00	855,28	57,097	57,231	593,8	0,695	12,32	0,01	66,36	0,08
10:50:00	117,50	58,685	58,762	382,8	0,690	7,08	0,06	-67,66	0,58
10:55:30	840,56	57,066	57,258	584,6	0,696	17,65	0,02	114,46	0,14
11:00:00	697,78	59,805	59,984	482,0	0,693	16,46	0,02	27,33	0,04
11:05:00	74,72	60,459	60,547	482,0	0,692	8,09	0,11	53,16	0,71
11:10:00	789,72	61,731	61,836	547,0	0,693	9,65	0,01	129,59	0,16
11:15:00	858,06	64,832	64,972	594,0	0,693	12,88	0,02	96,04	0,11
11:18:00	935,24	67,128	67,294	648,0	0,693	15,28	0,02	37,44	0,04
11:18:46	945,61	68,023	68,321	655,0	0,693	27,42	0,03	8,07	0,01
11:20:00	931,52	68,216	68,231	645,0	0,693	1,38	0,00	8,37	0,01
<b>Prom</b>				577,4	0,731	137,4	0,2	99,6	0,2

En el cuadro 32a se muestran tres tipos de rendimiento asociados al CCP,  $\eta_{i,ar}$ ,  $\eta_{i,r}$  y  $\eta$ . En la última fila se muestran los valores promedio para cada uno de los tres casos, tanto del calor útil, como del respectivo rendimiento. La diferencia notoria entre el rendimiento obtenido por el primer método y los dos últimos, es debida a las pérdidas ópticas, térmicas y geométricas del colector, que en primer caso son consideradas a partir de su valor teórico o de diseño, mientras en los dos últimos se cuantifican de manera global e indirecta.

Una observación que se desprende de lo anterior, es que las pérdidas ópticas, geométricas y térmicas reales del colector construido representan alrededor del 50% de la energía disponible en la superficie del reflector. Durante las pruebas se evidenció que las pérdidas geométricas eran del 25%, lo cual implica que el restante 25% corresponde a las pérdidas ópticas y térmicas reales. La causa de estos valores tan grandes está relacionada con los inconvenientes en el proceso de fabricación del reflector, el en cual se presentaron imprecisiones significativas de forma, modificando así el tamaño y características de la imagen formada.

Una segunda observación importante es la disminución del rendimiento a medida que el fluido aumenta de temperatura, como se ve en la gráfica siguiente.

Gráfica 25. Rendimiento global del CCP según pruebas de desempeño con agua dura como fluido de trabajo



**Pruebas del 14 de diciembre.** Para esta segunda prueba se cambió el fluido de trabajo por etanol al 95% y se introdujeron algunas modificaciones al absorbedor. Se tomó información por un tiempo de 2 horas, entre las 10:15 a.m. y las 12:15 p.m. con intervalos de 1 segundo. Se emplearán los datos correspondientes a los primeros 105 minutos por ser este el tiempo que tardó en obtenerse la temperatura máxima en el fluido de trabajo.

A continuación se presenta un resumen de los datos obtenidos en dichas pruebas.

Cuadro 30b: Datos operacionales de pruebas de desempeño CCP con etanol al 95% como fluido de trabajo

Hora	T° Entrada °C	T° Salida °C	Radiación G W/m <sup>2</sup>
10:15	22,135	26,324	897,564
10:20	25,897	30,781	905,318
10:24	31,634	32,341	808,845
10:25	31,568	33,079	803,557
10:26	31,919	33,088	581,021
10:27	32,508	33,333	767,195
10:28	33,062	34,096	862,331
10:29	33,589	34,733	864,939
10:30	34,466	35,738	878,926
10:31	35,270	36,671	893,978
10:32	35,896	37,445	891,202
10:33	36,454	38,190	903,675
10:34	37,033	38,966	913,725
10:35	37,806	39,633	916,771
10:36	38,088	40,183	920,726
10:37	38,725	41,057	922,108
10:38	39,437	41,829	910,270
10:39	39,686	42,260	813,860
10:40	40,106	43,020	905,721

Hora	T° Entrada °C	T° Salida °C	Radiación G W/m <sup>2</sup>
10:41	41,182	43,935	875,299
10:42	41,690	44,705	752,468
10:43	42,046	45,457	845,121
10:44	42,699	46,051	750,908
10:45	43,046	46,426	687,590
10:46	43,044	46,811	218,441
10:47	43,433	46,945	255,340
10:48	43,466	47,160	776,361
10:49	43,764	47,779	905,488
10:50	44,474	48,375	918,822
10:51	44,914	48,740	911,745
10:52	44,737	49,157	896,223
10:53	45,258	49,732	892,277
10:54	45,934	50,219	915,157
10:55	46,622	50,708	836,794
10:56	46,666	50,989	260,842
10:57	46,052	50,214	168,877
10:58	44,492	48,375	215,443
10:59	43,039	47,201	368,643
11:00	41,863	45,962	249,364
11:01	40,509	44,986	394,869
11:02	43,554	50,609	290,352
11:03	45,510	50,770	292,695
11:04	45,165	49,456	315,408
11:05	44,464	49,900	566,843
11:06	45,053	50,358	169,606
11:07	45,563	49,996	120,333
11:08	44,313	48,279	121,901
11:09	43,557	47,265	173,304
11:10	43,824	48,244	564,165
11:11	44,526	49,000	824,356
11:12	45,880	50,165	877,315
11:13	47,049	51,135	963,964
11:14	47,330	51,654	908,727
11:15	47,806	51,968	993,126
11:16	48,133	52,016	975,768
11:17	48,203	52,365	993,458
11:18	49,430	53,529	891,252
11:19	47,788	52,265	842,630
11:20	46,079	53,135	992,339
11:21	48,391	53,651	1000,261

Hora	T° Entrada °C	T° Salida °C	Radiación G W/m <sup>2</sup>
11:22	50,547	54,838	1007,165
11:23	50,551	55,986	1017,215
11:24	50,715	56,019	1028,684
11:25	51,715	56,148	1024,260
11:26	53,630	57,457	1165,135
11:27	54,865	58,766	1175,435
11:28	56,061	60,075	1185,735
11:29	57,342	61,036	1196,036
11:30	58,221	61,733	1206,336
11:31	59,246	63,013	1216,636
11:32	59,865	63,245	1226,937
11:33	61,664	65,016	1237,237
11:34	63,951	67,363	1247,537
11:35	64,880	67,895	1082,706
11:36	65,402	68,156	1091,633
11:37	65,360	68,273	1098,842
11:38	66,187	68,975	1109,287
11:39	66,072	68,756	1120,895
11:40	66,433	69,014	1115,287
11:41	67,069	69,546	1246,521
11:42	67,613	69,986	1266,007
11:43	67,778	70,048	1273,265
11:44	68,818	70,984	1271,282
11:45	69,832	71,894	1290,848
11:46	70,027	71,986	1291,727
11:47	70,284	72,139	1295,696
11:48	70,847	72,598	1259,081
11:49	71,314	72,962	1273,071
11:50	71,442	72,986	1106,165
11:51	71,658	73,098	1289,165
11:52	72,252	73,589	1198,957
11:53	72,661	73,894	1058,684
11:54	73,555	74,684	1206,156
11:55	74,838	75,864	1105,986
11:56	75,062	75,984	1216,678
11:57	75,249	76,068	1189,641
11:58	75,452	76,167	1168,841
11:59	75,607	76,218	1251,231
12:00	75,730	76,238	1298,351

Con los anteriores datos se realizó la evaluación operacional del CCP en forma semejante a como se procedió en las primeras pruebas.

Cuadro 31b. Condiciones operacionales del CCP con etanol al 95% como fluido de trabajo

CONDICIONES OPERACIONALES DEL CCP														
$G_b$ W/m <sup>2</sup>	$T_a$ °C	$T_i$ °C	$T_r$ °C	$m_{fi}$ kg/s	$V_a$ m/s	$\eta_{opt}$	$D_i$ m	$D_o$ m	$d_i$ m	$d_o$ m	$A_a$ m <sup>2</sup>	$A_r$ m <sup>2</sup>	$A_c$ m <sup>2</sup>	$\epsilon_c$
857	31,2	75,42	76,1	0,12	4	0,89	0,014	0,016	0,022	0,025	0,96	0,05	0,079	0,88
Características del flujo interno								Propiedades del aire exterior						
$C_p$	$\rho$	$\mu_{fi}$	$k_{fi}$	$Pr_{fi}$	$Re_{fi}$	$Nu_{fi}$	$h_{fi}$	$T_f$	$\rho_a$	$\mu$	$k_a$	$Pr_a$		
2400	810	857	31,2	75,42	76,1	0,12	4	80	0,950	2,1E-05	0,030	0,700		
								26	1,177	1,8E-05	0,026	0,708		

Cuadro 32b. Resultados evaluación rendimiento del CCP con etanol al 95% como fluido de trabajo

Hora	Radiación $G_b$ W/m <sup>2</sup>	T° Entrada °C	T° Salida °C	$Q_{i,ar}$ (W) Eq.3.11	$\eta_{i,ar}$ Eq. 5.1	$Q_{u,ar}$ (W) Eq. 5.2	$\eta_{i,r}$ Eq. 5.3	$Q_u$ (W) Eq. 5.4	$\eta$ Eq. 5.5
10:15	628,295	22,135	26,324	443,9	0,707	221,18	0,35	90,29	0,14
10:20	633,723	25,897	30,781	445,8	0,703	257,88	0,41	102,53	0,16
10:25	566,192	30,169	32,341	396	0,699	114,68	0,20	51,10	0,09
10:30	543,066	32,298	33,666	379,2	0,698	72,21	0,13	6,74	0,01
10:35	632,709	32,579	38,181	441,9	0,698	295,78	0,47	128,78	0,20
10:40	626,176	37,945	41,670	434,6	0,694	196,67	0,31	87,19	0,14
10:45	547,594	41,578	45,315	377,7	0,69	197,31	0,36	87,31	0,16
10:50	430,423	45,216	47,414	293,5	0,682	116,05	0,27	47,98	0,11
10:55	623,308	47,215	49,711	428,1	0,687	131,80	0,21	34,49	0,06
11:00	176,844	48,652	48,548	113,9	0,644	-5,47	0,03	-3,26	0,02
11:05	260,423	48,516	49,144	172,8	0,664	33,17	0,13	9,05	0,03
11:10	160,903	48,893	48,828	102,8	0,639	-3,42	0,02	2,30	0,01
11:15	639,448	48,989	50,784	438,9	0,686	94,80	0,15	56,83	0,09
11:20	657,363	51,357	52,662	450,4	0,6865	68,91	0,10	29,09	0,04

Hora	Radiación $G_b$ W/m <sup>2</sup>	T° Entrada °C	T° Salida °C	Qui,ar (W) Eq.3.11	$\eta_{i,r}$ Eq. 5.1	Qu ar (W) Eq. 5.2	$\eta_{i,r}$ Eq. 5.3	Qu (W) Eq. 5.4	$\eta$ Eq. 5.5
11:25	710,862	52,569	55,328	487,5	0,686	145,70	0,20	52,63	0,07
11:30	830,015	54,762	59,813	570,1	0,687	266,71	0,32	101,54	0,12
11:35	841,547	58,993	65,306	576	0,684	333,35	0,40	165,55	0,20
11:40	775,032	65,891	68,635	525,6	0,678	144,88	0,19	55,95	0,07
11:45	888,709	68,222	70,492	604,2	0,68	119,84	0,13	61,46	0,07
11:50	871,604	70,783	72,534	590,9	0,678	92,47	0,11	53,04	0,06
11:55	820,253	72,993	74,226	553,7	0,675	65,11	0,08	4,80	0,01
12:00	857,464	75,420	76,135	578,5	0,675	37,75	0,04	4,80	0,01
					<b>Prom</b>	148,0	0,22	97,5	0,25

En el cuadro 32b se observan algunas diferencias respecto a los resultados obtenidos en las pruebas del 14 de noviembre. Se produjo un ligero aumento en el calor transferido al fluido de 137.4 a 148W. Esto se explica por las modificaciones que tuvieron lugar en las características del sistema, como el aumento del diámetro del absorbedor y el cambio en la posición del mismo, lo cual condujo a un aumento en la eficiencia del 20 al 25%. Además el cambio del fluido de trabajo permitió obtener temperaturas mayores, hasta alcanzar casi los 77°C, esto sumado con la adición de válvulas para controlar el flujo a la entrada al absorbedor permitió conseguir evaporaciones esporádicas del fluido de trabajo de aproximadamente un 3% de la masa total del mismo, es decir unos 120g de etanol.

En definitiva se han observado valores del rendimiento cercanos al 70% al comienzo de cada una de las pruebas, indicando un excelente comportamiento del sistema cuando la temperatura de entrada es baja, y sigue siendo aceptable para temperaturas cercanas a los 45°C, cuando el rendimiento es aún mayor a 40%. Después de esta temperatura el rendimiento disminuye drásticamente hasta volverse casi nula la ganancia de

calor hacia el fluido de trabajo en las instancias finales del calentamiento. Tal comportamiento se observa también en la Gráfica 25.

Esto indica claramente que cada colector debe ser diseñado y construido para trabajar eficientemente en intervalos específicos de temperatura, de otra manera se incurrirá en enormes pérdidas y rendimientos globales muy bajos. Así que conseguir incrementos de temperatura superiores a 30°C mediante un único colector implicaría la utilización de un tamaño mayor al que se requeriría con varias etapas de colectores con características adecuadas, es decir, con relaciones de concentración diferentes para cada etapa, bajas para las primeras fases de calentamiento y más altas cuanto mayor sea la temperatura requerida en el fluido de trabajo.

## 6. CONSIDERACIONES ECONÓMICAS DE LA ENERGÍA SOLAR

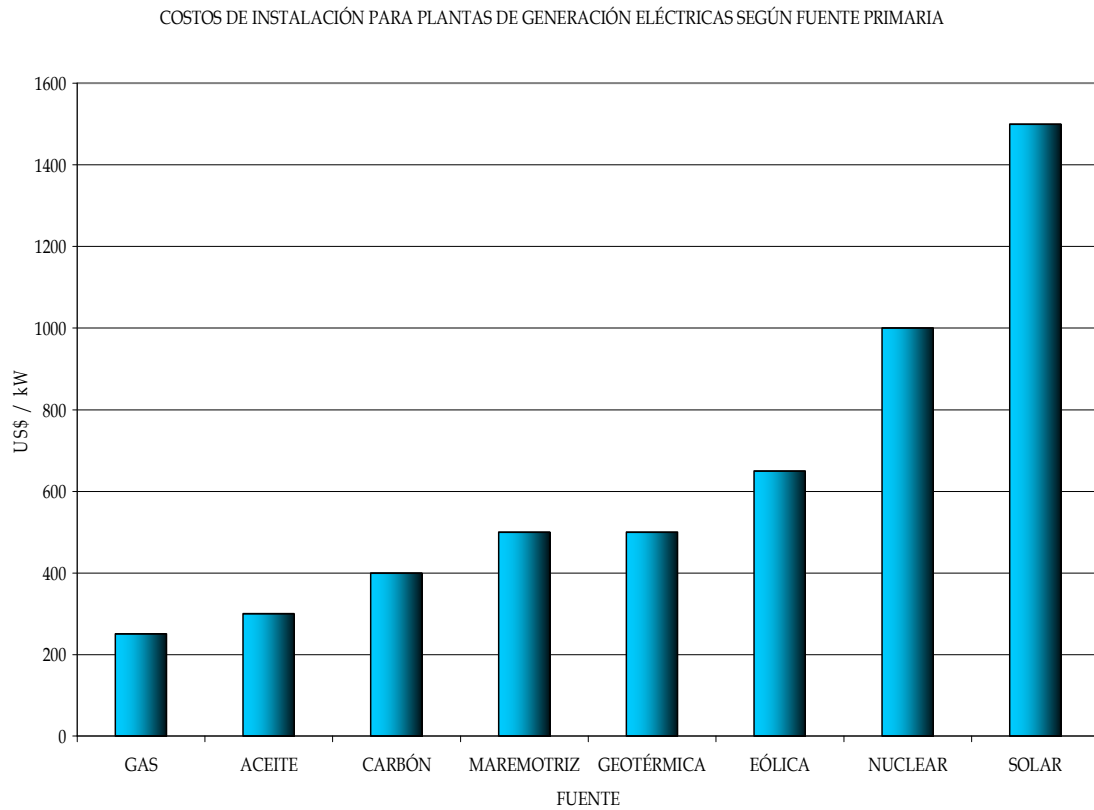
Aunque se dice que la energía solar es gratis, no necesariamente significa que se obtengan de manera automática bajos costos de aprovechamiento, dada la necesidad de emplear sistemas de captación, almacenamiento y equipos que posibiliten su uso para propósitos específicos, con costos de inversión significativos debidos, por un lado, a la baja densidad de la energía solar y por otro, al lento desarrollo de tecnologías económicas y eficientes. No obstante, para aplicaciones de mediano y largo plazo, la viabilidad económica resulta ser suficientemente atractiva para motivar su implementación con propósitos comerciales.

En el ámbito de la generación de electricidad, la energía solar resulta poco ventajosa en términos de los *costos de instalación/kW generado*, sin embargo en aplicaciones como la calefacción o refrigeración, la destilación, o la producción de vapor, los costos de instalación se ven compensados con el bajo costo de operación. En la Gráfica 26 se muestra comparativamente el costo de la energía solar frente a las fuentes convencionales.

Actualmente existe en varios países una gran variedad de sistemas para calefacción o acondicionamiento de aire a partir de la energía solar con costos de adquisición + operación relativamente competitivos. De manera semejante para calentamiento de agua con fines domésticos e industriales, se emplean calentadores con notables ventajas económicas y operacionales.

Los colectores solares de concentración cilíndrico-parabólicos, por sus características operacionales, son empleados especialmente para generación de electricidad en plantas térmicas en varios lugares del mundo, especialmente en Israel, Egipto, Estados Unidos, España, entre otros. Aunque los costos iniciales son elevados respecto a otras alternativas energéticas, el progreso tecnológico en este campo, sugieren un futuro prometedor a mediano plazo.

Gráfica 26. Costos de instalación para plantas de generación eléctricas según fuente primaria



Fuente: adaptado de Solar Energy Engineering, 1991

## **6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA GENERACIÓN DE VAPOR A PARTIR DE COLECTORES SOLARES DE CONCENTRACIÓN CILÍNDRICO PARABÓLICOS.**

El estudio económico resulta un factor determinante al momento de evaluar la viabilidad de una alternativa cuyo propósito principal sea el comercial.

En el presente caso se propone la realización de un estudio sobre el potencial, en términos económicos, del aprovechamiento de la energía solar mediante colectores de concentración cilíndrico parabólicos, partiendo de la relación entre los costos de instalación + operación y los beneficios obtenidos, para un periodo de tres años, de un prototipo desarrollado.

A fin de que los resultados sean representativos, es necesario hacer varias consideraciones previas sobre los costos de instalación, referidos en el cuadro 33.

Si bien el prototipo es de un tamaño aproximado de 1 m<sup>2</sup> de apertura, algunos costos de fabricación no deben contabilizarse en su totalidad, puesto que obedecen a especificaciones de capacidad o tamaños comercialmente disponibles, más no a los requeridos para la capacidad del sistema, en tales casos se imputará un costo proporcional, según el tamaño del colector.

El periodo de referencia obedece al tiempo de vida promedio de los espejos, es decir que en 3 años tendría lugar el cambio de los concentradores por deterioro normal de su operación, aunque el tiempo promedio de vida del sistema conjunto sea de unos 10 años.

Además de los costos de instalación se tendrán en cuenta otros ítems como mantenimiento, operación, los costos del capital y la depreciación.

Cuadro 33. Presupuesto bruto de fabricación CCP 1 m<sup>2</sup> de apertura.

<b>DETALLE PRESUPUESTO CONSTRUCCIÓN CCP</b>		
<b>ITEM</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>COSTO</b>
1	Espejo cilíndrico parabólico	568400
2	Estructura del colector	313200
3	Tanque - Caldera	150800
4	Tubo de vidrio	90000
5	Tubería para agua caliente	85000
6	Válvula solenoide + bobina	171000
7	Electrobomba	80000
8	Control presostático	81034
9	Tubo de Cobre (absorbedor)	16200
10	Manómetro	40000
11	Varios	25000
<b>TOTAL</b>		<b>1'620.634</b>

Según los resultados obtenidos en la prueba de desempeño, en promedio se aprovechan 140Watts/m<sup>2</sup>, durante 4.5 horas de radiación diaria, lo que representa una capacidad de 0.63 kW.h/m<sup>2</sup> cada día, es decir, 18.9 kW.h/m<sup>2</sup> mensuales, que equivalen que es la energía necesaria para producir 17.4 kg/m<sup>2</sup> de vapor saturado a 15 psi.

**Determinación de los costos totales de producción.** Los costos de la inversión inicial, que corresponden a la fabricación e instalación (contabilizados solo costos imputables) según se aclaró anteriormente son los siguientes.

Cuadro 34. Costos ajustados construcción de CCP por metro cuadrado

COSTOS AJUSTADOS CONSTRUCCION CCP		
Item	Descripción	Costo
1	Espejo reflector	300000
2	Estructura del colector	300000
3	Tanque - Caldera	50000
4	Tubo de vidrio	90000
5	Tubería	25000
6	Válvula solenoide + bobina	20000
7	Electrobomba	15000
8	Control presostático	15000
9	Tubo de Cobre (absorbedor)	10000
10	Manómetro	5000
11	Instrumentos	5000
12	Aislamiento	10000
13	Otros	15000
Total		860000

Los costos de operación-mantenimiento debidos a labores de limpieza e inspección rutinaria y eventuales reparaciones, en promedio se estima que son del orden del 1.5% del costo de instalación por cada año de operación, es decir \$12900/m<sup>2</sup>.

Los costos de depreciación se computan de acuerdo al periodo de vida del sistema que es de 3 años para los espejos y 10 años en promedio para el resto del sistema, aplicando cantidades iguales para cada intervalo de tiempo, como sigue:

Costo del equipo sin espejos = \$690.000

Intervalos = 120 meses

Costo de depreciación equipo = \$5750 mensual

Costo espejos = 300000

Intervalos = 36 meses

Costo depreciación espejos = \$8333 mensual

Costo total de depreciación = \$14083 mensual

Los costos del capital se estiman con base en la tasa de interés vigente, que en este caso es de 10% efectivo anual. Es decir, que el costo del capital será de \$7166 mensuales.

Como es común en este tipo de análisis, los cálculos deben realizarse teniendo en cuenta el valor del dinero en el tiempo, para tal efecto se empleará una tasa de inflación del 4.5% anual, es decir 0.375% mensual. De modo que

$$CF = CP * (1 + i)^m \quad (6.1)$$

Donde *CP* es el capital en valor presente, *CF*, el capital en valor futuro, *i* la tasa de interés del periodo y *m* el número de periodos a evaluar.

Hay dos maneras de evaluar económicamente un proceso productivo, la primera consiste en calcular el costo unitario de producción y compararlo con valores de referencia conocidos. Otra forma es determinando la rentabilidad del proceso para un periodo de tiempo determinado, lo cual precisa de

conocer el valor comercial del producto, de manera que pueda juzgarse su competitividad.

En casos como el presente, es más conveniente emplear el primer camino, por varios motivos, es más directo, sencillo y no precisa del conocimiento del valor comercial del producto que por ser un servicio industrial, está asociado generalmente a otros procesos y su costo depende además del tamaño o capacidad de la planta de producción.

A continuación se muestra un resumen de los costos y demás factores anteriormente descritos, así como los resultados principales.

Cuadro 35. Costos unitarios de la energía producida por metro cuadrado de colector

<b>COSTO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA</b>		
Ítem	Unidades	Valor
Capital	\$	860000
Tasa de interés	--	0,1
Costo anual del capital	\$	86000
Costos anuales de mantenimiento	\$	12900
Costos anuales de operación	\$	13760
Costos de depreciación	\$	64571
Tasa de inflación	--	0,045
Costos anuales totales	\$	181337
Producción anual	kW-h	229,95
Costo unitario	\$/kW-h	<b>788,6</b>
Costo unitario sin inversiones	\$/kW-h	<b>121,2</b>

El resultado muestra un costo unitario de la energía aprovechada mediante el sistema construido de \$788.6/kW-h, el cual es muy superior al valor comercial del mismo, que en este caso es de unos \$150/kW-h para sistemas con capacidades del orden de los 500MW-h anuales. Sin embargo, no es tan apropiado hacer estas comparaciones debido a las diferencias tan grandes de capacidad de producción, pues a mayor escala los costos se reducen de manera drástica. En el caso de los colectores de concentración se pueden obtener costos del orden de \$200/kW-h en sistemas de mediana y alta capacidad.

El costo unitario sin inversiones, que en este caso es de \$121.2/kW-h, involucra solo los gastos debidos a operación y mantenimiento, por lo tanto es mucho más cercano al valor promedio de producción en una industria de mediana capacidad.

**Determinación de la viabilidad económica.** El segundo modo de evaluar la viabilidad de una alternativa económica es determinando su rentabilidad en un periodo de tiempo conveniente, lo cual puede hacerse, hallando la Tasa Interna de Retorno del Capital (TIR) o el Tiempo de retorno del capital (TRC). Para esto, se tendrán en cuenta los costos de producción determinados en la sección anterior, para un tiempo de tres años divididos en periodos de 6 meses, durante los cuales se tendrá una producción anual de 229.95 kW-h, con un valor en el mercado de \$1100/kW-h.

De esta manera se tiene:

Inversión inicial: \$860000

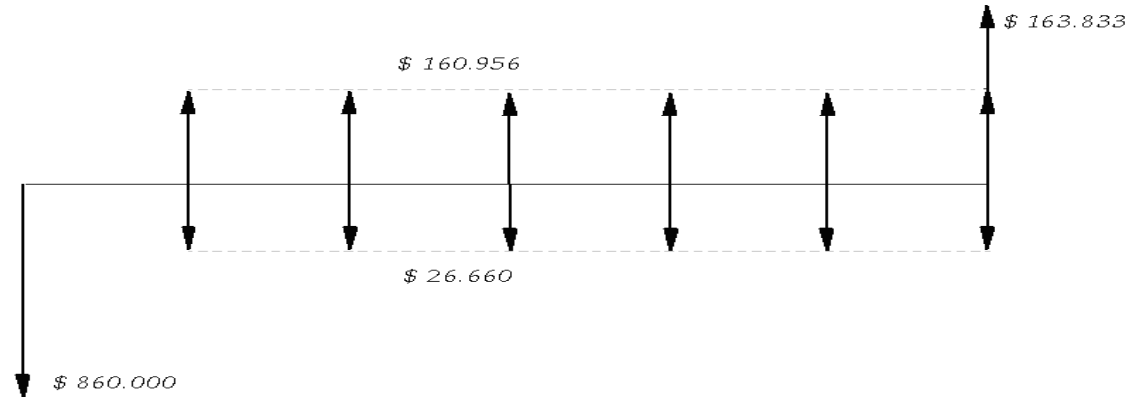
Costos semestrales de producción: \$26660

Valor semestral de la energía producida: \$160956

Valor final del equipo: \$163833

A continuación se presenta el respectivo diagrama de caja.

Figura 14. Diagrama de caja del análisis de costos del sistema CCP para un periodo de 3 años.



*Cálculo de la tasa interna de retorno TIR*

Para calcular la TIR debe tenerse en cuenta el valor del dinero en el tiempo (Ecuación 6.1) para cada una de las cantidades.

Costos totales de producción: \$169232

Valor total de la energía producida: \$1021773.21

Valor inversión inicial: 982829.88

Valor del equipo: \$163833

$$TIR = \frac{\text{Valor neto de la energía producida} - \text{Inversión inicial}}{\text{Inversión inicial}} * 100$$

$$TIR = \frac{(1021773.21 + 163833 - 169232) - (982829.88)}{982829.88} * 100$$

$$TIR = 3.41\%$$

### *Tiempo de Retorno de la Inversión*

Para calcular el tiempo de retorno de la inversión inicial se puede emplear la siguiente expresión:

$$0 = -P + \sum_{j=1}^n (FC)_j$$

Donde,

P: valor de la inversión inicial = \$860000

FC: Flujo de caja (Valor neto de la energía producida en valor futuro) = \$268610

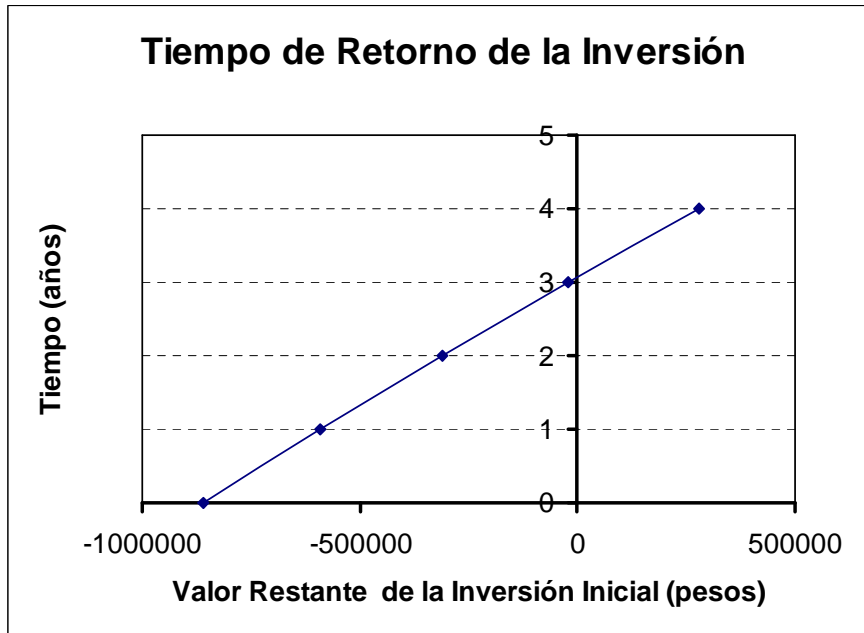
Tabulando estos valores se obtiene lo siguiente:

Cuadro 36. Calculo del Tiempo de retorno de la inversión.

Flujo de Caja	Valor Restante de la Inversión	Tiempo en años
0	-860000	0
268610	-591390	1
279354,4	-312035,6	2
290528,576	-21507,024	3
302149,719	280642,695	4

En la siguiente gráfica se muestra claramente el comportamiento de la inversión para un periodo de cuatro años.

Gráfica 27. Tiempo de retorno de la inversión



El tiempo de retorno de la inversión está dado por el punto de intersección entre la curva de *Valor restante de la inversión inicial* con el eje vertical, que representa *el tiempo en años*, lo cual ocurre para un tiempo de 3.2 años.

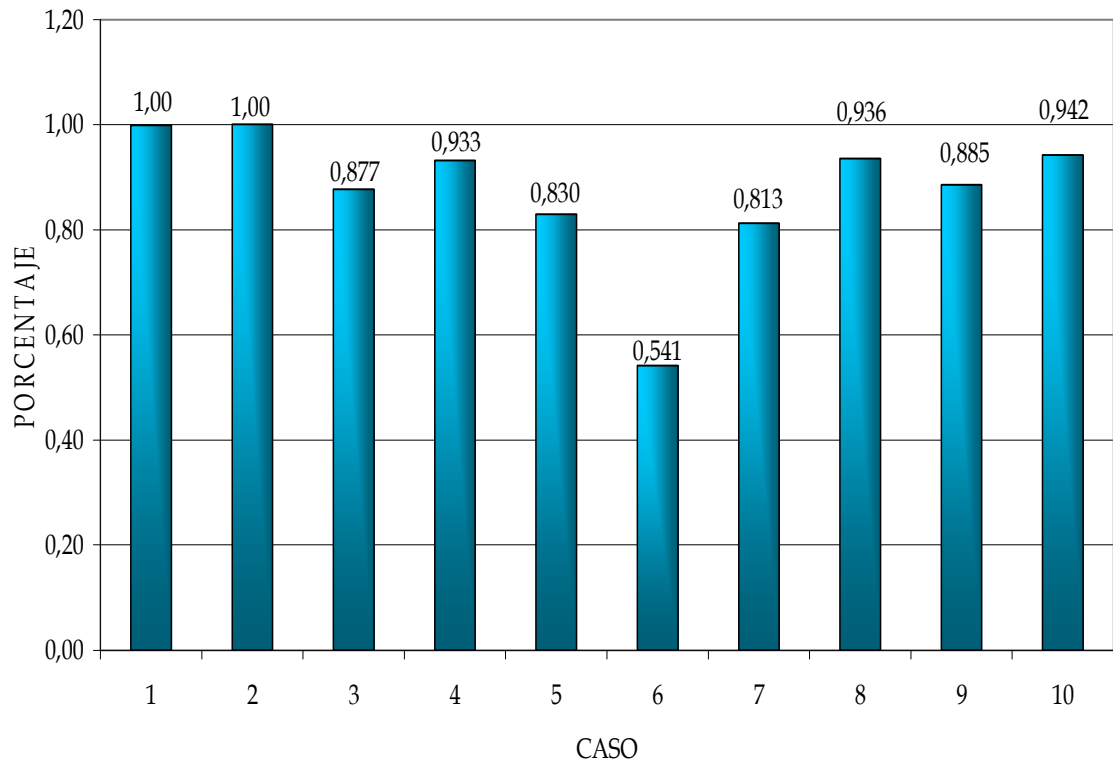
De todo esto es evidente que, a menos que se trate de un sistema de mediana o alta capacidad, resulta poco ventajoso el aprovechamiento de la energía solar mediante la vía térmica, específicamente colectores de concentración. Sin embargo, no por esto deja de ser un campo de interés investigativo, pues a medida que se logre reducir los costos de instalación y aumentar la eficiencia global del sistema, será una alternativa cada vez más atractiva en términos económicos y ambientales.

## CONCLUSIONES

- Se logró realizar satisfactoriamente la evaluación del potencial para la producción de vapor mediante sistemas de colectores de concentración cilíndrico-parabólicos a través de un análisis teórico-experimental de las variables geométricas, estructurales, ópticas y térmicas de un sistema CCP y el diseño y construcción de un modelo con orientación fija ajustable manualmente de  $1\text{m}^2$  de área de apertura, con concentrador en aleación de cobre de 16 mm de diámetro y cubierta de cristal de 24 mm de diámetro, y una relación de concentración  $C = 187$ , el cual fue acondicionado con instrumentos que permitieron cuantificar su desempeño operacional en término de su eficiencia global.
- Al determinar la cantidad de energía solar disponible en Bucaramanga se observó que la ciudad goza de un buen potencial para el aprovechamiento de la energía solar gracias a su conveniente posición geográfica y sus niveles altos de radiación promedio diaria ( $4.3\text{ kW-h/m}^2$ ), sin embargo debido a sus condiciones meteorológicas, es menos favorable el empleo de sistemas de concentración, puesto que solamente ( $2.2\text{ kW/m}^2$ ) corresponden a radiación directa.
- Mediante un análisis teórico se logró cuantificar el efecto de la orientación del colector y sus sistema de seguimiento de la posición solar, en la cantidad de energía colectada, determinándose así que un sistema con orientación fija inclinado  $7.14^\circ$  hacia el sur (latitud de Bucaramanga) logra coleccionar el 93.4% de la que lograría un colector con seguimiento continuo alrededor de un eje

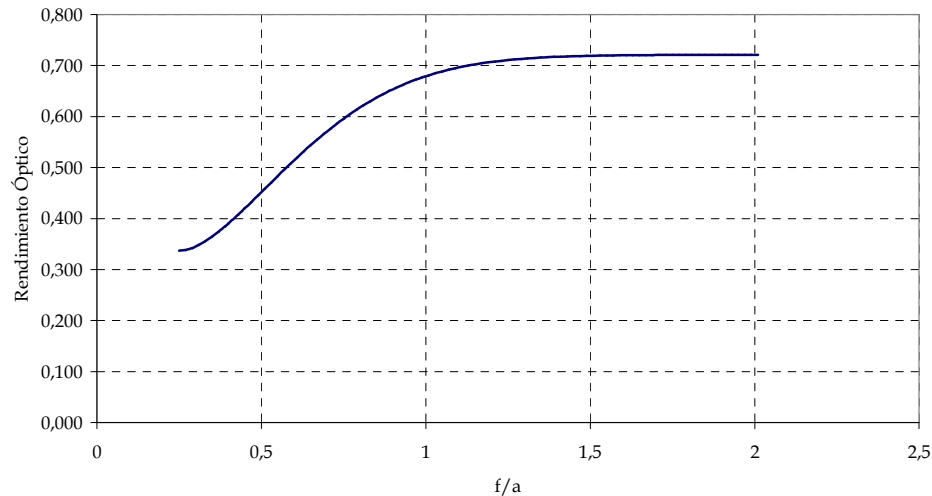
horizontal norte-sur (Gráfica 15), con la ventaja adicional que tienen los sistemas fijos de ser mucho menos complejos.

Gráfica 15. Resultados anuales porcentuales relativos al Caso 1.



- El estudio analítico del efecto de la geometría del concentrador en la eficiencia óptica del colector, permitió observar que para unas determinadas características ópticas (físicas) del colector, su correspondiente eficiencia aumenta a medida que también lo hace la relación entre la apertura del concentrador y la distancia focal ( $f/a$ ) (Gráfica 21) hasta un valor máximo que oscila alrededor de 70%.

Gráfica 21. Rendimiento Óptico de un CCP de 1m de apertura como función de la relación  $f/a$ , para  $\rho = 0.88$ ,  $\alpha = 0.91$ ,  $\tau = 0.9$  y  $\theta = 0^\circ$ .



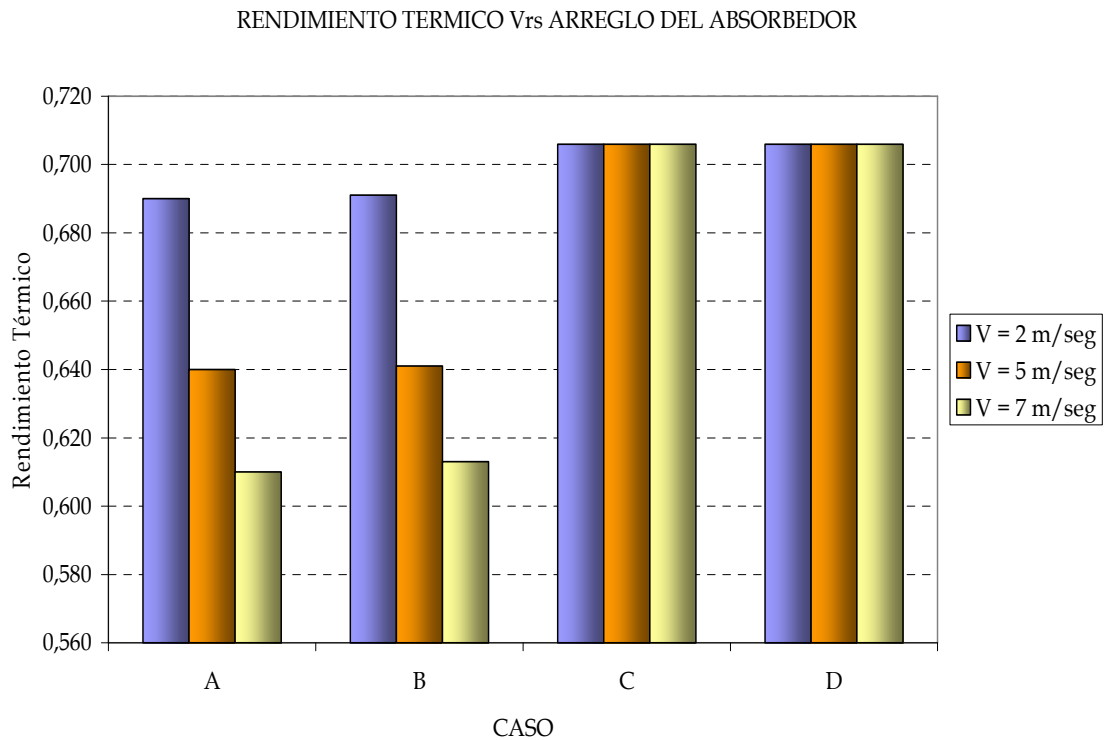
- Al evaluar experimentalmente mediante pruebas de brillo las características ópticas de la superficie reflectora en términos de su reflectividad efectiva para acero inoxidable, espejo de vidrio, chapa de aluminio, película de plata depositada sobre plástico, se pudo establecer que el vidrio posee una mayor reflectividad óptica (0.91) y una menor velocidad de ensuciamiento en condiciones normales de operación (0.3% por cada día de exposición). Además se notó que a mayor espesor del vidrio, mayores son las aberraciones ópticas producidas.

Cuadro 26. Resultados pruebas de reflectividad óptica de materiales

PRUEBAS OPTICAS REFLECTIVIDAD MATERIALES							
MATERIAL	DIRECTA ( $\mu\text{W}$ )	NUEVO		SUCIO 1 SEM		SUCIO 3 SEM	
		REFLEJ ( $\mu\text{W}$ )	$\rho$	REFLEJ ( $\mu\text{W}$ )	$\rho$	REFLEJ ( $\mu\text{W}$ )	$\rho$
Vidrio 5 mm	53,5	47,1	0,88	46,2	0,86	43,5	0,813
Vidrio 3 mm	53,5	47,8	0,893	46,7	0,87	44,15	0,825
Vidrio 2 mm	53,5	48,5	0,907	47,1	0,88	44,7	0,836
Plástico	53,5	44,6	0,834	42,5	0,79	36,2	0,677
Aluminio pulido	53,5	42,8	0,8	41,25	0,77	37,4	0,699
Acero Inox 430	53,5	44	0,822	42,1	0,79	40,2	0,751

- Mediante un estudio analítico del efecto de las características geométricas y mecánicas del absorbedor en la eficiencia del colector, se pudo determinar que una mayor relación de concentración posibilita la obtención de mayores temperaturas en el fluido de trabajo, pero también conduce a pérdidas térmicas mayores. Además se logró establecer que la utilización de cubierta de cristal en el tubo absorbedor permite aumentar la eficiencia global del colector en un 8% respecto a los absorbedores expuestos directamente al aire exterior para velocidades del viento de 5m/s. (Gráfica 23)

Gráfica 23. Variación del rendimiento térmico de un CCP como función del arreglo del absorbedor para diferentes velocidades del viento exterior, para un diámetro exterior del absorbedor  $D_o = 10\text{mm}$



- Se logró la realización exitosa de las pruebas de desempeño del colector construido en las que se obtuvo una temperatura máxima de 67°C utilizando como fluido de trabajo agua dura y de 77°C al emplear etanol al 95%. Con base en estas pruebas se determinó la eficiencia del absorbedor (25%) y la eficiencia global del colector (22%).
- Como resultado de las pruebas se observó además que la eficiencia del colector llega a ser de 40% cuando la temperatura del fluido era inferior a 45°C, lo cual deja ver que cada colector funciona más eficientemente en un rango no mayor de 30°C de incremento en la temperatura del fluido de trabajo, por lo que si se requieren temperaturas elevadas debe optarse por la utilización de múltiples etapas de colectores con relaciones de concentración diferentes, de modo que cada una opere en su rango más óptimo.
- Al evaluar económicamente la producción de vapor mediante colectores de Concentración Cilíndrico-parabólicos, pudo determinarse que el costo total de producción para sistemas a pequeña escala es de \$788/kW-h, el cual es comparativamente alto en contraste con otros sistemas convencionales por la producción de vapor.

En el caso específico de colectores a pequeña escala, como el construido, el tiempo de retorno de la inversión es de 3.2 años, con una tasa atractiva de retorno de 3.4% para el mismo periodo de tiempo.

## OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- El rendimiento real de un colector solar de concentración de orientación fija, es inferior al 50% respecto a los sistemas provistos de seguimiento continuo, contrario a lo que muestra la teoría, debido a que el cambio en la dirección de la radiación solar en el transcurso del día, hace definitivamente indispensable el ajuste continuo del colector, de modo que el ángulo de incidencia sea suficientemente bajo para favorecer la concentración de la radiación reflejada.
- Cuanto menor es el tamaño del colector, menor es también su rendimiento global y cuanto mayor es la capacidad del colector, mayor es su factibilidad económica y técnica, de manera que resultaría razonablemente viable el aprovechamiento de la energía solar por la vía térmica mediante colectores de concentración cilíndrico-parabólicos de alta y mediana capacidad.
- Aunque es posible la producción de vapor mediante colectores de concentración cilíndrico parabólicos, es poco viable a pequeña escala, por su elevado costo de instalación frente a los beneficios obtenidos, especialmente si existen formas más económicas y eficientes de obtener el mismo resultado.
- El verdadero potencial de los colectores cilíndrico-parabólicos de concentración como alternativa para la obtención de energía a partir de la radiación solar, radica en la posibilidad de hacerlo funcional en sitios donde no existan fuentes convencionales de energía como el gas natural o la electricidad, de modo que sea mucho más apremiante la solución de una necesidad que su factibilidad en términos económicos.

- La energía solar aunque no constituya una opción viable en términos técnicos a corto plazo, con el avance de la tecnología necesaria para su aprovechamiento eficiente, podrá llegar a representar una alternativa factible comercialmente gracias al bajo impacto ambiental.
- Para la construcción de colectores de concentración no es muy recomendable el empleo de espejos de vidrio de espesor superior a 3 mm debido a las enormes imperfecciones ópticas que acarrea su moldeo en caliente, a menos que se realice con estrictos controles de calidad.
- Para la generación de vapor mediante colectores de concentración cilíndrico parabólicos es más conveniente la utilización de varias etapas de colectores con diferentes razones de concentración, de manera que cada una pueda operar en su nivel de temperatura más óptimo, de esta manera podrían obtenerse eficiencias globales cercanas al 40%.
- Es muy importante que se continúe la investigación en este campo del aprovechamiento de la energía solar por la vía térmica de manera juiciosa y con el ánimo de hacer su utilización cada vez más viable.
- Sería realmente interesante en el futuro la combinación de las distintas formas de aprovechamiento de la energía solar, tanto térmica como fotovoltaica, con miras a desarrollar un sistema completamente autosuficiente, que pueda ser empleado en lugares donde la energía eléctrica sea un inconveniente.

## BIBLIOGRAFÍA

A.M. SAYIGH. Solar Energy Engineering, Mechanical Engineering Department, Riyadh University. Saudi Arabia, 1991.

DUFFIE, John & BECKMAN, William. Solar Engineering of Thermal Processes. John Willey & Sons, Inc. New York, USA. 1991.

FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Procesos Termosolares En Baja, Media y Alta Temperatura. Universidad de Cantabria.

GUALDRÓN, Mónica & PÁEZ, Slendy. Evaluación del Potencial de Desinfección de Agua Cruda Mediante el Aprovechamiento de la Energía Solar a Través de un Colector Cilindro-parabólico. Bucaramanga, Colombia. 2006. Trabajo de Grado.

Harris, J. A. and W. S. Duff (1981), "Focal Plane Flux Distribution produced by Solar Concentrating Reflectors" Solar Energy 27 (5), 403.

J. P. Holman. Transferencia de Calor. McGraw Hill, 8ª Edición. Madrid, España. 1998.

J. TARKIN, Anthony. Ingeniería Económica. McGraw Hill, Bogotá, Colombia. 1978.

MEINEL, Aden B. Applied Solar Energy (an introduction). Addison Wesley Publishing. 1976.

SILVA PEREZ, Manuel. Sistemas Termosolares De Concentración.  
Universidad de Sevilla. 2005

# ANEXOS

## ANEXO A: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS INSTRUMENTOS ÓPTICOS EMPLEADOS EN PRUEBAS DE BRILLO.

### OPTICAL POWER METER

#### Model 1815-C

### Instrument Specifications

Display Type	3.5-digit LCD
Sampling Rate	2.5 Hz
Gain Ranges	6 Ranges, 1 per Decade
Full Scale Readings:	
Low-Power	20 nW–2 mW
Low-Power w/Attn	20 $\mu$ W–2 W
High-Power	2 W–2 kW
DC Accuracy	< $\pm$ 0.5%, $\pm$ 0.25% Typ.
Bandwidth	9 kHz max, Range Dependent
Analog Output	0–2V into 1 M $\Omega$
Input Connector	BNC
Battery Life	130-180 hrs
Battery	6x AA-Alkaline
Weight [lb (kg)]	1.5 (0.7)
Dimensions (W x H x D) [in. (mm)]	3.3 (83) x 6.0 (152) x 7.0 (178)
Operating Temperature	18°C to 28°C, <70% RH
Storage Temperature	-25°C to 60°C, <90% RH

### System Specifications

When used with Newport's low-power, semiconductor detectors, the following System Specifications are attained:

Model	818-UV	818-SL	818-ST	818-ST-UV	818-IR	818-IG
Material	Silicon	Silicon	Silicon	Silicon	Germanium	Indium Gallium Arsenide
Diameter (cm)	1.13	1.13	1x1	1x1	0.3	0.3
Wavelength (nm)	190–1100	400–1100	400–1100	190–1100	780–1800	800–1650
Power Range (dBm)	-83 to +23	-90 to +33	-70 to +33	-70 to +33	-70 to +21.5	-90 to +21.5
Display Resolution (pW)	0.1	0.1	0.1	0.1	10	0.1
Accuracy (%)	$\pm$ 2	$\pm$ 2	$\pm$ 2	$\pm$ 2	$\pm$ 3	$\pm$ 2
Applicable wavelength range (nm)	200–1100	400–1100	400–1100	190–1100	780–1700	800–1650
Linearity (%)				$\pm$ 0.5		
NEP @ 5 Hz and 1 A/W	50 fW/ $\sqrt$ Hz	50 fW/ $\sqrt$ Hz	3 pW/ $\sqrt$ Hz	3 pW/ $\sqrt$ Hz	4 pW/ $\sqrt$ Hz	30 fW/ $\sqrt$ Hz

### LOW POWER DETECTOR

## Model 818-SL

### 818 Series Detector Specifications

Model	818-UV	818-SL
Spectral Range ( $\mu\text{m}$ )	0.19–1.1	0.4–1.1
Power, Average Max w/ Attenuator ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) <sup>1)</sup>	0.2	2
Power, Average Maximum w/o Attenuator ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) <sup>1)</sup>	0.2	2
Pulse Energy, Maximum - w/ Attenuator ( $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ) <sup>2)</sup>	0.10	1
Pulse Energy, Maximum - w/o Attenuator ( $\text{nJ}/\text{cm}^2$ ) <sup>2)</sup>	0.1	1
Accuracy at constant temperature	$\pm 7\%$ @ 0.19; $\pm 2\%$ @ 0.20–1.1 $\mu\text{m}$ <sup>3)</sup>	$\pm 2\%$ @ 0.4–1.1 $\mu\text{m}$ <sup>3)</sup>
Uniformity (%) <sup>7)</sup>	$\pm 2$	$\pm 2$
Linearity (%)	$\pm 0.5$	$\pm 0.5$
Saturation Current ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	0.05	4.6
Responsivity	$\geq 0.09$ A/W 250–1000 nm	$> 0.1$ A/W 400–1000 nm
Responsivity (Peak)	$> 0.4$ A/W	$> 0.5$ A/W
Rise Time ( $\mu\text{s}$ )	$\leq 2$	$\leq 2$
Shunt Resistance ( $\text{M}\Omega$ ) (typ)	$\geq 2$	$\geq 2$
Die Capacitance (pF)	8,800	12,000
Reverse Bias, Maximum (V)	100	10
NEP ( $\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ )	$8.9 \times 10^{-13}$	$5.5 \times 10^{-13}$
Material	Silicon	Silicon
Active Area ( $\text{cm}^2$ )	1	1
Active Diameter (cm)	1.13	1.13
Shape	Cylinder	Cylinder
Attenuator, OD3	Detachable	Detachable

1) Applies to entire spectral response

2) 15 ns pulse width

3) Applies to 818-F-IR

4) When measured with 1.0 mm diameter beam centered within 80% of active area

5) When measured with 1.5 mm diameter beam centered within 80% of active area

6) When measured with 3.0 mm diameter beam centered within 80% of active area

7) Uniformity specification applies to detector only

8) Applies to 818-IR and 818-IR/CM

9) Not applicable to 818-F-IR

**ANEXO B.**

**PLANOS DEL COLECTOR CILÍNDRICO  
PARABÓLICO**