



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



**DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION OPERACIONAL A PEQUEÑA  
ESCALA DE UN POTABILIZADOR SOLAR PARABOLICO PARA AGUA.**

**RENE FERNANDO CUESTAS SGUERRA  
IVAN RENE RINCÓN ACELAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA**

**2004**



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



**DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION OPERACIONAL A PEQUEÑA  
ESCALA DE UN POTABILIZADOR SOLAR PARABOLICO PARA AGUA.**

**RENE FERNANDO CUESTAS SGUERRA  
IVAN RENE RINCÓN ACELAS**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Químico**

**Director  
EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY  
Ingeniero Químico, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA**

**2004**

## CONTENIDO.

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	1
2. CONCEPTOS BÁSICOS DE RADIACION SOLAR.	3
2.1 EL SOL.	3
2.1.1 Composición y Estructura.	5
2.2 RADIACION.	5
2.3 ESPECTRO DE RADIACIÓN.	6
2.4 LEYES DE RADIACIÓN.	8
2.5 RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE.	10
2.5.1 Constante Solar.	10
2.5.2 Variación de la Radiación Solar Extraterrestre.	11
2.5.3 Distribución Espectral de la Radiación Solar Extraterrestre.	11
2.6. RADIACION SOLAR TERRESTRE.	12
2.6.1 Concepto De Masa Atmosférica.	13
2.6.2 Atenuación de la Radiación Directa..	15
2.6.3 Dispersión.	16

2.6.4 Reflexión.	16
2.6.5 Difusión.	17
2.6.6 Absorción.	18
2.7. RADIACIÓN SOLAR SALIENTE.	20
2.8. BALANCE DE CALOR.	21
2.9. DEFINICION DE PARAMETROS.	22
2.10. RELACIONES TRIGONOMETRICAS.	24
2.11. RADIACIÓN SOLAR SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS.	26
2.11.1 Componente Directa.	26
2.11.2 Componente Difusa.	27
2.11.3 Radiación Total.	28
3. DESINFECCIÓN DEL AGUA.	29
3.1 TRANSMISION DE PATOGENOS POR AGUA.	29
3.2 EFECTO DE LA RADIACIÓN UV-A Y DE LA TEMPERATURA SOBRE ALGUNOS MICROORGANISMOS PATÓGENOS.	30
3.2.1 Efectos de la radiación UV-A.	30
3.2.2 Efectos de la temperatura (radiación infrarroja).	32
3.3 MÉTODO DE LOS TUBOS MÚLTIPLES DE FERMENTACIÓN.	33
3.4 MARCO LEGAL DE LA DESINFECCION.	35

4. ESTADO DEL ARTE SOBRE COLECTORES SOLARES.	37
4.1 COLECTOR SOLAR PLANO.	37
4.2 COLECTOR AL VACÍO.	39
4.3 COLECTORES CONCENTRADORES.	41
4.3.1 Parabólicos por Reflexión.	42
4.3.2 Parabólicos por Refracción.	43
4.3.3 Colector Parabólico compuesto (C.P.C.).	43
4.3.4 Concentradores cilindro-parabólicos.	44
4.3.5 Segmentos parabólicos con receptor de foco lineal.	48
4.3.6 Plato parabólico con receptor de foco puntual.	49
4.4 HELIÓSTATOS.	50
4.5 PILETAS SOLARES.	51
5. ANÁLISIS TÉRMICO Y OPTICO DEL COLECTOR SOLAR PARABÓLICO.	53
5.1 ÁREA DEL CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO.	53
5.2 CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS SOBRE LOS COLECTORES DE CONCENTRACION.	54
5.2.1 El disco solar y la imagen solar teórica.	54
5.2.2 Angulo de incidencia formado por los vectores $n$ y $s$ .	55

5.3 PÉRDIDAS ÓPTICAS Y DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE INTERSECCIÓN.	56
5.4 FACTOR DE INTERCEPTACIÓN.	57
5.5 ENERGÍA ÚTIL SOBRE EL RECEPTOR; PÉRDIDAS TÉRMICAS.	58
5.6 RENDIMIENTO TÉRMICO DE UN COLECTOR CILINDRICO PARABÓLICO.	60
5.6.1 Desarrollo térmico del Concentrador parabólico sin cubierta.	60
5.6.2 Desarrollo térmico del Concentrador parabólico con cubierta.	62
6. ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR.	65
6.1 ANALISIS MENSUAL DE LA RADIACIÓN EN BARRANCABERMEJA..	66
6.1.1 Registros Mensuales año 1997.	66
6.1.2 Registros Mensuales año 1999.	67
6.1.3 Registros mensuales año 2000.	67
6.2 ANALISIS ANUAL DE LA RADIACIÓN EN BARRANCABERMEJA.	68
6.2.1 Día solar promedio año 1997.	68
6.2.2 Día solar promedio año 1999.	68
6.2.3 Día solar promedio año 2000.	68
6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS REGISTROS EN BARRANCABERMEJA	69

6.4 ANALISIS MENSUAL DE LA RADIACIÓN EN BUCARAMANGA.	72
6.4.1 Registros Mensuales año 2001.	72
6.4.2 Registros Mensuales año 2002.	75
6.4.3 Registros Mensuales año 2003.	78
6.5 ANALISIS ANUAL DE LA RADIACIÓN EN BUCARAMANGA.	79
6.5.1 Día solar promedio año 2001.	79
6.5.2 Día solar promedio año 2002.	80
6.5.3 Día solar promedio año 2003.	81
6.6 ANALISIS COMPARATIVO DE LOS REGISTROS EN BUCARAMANGA.	81
7. ANALISIS DEL PERFIL DE TEMPERATURAS DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA.	85
7.1 DESCRIPCION DEL COLECTOR DE EXPERIMENTACION.	85
7.2 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS PARA EL ANALISIS.	86
7.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS.	94
8. DISEÑO BÁSICO DEL COLECTOR CILINDRO PARABOLICO DE EXPERIMENTACION.	95
8.1 CÁLCULO DEL FACTOR DE INTERSECCIÓN $F_{\phi}$ .	95
8.2 CÁLCULO DEL DESARROLLO TÉRMICO DEL COLECTOR SIN CUBIERTAS.	96
8.3 CÁLCULO DEL DESARROLLO TÉRMICO DEL COLECTOR CON	

CUBIERTAS.	101
8.4 ÁREA COLECTORA NECESARIA PARA EL MONTAJE DE UN SISTEMA DE POTABILIZACIÓN DE 1 m <sup>3</sup> .	106
8.4.1 Cálculo del área necesaria para el sistema propuesto.	106
8.4.2. Distribución geométrica del sistema propuesto.	108
9. EVALUACION OPERACIONAL DEL POTABILIZADOR SOLAR PARABOLICO.	109
9.1 DESCRIPCION DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO	110
9.1.1 Esqueleto del concentrador.	110
9.1.2 Concentrador.	111
9.1.3 Tubo receptor.	112
9.1.4 Sistema de movimiento del colector.	113
9.1.5 Sistema de control térmico.	115
9.1.6 Armazón.	116
9.1.7 Unidades Complementarias	116
9.2 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EN EL COLECTOR CILINDRO PARABOLICO.	117
9.2.1 Pruebas térmicas del colector parabólico experimental.	117
9.2.2 Pruebas de desinfección.	125
9.3 ESTIMACION DE LA EFICIENCIA TÉRMICA.	126
9.4 INDICADORES DE DESEMPEÑO DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO.	130

9.4.1 Análisis comparativo en los indicadores de desempeño del colector cilindro parabólico y el colector de placa plana.	137
9.4.2 Determinación de costos del colector cilindro parabólico (CCP).	138
10. CONCLUSIONES.	173
11. RECOMENDACIONES.	176
BIBLIOGRAFIA.	177
ANEXOS	181

## LISTA DE TABLAS.

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Colores del espectro visible y sus extremos.	8
<b>Tabla 2.</b> Determinación de la masa atmosférica, para una presión de 760 mm de Hg.	14
<b>Tabla 3.</b> Valores típicos del albedo.	17
<b>Tabla 4.</b> Balance de radiación.	22
<b>Tabla 5.</b> Patógenos transmitidos por el agua.	31
<b>Tabla 6.</b> Resistencia térmica de los microorganismos	33
<b>Tabla 7.</b> Índice NMP.	34
<b>Tabla 8.</b> Requisitos microbiológicos para el agua potable.	35
<b>Tabla 9 .</b> Plantas Termoeléctricas de Colectores Cilindro Parabólicos en el mundo.	46
<b>Tabla 10.</b> Registros mensuales año 1997 en la ciudad de Barrancabermeja.	67
<b>Tabla 11.</b> Registros mensuales año 1999 en la ciudad de Barrancabermeja.	67
<b>Tabla 12.</b> Registros mensuales año 2000 en la ciudad de Barrancabermeja.	67

<b>Tabla 13.</b> Día solar promedio en Barrancabermeja en los años 1997,1999 2000	69
<b>Tabla 14.</b> Resultados obtenidos para el cálculo de $T_c$ .	102
<b>Tabla 15.</b> Parámetros térmicos del colector parabólico. 10-Dic-03.	119
<b>Tabla 16.</b> Parámetros térmicos del colector parabólico. 11-Dic-03.	120
<b>Tabla 17.</b> Parámetros térmicos del colector parabólico. 12-Dic-03.	121
<b>Tabla 18.</b> Parámetros térmicos del colector parabólico. 13-Dic-03.	122
<b>Tabla 19.</b> Parámetros térmicos del colector parabólico. 15-Dic-03.	123
<b>Tabla 20.</b> Parámetros térmicos del colector parabólico. 16-Dic-03.	124
<b>Tabla 21.</b> Eficiencias del Colector Parabólico. 10-Dic-03.	131
<b>Tabla 22.</b> Eficiencias del Colector Parabólico. 11-Dic-03.	132
<b>Tabla 23.</b> Eficiencias del Colector Parabólico. 12-Dic-03.	133
<b>Tabla 24.</b> Eficiencias del Colector Parabólico. 13-Dic-03.	134
<b>Tabla 25.</b> Eficiencias del Colector Parabólico. 15-Dic-03.	135
<b>Tabla 26.</b> Eficiencia instantánea del Colector 16-Dic-03.	136
<b>Tabla 27.</b> Indicadores de desempeño de los colectores en estudio.	137
<b>Tabla 28.</b> Costos del colector cilindro parabólico.	139
<b>Tabla 29.</b> Parámetros de factibilidad económica del colector cilindro	

parabólico (CCP). 139

**Tabla 30.** Parámetros de factibilidad económica para un sistema de  
1 m<sup>3</sup>/día con colectores cilindro parabólico (CCP). 140

## LISTA DE FIGURAS.

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Orbita de la tierra alrededor del sol.	4
<b>Figura 2.</b> Espectro electromagnético	7
<b>Figura 3.</b> Esquema de la cantidad de radiación solar y terrestre.	10
<b>Figura 4.</b> Masa de aire atmosférico.	14
<b>Figura 5.</b> Distribución espectral de la radiación solar.	15
<b>Figura 6.</b> Posiciones del sol a lo largo del año.	23
<b>Figura 7.</b> Situación espacial de algunos ángulos.	23
<b>Figura 8.</b> Ángulos presentes en la determinación de la radiación solar directa sobre un dispositivo.	23
<b>Figura 9.</b> Radiación directa solar sobre superficies inclinada.	27
<b>Figura 10.</b> Colector solar de placa plana.	36
<b>Figura 11.</b> Colector Tubular al vacío	39
<b>Figura 12.</b> Colector Owens-Illinois.	40
<b>Figura 13.</b> Eficiencias en colectores.	40
<b>Figura 14.</b> Colector parabólico por reflexión.	42
<b>Figura 15.</b> Colector parabólico por refracción.	43

<b>Figura 16.</b> Colector parabólico compuesto.	43
<b>Figura 17.</b> CPC utilizado en Israel.	44
<b>Figura 18.</b> Colector cilindro parabólico.	45
<b>Figura 19.</b> Vista Frontal de un CCP.	46
<b>Figura 20.</b> Parabolic Trough System.	47
<b>Figura 21.</b> Campo de colectores cilindro parabólicos.	47
<b>Figura 22.</b> Partes de un colector cilindro parabólico.	48
<b>Figura 23.</b> Segmentos parabólicos con receptor de foco lineal.	48
<b>Figura 24.</b> Plato parabólico con receptor de foco puntual.	49
<b>Figura 25.</b> Helióstato. (Vista frontal y trasera).	50
<b>Figura 26.</b> Esquema general de una torre de energía.	51
<b>Figura 27.</b> Torre de energía.	51
<b>Figura 28.</b> Concentrador cilindro parabólico general.	53
<b>Figura 29.</b> Imagen reflejada teórica del sol en un colector cilíndrico parabólico.	54
<b>Figura 30.</b> Balance energético en un colector cilíndrico-parabólico.	59
<b>Figura 31.</b> Relaciones entre el nivel de concentración y temperaturas de funcionamiento del receptor.	59
<b>Figura 32.</b> Gráfica comparativa del día solar promedio para cada año.	69

<b>Figura 33.</b> Gráfica comparativa de los picos de radiación alcanzados por año	70
<b>Figura 34.</b> Gráfica comparativa de los picos promedio para cada año.	71
<b>Figura 35.</b> Radiación Promedio Marzo de 2001.	72
<b>Figura 36.</b> Radiación Promedio Abril de 2001.	73
<b>Figura 37.</b> Radiación Promedio Mayo de 2001.	73
<b>Figura 38.</b> Radiación Promedio Junio de 2001	74
<b>Figura 39.</b> Radiación Promedio Julio de 2001.	74
<b>Figura 40.</b> Radiación Promedio Agosto de 2001.	75
<b>Figura 41.</b> Radiación Promedio Agosto 2002.	75
<b>Figura 42.</b> Radiación Promedio Septiembre de 2002.	76
<b>Figura 43.</b> Radiación Promedio Octubre de 2002.	76
<b>Figura 44.</b> Radiación Promedio Noviembre de 2002.	77
<b>Figura 45.</b> Radiación Promedio Diciembre de 2002.	77
<b>Figura 46.</b> Radiación Promedio Enero de 2003.	78
<b>Figura 47.</b> Radiación Promedio Febrero de 2003.	78
<b>Figura 48.</b> Radiación Promedio Marzo de 2003.	79
<b>Figura 49.</b> Día solar promedio año 2001.	80
<b>Figura 50.</b> Día solar promedio año 2002.	80

<b>Figura 51.</b> Día solar promedio año 2003.	81
<b>Figura 52.</b> Grafica comparativa del día solar promedio para cada año de registro.	82
<b>Figura 53.</b> Grafica comparativa de los picos de radiación alcanzados.	82
<b>Figura 54.</b> Grafica comparativa de los picos promedio mensuales de radiación.	83
<b>Figura 55.</b> Vista frontal colector de placa plana.	85
<b>Figura 56.</b> Mapa de puntos del colector de placa plana.	87
<b>Figura 57.</b> Perfil de temperatura de los puntos A en el colector.	88
<b>Figura 58.</b> Perfil de temperatura de los puntos B en el colector.	89
<b>Figura 59.</b> Perfil de temperatura de los puntos C en el colector.	89
<b>Figura 60.</b> Perfil de temperatura de los puntos D en el colector.	90
<b>Figura 61.</b> Perfil de temperatura de los puntos E en el colector.	90
<b>Figura 62.</b> Prueba global del 16 de Julio de 2003.	91
<b>Figura 63.</b> Prueba global del 17 de Julio de 2003	92
<b>Figura 64.</b> Prueba global del 17 de Julio de 2003 (comportamiento térmico en relación al tiempo).	92
<b>Figura 65.</b> Prueba global del 21 de Julio de 2003.	93
<b>Figura 66.</b> Prueba global del 22 de Julio de 2003.	93
<b>Figura 67.</b> Esquema del colector cilindro parabólico.	109

<b>Figura 68.</b> Esquema del esqueleto del colector parabólico.	111
<b>Figura 69.</b> Esqueleto del colector parabólico.	111
<b>Figura 70.</b> Tubo receptor de cobre.	113
<b>Figura 71.</b> Vista frontal del sistema de movimiento.	114
<b>Figura 72.</b> Sistema de control	115
<b>Figura 73.</b> Grafica de los parametros térmicos del colector parabólico (11 de diciembre de 2003)	125
<b>Figura 74.</b> Grafica de los parametros térmicos del colector parabólico (16 de diciembre de 2003)	126
<b>Figura 75.</b> Eficiencia térmica del colector parabólico (11 de diciembre de 2003)	129
<b>Figura 76.</b> Eficiencia térmica del colector parabólico (16 de diciembre de 2003)	130

## **LISTA DE ANEXOS.**

**ANEXO A.** Instrumentación para la observación del flujo solar.

**ANEXO B.** Fotografías del colector cilindro parabólico (CCP).

**ANEXO C.** Resultados del análisis microbiológico de agua.

**ANEXO D.** Datos de radiación para los días de prueba analizados. (Estación  
metereológica UIS)

## RESUMEN

**Título :** DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION OPERACIONAL A PEQUEÑA ESCALA DE UN POTABILIZADOR SOLAR PARABOLICO PARA AGUA\*.

**Autores :** RENE FERNANDO CUESTAS SQUERRA  
IVAN RENE RINCÓN ACELAS\*\*.

**Palabras Claves:** Agua, potabilización, colector cilindro-parabólico, energía solar.

### DESCRIPCION

El presente proyecto contiene el desarrollo de una aplicación tecnológica de la energía solar, utilizando su radiación, que nos permite el calentamiento de un fluido; en este caso: agua. Haciendo un tratamiento microbiológico, que conlleve a su potabilización, para su aplicación en pequeñas comunidades rurales.

Para tal fin, se diseño y construyó un colector solar compuesto, del tipo conocido como colector cilindro parabólico a pequeña escala; analizando el potencial energético de la ciudad de Barrancabermeja (sitio de aplicación) y la ciudad de Bucaramanga (sitio donde se realizaron las pruebas para obtener la evaluación operacional del colector).

Otro de los objetivos de este proyecto es optimizar el diseño de colectores de placa plana, utilizados anteriormente para el mismo objetivo. Para este fin se realizó un perfil de temperaturas en este tipo de colectores.

Fue necesario encontrar una temperatura a la cual fuera posible la eliminación de coliformes presentes en el agua, de tal forma que su calidad mejorara microbiológicamente para poder ser usada en consumo humano . Por esta razón se tomó como punto de partida un análisis previo de la calidad del agua utilizada en la zona a implementar este sistema.

Basados en las necesidades del colector, este se construyó con materiales de una alta resistencia a la intemperie, durabilidad, buena eficiencia óptica y bajo costo.

Se analizo la eficiencia térmica del colector en operación bajo distintas condiciones climáticas, obteniendo como resultados las capacidades máximas y mínimas diarias de este, junto con un comportamiento medio en su eficiencia.

El agua utilizada presentaba niveles muy altos de contaminación microbiológica, comparada con los niveles de aguas subterráneas; sin embargo, con el proceso realizado en este colector cilindro parabólico (CCP), el agua tratada presentó un alto grado de potabilización.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director, Dr. Edgar Fernando Castillo Monroy. (UIS).

## ABSTRACT

**Title:** DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATIONAL EVALUATION IN SMALL SCALE OF A PARABOLIC - TROUGH SOLAR COLLECTOR SYSTEM TO PRODUCE DRINKABLE WATER\*.

**Authors:** RENE FERNANDO CUESTAS SGUERRA  
IVAN RENE RINCÓN ACELAS\*\*.

**Key words:** Drinkable water, parabolic trough collector, solar power.

### DESCRIPTION.

This project is about development of a technological application of the solar power using its radiation that allows us the heating of a fluid; in this case, water. Making a microbiological treatment to produce drinkable water for their application in small rural communities.

For this objective, a solar collector system was design and built of kind called cylindrical parabolic collector to small scale; analyzing the energy potential of the city of Barrancabermeja (application place) and the city of Bucaramanga (where they were carried out the tests to obtain the operational evaluation of the collector).

Another of the objectives of this project is to optimize the design of flat plane collectors, used previously for the same objective. For this end was carried out a profile of temperatures in this kind of collectors.

It was necessary to find a temperature to which was possible the elimination of the most of coliforms presents in the water, in such a way that their quality improved microbiological to be able to be used in human consumption. For this reason a previous analysis of the quality of the water used in the area to implement this system was a starting point.

Based on the necessities of the collector, this it was built with materials from a high resistance to the bleakness, durability, high efficiency optic and low cost.

Thermal efficiency of the collector in operation was analyzed under different climatic conditions obtaining as results the daily maximum and minimum capacities with a half behavior in efficiency.

The used water presented high levels of microbiological contamination, compared with the levels of underground waters; however, with the process carried out in this collector parabolic cylinder (CPC), the treated water presented a high drinkable degree.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director, Dr. Edgar Fernando Castillo Monroy. (UIS).

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente Colombia es un país que está empezando a incursionar en el campo de las energías alternativas. Una de ellas es el aprovechamiento del potencial energético solar con que se cuenta en algunas zonas de nuestro territorio; en especial, una de estas regiones es el Magdalena Medio (Santander en general). La cual cuenta con los más altos potenciales de nuestro país, siendo superada únicamente por el desierto de la Guajira.

Este potencial con que cuenta nuestro departamento se puede utilizar para optimizar el proceso de potabilización de agua en pequeñas comunidades, ya que la demanda de agua potable es sin duda la más urgente de las necesidades de nuestras comunidades rurales que se ven obligadas a consumir el preciado líquido luego de ser sometido a tratamientos poco eficientes o en su defecto a ninguno. El potencial hídrico de nuestro país es por supuesto uno de los mejores del mundo. Sin embargo, es necesario someter el agua a un proceso de potabilización con el fin de mejorar su calidad y cumplir con la normatividad vigente, evitando los problemas de salud concernientes al consumo de agua no tratada por parte de la población.

Este proyecto busca aprovechar dicho potencial energético solar como un primer paso hacia una cultura de aprovechamiento de las energías alternativas a través de una propuesta de diseño y construcción de un potabilizador solar a pequeña escala, específicamente, un colector compuesto del tipo cilindro parabólico, cuya gran innovación, con relación a los colectores trabajados y analizados anteriormente en la Universidad y en la región, es el uso de material reflectivo, para aumentar el factor de concentración de los rayos solares, elevando la

eficiencia del proceso en el equipo, en comparación con los colectores de placa plana, donde este factor de concentración es bajo .

Por lo anterior, es importante mencionar que uno de los objetivos de este proyecto es analizar la viabilidad técnica y operacional de la ejecución de procesos de tratamiento de agua con energía solar a través de colectores cilindro parabólicos (CCP), como una propuesta alterna al uso de colectores de placa plana. Basados en el análisis expuesto para colectores de placa plana por Castillo y Barrios (2002) en su proyecto de grado " Desarrollo de un sistema de prototipo para potabilización de agua mediante energía solar en comunidades rurales del Magdalena Medio ", se contempló analizar el perfil de temperaturas del colector de placa plana en mención, con el fin de optimizarlo y reducir las posibles pérdidas que este tenga, para lograr un valor de eficiencia térmica mas alto, si es posible.

El presente documento se encuentra dividido en 9 capítulos. A continuación se explican el enfoque de cada uno de ellos:

El capítulo dos presenta generalidades importantes acerca de la energía solar. El capítulo tres explica los fundamentos de la desinfección microbiológica de aguas subterráneas no tratadas. El capítulo cuatro muestra a profundidad los diferentes equipos usados en la actualidad, en el mundo, para la conversión de energía solar en energía térmica, sus usos e innovaciones en cada uno de ellos. En el capítulo cinco se presenta el análisis térmico y óptico del colector cilindro parabólico. El capítulo seis corresponde a la evaluación del potencial energético solar en la ciudad de Barrancabermeja y la ciudad de Bucaramanga, a partir de datos correspondientes a tres años de registros diarios de radiación en cada una de estas ciudades. En el capítulo siete se hace un análisis al perfil de temperaturas que muestra el colector de placa plana. En el capítulo ocho se muestra el diseño básico para el colector cilindro parabólico (CCP), y se determina el área necesaria y la estructura para un sistema de potabilización de 1 m<sup>3</sup>/día. En el capítulo nueve

se describe el colector cilindro parabólico. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones que los autores dan, luego de culminar este proyecto.

## **2. CONCEPTOS BASICOS DE RADIACION SOLAR.**

La tierra recibe anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  Kwh. de energía solar lo que corresponde a 10.000 veces el consumo mundial de energía en ese período. Este hecho indica que además de ser responsable por la manutención de vida en la tierra, la radiación solar constituye una inagotable fuente energética, existiendo un enorme potencial de utilización por medio de sistemas de captación y conversión en otra forma de energía (térmica, eléctrica, etc.).

Nuestro planeta en su movimiento anual en torno al sol, describe en trayectoria elíptica un plano que esta inclinado aproximadamente  $23,5^\circ$  con relación al plano ecuatorial. Esta inclinación es responsable por la variación de la elevación del sol en el horizonte con relación a la misma hora, a lo largo de los días, dando origen a las estaciones del año y dificultando los cálculos de la posición del sol para una determinada fecha, como se puede ver en la figura 1.

### **2.1 EL SOL.**

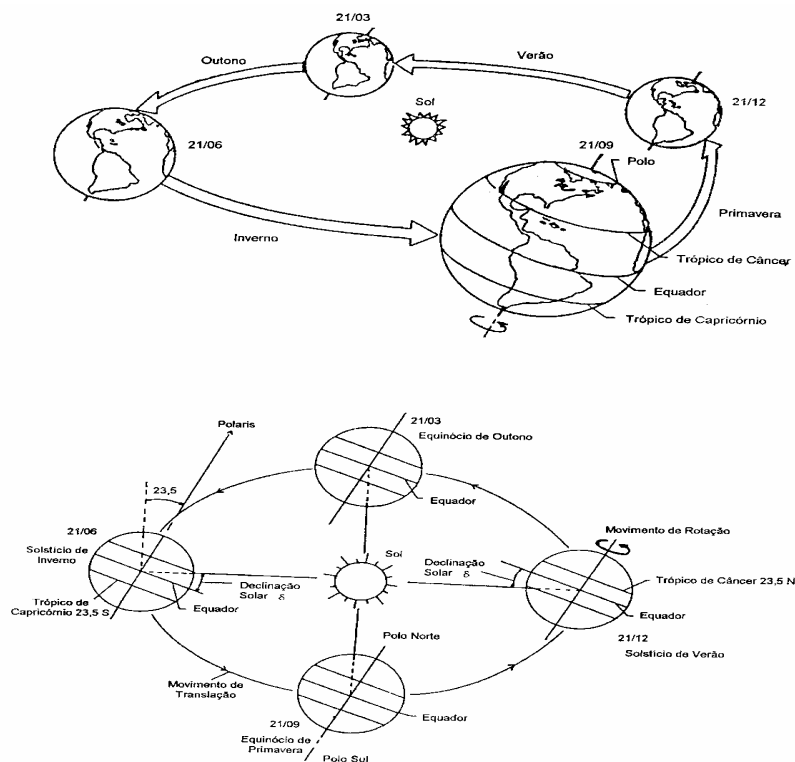
Como energía renovable se tiene la energía solar derivado del astro rey que regula nuestra vida. El sol es una estrella enana de aproximadamente 1.392.000 Kilómetros de diámetro (casi 100 veces el de la Tierra y 10 veces el del Júpiter), que se formó a partir de una nube de gas compuesta principalmente de hidrógeno.

Su centro es extremadamente caliente, con temperaturas suficientemente elevadas para permitir la fusión del hidrogeno en helio. Esta fusión que se produce en el centro solar emite energía en forma de una radiación

electromagnética de alta frecuencia que se transmite lentamente a la superficie mediante una sucesión de procesos radiactivos.

La radiación que finalmente llega a la tierra proviene de una estrecha región de la superficie solar bastante opaca a la luz visible, llamada fotosfera. La producción de energía del sol requiere la combustión o conversión de masa en energía al ritmo de  $4.2 \times 10^6$  toneladas por segundo. Considerando que la masa total del sol es de  $22 \times 10^{26}$  toneladas, se puede calcular fácilmente que el astro continuara irradiando energía durante dos billones de años más.

**Figura 1:** *Orbita de la tierra alrededor del sol, con su eje N-S inclinado un ángulo de  $23,5^\circ$ .*



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.*

La Tierra, que se encuentra a 150 millones de Km. de distancia del sol intercepta solo una parte de la radiación producida por este. La cantidad de energía que llega a la superficie de la tierra en un año es hasta de 50 veces mayor que las estimaciones actuales de toda la energía disponible (proveniente) de las reservas conocidas de combustibles fósiles y 35.000 veces mayor que el consumo mundial de energía por año.

**2.1.1 Composición y Estructura:** La energía solar se crea en el interior del Sol. Es aquí donde la temperatura (15.000.000 °C) y la presión (340 mil veces la presión del aire en la Tierra al nivel del mar) son tan intensas que se llevan a cabo las reacciones nucleares. Éstas reacciones causan que cuatro átomos de hidrógeno se fusionen y formen una partícula alfa ó núcleo de helio. La partícula alfa tiene cerca de 0.7 % menos masa que los cuatro protones.

La diferencia en la masa es expulsada como energía y es llevada a la superficie del Sol, a través de un proceso conocido como convección, donde se liberan luz y calor. La energía generada en el centro del Sol tarda un millón de años para alcanzar la superficie solar. Cada segundo se convierten 700 millones de toneladas de hidrógeno en cenizas de helio. En el proceso el sol libera grandes cantidades de energía; por lo cual, el Sol cada vez se vuelve más ligero.

El Sol consta de una serie de capas. Se denominan como sigue:

- **La Corona:** la atmósfera externa del Sol.
- **La Cromosfera:** Esta capa bordea la superficie del Sol.
- **La Fotosfera:** la superficie visible del Sol.
- **La Zona Convectiva:** El proceso de convección transporta energía de la zona radiactiva del Sol hacia la fotosfera.

- **La Zona Radiactiva:** El transporte de energía del núcleo "radia" hacia el exterior y se realiza a través de esta capa de gases de hidrógeno y de helio hacia la zona convectiva.
- **El núcleo:** o más bien, la planta de energía nuclear del Sol.

## 2.2 RADIACIÓN.

La radiación es transferencia de energía por **ondas electromagnéticas**, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. La radiación es un proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio o de algún medio.

Todas las formas de radiación son producidas por cargas aceleradas. Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia ( $\nu$ ) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión :

$$\lambda \nu = c \quad (1)$$

son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad  $c = 299.792 \text{ Km./s}$ .

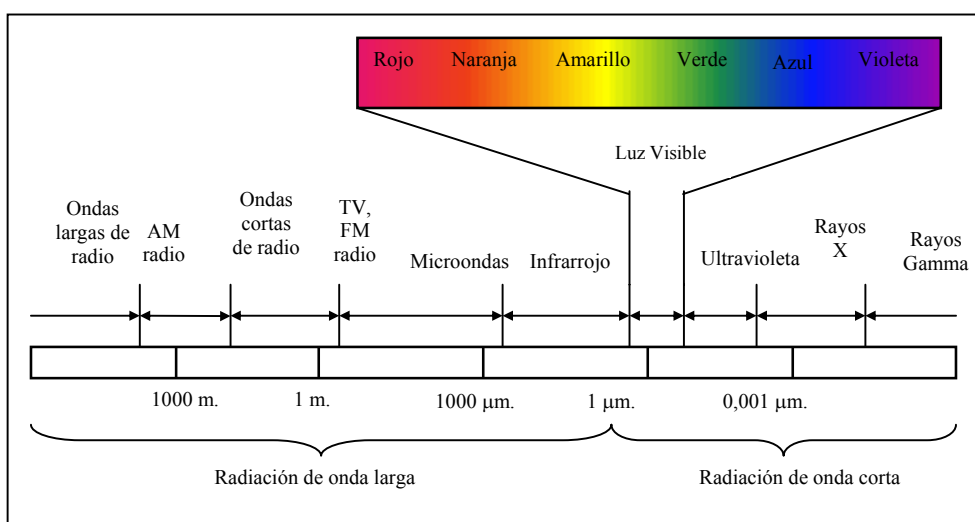
## 2.3 ESPECTRO DE RADIACIÓN.

La radiación electromagnética, puede definirse como un conjunto de ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. Las ondas electromagnéticas viajan en el vacío a la rapidez de la luz  $c$ , transportando energía y cantidad de movimiento desde alguna fuente a un receptor. Existen muchas formas de ondas electromagnéticas que se distinguen por sus frecuencias y

longitudes de onda, que varían en un amplio rango, como se muestra en la figura 2, definiendo el espectro electromagnético. Esta variación se produce porque las fuentes que producen las ondas son completamente diferentes. El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior. La **luz**, llamada también **luz visible** o **luz blanca**, es uno de los componentes del espectro electromagnético, y se define como aquella parte del espectro de radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano.

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde longitudes de onda corta de billonésimas de metro (frecuencias muy altas) hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas). La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético. Por orden creciente de longitudes de onda (o decreciente de frecuencias), el espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, rayos X duros y blandos, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio.

**Los rayos gamma y los rayos X duros tienen una longitud de onda de entre  $5 \cdot 10^{-6}$  y  $5 \cdot 10^{-4}$  micrómetros (un micrómetro, símbolo  $\mu\text{m}$ , es una millonésima de metro). Los rayos X blandos se superponen con la radiación ultravioleta en longitudes de onda próximas a los  $5 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$ . La región ultravioleta, a su vez, da paso a la luz visible, que va aproximadamente desde 0.4 hasta 0.8  $\mu\text{m}$ .**



**Figura 2.** Espectro electromagnético.

**Fuente:** *Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile .*

Los rayos infrarrojos se mezclan con las frecuencias de radio de microondas, entre los 100 y 400  $\mu\text{m}$ . Desde esta longitud de onda hasta unos 15.000 m, el espectro está ocupado por las diferentes ondas de radio; más allá de la zona de radio, el espectro entra en las bajas frecuencias, cuyas longitudes de onda llegan a medirse en decenas de miles de kilómetros.

La radiación del Sol es emitida en todas las longitudes de onda, pero tiene un máximo en la región de luz visible. La luz visible está compuesta por varios colores, que cuando se mezclan forman la luz blanca, por lo que también se le da ese nombre. Cada uno de los colores tiene una longitud de onda específica, con límites entre 0.43 y 0.69  $\mu\text{m}$ . Considerando desde las longitudes de onda más cortas a las más largas, los diferentes colores tienen los valores centrales de longitudes de onda que se indican en la tabla 1.

**Tabla 1.** *Colores del espectro visible y sus extremos.*

Color	( $\lambda$ ) $\mu\text{m}$
Ultravioleta	< 0.35
Violeta	0.4
Azul	0.45
Verde	0.5
Amarillo	0.55
Naranja	0.6
Rojo	0.7
Infrarrojo	> 0.75

**Fuente:** *Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile.*

Estos colores están dentro de un rango de longitudes de onda, por ejemplo el violeta esta en el rango entre 0.4 y 0.45  $\mu\text{m}$ . Son los colores que forman el arco iris. En sus extremos se tienen el ultravioleta y el infrarrojo. La mayor cantidad de energía radiante del Sol se concentra en el rango de longitudes de onda del visible y visible cercano del espectro.

## **2.4 LEYES DE RADIACIÓN.**

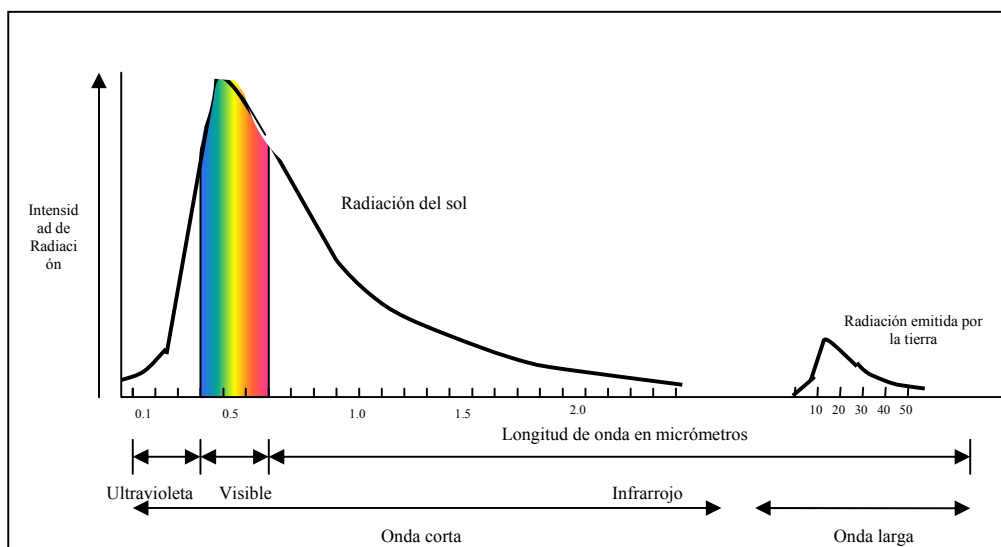
Para entender mejor como la energía radiante del Sol interactúa con la Atmósfera de la Tierra y su superficie, se deben conocer las leyes básicas de radiación.

1. Todos los objetos emiten energía radiante, cualquiera sea su temperatura, por ejemplo el Sol, la Tierra, la atmósfera, los Polos, las personas, etc.
2. Los objetos con mayor temperatura radian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos. Por ejemplo el Sol con una temperatura media de 6000 K en su superficie, emite  $1.6 \cdot 10^5 = (6000/300)^4$  veces más energía que la Tierra con una temperatura media en superficie de 290 K = 17° C .
3. Los cuerpos con mayor temperatura emiten un máximo de radiación en longitudes de ondas más cortas. Por ejemplo el máximo de energía radiante del Sol se produce para longitudes de onda  $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$ , para la Tierra en  $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$ . (Figura 3)
4. Los objetos que son buenos absorbedores de radiación son también buenos emisores. Este es un principio importante para comprender el calentamiento en

la atmósfera, porque sus gases son absorbedores y emisores selectivos en longitud de onda. Así, la atmósfera es aproximadamente transparente (no absorbe) a ciertas longitudes de onda de radiación y aproximadamente opaca (buen absorbedor) en otras longitudes de onda. Por ejemplo es transparente a la luz visible, que llega a la superficie. La nieve es también absorbedor selectivo: es mal absorbedor de la luz visible ya que refleja ~90% y es buen absorbedor (y emisor) de la radiación infrarroja de longitud de onda larga.

Un absorbedor perfecto se llama “**cuerpo negro**”, que se define como un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a su superficie. No se conoce ningún objeto así, aunque una superficie de negro de carbono puede llegar a absorber aproximadamente un 97% de la radiación incidente.

El Sol, la Tierra, la nieve, etc., bajo ciertas condiciones se comportan como un cuerpo negro. En teoría, un cuerpo negro sería también un emisor perfecto de radiación, y emitiría a cualquier temperatura la máxima cantidad de energía disponible. A una temperatura dada, emitiría una cantidad definida de energía en cada longitud de onda. A raíz del fracaso de los intentos de calcular la radiación de un cuerpo negro ideal según la física, se desarrollaron por primera vez los conceptos de física cuántica.



**Figura 3.**  
Esquema de la cantidad de radiación

ción solar y terrestre.

**Fuente:** Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva.

Chile

## 2.5 RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE.

**2.5.1 Constante Solar:** La constante solar ( $G_{sc}$ ), es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera. Esta energía corresponde a una radiación electromagnética formada por distintas longitudes de onda (espectro solar) agrupadas en tres bandas: ultravioleta (UV), visible e infrarrojo (IR). Cada banda transporta una cantidad de energía determinada, siendo a este respecto las más importantes el visible y el IR.

La referencia radiométrica mundial WRR (WRR: World Radiometric Reference) del WRC (World Radiaron Center ) es :

$$G_{sc} = 1367 \frac{W}{m^2} = 433.3 \frac{Btu}{(ft^2 * h)} = 1.96 \frac{Cal}{(cm^2 * min)} \quad (2)$$

Con una desviación estándar de  $1.6 \text{ W/m}^2$  y una desviación máxima de  $\pm 7 \text{ W/m}^2$ .

**2.5.2 Variación de la Radiación Solar Extraterrestre:** Debido a que la intensidad de la radiación solar varía de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia tierra-sol durante el año, da lugar a una variación de la radiación solar extraterrestre  $G(n)$ :

$$G(n) = G_{sc} * \left[ 1 + 0.333 * \cos \left( 360 * \frac{n}{365} \right) \right] \quad (3)$$

En donde  $n$  es el número del día ( $1 < n < 365$ ). Esta función tiene una variación de 3.3 %, con el máximo de  $1412 \text{ W/m}^2$  el 1 de enero y el mínimo de  $1322 \text{ W/m}^2$  el 1 de julio.

**2.5.3 Distribución Espectral de la Radiación Solar Extraterrestre:** El Sol es un gigantesco reactor de fusión nuclear, constituido por diferentes gases que se encuentran retenidos en el mismo por fuerzas gravitatorias. La energía en forma de radiación electromagnética, resultado de las reacciones de fusión que tienen lugar en él (fundamentalmente en el núcleo), debe ser transferida a la superficie exterior para, desde allí, ser radiada al espacio; en este proceso de transferencia aparecen fenómenos convectivos y radiativos, así como sucesivas capas de gases, dando lugar a un espectro de emisión continuo.

A pesar de la compleja estructura del Sol, para las aplicaciones de los procesos térmicos derivados del mismo, se puede adoptar un modelo mucho más simplificado. Así, se puede considerar al Sol como un cuerpo negro que radia energía a la temperatura de  $5.777 \text{ K}$ , ya que la distribución de energía para cada longitud de onda aprovechable por los procesos térmicos y fototérmicos, es básicamente la misma que la de dicho cuerpo negro.

La Tierra, en su movimiento alrededor del Sol, describe una órbita elíptica, de escasa excentricidad, de forma que la distancia entre el Sol y la Tierra varía aproximadamente un  $\pm 3\%$ .

- La distancia media Tierra-Sol es,  $d = 149$  millones de Km.
- En el solsticio de verano, la Tierra está alejada una distancia del Sol máxima,  $d_{\text{máx}} = 1,017 d$
- En el solsticio de invierno, la Tierra se halla a la distancia mínima del Sol,  $d_{\text{mín}} = 0,983 d$ .

La radiación al atravesar la atmósfera, es parcialmente absorbida y difundida por ciertos componentes de la misma; en las últimas décadas, al disponer de satélites artificiales, se han podido realizar mediciones directas de la intensidad solar, libres de la influencia de la atmósfera terrestre.

El espectro se suele dividir en las tres regiones siguientes:

1. La región llamada **visible** ( $0.35 \mu\text{m} < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$ ) porque es el rango que puede detectar el ojo humano y dentro del cual están los colores violeta ( $0.4 \mu\text{m}$ ), azul ( $0.45 \mu\text{m}$ ), verde ( $0.5 \mu\text{m}$ ), amarillo ( $0.55 \mu\text{m}$ ), anaranjado ( $0.6 \mu\text{m}$ ) y rojo ( $0.70 \mu\text{m}$ ).
2. La región invisible más allá del rojo ( $\lambda > 0.75 \mu\text{m}$ ), conocida como **infrarrojo lejano** o región de las ondas de calor.
3. La región invisible antes del violeta ( $\lambda < 0.35 \mu\text{m}$ ), denominada **ultravioleta**.

De acuerdo con lo anterior, a cada región corresponde una fracción de la constante solar, distribuida así: 7 % al ultravioleta ( $95.7 \text{ W/m}^2$ ), 47.3 % al visible ( $646.6 \text{ W/m}^2$ ) y 45.7 % al infrarrojo ( $624.7 \text{ W/m}^2$ ).

## **2.6 RADIACION SOLAR TERRESTRE.**

La energía solar es afectada por la atmósfera terrestre tanto es su dirección como en su intensidad. La radiación solar que llega al sistema tierra-atmósfera, se conoce también con el nombre de radiación de onda corta, por los valores de longitud de onda en los que se concentra el máximo de emisión de energía solar.

La atmósfera en su mayoría es transparente a la radiación solar entrante. Considerando, que al tope de la atmósfera llega un **100 %** de radiación solar, sólo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por

la atmósfera como radiación difusa hacia la superficie (esto hace que un 51 % de radiación llegue a la superficie terrestre). Un 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30 % se pierde hacia el espacio, de este valor, la atmósfera dispersa un 6 %, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4 %.

Entonces la radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación.

**2.6.1 Concepto De Masa Atmosférica:** La radiación procedente del Sol que llega a la superficie terrestre tiene que atravesar la capa atmosférica que envuelve la Tierra, cuyo espesor aproximado es de unos 9 Km. en condiciones normales, contados desde el nivel del mar hasta el nivel más alto de la vertical de la misma. Dicha radiación es difundida y absorbida, cuando no reflejada, por las moléculas gaseosas en suspensión dentro de la atmósfera, tanto más, cuanto mayor sea el número de partículas en suspensión.

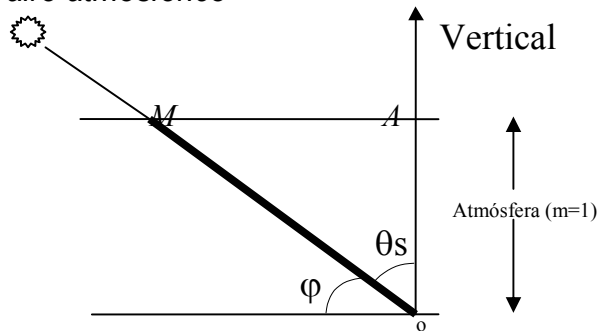
No obstante hay una cierta cantidad de radiación solar que no ha encontrado obstáculo y ésta es la **radiación directa** que llega del Sol, es decir, la radiación solar recibida desde el Sol sin cambio de dirección. La **radiación difusa** se define como la radiación solar recibida desde el Sol después de que la reflexión y la difusión por la atmósfera hayan modificado su dirección. El camino óptico recorrido por la radiación solar es diferente según sea la altura cenital del Sol y ello conduce a la introducción del concepto de masa de aire  $m$ , o **masa atmosférica** atravesada por la radiación.

Se considera el paso vertical a través de la atmósfera a nivel del mar como  $m = 1$ , es decir, Sol en la vertical del lugar y como la presión media a nivel del mar es de

760 mm de mercurio, el valor de la masa de aire atmosférico vale, siendo  $p$  la presión atmosférica del lugar:

$$m = OA = \frac{P}{760} \quad (4)$$

**Figura 4.** Masa de aire atmosférico



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.*

para una dirección de la radiación solar directa que forme un ángulo  $\varphi$  con la horizontal, el camino (OM) recorrido por la misma en función de la presión atmosférica  $p$  es:

$$OM = \frac{OA}{\text{Sen } \varphi} = \frac{P}{760 * \text{Sen } \varphi} \quad (5)$$

**Tabla 2.** Determinación de la masa atmosférica del sol, para una presión de 760 mm de Hg.

ÁNGULO $\varphi$	MASA ATMOSFÉRICA $m = \frac{1}{\text{Sen } \varphi}$	MASA VERDADERA
90	1	1
80	1.02	1.015
70	1.06	1.064
60	1.16	1.154
50	1.31	1.304

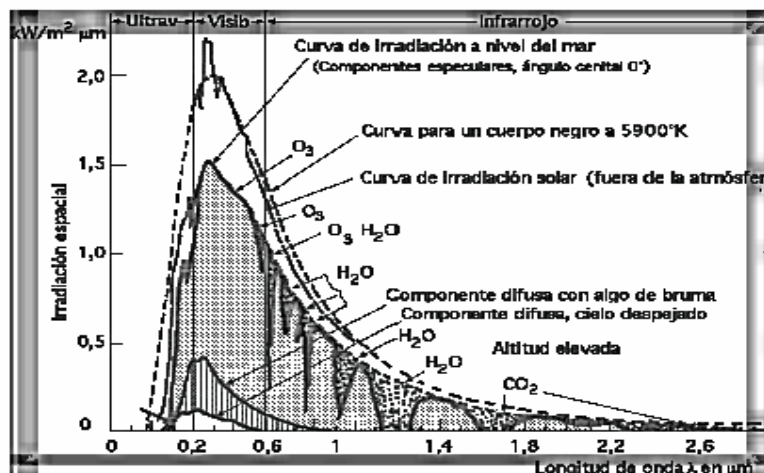
40	1.56	1.553
30	2	1.995
20	2.92	2.094
15	3.86	3.816
12	4.81	4.716
10	5.76	5.6

**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.*

**2.6.2 Atenuación de la Radiación Directa:** La radiación incidente normal recibida del Sol, sobre la superficie terrestre, está sujeta a variaciones debidas fundamentalmente a:

- a) Variaciones de la distancia Tierra-Sol.
- b) Variaciones de la difusión, debidas a las moléculas de aire, vapor de agua y polvo.
- c) Variaciones en la absorción atmosférica por el O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O y el CO<sub>2</sub>

**Figura 5.** *Distribución espectral de la radiación solar*



**Fuente:** *Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile*

La radiación solar normal incidente en la atmósfera terrestre tiene la distribución espectral indicada en la Figura 5. Los rayos X y otras radiaciones de onda corta del espectro solar, son absorbidos en gran proporción en la ionosfera por el  $N_2$ ,  $O_2$  y otros componentes atmosféricos. La mayor parte del ultravioleta queda absorbido por el  $O_3$ . Para longitudes de onda superiores a 2,5 mm se produce la radiación terrestre y una fuerte absorción por el  $CO_2$  y el  $H_2O$  de la atmósfera, por lo que al suelo llega muy poca energía. En consecuencia, y desde el punto de vista de las aplicaciones terrestres de la energía solar, solamente interesan las radiaciones comprendidas en las longitudes de onda de 0,29 mm hasta 2,5 mm, que son las que a su paso a través de la atmósfera van a sufrir las variaciones debidas a la difusión y a la absorción.

**2.6.3 Dispersión:** La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. Esto explica como un área con sombra o pieza sin luz solar esté iluminada, le llega luz difusa o radiación difusa. El 26 % de radiación difusa desde la atmósfera llega a la tierra.

Los gases de la atmósfera dispersan mas efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que en longitudes de onda más largas (naranja y rojo). Esto explica el color azul del cielo y los colores rojo y naranja del amanecer y atardecer. Cuando amanece o anochece, la radiación solar recorre un mayor espesor de atmósfera y la luz azul y violeta es dispersada hacia el espacio exterior, pasando mayor cantidad de luz roja y naranja hacia la Tierra, lo que da el color del cielo a esas horas.

Las partículas más grandes asociadas con niebla, smog o bruma también dispersan luz en longitudes de onda tal que el cielo se ve del blanco al gris. La dispersión de la luz solar por gotas de agua, bruma o partículas de polvo hacen

posible observar bandas de luz solar llamadas **rayos crepusculares**, que se ven por ejemplo cuando la luz solar cruza los claros entre las nubes.

**2.6.4 Reflexión:** Aproximadamente el 30 % de la energía solar que llega al tope de la atmósfera es reflejada al espacio, un 20% reflejado por las nubes, 6% desde la atmósfera y un 4% desde la superficie de la tierra. Esta energía se pierde y no interviene en el calentamiento de la atmósfera. La fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie, se llama **albedo**, por lo tanto el albedo planetario es en promedio de un 30 %.

El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro, depende de la cobertura nubosa, naturaleza de la superficie, inclinación de los rayos solares, partículas en el aire, etc. Las nubes contribuyen con un alto porcentaje de albedo (~ 20 %).

La Luna tiene sólo un 7 % de albedo, porque no tiene atmósfera y en las noches de luna llena da un buen brillo, pero la Tierra brilla aún más sobre la noche lunar, por lo que en la Luna las noches de tierra llena son mas claras que en la Tierra las noches de luna llena. En la tabla 3 se da el albedo de algunas superficies comunes.

**Tabla 3.** Valores típicos del albedo.

<b>SUPERFICIE</b>	<b>ALBEDO %</b>
Nieve fresca	80-85
Arena	20-30
Pasto	20-25
Bosque	5-10
Suelo Seco	15-25
Agua (sol cerca del horizonte)	50-80
Agua (sol cerca del cenit)	3-5

Nube gruesa	70-80
Nube Delgada	25-30
Tierra y atmósfera global.	30

**Fuente:** *Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile*

**2.6.5 Difusión:** Las moléculas de aire son muy pequeñas, en comparación con las longitudes de onda de la radiación más significativas en el espectro de la energía solar. La difusión de ésta radiación por las moléculas del aire se puede estudiar por la teoría de Rayleigh, según la cual, el coeficiente de difusión varía aproximadamente como la inversa de la cuarta potencia de la longitud de onda de la radiación  $\lambda^{-4}$ ; esto se ha verificado experimentalmente y a partir de los datos obtenidos se ha propuesto como factor de transmisión monocromática asociado a la difusión atmosférica, el dado por la expresión:

$$F_{\lambda(\text{moléculas de aire})} = 10^{-0.00389 * \lambda^{-4}} \quad (6)$$

en la que  $\lambda$  viene dada en micras,  $m = 1$ , y la presión atmosférica es 760 mm de mercurio. La difusión por partículas de polvo, que por supuesto tienen un tamaño mucho mayor que las moléculas que componen el aire y que además varían de tamaño y concentración según el lugar, la altura y el momento, es mucho más difícil de determinar. Moon desarrolló un factor de transmisión similar al utilizado para las moléculas de aire, de la forma:

$$F_{\lambda(\text{polvo})} = 10^{-0.0353 * \lambda^{-0.75}} \quad (7)$$

en la que  $m = 1$ , siendo el término medio de la concentración de las partículas de polvo de 800 por  $\text{cm}^3$  a nivel del suelo. La difusión debida al vapor de agua contenido en la atmósfera, con el Sol en su cenit y con una presión de saturación (presión parcial promediada del vapor de agua en la atmósfera) de 26 mbars, se representa en la forma:

$$F_{\lambda(\text{vapor de agua})} = 10^{-0.0075 * \lambda^{-2}} \quad (8)$$

por lo que el efecto total de la difusión sobre la radiación se puede expresar aproximadamente por:

$$F_{\text{total}} = \left[ \left[ F_{\lambda(\text{moléculas aire})} * \frac{P}{760} * F_{\lambda(\text{polvo})} * \frac{r}{800} * F_{\lambda(\text{vapor de agua})} * \frac{W}{26} \right] * m \right] \quad (9)$$

siendo:

- **F<sub>total</sub>** es la transmitancia atmosférica monocromática para la radiación directa
- **p** es la presión total de la atmósfera en mm de mercurio
- **r** es la concentración de partículas de polvo, a nivel del suelo, (partículas por cm<sup>3</sup>)
- **W** es la cantidad de agua precipitable en la atmósfera, por encima del lugar de observación, en mm de Hg.
- **m** es la masa de aire.

La difusión molecular, en la práctica, sólo es función de la presión atmosférica a nivel del suelo y de la posición del Sol, valores que se pueden medir y calcular, midiéndose el coeficiente de turbidez con un pirheliómetro.

**2.6.6 Absorción:** Los gases de la atmósfera son absorbedores selectivos de radiación solar, es decir que absorben gran cantidad para algunas longitudes de onda, moderadas en otras y muy poca en otras. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura. Los gases que son buenos absorbedores de radiación solar son importantes en el calentamiento de la atmósfera.

La absorción de la radiación solar a su paso por la atmósfera terrestre es debida fundamentalmente al ozono en el ultravioleta,  $\lambda < 0,3 \text{ mm}$ , y un poco por,  $0,5 < \lambda <$

0,6 mm, y al vapor de agua confinado en las capas bajas de la atmósfera en la banda del infrarrojo,  $\lambda > 0,7$  mm; más allá de 2,3 mm la transmisión a través de la atmósfera es muy baja, debido a la absorción por el H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, por lo que en el espectro de energía solar extraterrestre, la energía es inferior al 5% de la total del espectro solar, siendo pequeña la energía recibida a nivel del suelo.

Las transmitancias por absorción se deben combinar de la misma manera que por difusión y la transmitancia monocromática resultante para la radiación directa se puede escribir como:

$$F_{\lambda} = F_{\lambda(s)} * F_{\lambda(abs)} = F_{\lambda(s)} * F_{\lambda(abs.ozono)} * F_{\lambda(abs.vapor\ de\ agua)} \quad (10)$$

donde uno de los factores de absorción, bien el del ozono o el del vapor de agua, es la unidad, puesto que las bandas de absorción correspondientes al O<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O no se relacionan entre sí.

Un modelo presentado por Unsworth y Monteith (1998) que se ha examinado y comprobado en diferentes lugares de Inglaterra y del Sudán, contempla un **coeficiente de turbidez**  $s$  mediante el cual se pueden relacionar la irradiancia solar normal directa  $I_{s0}$  con la irradiancia normal directa en el aire limpio  $I_0$  (o flujo solar entrante en la atmósfera), mediante la ecuación:

$$I_{s0} = I_0 * e^{-\sigma m} \quad (11)$$

siendo  $I_0$  la irradiancia normal de la radiación solar para una atmósfera limpia que contiene CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O, como elementos que absorben y emiten radiación.

La relación  $\frac{I_{s0}}{I_0}$  representa la fracción de la potencia transmitida. La fracción extinguida  $\alpha_s$  que es absorbida por la atmósfera es,  $\alpha_s = \frac{I_0 - I_{s0}}{I_0}$ .

## 2.7 RADIACIÓN SOLAR SALIENTE.

La energía solar directa no es un efectivo calentador de la atmósfera, sino que, como veremos ahora, ésta es calentada por contraradiación desde la Tierra, generando la dinámica de la máquina del tiempo. Como ya se dijo, aproximadamente el 51% de la energía solar que alcanza el tope de la atmósfera, llega a la superficie de la Tierra directa o indirectamente y es absorbida en el suelo. La mayor parte de esta energía es reirradiada hacia el cielo.

Pero como la Tierra tiene una temperatura mucho menor que la del Sol, la radiación terrestre es emitida en longitudes de onda mucho más larga que la radiación solar de onda corta. La radiación terrestre se emite en longitudes de onda comprendida entre 1 y 30  $\mu\text{m}$ , dentro del rango infrarrojo del espectro, con un máximo en 10  $\mu\text{m}$ , por esta razón se llama también radiación de onda larga o radiación infrarroja.

Algunos gases de la atmósfera pueden absorber parte de la radiación que la Tierra emite al espacio, evitando que esta se pierda hacia el espacio exterior. Por ejemplo el vapor de agua y el dióxido de carbono son importantes absorbedores de radiación en el infrarrojo.

El vapor de agua absorbe aproximadamente cinco veces más radiación terrestre que todos los otros gases combinados, contribuyendo a elevar la temperatura de la baja troposfera, lugar donde se desarrolla la vida. Es de notar que entre 8 y 11  $\mu\text{m}$  la atmósfera absorbe muy poca radiación de onda larga, como también el

vapor de agua y el CO<sub>2</sub>. Esta región se llama “ventana atmosférica” debido a que en esa longitud de onda la atmósfera no absorbe radiación, la que se escapa al espacio exterior. Entonces, la atmósfera es transparente a la radiación de onda corta del Sol, pero absorbe la radiación terrestre de onda larga; por lo tanto la atmósfera no es calentada por la radiación solar, sino que se calienta desde el suelo hacia arriba.

## **2.8 BALANCE DE CALOR.**

La Tierra tiene una temperatura media constante en el tiempo, por lo que existe un balance entre la cantidad de radiación solar entrante y la radiación terrestre saliente, si no se calentaría o enfriaría continuamente. Por otra parte algunas regiones del planeta reciben mas radiación solar que otras, pero la radiación terrestre saliente es aproximadamente la misma en cualquier lugar del planeta. Por lo tanto debe existir un balance de calor, que se produce en dos formas:

1. Balance de energía total tierra/atmósfera. La cantidad de energía que llega a la superficie de la Tierra desde el Sol y desde la atmósfera, tiene que ser igual a la cantidad de energía que se refleja desde la superficie mas la que emite la Tierra al espacio.
2. Balance de energía entre diferentes zonas del planeta. En promedio la zona latitudinal entre 35°N y 35°S reciben mas energía que la que pierden y lo contrario ocurre en zonas polares. Es conocido que las zonas centradas en el ecuador son las regiones más cálidas del planeta, lo contrario se produce en altas latitudes, donde se pierde más calor por emisión de radiación de onda larga que la recibida en onda corta del Sol. Pero estas zonas no se calientan ni enfrían continuamente, por lo que existe un transporte de calor desde las regiones con exceso a las regiones con déficit de calor. Es un transporte desde el ecuador hacia los polos y viceversa, que lo realizan la

atmósfera y los océanos a través de los vientos y las corrientes en tres formas:

- a) Se consume calor sensible en la evaporación en los trópicos, el vapor de agua es transportado hacia los polos por los vientos y liberado como calor latente cuando se produce la condensación del vapor para formar las nubes.
- b) Calor transportado por las corrientes oceánicas cálidas hacia los polos (por ejemplo corriente de Brasil) y transporte de frío desde altas latitudes hacia zonas ecuatoriales por las corrientes frías .
- c) La circulación general de la atmósfera participa en el balance de calor con los grandes sistemas de vientos, huracanes y ciclones que transportan calor desde zonas tropicales hacia los polos y frío desde zonas polares hacia el ecuador.

**Tabla 4. Balance de radiación.**

<b>ENTRANTE</b>	<b>SALIENTE</b>
<b>Balance de calor en la superficie de la tierra.</b>	
Radiación solar 51	<b>Radiación terrestre</b> <b>116</b>
Radiación atmosférica 95	Evaporación 23
	Conducción/Convección 7
<b>Total</b> <b>146</b>	<b>Total</b> <b>146</b>
<b>Balance de Calor en la atmósfera.</b>	
Radiación solar 19	Radiación al espacio 64
Condensación. 23	Radiación a la superficie 95
Radiación terrestre 110	
Conducción. 7	

<b>Total. 159</b>	<b>Total 159</b>
<b>Balance de calor planetario.</b>	
Radiación solar 100%	Reflejada y dispersa 30%
	Radiación de atmósfera al espacio 64%
	Radiación de la tierra al espacio 6%
<b>Total 100%</b>	<b>Total 100%</b>

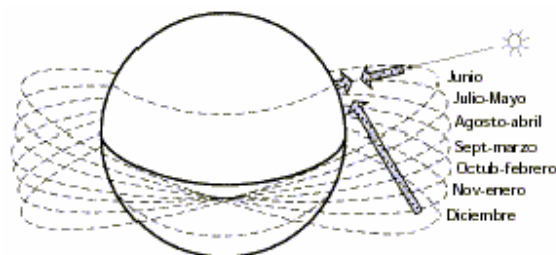
**Fuente:** Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile.

## 2.9 DEFINICION DE PARAMETROS.

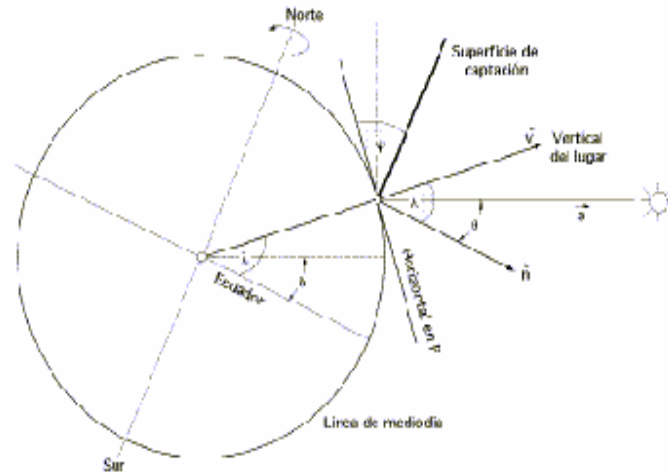
Para calcular la radiación solar incidente sobre una superficie que tiene una determinada inclinación y orientación, es necesario definir algunos términos, cuya representación se ha hecho en las Figuras 6, 7 y 8

$\theta_s$  Angulo cenital solar: es el ángulo que forma la radiación directa del Sol y la vertical del lugar, en un punto cualquiera de la Tierra. Este ángulo varía continuamente a lo largo del día y depende también de la latitud del lugar y de la declinación.

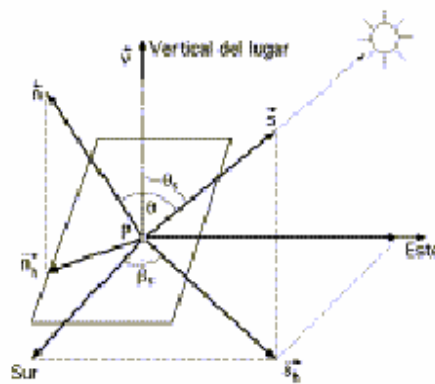
**Figura 6.** Posiciones del sol a lo largo del año.



**Figura 7.** Situación espacial de algunos ángulos.



**Figura 8.** Ángulos presentes en la determinación de la radiación solar directa sobre un dispositivo



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.

$\beta_s$  Angulo acimutal del sol: es el ángulo que forma la componente horizontal de la radiación solar directa, con la dirección Norte-Sur, en el hemisferio norte. Se mide sobre el plano horizontal que pase por el lugar.

- $\delta$  Declinación: es la posición angular del Sol al mediodía solar, respecto al plano del Ecuador terrestre; el valor de este ángulo se suele tomar cada día al mediodía solar.
- L** Latitud: Del lugar es el ángulo que forma el semiplano que pasa por los polos en un lugar de la superficie de la Tierra y el semiplano que pasa por Greenwich
- $\tau$  Angulo horario: Desplazamiento angular del sol respecto al mediodía, que es el instante en que el Sol se encuentra más alto en el cielo y se corresponde con un ángulo cenital solar mínimo, es decir, con un ángulo horario igual a 0. Cada hora es igual a  $15^\circ$  de longitud, tomando un valor (+) por las mañanas y (-) por las tardes.
- $\lambda$  Latitud: Con respecto a un lugar cualquiera sobre la superficie de la Tierra, es su desplazamiento angular por encima o por debajo del Ecuador, medido desde el centro de la Tierra. Se considera positiva al N del Ecuador.
- $\psi$  Angulo cenital de la superficie: es el que forma el terreno,(o la superficie que se considere), con la horizontal del lugar por lo tanto, el ángulo que forma la normal a la superficie con la vertical del lugar.

## 2.10 RELACIONES TRIGONOMETRICAS.

Las relaciones trigonométricas existentes entre la posición de un plano orientado en cualquier forma y en cualquier momento, respecto a la dirección de la componente directa de la radiación solar incidente, se puede expresar mediante la expresión (Benford y Book) de la forma:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & (\text{sen } \sigma * \text{sen } \lambda * \cos \psi) - \\ & (\text{sen } \sigma * \cos \lambda * \text{sen } \psi * \cos \beta) + \\ & (\cos \sigma * \cos \lambda * \cos \psi * \cos \tau) + \\ & (\cos \sigma * \text{sen } \lambda * \text{sen } \psi * \cos \beta * \cos \tau) \\ & + (\cos \sigma * \text{sen } \psi * \text{sen } \beta * \text{sen } \tau). \end{aligned} \quad (12)$$

Cuando el plano del terreno coincide con el horizontal,  $y = 0$ , por lo que el **ángulo cenital de la radiación solar directa**  $\theta = \theta_s$ , es:

$$\cos \theta_s = \text{sen } \sigma \text{sen } \lambda + \cos \sigma \cos \lambda \cos \tau \quad (13)$$

que define el ángulo cenital solar en función de la latitud del lugar  $\lambda$ , del día del año definido por su declinación media  $\delta$  y la hora del día definida por el ángulo horario  $\tau$ .

$$\cot g \beta_s = \frac{\text{tag } \sigma * \cos \lambda - \text{sen } \lambda * \cos \tau}{\text{sen } \tau} \quad (14)$$

Mediante la ecuación del ángulo cenital solar se puede determinar **el ángulo horario**  $\tau_s$  de salida o puesta del Sol, haciendo  $\theta_s = 90^\circ$ :

$$\cos \tau_s = -\frac{\text{sen } \lambda * \text{sen } \sigma}{\cos \lambda * \text{sen } \sigma} = -\tan \lambda * \tan \sigma \quad (15)$$

Para la **declinación**  $\delta$  tomaremos el valor medio diario, al mediodía, dado por la ecuación:

$$\sigma = 23.45 * \text{sen} \left( 360 * \frac{284 + Z}{365} \right) \quad (16)$$

en la que  $Z$  es el día del año considerado, contado a partir del 1 de Enero.

## **2.11 RADIACIÓN SOLAR SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS.**

Si se supone que el Sol brilla uniformemente, de manera que tengamos una distribución igual durante el día y si adoptamos una curva standard de radiación para la irradiancia directa, que nos relacione la irradiancia normal directa con la altura cenital solar, se puede estirar, mediante cálculos trigonométricos y posterior integración numérica, la relación existente entre la radiación directa mensual sobre cualquier superficie plana inclinada y la correspondiente radiación directa media mensual sobre un plano horizontal.

El proceso se puede simplificar aplicando la formulación trigonométrica que permite seguir el movimiento aparente del Sol, junto con la curva de radiación standard elegida, obteniéndose de esta forma los valores instantáneos de radiación sobre distintas superficies, en determinados intervalos de tiempo, en cualquier época del año y en distintos lugares; de esta forma se obtienen los gráficos de datos sobre irradiancia directa con el cielo sin nubes y el Sol brillante

**2.11.1 Componente Directa:** Analicemos en primer lugar la componente directa de la radiación. Sobre una superficie horizontal, la dirección de la radiación directa  $I_0$  forma un ángulo  $\theta_s$  con la vertical, siendo  $I_{0(h)}$  su proyección sobre la misma.

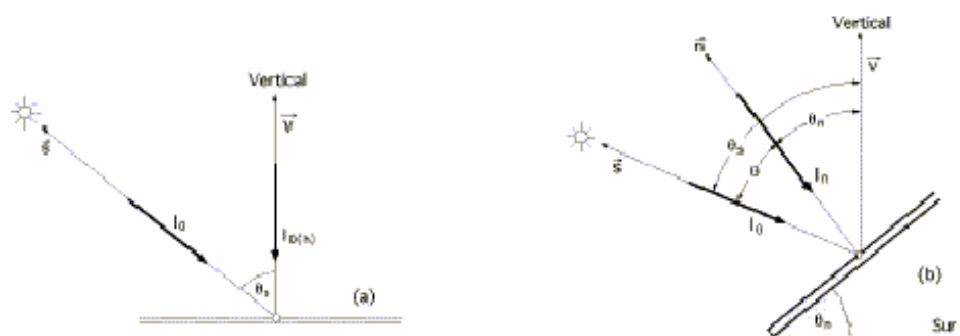
La normal a la superficie inclinada forma un ángulo con la vertical del lugar que llamaremos  $\theta_n$  que es a su vez el ángulo que la superficie forma con el plano horizontal; la proyección de la radiación directa  $I_0$  sobre la normal a la superficie es  $I_n$ . Hay que suponer que en el hemisferio Norte la superficie inclinada está orientada al Sur.

De acuerdo con las Figura 9 se tiene:

$$I_{0(h)} = I_0 \cos \theta_s \quad (17)$$

$$I_n = I_0 \cos(\theta_s - \theta_n) = I_0 \cos \theta_{(s-n)} \quad (18)$$

**Figura 9.** Radiación directa solar sobre superficies inclinada.



**Fue**

**nte:** FERNANDEZ, Pedro. Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.

La relación  $\eta_D$  entre la radiación directa sobre la superficie inclinada  $I_n$  y la de la superficie horizontal  $I_{0(h)}$ , viene dada en la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \eta_D &= \frac{I_n}{I_{0(h)}} = \frac{\cos \theta_{(s-n)}}{\cos \theta_s} = \frac{\sin \sigma \sin (\lambda - \theta_n) + \cos \sigma \cos (\lambda - \theta_n) \cos \tau}{\sin \sigma \sin \lambda + \cos \sigma \cos \lambda \cos \tau} = \\ &= \frac{\cos \theta_s \cos \theta_n + \sin \theta_s \sin \theta_n}{\cos \theta_s} = \cos \theta_n + \sin \theta_n \tan \theta_s \quad (19) \end{aligned}$$

**2.11.2 Componente Difusa:** La componente difusa de la radiación solar se extiende uniformemente por el cielo (nubosidad uniforme, días de bruma,..etc.), resulta que la radiación difusa sobre una superficie inclinada va a depende de la parte de cielo que se vea desde esta superficie. Si además se supone que las propiedades del suelo y demás superficies vistas desde ella reflejan la radiación

solar, constituyen una nueva fuente de radiación difusa (albedo), equivalente a la del cielo, por lo que la superficie inclinada recibirá la misma radiación difusa, sin que influya su orientación, por lo que el factor de corrección de la radiación difusa será siempre la unidad.

En la práctica se puede considerar que la radiación difusa sobre un plano horizontal es la tercera parte de la radiación directa sobre el mismo plano. En consecuencia, la componente difusa es la suma de los dos efectos :

$$I_{\text{dif}} = I_{\text{dif}(h)} + I_{\text{albedo}} = I_{\text{dif}(h)} \frac{1 + \cos \theta_n}{2} + (I_0 + I_{\text{dif}})_{(h)} \frac{1 - \cos \theta_n}{2} * \rho \quad (20)$$

**2.11.3 Radiación Total:** La radiación total sobre una superficie inclinada que incluye el albedo, es:

$$\begin{aligned} I_{T(i)} &= I_{o(i)} + I_{\text{dif}(h)} + I_{\text{albedo}} = I_{o(h)} * \eta_D + I_{\text{dif}(h)} + I_{\text{albedo}} \\ &= I_{o(h)} * \eta_D + I_{\text{dif}(h)} * \frac{1 + \cos \theta_n}{2} + (I_{o(i)} + I_{\text{dif}(h)}) * \frac{1 - \cos \theta_n}{2} \rho \end{aligned} \quad (21)$$

definiéndose el factor eficaz de energía solar en la superficie inclinada respecto a la total horizontal, en la forma:

$$\eta_{\text{eficaz}} = \frac{I_{0(h)}}{I_{T(h)}} \eta_D + \frac{I_{\text{dif}(h)}}{I_{T(h)}} * \frac{1 + \cos \theta_n}{2} + \frac{1 - \cos \theta_n}{2} \rho \quad (22)$$

A medida que aumenta  $\theta_n$ , el sumando del albedo se va haciendo más importante.

*Para una superficie vertical la radiación difusa es igual a la suma de la mitad de la radiación difusa del cielo y de la mitad de la radiación global difundida por el suelo:*

$$I_{dif(v)} = \frac{I_{dif(h)}}{2} + \frac{I_{o(h)} + I_{dif(h)}}{2} * \rho \quad (23)$$

En realidad, esta formulación es teórica por cuanto la radiación reflejada difusa se difunde en la atmósfera que, a su vez, la vuelve a difundir parcialmente hacia el suelo, es decir, la radiación difundida por el cielo no es isótropa. Para una nubosidad media, esta redifusión es del orden del 10% y la radiación total teórica aumenta otro tanto.

### 3. DESINFECCIÓN DEL AGUA.

#### 3.1 TRANSMISION DE PATOGENOS POR AGUA.

Los patógenos transmitidos por agua pertenecen a los grupos de bacterias, virus y parásitos. Si bien con frecuencia los virus no se detectan en el agua ni en el huésped, pueden representar el mayor grupo de agentes patógenos, seguidos por los parásitos y las bacterias.

Muchos patógenos comunes no sólo se transmiten por agua sino que también siguen otras rutas de infección. Los malos hábitos de higiene frecuentemente son una fuente significativa de infección. Además, en los países en desarrollo se observa con frecuencia una contaminación secundaria del agua para consumo, debido a un manejo inadecuado. Por lo tanto, las intervenciones dirigidas a mejorar la calidad del agua deben considerar siempre la introducción de diversos mensajes referidos a la higiene, a través de la combinación de dichas medidas, es posible lograr efectos positivos significativos en la salud de la población .

Los principales factores que influyen en la importancia de los patógenos transmitidos por agua incluyen su capacidad para sobrevivir en el ambiente y el número necesario para infectar a un huésped (humano). En la tabla 5 se presentan los patógenos más conocidos, así como sus características. Las bacterias *Vibrio cholerae*, *Shigella*, *Salmonella* así como diferentes cepas patógenas de *E. coli* son los patógenos más importantes transmitidos por agua.

Las enfermedades gastrointestinales causadas por estas bacterias pueden ser serias y generalmente requieren tratamiento. La deshidratación como

consecuencia de una diarrea profusa es frecuente entre niños menores de 5 años en los países en desarrollo. Las epidemias de cólera son causadas principalmente por *Vibrio cholerae* transmitido por agua; por lo tanto, el tratamiento del agua es la medida más importante para la prevención de las epidemias de cólera.

Las enfermedades *virales* son generalmente sintomáticas y agudas con períodos relativamente cortos, alta liberación de virus y baja dosis infecciosa. Aún cuando los *helmintos* y *protozoarios* generalmente no causan diarreas agudas, representan un grupo importante de patógenos. Una infección con protozoarios puede causar problemas crónicos de digestión, que pueden conducir a una malnutrición. Los niños malnutridos tienen mayor probabilidad de sufrir diferentes tipos de infecciones.

*La Giardia spp.* y *el Cryptosporidium spp.* son dos protozoarios transmitidos regularmente a través del agua, ambos patógenos tienen una etapa de quiste, que es muy resistente a las influencias ambientales. Ello les permite sobrevivir durante largo tiempo fuera de cualquier huésped. La ingestión de los quistes puede causar enfermedades. Las infecciones asintomáticas son muy comunes y apoyan la difusión de estos patógenos.

### **3.2 EFECTO DE LA RADIACIÓN UV-A Y DE LA TEMPERATURA SOBRE ALGUNOS MICROORGANISMOS PATÓGENOS.**

Todo proceso de desinfección solar utiliza dos componentes de la luz solar para la desinfección del agua: El primero, la radiación UV-A, tiene efecto germicida y el segundo componente, la radiación infrarroja, eleva la temperatura del agua y genera el efecto de pasteurización cuando la temperatura llega a 70-75°C. El uso combinado de la radiación UV-A y del calor produce un efecto de sinergia que incrementa la eficacia del proceso.

**3.2.1 Efectos de la radiación UV-A :** La radiación solar puede dividirse en tres rangos de longitud de onda: radiación UV, luz visible y radiación infrarroja. El ojo humano no puede percibir la radiación UV que tiene un rango de radiación muy agresiva que puede causar daños severos a la piel y los ojos y puede destruir las células vivas. Afortunadamente, la mayoría de la luz UV-C y UV-B en el rango de 200 a 320 nm es absorbida por la capa de ozono (O<sub>3</sub>) en la atmósfera que protege a la tierra de un gran porcentaje de la radiación solar proveniente del espacio.

*Tabla 5. Patógenos transmitidos por el agua.*

<b>PATÓGENOS TRANSMITIDOS POR AGUA / IMPORTANCIA PARA LA SALUD Y RUTAS DE TRANSMISIÓN</b>				
<b>Patógeno</b>	<b>Influencia en la salud</b>	<b>Rutas de transmisión</b>	<b>Persistencia en los sistemas de abastecimiento de agua</b>	<b>Dosis infecciosa</b>
<b>Bacterias</b>				
Campilobacter jejuni, C. coli	Alta	- Contacto persona a persona	Moderada	Moderada
E. coli patógeno	Alta	- Contaminación doméstica	Moderada	Alta
Salmonella typhi	Alta	- Contaminación del agua	Moderada	Alta
Otras salmonellas	Alta	- Contaminación de cultivos	Prolongada	Alta
Shigella spp	Alta		Corta	Moderada
Vibrio cholerae	Alta		Corta	Alta
Yersinia enterocolitica	Alta		Prolongada	Alta
Pseudomonas ae.	Moderada		Puede multiplicarse	Alta (?)
Aeromonas spp	Moderada		Puede multiplicarse	Alta (?)
<b>Virus</b>				
Adenovirus	Alta	- Contacto persona a persona	?	Baja
Virus de la polio	Alta	- Contaminación doméstica	?	Baja
Virus de la hepatitis A	Alta	- Contaminación del agua	?	Baja
Virus de la	Alta		?	Baja

hepatitis no A				
Enterovirus	Alta		prolongada	Baja
Virus Norwalk	Alta		?	Baja
Virus tipo Norwalk (NLV)	Moderada		?	Baja (?)
Rotavirus	Alta		?	Moderada
<b>Protozoarios</b>				
Entamoeba hystolítica	Alta	- Contacto persona a persona	Moderada	Baja
Giardia spp	Alta	- Contaminación doméstica	Moderada	Baja
Cryptosporidium spp	Alta	- Contaminación mediante animales	Prolongada	Baja

**Fuente:** [www.sodis.ch](http://www.sodis.ch).

Sólo una fracción de la radiación UV-A, con un rango de longitud de onda más alto, 320 a 400 nm, cercano a la luz violeta visible, llega a la superficie de la tierra. La luz UV-A tiene un efecto letal en los patógenos presentes en el agua que afectan a los humanos. Estos patógenos no se adaptan bien a las condiciones ambientales agresivas, pues sus condiciones de vida específicas son las del tracto gastrointestinal humano.

Por lo tanto, son más sensibles a la luz solar que los organismos que abundan en el ambiente. La radiación UV-A interactúa directamente con el ADN, los ácidos nucleicos y las enzimas de las células vivas, cambia la estructura molecular y puede producir la muerte de la célula. La radiación UV reacciona con el oxígeno disuelto en el agua y produce formas altamente reactivas de oxígenos (radicales libres de oxígeno y peróxidos de hidrógeno). Estas moléculas también interfieren con las estructuras celulares y matan a los patógenos.

**3.2.2 Efectos de la temperatura (radiación infrarroja):** Otro aspecto de la luz solar es la radiación de onda larga, denominada infrarroja. Esta radiación tampoco la puede ver el ojo humano, pero podemos sentir el calor producido por la luz con una longitud de onda superior a 700 nm. La radiación infrarroja absorbida por el agua es responsable de su calentamiento.

Los microorganismos son sensibles al calor. En la tabla 6 se presenta la temperatura y el tiempo de exposición necesarios para eliminar microorganismos. Puede verse que el agua no tiene que hervir para matar el 99.9% de los microorganismos y el calentamiento del agua a 50- 60°C durante una hora tiene el mismo efecto.

**Tabla 6 . Resistencia térmica de los microorganismos.**

RESISTENCIA TÉRMICA DE LOS MICROORGANISMOS			
Microorganismos	Temperatura para una desinfección del 100%		
	1 min.	6 min.	60 min.
Enterovirus			62 °C
Rotavirus			63 °C (30 min.)
Coliformes fecales	80 °C destrucción completa		
Salmonella		62 °C	58 °C
Shigella		61 °C	54 °C
Vibrio Cholerae			45 °C
Quistes de entamoeba histolytica	57 °C	54 °C	50 °C
Quistes de giardia	57 °C	54 °C	50 °C
Huevos y larvas de gusano ganchudo		62 °C	51 °C
Huevos de Áscaris	68 °C	62 °C	57 °C
Huevos de esquistosoma	60 °C	55 °C	50 °C
Huevos de Tenia	65 °C	57 °C	51 °C

**Fuente:** [www.sodis.ch](http://www.sodis.ch).

### 3.3 MÉTODO DE LOS TUBOS MÚLTIPLES DE FERMENTACIÓN.

- *Procedimiento de un tubo :*
  - Esterilización
  - Adición de la muestra de agua (entre 0,1 y 100 ml)
  - Incubación : T = 35 °C ,  $\theta$  = 48 horas
  - Resultado :
    - Ausencia de gases en tubo invertido, indica que los coliformes no están presentes.
    - Presencia de gases en tubo invertido indica la evidencia presuntiva de la existencia de coliformes.
  
- Procedimientos en tubos múltiples:
  - Serie común : 5 tubos con porciones de 10 ml de agua.
  - 5 tubos con porciones de 1ml de agua.

5 tubos con porciones de 0,1ml de agua.

- Resultado de tubos positivos se ingresa a la tabla de probabilidades (Tabla 7) que entrega el numero más probable de coliformes por 100 ml de la muestra original (NMP/100ml).

**Tabla 7. Índice NMP**

Lectura (1)	Índice NMP por 100ml	Limite de confianza (2)		Lectura (1)	Índice NMP por 100ml	Limite de confianza (2)	
		Inferior	Superior			Inferior	Superior
000	< 0			412	26	9	78
001	2	< 0.5	7	420	22	7	67
010	2	< 0.5	7	421	26	9	78
020	4	< 0.5	11	430	27	9	80
				431	33	11	93
100	2	< 0.5	7	440	34	12	93
101	4	< 0.5	11				
110	4	< 0.5	11	500	23	7	70
111	6	< 0.5	15	501	31	11	89
120	6	< 0.5	15	502	43	15	110
				510	33	11	93
200	5	< 0.5	13	511	46	16	120
201	7	1	17	512	63	21	150
210	7	1	17	520	49	17	130
211	9	2	21	521	70	23	170
220	9	2	21	522	94	28	220
230	12	3	28	530	79	25	190
				531	110	31	250
300	8	1	19	532	140	37	340
301	11	2	25	533	180	44	500
310	11	2	25	540	130	35	300
311	14	4	34	541	170	43	490
320	14	4	34	542	220	57	700
321	7	5	46	543	280	90	850
				444	350	120	1000
400	13	3	31	550	240	68	750
401	17	5	46	551	350	120	1000
410	17	5	46	552	540	180	1400
411	21	7	63	553	920	300	3200
				554	1600	640	5800
				555	> 2400	-	-

**Fuente:** <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/agua.html> Ingeniería Ambiental y Medio Ambiente. El Agua, propiedades físicas y químicas.

### 3.4 MARCO LEGAL DE LA DESINFECCION .

El decreto 475 de 1998, establece las normas técnicas de calidad del agua potable. En su artículo 25 exige que el agua para consumo humano cumpla con los valores admisibles presentados en la tabla 8, desde el punto de vista microbiológico.

En su artículo 26, establece que ninguna muestra de agua potable, debe contener E-coli en 100 cm<sup>3</sup> de agua, independientemente del método de análisis utilizado.

El decreto presenta además algunos conceptos importantes para el presente proyecto. A continuación se nombra los más utilizados:

- *Aceptable*: Calificativo que aprueba las características organolépticas del agua para consumo humano.
- *Agua para Consumo Humano*: Es aquella que se utiliza en bebida directa y preparación de alimentos para consumo.
- *Agua Potable*: Es aquella que por cumplir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el presente decreto, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a la salud.

**Tabla 8.** Requisitos microbiológicos para el agua potable.

MICROORGANISMO	TÉCNICA SUSTRATO DEFINIDO	FILTRACIÓN POR MEMBRANA	TUBOS MÚLTIPLES DE FERMENTACIÓN.
Coliformes totales	0 microorganismos/cm <sup>3</sup>	0 UFC/100cm <sup>3</sup>	< 2 microorga/100cm <sup>3</sup>
Escherichia Coli	0 microorganismos/cm <sup>3</sup>	0 UFC/100cm <sup>3</sup>	< 2 microorga/100cm <sup>3</sup>

*Fuente:* Decreto 475 de 1988.

- *Agua Segura*: Es aquella que sin cumplir algunas de las normas de potabilidad definidas en el presente decreto, puede ser consumida sin riesgo para la salud humana.

- *Escherichia Coli (E-Coli)* : Bacilo aerobio gram-negativo que no produce esporas, pertenece a la familia de las enterobacteriáceas y se caracteriza por poseer la enzima  $\beta$ -Galactosidasa y  $\beta$ -Glucoroanidasa.
- *Grupo Coliforme*: Es el que comprende todas las bacterias gram negativas en forma bacilar que fermenta la lactosa a temperatura de 35 a 37 °C, produciendo ácido y gas (CO<sub>2</sub>) en un plazo de 24 a 48 horas, aerobias o anaerobias facultativas, no forman esporas y presentan actividad enzimática de la  $\beta$ -Galactosidasa.
- *Índice de Coliformes*: Es la cantidad estimada de microorganismos de grupo coliformes presentes en cien centímetros cúbicos (100 cm<sup>3</sup>) de agua, cuyo resultado se expresa en términos de números más probable (NPM) por los métodos enumerados anteriormente.

#### 4. ESTADO DEL ARTE SOBRE COLECTORES SOLARES.

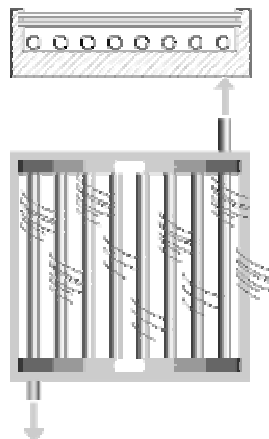
La transformación de la radiación solar en energía térmica, ya sea en forma de agua caliente, aire caliente, vapor de agua, etc., se hace por intermedio de los llamados colectores solares que pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- Colector solar plano.
- Colector solar al vacío.
- Colectores Concentradores .
- Helióstatos .
- Piletas solares .

##### 4.1 COLECTOR SOLAR PLANO.

El principio fundamental de funcionamiento de un colector solar se basa en el aprovechamiento de la propiedad que posee una superficie revestida de negro o de una sustancia de material selectivo, que absorbe la radiación solar en un 90% y la emite en menos de un 10 por ciento.

**Figura 10 .** *Colector Solar de Placa plana.*



**Fuente:** *Energía Solar. Por Rafael Faradje.*

En particular, el colector solar plano está formado por una superficie metálica plana que lleva adherida a ella una serie de tuberías de cobre, estando todo el conjunto revestido de pintura negra absorbente selectiva. Por las tuberías circula el agua a ser calentada por la radiación solar.

Para evitar las pérdidas de calor por convección (pérdidas térmicas) se coloca una o dos cubiertas de vidrio entre la superficie de absorción y el medio ambiente; que además de reducir las pérdidas de calor, protegen al conjunto de las condiciones atmosféricas. Para evitar la pérdida de calor por conducción, el conjunto lleva en su parte posterior una capa de material aislante térmico que puede ser: poliuretano expandido, lana de vidrio, fiberglass, etcétera.

El rendimiento de un colector solar, en general, se deduce comparando la cantidad de calor que se obtiene del agua y la cantidad de calor que recibe el colector de la radiación solar, o sea: Si  $Q_r$  es la cantidad de calor recibida de la radiación solar, y  $Q_u$  es la cantidad de calor que se obtiene del agua, el rendimiento será:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_r} \quad (24)$$

Desarrollando las expresiones de  $Q_r$  y  $Q_u$  en función de las temperaturas del agua, de la temperatura ambiente, de la radiación recibida, y de los elementos que provocan las pérdidas ópticas: transmitancia de la superficie donde incide el rayo solar, absorptancia efectiva de la tubería por donde circula el líquido, reflectancia especular, fracción de radiación interceptada por el receptor; y las pérdidas térmicas: coeficiente de transmisión del calor, masa del líquido, temperaturas inicial y final del líquido y temperatura ambiente; se llega a una expresión del rendimiento siguiente:

$$\eta = A - B * \frac{T_{pf} - T_a}{I_d} \quad (25)$$

Siendo A y B funciones de los elementos arriba citados,  $I_d$ : la radiación solar directa,  $T_{pf}$  la temperatura promedio del líquido y  $T_a$  la temperatura ambiente. La expresión anterior representada en coordenadas cartesianas es una recta, donde la ordenada en el origen nos da el rendimiento considerando solamente el valor de las pérdidas ópticas, mientras que la inclinación (la tangente del ángulo, nos da las pérdidas térmicas).

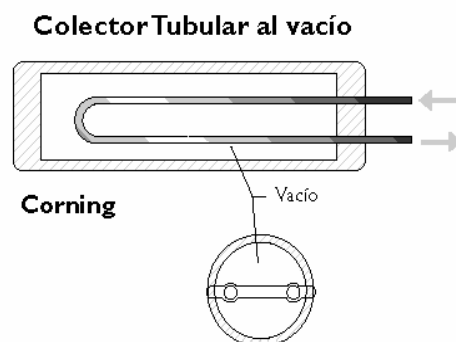
#### 4.2 COLECTOR AL VACÍO.

La idea de hacer el vacío entre la cubierta de vidrio y la placa receptora resultó muy atractiva por cuanto ello reduce las pérdidas por convección a cero, y si a ello le agregamos una superficie de absorción selectiva, también se pueden reducir casi a cero las pérdidas por radiación, con lo cual se consigue un colector ideal.

Sin embargo, el conseguir un vacío entre las placas de un colector plano es muy difícil técnicamente, por cuanto hay que tener un soporte rígido del espacio entre las placas (para ello el panel de abeja es ideal) y un sellado hermético a veces imposible de practicar.

Habiéndose conseguido y estando disponible la tecnología para la fabricación de tubos para iluminación fluorescente, se han desarrollado dos tipos de colectores el vacío tubulares, producidos por Corning y Owens-Illinois, que pueden apreciarse en el dibujo siguiente:

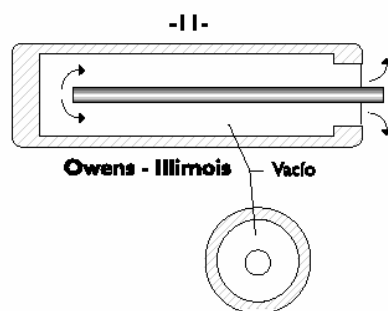
**Figura.11.** Colector Tubular al vacío.



**Fuente:** *Energía Solar I. Por Rafael Faradje.*

El desarrollado por Corning usa un tubo de vidrio de gran diámetro que rodea a una superficie plana selectiva. En cambio, el de Owens-Illinois emplea también un tubo de vidrio grande pero en lugar de una superficie plana selectiva, usa un tubo concéntrico de menor diámetro que lleva a su alrededor la superficie selectiva.

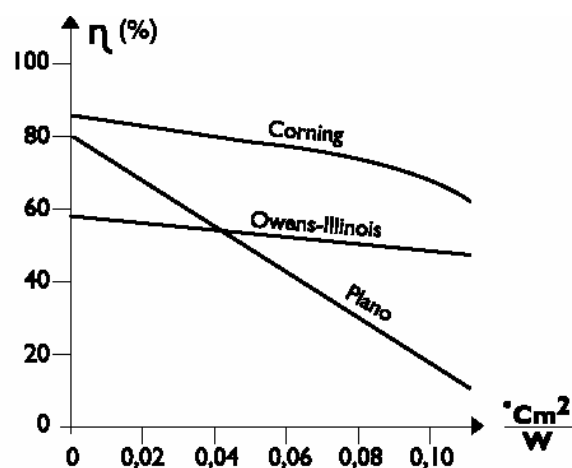
**Figura 12.** *Colector Owens-Illinois.*



**Fuente:** *Energía Solar I. Por Rafael Faradje*

A continuación se pueden observar las mejoras obtenidas con estos colectores con respecto a la eficiencia presentada por un colector solar de placa plana.

**Figura 13.** *Eficiencias en colectores.*



**Fuente:** *Energía Solar I. Por Rafael Faradje*

El inconveniente de este tipo de colectores es su costo elevado y su mantenimiento difícil, por lo cual no tienen mucha aceptación en el mercado. También la firma General Electric desarrolló un colector similar y de rendimiento importante, muy parecido en sus características al de Owens-Illinois.

#### **4.3 COLECTORES CONCENTRADORES.**

El principio de los colectores concentradores es el de concentrar mediante procedimientos ópticos la energía que irradia el sol antes de su transformación en calor. Así, una radiación solar que entra a un colector concentrador a través de una superficie determinada es reflejada, refractada o absorbida por una superficie menor, para luego ser transformada en energía térmica. Esto no ocurre en el colector plano donde la transformación de la energía solar en energía térmica se efectúa en la misma superficie que recibe la radiación.

La ventaja importante de este tipo de colector es ante todo la reducción de las pérdidas térmicas en el receptor, pues al ser éste de menor superficie habrá menos área para la radiación del calor y por lo tanto el líquido que circula por el receptor puede calentarse a mayores temperaturas con un rendimiento razonable y a un costo menor.

Claro está que las reflexiones y refracciones extras de la radiación solar hacen aumentar las pérdidas ópticas y entonces las curvas representativas del rendimiento, parten de ordenadas en el origen menores que las de un colector plano, pero no tienen la pendiente pronunciada, característica de estos últimos.

A continuación se presenta el coeficiente de concentración para este tipo de colectores:

$$C = \frac{\text{Área neta de entrada de la radiación al colector}}{\text{Área donde se concentra la radiación}} \quad (26)$$

Los colectores concentradores, de acuerdo con el valor de C, se dividen en dos tipos:

**- de alta concentración**

( $C > 10$ ) Son los que, mediante dispositivos especiales y precisos de enfoque y seguimiento del sol, logran en el receptor una alta densidad de energía;

**- de media y baja concentración**

( $2 < C < 10$ ) Son los que no requieren dispositivos especiales de enfoque y tampoco un seguimiento permanente del sol, sino la modificación de su posición algunas veces por año, que dependerá del valor de C. Así, por ejemplo, para

- C = 2 a 3 → 4 veces por año
- C = 3 a 6 → 8 veces por año
- C = 10 → 80 veces por año

Los colectores concentradores pueden ser de varios tipos:

**4.3.1 Parabólicos por Reflexión.**

**Figura 14.** Colector Parabólico por Reflexión



**Fuente:** Energía Solar II. Por Rafael Faradje.

El colector está formado por una superficie reflectora (espejo, aluminio anodizado, etc.) de forma parabólica, que recibe los rayos solares y que merced a la propiedad de la parábola que dice que cuando los rayos son paralelos al eje de la

misma se concentran en el foco de ella, dichos rayos inciden en un elemento receptor ubicado en el foco, que contiene el fluido a calentar.

**4.3.2 Parabólicos por Refracción:** El colector está formado por una lente que recibe los rayos solares paralelos y los refracta concentrándolos en un punto, donde se encuentra el elemento receptor que contiene el fluido a calentar

**Figura 15.** Colector Parabólico por Refracción

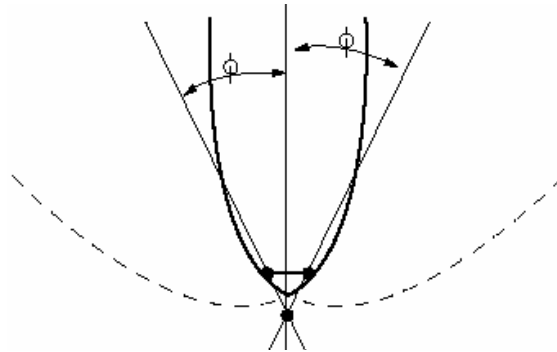


**Fuente:** *Energía Solar II. Por Rafael Faradje*

**4.3.3 Colector Parabólico compuesto (C.P.C.):** El colector está formado por dos parábolas dispuestas de tal manera que ambos ejes forman con la vertical el mismo ángulo  $\varphi$ . Se demuestra que existe una vinculación entre la concentración  $C$  del colector y dicho ángulo, mediante la expresión:

$$C = \frac{1}{\text{Sen } \varphi} \quad (27)$$

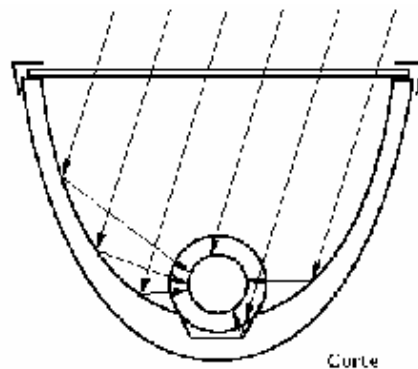
**Figura 16.** Colector Parabólico Compuesto



**Fuente:** *Energía Solar II. Por Rafael Faradje*

todos los rayos solares que inciden con un ángulo respecto de la vertical y que se encuentran dentro de dicho valor de  $\phi$  tienen la particularidad de llegar por una o dos reflexiones al receptor ubicado en la parte inferior. Este receptor puede ser plano horizontal, plano vertical, cilíndrico, etc

**Figura 17.** CPC utilizado en Israel



**Fuente:** *Energía Solar II. Por Rafael Faradje*

En la Figura 17 se ve en corte un C.P.C. fabricado en Israel, donde se puede apreciar la superficie reflectora interior de aluminio anodizado, que en la parte inferior tiene la forma de trapecio (también puede tener la forma de una W).

En la parte superior hay un vidrio que permite el paso de la radiación solar, que en forma directa o luego de una o dos reflexiones incide en una tubería metálica con

revestimiento selectivo por donde circula el fluido a calentar. Rodea a esta tubería una manga de plástico especial que hace disminuir las pérdidas térmicas por convección en el espacio entre la tubería y el vidrio.

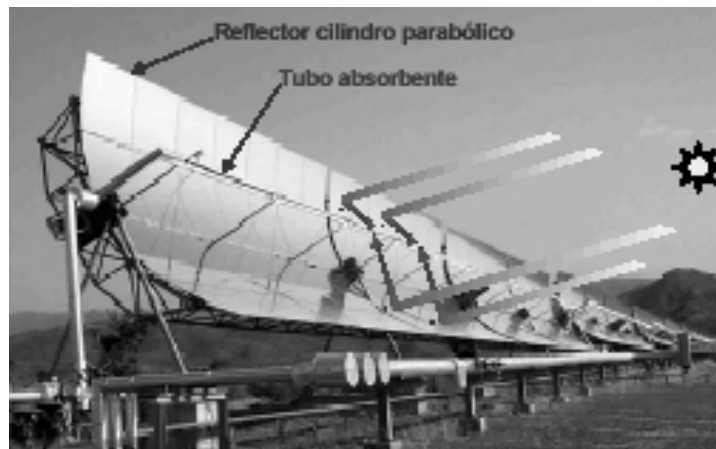
Todo el conjunto está cerrado por una cubierta de chapa de hierro galvanizada y entre ésta y el aluminio reflectivo hay un aislante que puede ser poliuretano expandido, lana de vidrio, etcétera.

**4.3.4 Concentradores cilindro-parabólicos** : también conocido como Colector Parabólico Receptor de Foco Lineal. El captador cilindro parabólico, denominado mediante las siglas CCP, debe su nombre a uno de sus componentes principales: la superficie reflectante cilindro parabólica que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo absorbente colocado en la línea focal de la parábola.

Esta radiación concentrada sobre el tubo absorbente hace que el fluido que circula por su interior se caliente, transformando de esta forma la radiación solar en energía térmica, en forma de calor sensible o latente del fluido. Rodea a esta tubería metálica otra de vidrio, y entre ambas se ha efectuado el vacío, para disminuir las pérdidas térmicas por convección.

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

**Figura 18.** Colector Cilindro Parabólico.



**Fuente:** *Energía Solar Termoeléctrica .Dr. Manuel Romero Álvarez. Director Plataforma solar de Almería-CIEMAT.España.*

El tipo de fluido de trabajo que se utiliza en los CCP depende de la temperatura a la que se desee calentar. Si las temperaturas que se desean son moderadas ( $<200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), se puede utilizar agua desmineralizada o Etilen Glicol como fluidos de trabajo, esto en el caso de plantas termoeléctricas ,o simplemente utilizarlo como dispositivo en el tratamiento de aguas. En cambio, se utilizan aceites sintéticos en aquellas aplicaciones donde se desean temperaturas más altas ( $200\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

**Figura 19.** Vista Frontal de Un CCP



**Fuente:** *Efficiency improvement of parabolic trough collectors by means of additional end reflectors, th. Fend, J. León1, plataforma solar de Almería.*

A continuación se presenta una tabla que relaciona las plantas termosolares con CCP, tanto experimentales como comerciales, que han sido implementadas en el mundo desde la década de los 80.

**Tabla 9 .Plantas Termoeléctricas de Colectores Cilindro Parabólicos en el mundo.**

Planta	País	Potencia (MW)	Fluido de trabajo	Medio de Almacenamiento	Comienzo operación
DCS	España	0.5	Aceite (Santotherm 55)	Aceite (Santotherm 55)	1981
SEGS-I	EEUU	14	Aceite (ESSO 500)	Aceite (ESSO 500)	1984
SEGS-II	EEUU	30	Aceite (Monsanto VP1)	Sin almacenamiento	1985
SEGS-III	EEUU	30	Aceite (Monsanto VP1)	Sin almacenamiento	1986
SEGS-IV	EEUU	30	Aceite (Monsanto VP1)	Sin almacenamiento	1986
SEGS-V	EEUU	30	Aceite (Monsanto VP1)	Sin almacenamiento	1987
SEGS-VI	EEUU	30	Aceite (Monsanto VP1)	Sin almacenamiento	1988
SEGS-VII	EEUU	30	Aceite (Monsanto VP1)	Sin almacenamiento	1989
SEGS-VIII	EEUU	80	Aceite (Monsanto VP1)	Sin almacenamiento	1989
SEGS-IX	EEUU	80	Aceite (Monsanto VP1)	Sin almacenamiento	1990

**Fuente:** *Energía Solar Termoeléctrica .Dr. Manuel Romero Álvarez. Director Plataforma solar de Almería-CIEMAT.España.*

Estos sistemas presentan una producción entre 14 y 80 MW, los cuales son híbridos hasta con un 25 % de gas natural para proveer la energía que no se recibe cuando la energía solar no esta disponible. Reciben el nombre de “Parabolic Trough”, en el idioma inglés.

## **5. ANÁLISIS TÉRMICO Y OPTICO DEL COLECTOR SOLAR PARABÓLICO.**

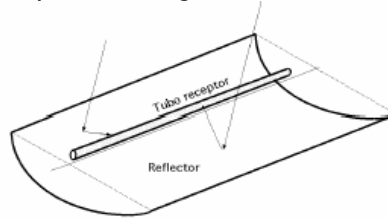
Para evitar confusiones de términos, la palabra colector se aplica al sistema total incluyendo el receptor y el concentrador. El receptor es donde la radiación se absorbe y se convierte en alguna otra forma de energía; esto incluye al absorbedor, que esta asociado con la cubierta, y aislamientos. El concentrador, o sistema óptico, es la parte del colector que direcciona la radiación sobre el receptor. La apertura del concentrador es la abertura a través de la cual la radiación solar entra en el concentrador.

El siguiente es el análisis térmico y óptico del colector solar parabólico desarrollado en este proyecto, a través del cual podemos conocer su rendimiento térmico y finalmente la eficiencia con la que éste aprovecha la energía que recibe del sol. Este análisis se realiza para dos casos: con y sin efectos de cubierta en el receptor. En cualquier caso para poder efectuar un estudio térmico simple de este colector, es necesario suponer un estado estacionario de funcionamiento; es decir unos valores medios constantes para todos los parámetros que intervienen.

### **5.1 ÁREA DEL CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO.**

En el caso del concentrador parabólico cuando se habla de área nos estamos refiriendo al área de apertura del concentrador,  $A_a$ ; que es un rectángulo de dimensiones de la anchura y la longitud de la superficie reflectante, como se muestra en la figura 28.

**Figura 28.** Concentrador cilindro parabólico general.



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos Termosolares En Baja, Media Y Alta Temperatura Universidad de Cantabria.*

## 5.2 CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS SOBRE LOS COLECTORES PARABOLICOS.

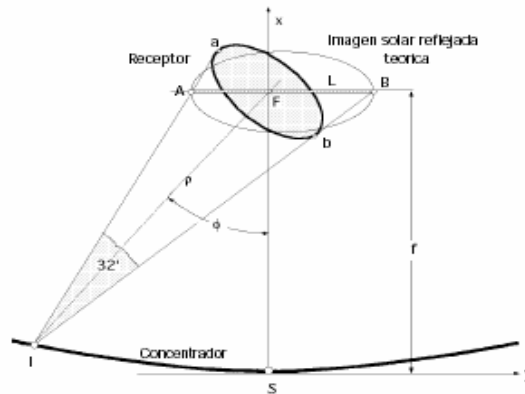
**5.2.1 El disco solar y la imagen solar teórica:** La función de un sistema óptico es formar una imagen del sol sobre un receptor. Las relaciones del tamaño del sol y la distancia a la tierra determina que el ángulo subtendido por el disco solar es  $32^\circ$  para un observador en la tierra; por lo tanto una imagen teórica del sol creado por cualquier sistema óptico tendrá un tamaño finito, el cual depende del tamaño del disco solar y de la geometría del sistema. Esto se muestra en la figura 29, donde el segmento ab (o  $W'$ ) es el diámetro de la imagen solar sobre el receptor para una imagen formada por cualquier parte del concentrador.

Para un receptor plano y normal al eje de concentrador, el ancho  $W'$ , se encuentra usando “el radio del espejo”,  $r$ , por lo tanto tenemos que:

$$W' = \frac{2r \tan 16^\circ}{\cos \phi} \quad (28)$$

la distancia  $r$  de un punto del receptor al foco puede ser derivada por la forma particular del reflector.

**Figura 29.** Imagen reflejada teórica del sol en un colector cilíndrico parabólico.



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos Termosolares En Baja, Media Y Alta Temperatura* Universidad de Cantabria.

Para un concentrador de sección parabólica, la longitud del foco es definida por la siguiente ecuación:

$$x^2 = 4fy \quad (29)$$

y r es dado por:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos\phi} \quad (30)$$

donde f es la distancia focal de la parábola, y  $\phi$  es el ángulo entre el eje y el rayo reflejado en el foco, como se muestra en la figura 29.

Mediante la distancia focal f se determina el tamaño de la imagen reflejada y mediante la superficie de apertura Aa la energía total que puede concentrar, por lo que el flujo de energía en el foco receptor será función de la relación Aa/f.

Una característica fundamental de estos colectores es el llamado índice de concentración Aa/Ar, que es la relación entre el área de la superficie de apertura del concentrador y el área de la superficie receptora.

**5.2.2 Angulo de incidencia formado por los vectores n y s:** Un factor a tener en cuenta es la orientación del colector y el mecanismo apropiado que permita hacer un seguimiento lo más preciso posible del movimiento aparente del Sol, lo que implica en la mayoría de los casos tener que hacer uso de más de un sistema de movimiento.

Así, un concentrador cilíndrico parabólico tiene que tener un mecanismo de seguimiento del Sol que permita que su vector unitario  $n$  normal a la superficie de abertura y el vector unitario solar  $s$ , conformen un plano que coincida con el plano focal que a su vez sea plano de simetría del concentrador y que por lo tanto contenga al receptor; con este montaje es posible obtener giros del colector alrededor de un sólo eje de giro que puede ser un montaje (Norte-Sur), (Este-Oeste), o inclinado y paralelo al eje de la tierra, con velocidad de giro de  $15^\circ$  por hora.

Sin embargo, el seguimiento perfecto del Sol se conseguirá cuando los vectores  $n$  y  $s$  coincidan, ya que en esas circunstancias, la superficie de abertura del colector será normal a los rayos solares incidentes; este montaje requiere la composición de dos movimientos o giros sobre dos ejes, combinación de los citados anteriormente, que se conoce como **Alt-acimut**; el movimiento se realiza mediante giros alrededor de un eje vertical y otro horizontal, existiendo otros tipos de movimientos relativos, pero siempre, el vector unitario normal  $n$  al plano de abertura, tiene que coincidir con la dirección de los rayos solares incidentes definida por el vector unitario  $s$ .

El ángulo  $\theta$  tiene una gran importancia en este tipo de colectores, por cuanto de él depende el valor de  $I_s$  que es la energía incidente por unidad de superficie sobre el concentrador reflector, de valor:

$$I_s = I_o \cos \theta \quad (31)$$

### 5.3 PÉRDIDAS ÓPTICAS Y DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE INTERSECCIÓN

La reflectancia especular  $\rho$  se define como la fracción de energía solar directa incidente que se refleja hacia el receptor según las leyes de la reflexión, de forma que el ángulo de incidencia y el reflejado, ambos respecto a la normal en un punto cualquiera de la superficie reflectora, sean iguales; las pérdidas por reflexión son de la forma,  $1 - \rho$ .

Se consigue una reflectancia elevada utilizando depósitos metálicos o pinturas sobre substratos metálicos o sobre cristal. En colectores cilíndricos parabólicos (CCP) se suelen utilizar láminas de aluminio anodizado, o también películas de plástico metalizadas en vacío, que permiten obtener unos valores altos de la reflectividad durante grandes períodos de funcionamiento del colector. La transmitancia  $\tau$  y la absortancia  $\alpha$  tienen el mismo significado que en los colectores de placa plana, aunque sus valores difieren, dado que las condiciones de diseño también son diferentes pudiendo considerar las siguientes:

- a) Los concentradores no tienen cubiertas y  $\tau$  no influye en el balance energético,  $\tau = 1$ .
- b) Si el receptor es de cavidad, el valor de  $\alpha$  tiende a la unidad, con una emitancia elevada.
- c)  $\tau$  y  $\alpha$  dependen del ángulo medio de incidencia; para un diseño concreto, tiene que ser inferior a  $60^\circ$ .
- d) El factor de interceptación  $F\phi$  representa la fracción de energía reflejada en el concentrador, que es interceptada a su vez por el receptor de energía; éste factor  $F\phi$  es una propiedad del concentrador y de su sistema de orientación al producir la imagen solar y del receptor y de su posición en el colector, al interceptar una parte de dicha imagen solar.

Las pérdidas correspondientes son de la forma,  $1 - F\phi$

El rendimiento óptimo de un colector se obtiene con un factor  $F\phi$  determinado menor que la unidad; la optimización del tamaño del receptor proporciona una ganancia máxima de energía útil, reduciéndose al máximo las pérdidas ópticas y aumentando las pérdidas térmicas, mientras que, para un receptor pequeño, implica pérdidas térmicas bajas y pérdidas ópticas altas. En consecuencia, un dimensionado adecuado del receptor implica el tener que compaginar ambos tipos de pérdidas de energía.

La eficiencia óptica del colector se define como,  $\eta = \rho * F\phi * (\tau * \alpha)$ .

#### 5.4 FACTOR DE INTERCEPTACION.

El factor de interceptación  $F\phi$  viene dado por:

$$F\phi = 1 - e^{-\left(\frac{hr}{R}\right)^2} \quad (32)$$

que expresa una relación entre el factor de interceptación  $F\phi$  y la relación entre los radios  $r/R$ , permitiendo un cálculo fácil de  $F\phi$  para sistemas de concentración con simetría axial.

#### 5.5 ENERGÍA ÚTIL SOBRE EL RECEPTOR; PÉRDIDAS TÉRMICAS.

Vamos a considerar un concentrador cilíndrico parabólico (CCP); un balance energético del mismo, en la posición  $x$  permitirá determinar la ganancia útil  $q_u$  del colector por unidad de superficie de abertura según se muestra en la Figura 30:

$$q_u = I_s \rho F\phi (\tau \alpha) - U_C (T_{r,x} - T_a) \frac{A_r}{A_a} \quad (33)$$

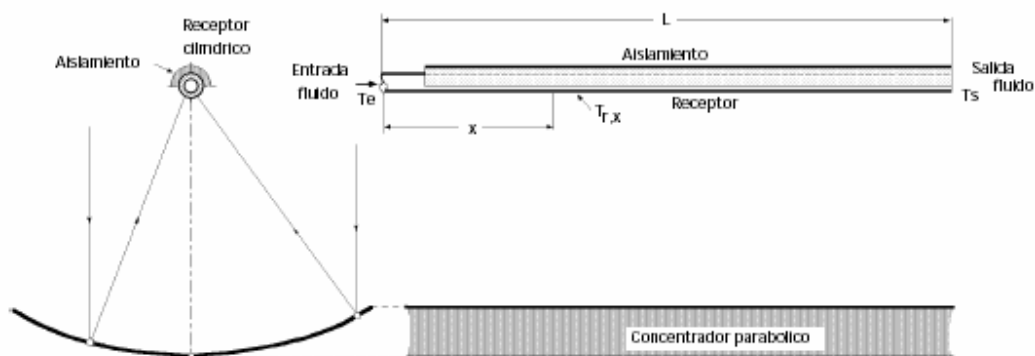
y si todo el receptor está a una temperatura uniforme  $T_r$  la ganancia útil total será:

$$Q_U = q_U A_a = A_a I_s \rho F \phi (\tau \alpha) - U_C A_r (T_r - T_a) \quad (34)$$

Siendo:

- $A_a$  la superficie de abertura del colector, sin sombras
- $A_r$  la superficie del receptor.
- $\phi = A_a/A_r$ , el factor de concentración que permite obtener flujos de energía comparables a los de cualquier intercambiador industrial convencional.
- $\rho$  es la reflectancia especular de la superficie reflectora
- $F\phi$  es la fracción de energía reflejada que es interceptada por el receptor y que constituye el factor de interceptación.
- $I_s$  es la radiación solar directa normal al plano de abertura del concentrador.
- $U_c (T_r - T_a)$ , son las pérdidas térmicas por unidad de superficie del receptor hacia el exterior;  $T_r$  es la temperatura media del receptor y  $T_a$  es la temperatura del medio exterior. Estas pérdidas se reducen al aumentar el factor de concentración,  $\phi = A_a/A_r$

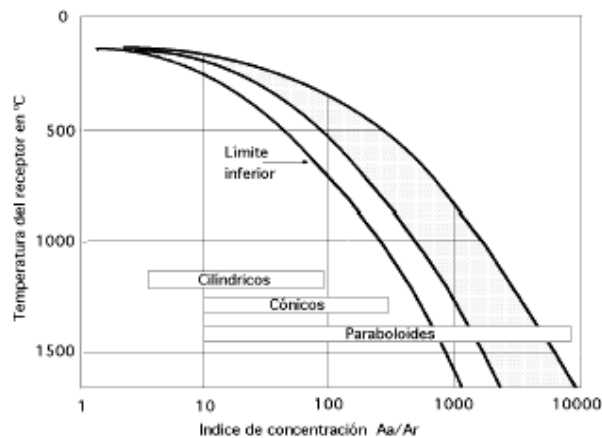
**Figura 30.** Balance energético en un colector cilíndrico-parabólico.



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos Termosolares En Baja, Media Y Alta Temperatura* Universidad de Cantabria.

En la Figura 31, la curva de **límite inferior** representa los niveles de concentración en los que las pérdidas térmicas son iguales a la energía absorbida, mientras que los niveles superiores dan una ganancia útil.

**Figura 31.** Relaciones entre el nivel de concentración y temperaturas de funcionamiento del receptor.



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos Termosolares En Baja, Media Y Alta Temperatura* Universidad de Cantabria.

La zona rayada se corresponde con eficiencias del colector del orden del 40% al 60% y representa el campo de funcionamiento normal; también se indica el campo en el que se pueden utilizar determinados tipos de reflectores. Cuanto menor sea la superficie del receptor, las pérdidas térmicas serán también menores; si ésta superficie receptora fuese puntual, las pérdidas térmicas serían cero; de esto se deduce que la ganancia de energía útil y las curvas de eficiencia se acercan a medida que se reducen las pérdidas térmicas.

## 5.6 RENDIMIENTO TÉRMICO DE UN COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO.

Como se dijo anteriormente, analizaremos los efectos en el rendimiento térmico del colector, el trabajo de éste sin cubierta de vidrio y con cubierta de vidrio, luego de realizar este análisis con sus respectivos cálculos se procederá a definir cual

mecanismo usar, teniendo en cuenta la relación costo/beneficio que ambas alternativas nos pueden brindar.

**5.6.1 Desarrollo térmico del Concentrador parabólico sin cubierta:** Vamos a considerar un concentrador cilíndrico parabólico y un receptor circular sin cubierta,  $\tau = 1$ , alrededor del cual no existen gradientes de temperatura.

El coeficiente de transmisión de calor entre el tubo a  $T_r$  y el fluido a  $T_f$  que circula por su interior es  $h_{cF}$  y el coeficiente global de pérdidas al exterior  $U_c$ , de la forma:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_{\text{viento}} + h_r} \quad (35)$$

siendo  $h_r$  el coeficiente de radiación, igual a:

$$h_r = 4\sigma\varepsilon_r \hat{T}^3 \quad (36)$$

$\varepsilon_r$  la emitancia del receptor y  $\hat{T}$  la temperatura media para la radiación; el coeficiente de pérdida por convección debido al viento,  $h_{\text{viento}}$ , es encontrado de:

$$h_{\text{viento}} = 5.7 + 3.8V \quad (37)$$

donde  $V$  es la velocidad promedio del viento .

Como el flujo de calor es elevado, hay que tener en cuenta el coeficiente de transferencia de calor por conducción  $k$ , desde la superficie exterior del tubo receptor, a la interior, por lo que el coeficiente global de transmisión de calor  $U$  basado en el diámetro exterior de del tubo, desde la superficie exterior al fluido, es:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_c} + \frac{d_e}{h_{CF} d_i} + \frac{d_e}{2k} \ln \frac{d_e}{d_i} \quad (38)$$

donde  $d_e$  y  $d_i$  son los diámetros exterior e interior del tubo receptor,  $h_{CF}$  es el coeficiente de transferencia de calor en el interior del tubo, y  $k$  es la conductividad térmica del tubo.

El factor de eficiencia del colector lo encontramos como

$$F' = \frac{U}{U_c} \quad (39)$$

La ganancia útil de energía del receptor, en función de  $T_r$  y  $T_a$ , es como se menciono anteriormente:

$$q_u = I_s \rho F_\phi (\tau\alpha) - U_c (T_r - T_a) \frac{A_r}{A_a}$$

El rendimiento térmico  $\eta$  se define de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_s A_a} = \frac{q_u}{I_s} \quad (40)$$

Si el receptor estuviese recubierto, habría que tener en cuenta el producto transmitancia-absortancia ( $\tau\alpha$ ) y evaluar de nuevo  $U_c$ , por cuanto aparecen resistencias adicionales de transmisión de calor.

Además del factor de eficiencia también se suele utilizar el factor de remoción ( $F_r$ ) para expresar la eficiencia instantánea del colector en función de la diferencia entre la temperatura de entrada del fluido y la temperatura ambiente. Sin embargo, este factor se utiliza cuando el colector se maneja en flujo continuo y es función

del caudal que se maneje. Nuestro colector no trabajará con flujo continuo pues este estará interrumpido por el sistema de control térmico, razón por la cual este parametro no es aplicable en la evaluación de su eficiencia.

### 5.6.2 Desarrollo térmico del Concentrador parabólico con cubierta:

Consideramos el caso anterior, trabajándolo con una cubierta concéntrica en el tubo receptor. Debido a que la velocidad del aire atrapado entre la cubierta y la capa de distancia con respecto al tubo receptor tiende a cero y si suponemos que la diferencia entre la temperatura de la cubierta y el receptor es menor que el valor critico requerido para que el fluido se vuelva inestable, entonces el calor se transfiere a través de la capa solo por conducción.

Lo primero es determinar la transmitancia de la cubierta de vidrio, esta se halla de la siguiente ecuación:

$$\tau = e^{-kL} \left( \frac{1-r}{1+r} \right) \quad (41)$$

Donde:

- L es el espesor de la cubierta (L)
- K es el coeficiente de extinción del material ( $L^{-1}$ )
- r es la reflectancia del material (adimensional)

Para conocer el valor de la reflectancia r, es posible calcularla con base en el índice de refracción, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$r = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (42)$$

Por consiguiente se muestra que la transmitancia en este caso no será la unidad (como en el caso de trabajar sin cubierta).

El coeficiente global de pérdidas, ahora tendrá dos términos mas, uno es por conducción de la cubierta (vidrio), otro por la conducción del aire atrapado entre la cubierta y el tubo receptor, y con la radiación entre las placas (cubierta y tubo receptor), esto se debe ver en las diferencias de temperaturas entre estas que no son pequeñas; por lo que el coeficiente global de pérdidas al exterior  $U_c$ , es de la forma:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_{\text{viento}} + h_r} + \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_a + h_{ra}} \quad (43)$$

donde:

- $R_v$  es el coeficiente de transferencia por conducción de la cubierta.
- $R_a$  es el coeficiente de transferencia por conducción del aire atrapado.
- $h_{ra}$  es el coeficiente de transferencia por radiación entre cubierta y tubo receptor

$$R_v = \frac{2k_v}{D_{ev} \ln\left(\frac{D_{ev}}{D_{iv}}\right)} \quad (44)$$

siendo:

- $k_v$  La conductancia del material de la cubierta (Vidrio).
- $L_v = D_{ev} \ln\left(\frac{D_{ev}}{D_{iv}}\right)$  espesor de la cubierta cilíndrica.

$$R_a = \frac{2k_a}{D_{iv} \ln\left(\frac{D_{iv}}{D_e}\right)} \quad (45)$$

siendo:

- $k_a$  La conductancia del material de la cubierta (Vidrio).
- $L_a = D_{iv} \ln\left(\frac{D_{iv}}{D_e}\right)$  espesor del anillo cilíndrico entre el interior de la cubierta y la superficie externa del tubo receptor.

$$h_{ra} = 4\sigma\varepsilon_c \hat{T}_2^3 \quad (46)$$

- $\varepsilon_c$  es la emitancia de la cubierta.
- $\hat{T}_2$  es la temperatura promedio entre la cubierta y la superficie externa del tubo receptor.

El coeficiente global de transmisión de calor es el mismo descrito para un colector de este tipo sin cubiertas, como en la ecuación 38:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_c} + \frac{de}{h_{CF}di} + \frac{de}{2k} \ln \frac{de}{di}$$

Por lo que el factor de eficiencia se describe de la misma manera (ecuación 39):

$$F' = \frac{U}{U_c}$$

La ganancia útil de energía del receptor, en función de  $T_r$  y  $T_a$ , es como se menciono anteriormente:

$$q_u = I_s \rho F_\phi (\tau\alpha) - U_c (T_r - T_a) \frac{A_r}{A_a}$$

El rendimiento térmico  $\eta$  se define de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_s A_a} = \frac{q_u}{I_s} \quad (47)$$

## 6. ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR REGIONAL.

El siguiente es la evaluación del potencial energético solar disponible en las dos regiones de nuestro interés: la región del Magdalena Medio (sitio propuesto para la ejecución del proyecto), a partir de la información de radiación solar de Barrancabermeja, teniendo en cuenta que los datos de radiación, no varían considerablemente de una subregión a otra, si estas están comprendidas dentro de una región con las mismas características climáticas y de relieve; y la ciudad de Bucaramanga (sitio donde se realizan las pruebas térmicas para la evaluación operacional del colector).

La información aquí suministrada fue registrada por el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales de la UIS (CEIAM), a través de las estaciones de monitoreo ambiental con que cuenta el centro de investigaciones en la ciudad de Barrancabermeja, y por la Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB), a través de las estaciones de monitores ambiental con las que cuenta la corporación en Bucaramanga, específicamente la estación del centro de la ciudad. La radiación reportada es la radiación total (Directa más difusa).

La información que se analizó para la región del Magdalena Medio corresponde a los años 1997, 1999 y 2000 y fue obtenida por CASTILLO y BARRIOS (2002) en el proyecto de grado “ **Desarrollo de un sistema prototipo para potabilización de agua mediante energía solar en comunidades rurales del Magdalena Medio** ” . Por razones de tipo operacional la información no es la misma para todos los años; así por ejemplo, para el año 1997 se analizó información de 5 meses de registro, para el año 1999, diez meses de registro y para el año 2000,

ocho meses de registro. Todos estos son registros diarios de la radiación que incide sobre la ciudad.

La información que se analizó para la ciudad de Bucaramanga corresponde a los años 2001, 2002 y 2003. Lo mismo que en la información del Magdalena Medio, la información no es la misma en todos los años; así por ejemplo, para el año 2001 se analizó información para seis meses de registro, para el año 2002 cinco meses de registro y para el año 2003, tres meses de registro. Estos son registros diarios de la radiación que incide sobre la ciudad, específicamente sobre la estación del centro.

La información diaria se llevó a promedios mensuales, a los cuales se les evaluó las horas de radiación registrable (HRR); es decir aquella radiación que supera la unidad ( $1 \text{ W/m}^2$ ), se evaluaron las horas de radiación efectiva (HRE) que es aquella radiación que supera los  $100 \text{ W/m}^2$  (este rango de radiación lo hemos denominado *rango de radiación efectiva RRE*). En este caso se registra la hora en que la radiación alcanza ese valor o lo ha superado; esto significa que si bien a las 8 am la radiación aun no ha alcanzado dicho valor a las 9 am ya lo ha podido superar y en este caso se registra esta ultima hora como aquella en que se inicia la radiación efectiva aunque se haya iniciado en un momento ubicado entre las 8 y las 9 am. Se registra además el pico máximo alcanzado durante el mes y el pico promedio.

Se llevan los registros a promedios anuales haciendo la comparación de los valores más relevantes para cada año y se calcula el potencial energético en KW-h recibido cada año en la ciudad calculando el área bajo la curva media anual de radiación.

Esta información es trascendental desde el punto de vista operacional para cualquier sistema de aprovechamiento de la energía solar que se desee

implementar en cualquier región pues asegura el normal funcionamiento de los mismos

## 6.1 ANALISIS MENSUAL DE LA RADIACIÓN EN BARRANCABERMEJA.

**6.1.1 Registros Mensuales año 1997:** Estos registros mensuales se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 10. Registros mensuales año 1997 en la ciudad de Barrancabermeja.*

Mes	HRR	HRE	Pico (W/m <sup>2</sup> )	Pico Promedio (W/m <sup>2</sup> )
Agosto	7 am-6 pm	10 am-5 pm	713	664
Septiembre	6 am-6 pm	8 am-5 pm	1023	647
Octubre	6 am-6 pm	8 am-5 pm	944	692
Noviembre	6 am-6 pm	8 am-5 pm	873	724
Diciembre	6 am-6 pm	8 am-5 pm	840	643

*Fuente: CASTILLO, Edgar y BARRIOS, Marlon.*

**6.1.2 Registros Mensuales año 1999:** Estos registros mensuales se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 11. Registros mensuales año 1999 en la ciudad de Barrancabermeja.*

Mes	HRR	HRE	RRE (W/m <sup>2</sup> )	Pico (W/m <sup>2</sup> )	Pico Promedio (W/m <sup>2</sup> )
Marzo	7am-7pm	9am-5pm	189-222	933	761
Abril	6am-6pm	9am-5pm	195-217	888	641
Mayo	6am-7pm	9am-5pm	161-202	855	690
Junio	6am-7pm	9am-5pm	143-239	835	617
Julio	6am-7pm	9am-5pm	150-244	807	655
Agosto	6am-7pm	9am-5pm	179-239	844	659
Septiembre	6am-6pm	9am-5pm	155-183	900	694
Octubre	6am-6pm	8am-5pm	113-153	644	665
Noviembre	6am-6pm	8am-5pm	117-113	906	597
Diciembre	7am-6pm	8am-5pm	119-165	895	583

*Fuente: CASTILLO, Edgar y BARRIOS, Marlon.*

**6.1.3 Registros mensuales año 2000:** Estos registros mensuales se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 12. Registros mensuales año 2000 en la ciudad de Barrancabermeja.*

Mes	HRR	HRE	RRE (W/m <sup>2</sup> )	Pico (W/m <sup>2</sup> )	Pico Promedio (W/m <sup>2</sup> )
Enero	7am-6pm	8am-5pm	100-231	855	693
Febrero	7am-6pm	9am-5pm	221-250	895	710
Marzo	7am-6pm	9am-5pm	194-225	929	705
Abril	6am-6pm	9am-5pm	195-190	890	652
Mayo	6am-6pm	9am-5pm	179-114	833	599
Junio	6am-6pm	9am-5pm	101-177	837	546
Julio	6am-7pm	9am-5pm	165-240	869	707
Agosto	6am-7pm	9am-5pm	170-174	757	536

*Fuente: CASTILLO, Edgar y BARRIOS, Marlon.*

## 6.2 ANALISIS ANUAL DE LA RADIACIÓN EN BARRANCABERMEJA.

Con la información disponible se realizó un promedio anual a partir de los registros diarios. Estos promedios son un índice aproximado del comportamiento de la radiación durante el año en cuestión. Los resultados fueron los siguientes.

**6.2.1 Día solar promedio año 1997:** Con la información de estos cinco meses, se hizo la aproximación al día solar promedio del año 1997. La información diaria se promedió toda de manera uniforme; es decir, que el promedio obtenido es con base en la información diaria de los cinco meses. Podemos observar que el pico promedio alcanzado fue de 659 W/m<sup>2</sup>. Durante el año el pico máximo alcanzado fue de 1023 (W/m<sup>2</sup>) a la 1 pm. El rango promedio de radiación efectiva estuvo entre las 8 am y las 5 pm con valores de 115 y 168 (W/m<sup>2</sup>) respectivamente; lo que significa que en promedio hubo durante el día 9 horas efectivas o aprovechables de sol.

**6.2.2 Día solar promedio año 1999:** En este año se registraron en promedio de nueve horas efectivas de radiación entre las 8 am y las 5 pm, con valores que se encuentran entre los 100 y los 197 W/m<sup>2</sup>. El valor máximo alcanzado durante el año fue de 944 W/m<sup>2</sup> y el pico promedio alcanzado fue de 641 W/m<sup>2</sup>. Las horas promedio de radiación registrable fueron 13; desde las 6 am y hasta las 7 pm se dieron en promedio valores registrables de radiación.

**6.2.3 Día solar promedio año 2000:** En este año se presentaron en promedio doce horas de radiación registrable, desde las 6 am hasta las 6 pm. El pico máximo alcanzado durante el año fue de 929 W/m<sup>2</sup>, y el pico promedio fue de 657 W/m<sup>2</sup> como lo muestra la gráfica. Se lograron en promedio ocho horas efectivas de radiación desde las 9 am hasta las 5 pm, con valores que van desde los 193 hasta los 212 W/m<sup>2</sup>.

La siguiente tabla nos muestra los datos del día solar promedio en cada uno de los tres años:

**Tabla 13.** Día solar promedio en Barrancabermeja en los años 1997, 1999, 2000.

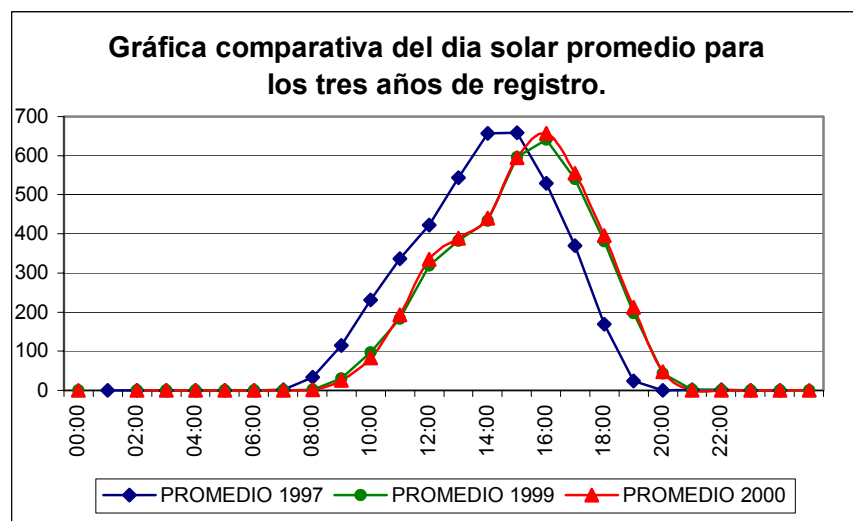
Hora	1997 (W/m <sup>2</sup> )	1999 (W/m <sup>2</sup> )	2000 (W/m <sup>2</sup> )
7am	33	30	25
8am	115	98	83
9am	231	184	193
10am	337	319	334
11am	423	383	389
12 m	544	434	439
1pm	657	597	595
2pm	659	641	657
3pm	529	541	555
4pm	370	382	395
5pm	169	198	242
6pm	24	42	48

**Fuente:** CASTILLO, Edgar y BARRIOS, Marlon.

### 6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS REGISTROS EN BARRANCABERMEJA.

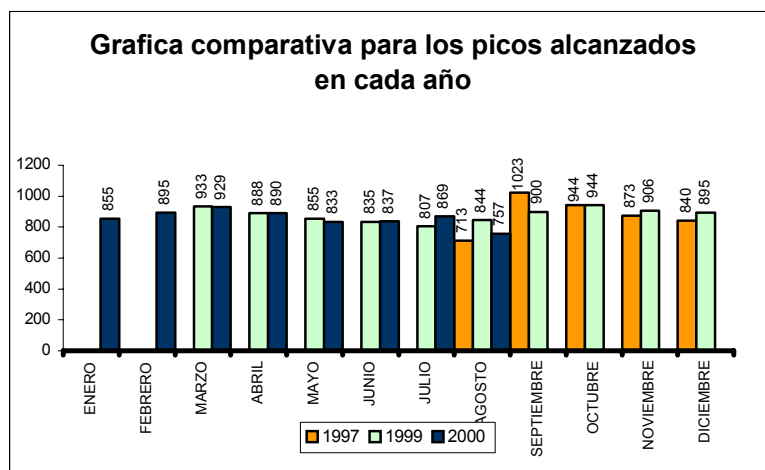
La Figura 32, nos muestra que el potencial energético en la región se mantiene constante para los tres años. En la Figura 33, se observa que los picos alcanzados en cada uno de los meses en los diferentes años sobrepasan todos los 700 ( $W/m^2$ ) y que el pico más alto alcanzado en los diferentes meses para los tres años es de 1023 ( $W/m^2$ ).

*Figura 32. Gráfica comparativa del día solar promedio para cada año.*



*Fuente: CASTILLO, Edgar y BARRIOS, Marlon.*

**Figura 33.** Gráfica comparativa de los picos de radiación alcanzados por año .



**Fuente:** CASTILLO, Edgar y BARRIOS, Marlon.

Los picos promedios como se puede observar en la Figura 34 sobrepasan todos los 500 ( $W/m^2$ ) lo que significa que inclusive durante las épocas lluviosas del año (mayo-junio) conservamos un buen promedio de radiación. Este será precisamente nuestra radiación disponible para efectos de diseño, teniendo en cuenta que los fabricantes recomiendan trabajar con la radiación disponible en el peor de los meses en la evaluación de lo que se conoce como periodo más desfavorable\*. Además se puede observar que aunque en septiembre de 1997 se presentó el pico más alto alcanzado en los meses de los diferentes años, su promedio es más bajo que en el mismo mes para el año 1999; por lo tanto el hecho de que alcancemos valores altos de radiación, no significa que obtendremos también valores medios altos.

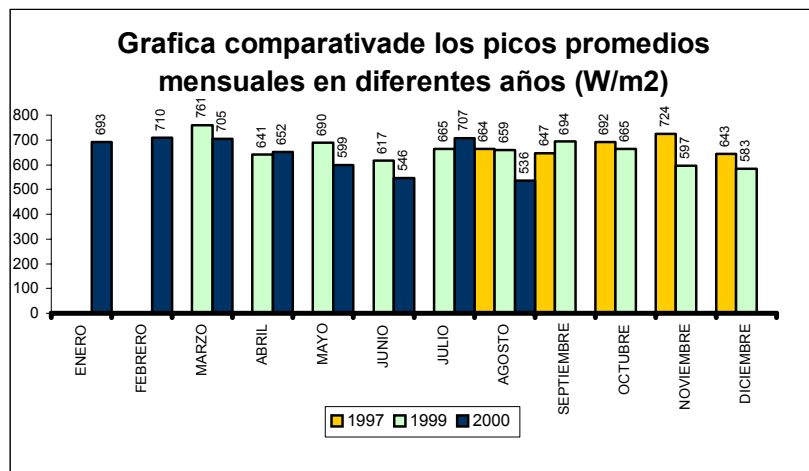
El área bajo la curva que indica la radiación anual disponible en la región por metro cuadrado se calcula realizando una regresión de los datos para obtener una

\* Curso programado de energía solar (CENSOLAR). Pagina 6 (5.2.1)

línea de tendencia y calculando el área bajo la curva para cada año. Para el año 1999 por ejemplo la línea de tendencia responde a la siguiente función (Ecuación 48).

$$f(x) = -0,0006x^6 + 0,0566x^5 - 1,83x^4 + 26,911x^3 - 177,77x^2 + 476,5x - 370,92 \quad (48)$$

**Figura34.** Gráfica comparativa de los picos promedio para cada año.



**Fuente:** CASTILLO, Edgar y BARRIOS, Marlon.

Integrando desde la ocho hasta las dieciocho horas esta función polinómica, obtenemos el área bajo la curva. El resultado es el siguiente (Ecuación 49):

$$\int_8^{18} f(x) = 7974.7 - (-158.68) = 8133 \frac{W \cdot h}{m^2} = 8.1 \frac{kW \cdot h}{m^2} \quad (49)$$

De la misma forma se realizó el procedimiento para el año 1997 y 2000 con los siguientes resultados para cada año.

- Año 1997 (5 meses de registro): 7.9 (kW-h)/m<sup>2</sup>
- Año 1999 (10 meses de registro): 8.0 (kW-h)/m<sup>2</sup>
- Año 2000 (8 meses de registro): 8.1 (kW-h)/m<sup>2</sup>

Realizando un promedio ponderado teniendo en cuenta que unos años tienen mayor número de registros que otros, obtenemos la radiación media de los tres años (Ecuación 50):

$$7.9*(0.2174) + 8.0*(0.4348) + 8.1*(0.3478) = 8.0 \text{ kW-h/m}^2 \quad (50)$$

Finalmente podemos decir que en promedio Barrancabermeja registra en promedio  $8.0 \text{ kW-h/m}^2$  de radiación media anual. Hay que tener en cuenta que esta información está registrada en casi la totalidad del año como es el caso de los años 1999 y 2000; por lo tanto las lluvias también han tenido influencia en estos valores.

En conclusión la radiación solar disponible en Barrancabermeja por año se considera muy buena; e incluso los meses más desfavorables presentan valores óptimos de radiación.

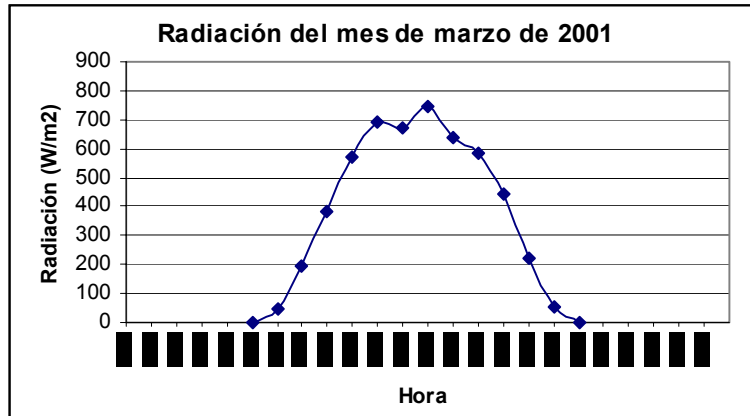
## **6.4 ANALISIS MENSUAL DE LA RADIACIÓN EN BUCARAMANGA.**

### **6.4.1 Registros Mensuales año 2001:**

#### Marzo:

Se presentaron aproximadamente 12 horas radiación registrable (Por encima de  $1 \text{ W/m}^2$ ), empezando desde valores muy bajos hasta valores de  $742 \text{ W/m}^2$ . En realidad aunque la radiación empezó a registrarse a las 6:00 am, solo se alcanzaron valores efectivos de radiación a eso de las 7:00 am y hasta las 4:00 pm a las 6 pm cayó por debajo de la unidad como lo muestra la gráfica:

**Figura 35. Radiación Promedio Marzo de 2001.**

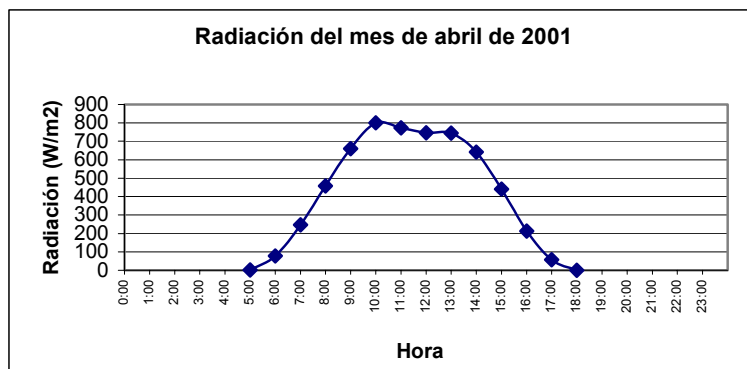


**Fuente:** Autores.

**Abril:**

Horas promedio de radiación: 13 horas, rango registro radiación: 5 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 245 – 213 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1229 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 744 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 36. Radiación Promedio Abril de 2001.**

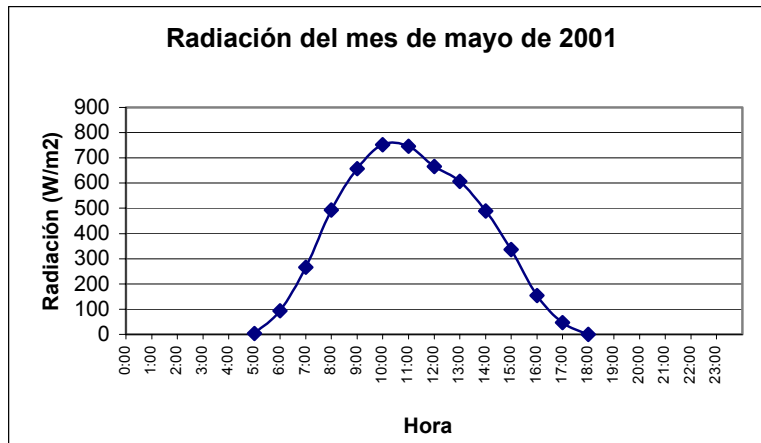


**Fuente:** Autores.

Mayo:

Horas promedio de radiación: 13 horas, rango registro radiación: 5 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 266 – 153 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1070 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 752 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 37.** Radiación Promedio Mayo de 2001.

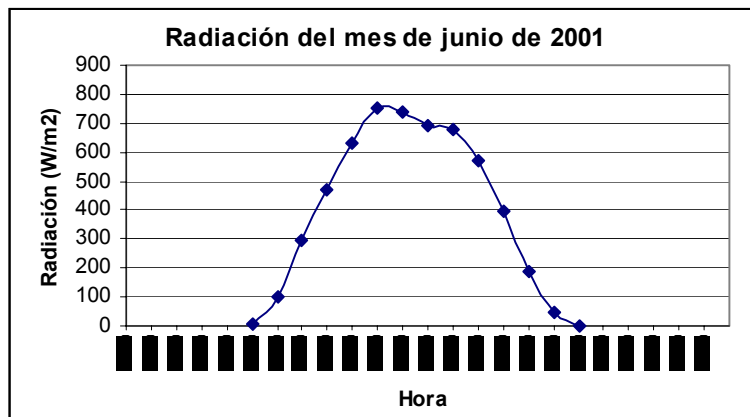


**Fuente:** Autores.

Junio:

Horas promedio de radiación: 13 horas, rango registro radiación: 5 am a 6 pm, HRE: 6 am – 5 pm, RRE: 103 – 185 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1099 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 754 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 38.** Radiación Promedio Junio de 2001

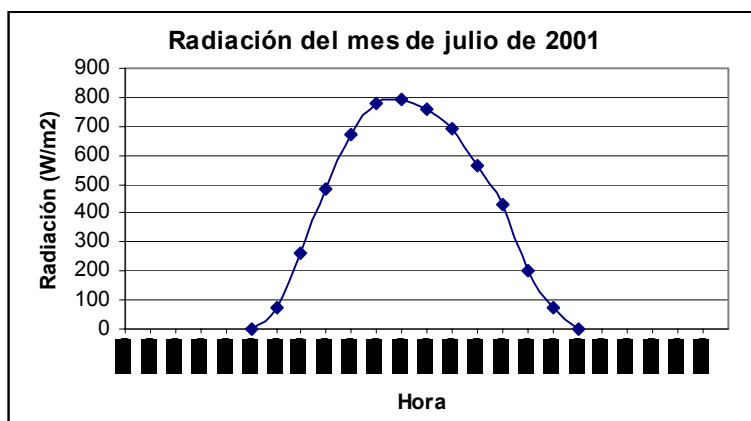


**Fuente:** Autores.

Julio:

Horas promedio de radiación: 14 horas, rango registro radiación: 5 am a 7 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 262 – 200 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1119 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 792 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 39.** Radiación Promedio Julio de 2001.

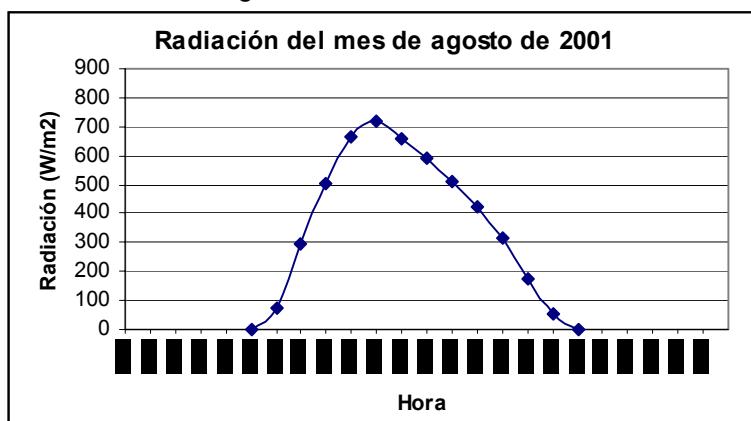


**Fuente:** Autores.

Agosto:

Horas promedio de radiación: 13 horas, rango registro radiación: 5 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 294 – 171 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1075 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 792 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 40.** Radiación Promedio Agosto de 2001.



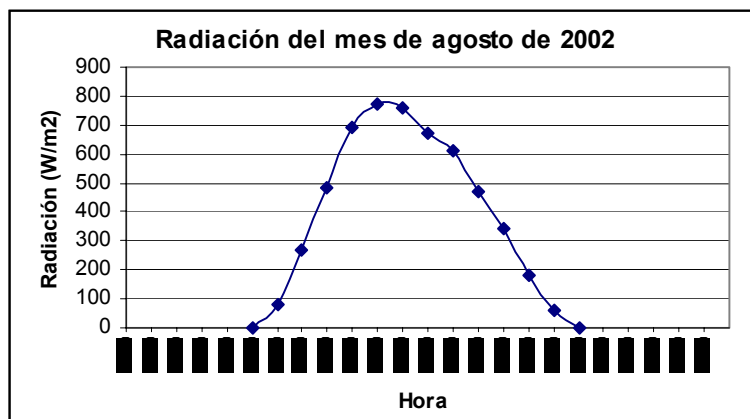
**Fuente:** Autores.

## 6.4.2 Registros Mensuales año 2002:

### Agosto:

Horas promedio de radiación: 13 horas, rango registro radiación: 5 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 271 – 183 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1109 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 772 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 41.** Radiación Promedio Agosto 2002.

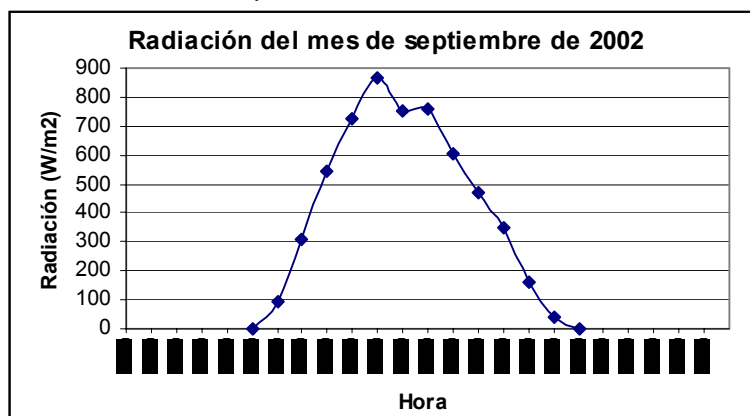


**Fuente:** Autores.

### Septiembre:

Horas promedio de radiación: 13 horas, rango registro radiación: 5 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 309 – 163 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1076 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 869 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 42.** Radiación Promedio Septiembre de 2002.

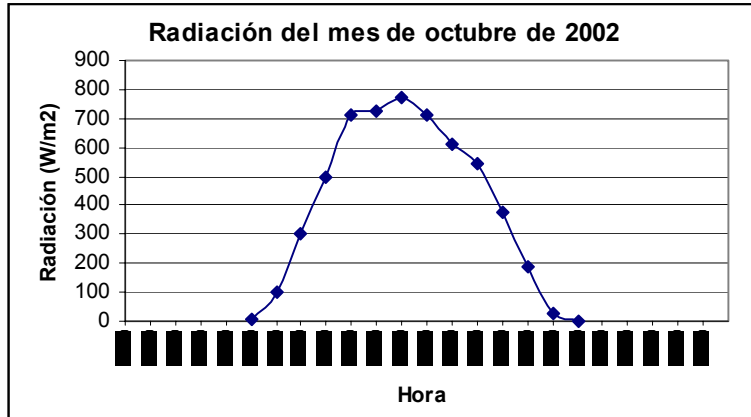


**Fuente:** Autores.

Octubre:

Horas promedio de radiación: 13 horas, rango registro radiación: 5 am a 6 pm, HRE: 6 am – 5 pm, RRE: 103 – 185 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1153 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 770 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 43.** Radiación Promedio Octubre de 2002.



**Fuente:** Autores.

Noviembre:

Horas promedio de radiación: 13 horas, rango registro radiación: 5 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 302 – 149 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1130 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 793 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 44.** Radiación Promedio Noviembre de 2002.

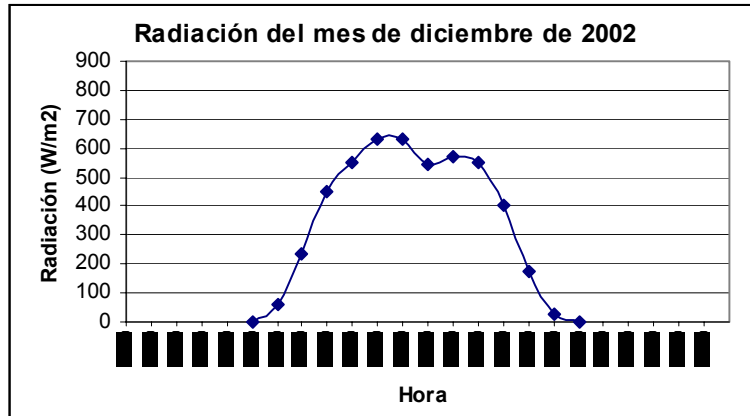


**Fuente:** Autores.

Diciembre:

Horas promedio de radiación: 12 horas, rango registro radiación: 6 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 231 – 177 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 913 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 630 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 45.** Radiación Promedio Diciembre de 2002.



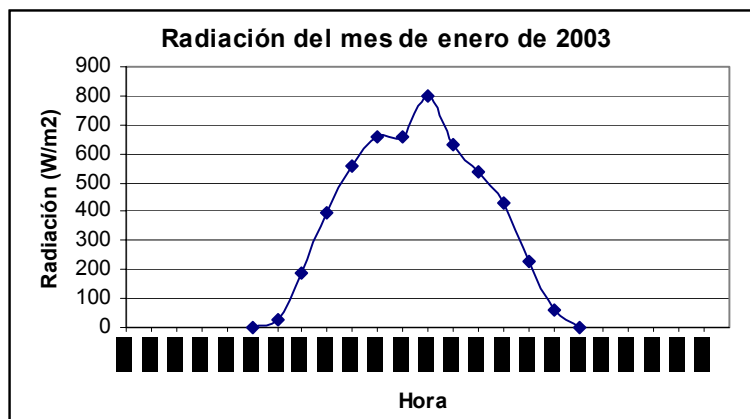
**Fuente:** Autores.

**6.4.3 Registros Mensuales año 2003:**

Enero:

Horas promedio de radiación: 12 horas, rango registro radiación: 6 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 185 – 229 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1026 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 796 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 46.** Radiación Promedio Enero de 2003.

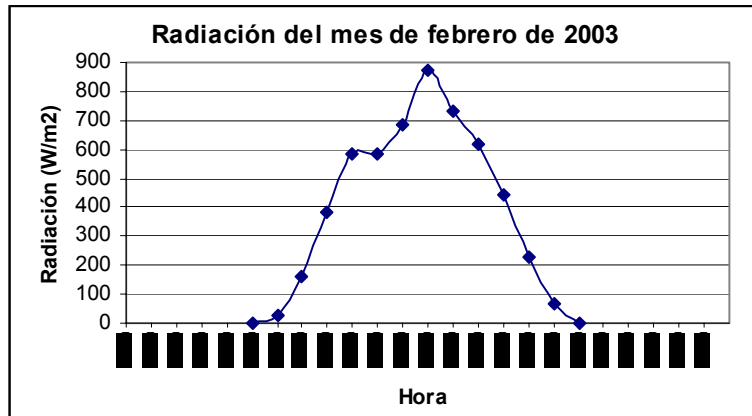


**Fuente:** Autores.

Febrero:

Horas promedio de radiación: 12 horas, rango registro radiación: 6 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 160 – 228 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1119 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 874 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 47.** Radiación Promedio Febrero de 2003.

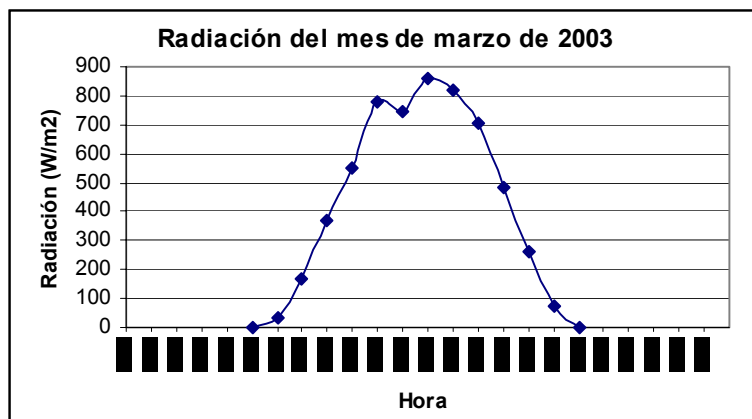


**Fuente:** Autores.

Marzo:

Horas promedio de radiación: 12 horas, rango registro radiación: 6 am a 6 pm, HRE: 7 am – 5 pm, RRE: 168 – 261 W/m<sup>2</sup>, pico alcanzado: 1100 W/m<sup>2</sup>, pico promedio: 862 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 48.** Radiación Promedio Marzo de 2003.



**Fuente:** Autores.

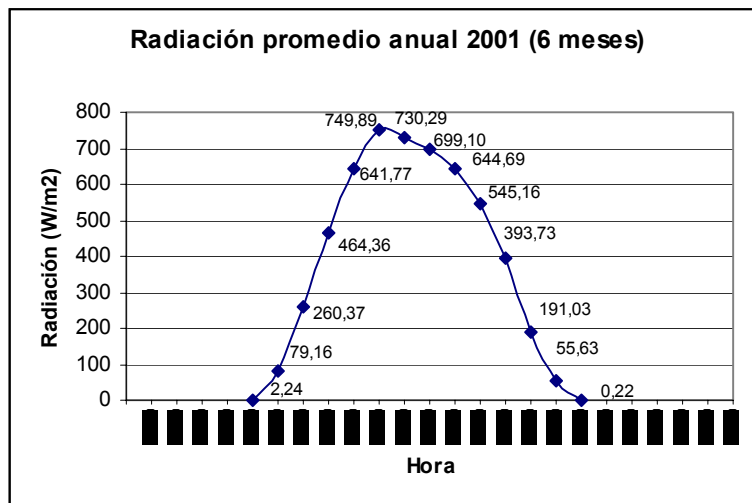
## 6.5 ANALISIS ANUAL DE LA RADIACIÓN EN BUCARAMANGA.

Con la información disponible se realizó un promedio anual a partir de los registros diarios. Estos promedios son un índice aproximado del comportamiento de la radiación durante el año en cuestión. Los resultados fueron los siguientes.

**6.5.1 Día solar promedio año 2001:** Con la información de estos seis meses, se hizo la aproximación al día solar promedio del año 2001, ver figura 49.

En este año se registraron en promedio de diez horas efectivas de radiación entre las 7 am y las 5 pm, con valores que se encuentran en un RRE de 260 y 191  $W/m^2$ . El valor máximo alcanzado durante el año fue de 1229  $W/m^2$  y el pico promedio alcanzado como lo muestra la figura fue de 749.89  $W/m^2$ . Las horas promedio de radiación registrable fueron 13; desde las 5 am y hasta las 6 pm se dieron en promedio valores registrables de radiación.

**Figura 49.** Día solar promedio año 2001.

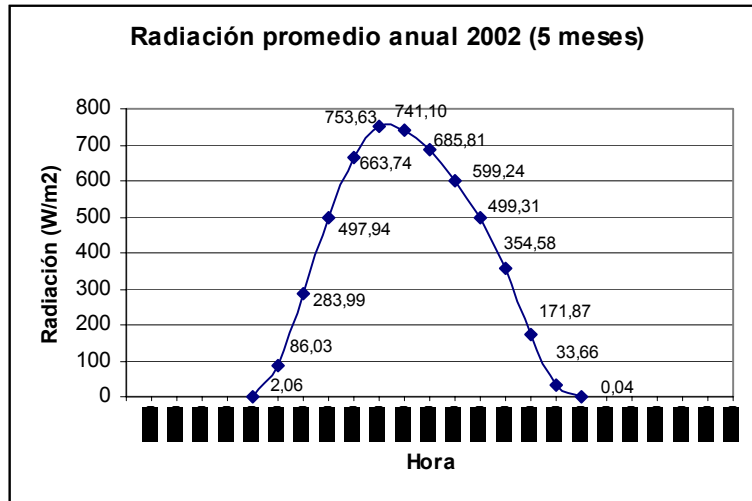


**Fuente:** Autores.

**6.5.2 Día solar promedio año 2002:** Este año presentó en promedio trece horas de radiación registrable, desde las 5 am hasta las 6 pm. El pico máximo alcanzado durante el año fue de 1153  $W/m^2$ , y el pico promedio fue de 741.1  $W/m^2$  como lo

muestra la figura 68. Se lograron en promedio diez horas efectivas de radiación desde las 7 am hasta las 5 pm, con valores en un RRE de 283.99 y 171.87 W/m<sup>2</sup>.

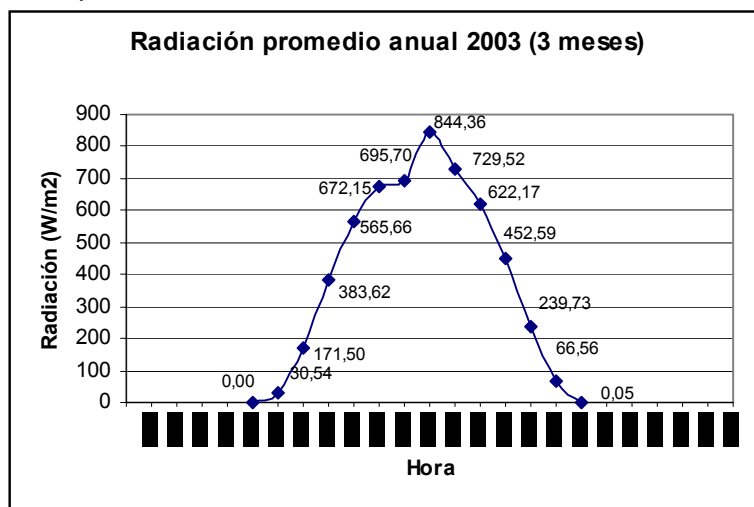
**Figura 50.** Día solar promedio año 2002.



**Fuente:** Autores.

**6.5.3 Día solar promedio año 2003:** En este año se presentaron en promedio doce horas de radiación registrable, desde las 6 am hasta las 6 pm. El pico máximo alcanzado durante el año fue de 1119 W/m<sup>2</sup>, y el pico promedio fue de 844.36 W/m<sup>2</sup> como lo muestra la figura. Se lograron en promedio diez horas efectivas de radiación desde las 7 am hasta las 5 pm, con valores que se encuentran en un RRE de 171.5 y 239.73 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 51.** Día solar promedio año 2003.



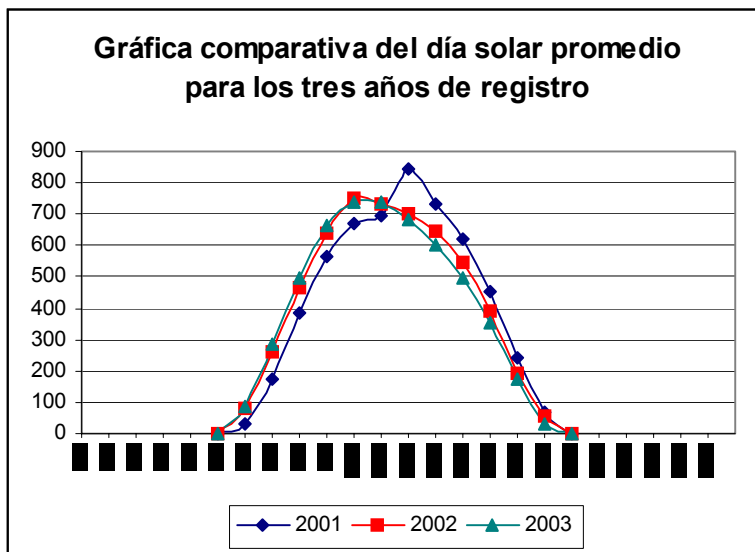
**Fuente:** Autores.

### 6.6 ANALISIS COMPARATIVO DE LOS REGISTROS EN BUCARAMANGA.

La Figura 52, nos muestra que el potencial energético en Bucaramanga mantiene una tendencia muy parecida para los tres años aquí estudiados. En la Figura 53, se puede observar que los picos alcanzados en cada uno de los meses en los diferentes años sobrepasan todos los 900 (W/m<sup>2</sup>) y que el pico más alto alcanzado en los diferentes meses para los tres años es de 1229 (W/m<sup>2</sup>).

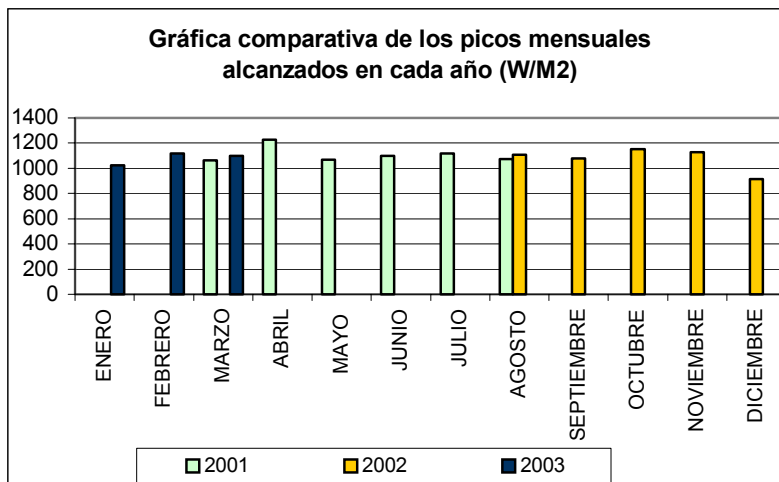
Los picos promedios como se puede observar en la Figura 54 sobrepasan todos los 600 (W/m<sup>2</sup>) lo que significa que inclusive durante las épocas lluviosas del año conservamos un buen promedio de radiación. Este será precisamente nuestra radiación disponible para efectos de diseño, teniendo en cuenta que los fabricantes recomiendan trabajar con la radiación disponible en el peor de los meses en la evaluación de lo que se conoce como periodo más desfavorable, como se dijo anteriormente.

**Figura 52.** Grafica comparativa del día solar promedio para cada año de registro.



**Fuente:** Autores.

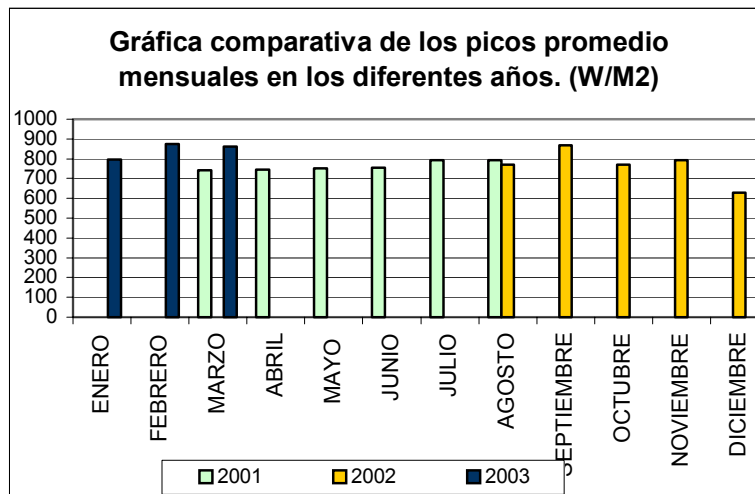
**Figura 53.** Grafica comparativa de los picos de radiación alcanzados.



**Fuente:** Autores.

Como se puede observar, aunque en abril de 2001 se presentó el pico más alto alcanzado en los meses de los diferentes años, su promedio es más bajo que en otros meses para el mismo año. Lo anterior significa que el hecho de que alcancemos valores altos de radiación, no significa que obtendremos también valores medios altos.

**Figura 54.** Grafica comparativa de los picos promedio mensuales de radiación.



**Fuente:** Autores.

El área bajo la curva que indica la radiación anual disponible en la región por metro cuadrado se calcula realizando una regresión de los datos para obtener una línea de tendencia y calculando el área bajo la curva para cada año. Para el año 2001 por ejemplo la línea de tendencia responde a la siguiente función (Ecuación 51):

$$f(x) = 0.0099x^6 - 0.7019x^5 + 20.439x^4 - 311.42x^3 + 2582.2x^2 - 10763x + 17457 \quad (51)$$

Integrando desde la siete hasta las diecisiete horas esta función polinómica, obtenemos el área bajo la curva. El resultado es el siguiente (Ecuación 52):

$$\int_7^{17} f(x) = 5593.6 \frac{W.h}{m^2} = 5.59 \frac{kW.h}{m^2} \quad (52)$$

De la misma forma se realizó el procedimiento para el año 2002 y 2003 con los siguientes resultados para cada año.

Año 2001 (6 meses de registro): 5.59 (kW-h)/m<sup>2</sup>

Año 2002 (5 meses de registro): 4.25 (kW-h)/m<sup>2</sup>

Año 2003 (3 meses de registro): 6.92 (kW-h)/m<sup>2</sup>

Realizando un promedio ponderado teniendo en cuenta que unos años tienen mayor número de registros que otros, obtenemos la radiación media de los tres años (Ecuación 53):

$$5.59*(0.4286) + 4.25*(0.3571) + 6.92*(0.2143) = 5.4 \text{ kW-h/m}^2 \quad (53)$$

Finalmente podemos decir que Bucaramanga registra en promedio 5.4 *kW-h/m<sup>2</sup>* de radiación media anual. Hay que tener en cuenta que esta información está registrada en casi la totalidad del año; por lo tanto las lluvias también han tenido influencia en estos valores.

Como vemos, la radiación media anual en Bucaramanga es el 67.5% de la radiación media anual registrada en Barrancabermeja, a pesar de que los picos promedio en Bucaramanga son más altos, esto concuerda con la afirmación de que el hecho de que alcancemos valores altos de radiación, no significa que obtendremos también valores medios altos.

También es importante recalcar que aunque en los dos sitios de estudio, el número de horas de radiación efectiva al día es de 10, el rango no es el mismo, pues para Bucaramanga es de 7am a 5 pm y para Barrancabermeja es de 8 am a 6 pm.

En conclusión la radiación solar disponible en Bucaramanga por año se considera como buena, sin llegar al nivel de Barrancabermeja, sitio que se presenta como una mejor opción para el trabajo del colector.

## 7. ANÁLISIS DEL PERFIL DE TEMPERATURAS DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA.

Este capítulo tiene como fin, el determinar el perfil de temperaturas real del colector solar de placa plana, utilizado por CASTILLO y BARRIOS (2002), para detallar posibles problemas que éste presente, y así, dar un diagnóstico para en un futuro (en el momento de una posible aplicación), mejorar el sistema de colectores de este tipo.

### 7.1 DESCRIPCION DEL COLECTOR DE PLACA PLANA.

Figura 55. Vista frontal colector de placa plana.



**Fuente:** CASTILLO, Edgar y BARRIOS, Marlon.

Se utilizaron materiales con los que se trabajó previamente como el cobre y la lana de vidrio y otros nuevos como la fibra de vidrio en el armazón. Las características son las siguientes:

- Un colector con un 1 m<sup>2</sup> de área y 14 cm de profundidad.
- 25 metros de tubería de cobre de 3/8" en serpentín.
- Placa absorbora en lamina de aluminio de 0.5 mm de espesor para anclaje de la tubería.
- Doble cubierta de vidrio corriente (canto verde) de 4 mm de espesor.
- Aislante posterior de lana de vidrio de 6 cm. de espesor.
- Pintura color negro mate para recubrimiento de la placa absorbora.
- Separación de 6 cm entre la placa absorbora y la cubierta interior.
- Distancia de 2 cm entre las dos cubiertas.
- Armazón fabricado en fibra de vidrio\*.

## 7.2 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS PARA EL ANALISIS.

Para el análisis de este perfil, se dividió el colector en 121 puntos, 5 puntos en sentido horizontal (de la A a la E) y 30 puntos en sentido vertical, (ver mapa de puntos, Figura 56)

Se hicieron dos tipos de pruebas:

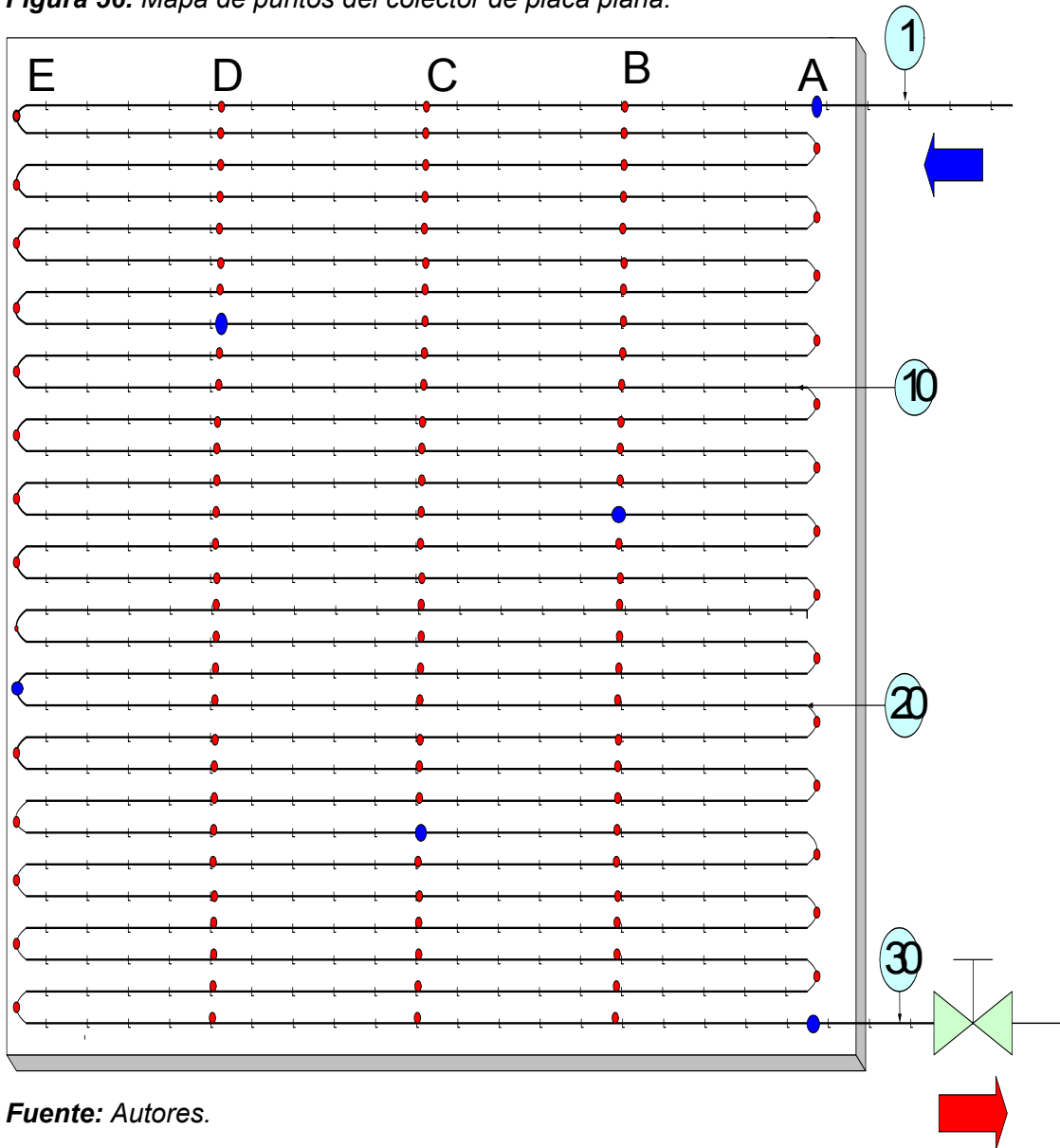
- **PARCIALES:** secciones específicas, en sentido horizontal (30 pruebas de 3 horas cada una), y en sentido vertical (24 pruebas de 2 horas cada una). Estas pruebas se hicieron sin usar vidrios para el efecto invernadero, debido a la dificultad que estos representan en la manejabilidad en cada una de las pruebas.
- **GLOBALES:** Luego del análisis de las pruebas parciales, se determinaron 6 puntos representativos a nivel general en el colector, donde se hicieron 5

---

\* No hay registros de colectores fabricados con este material.

pruebas, una por día (de 7:30 am a 4:30 pm). Estas pruebas se hicieron con las cubiertas de vidrio, para su efecto invernadero, trabajando en su funcionamiento normal. En total se realizaron 59 pruebas.

**Figura 56.** Mapa de puntos del colector de placa plana.



**Fuente:** Autores.

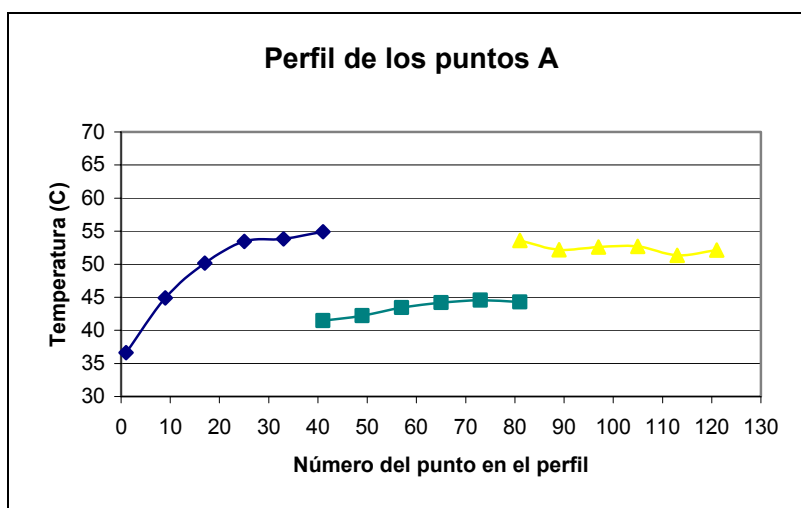
En este análisis se utilizó un enlace en cada prueba y para esto el último punto de la prueba n, fue el primero de la prueba n+1, y con esto lograr una validez comparativa de manera cualitativa. En cada prueba se tomaron 6 puntos, y así,

hacer el seguimiento de todo el colector, la distancia entre punto y punto fue de 14 cm. aproximadamente.

La toma de datos en cada prueba parcial se hizo cada 15 minutos, luego se promedió el comportamiento en cada una de estas, para así detectar puntos de interés, entendiéndose puntos de interés como los puntos donde el comportamiento térmico rompía con cierta tendencia en este comportamiento.

Los resultados de estas pruebas parciales (las pruebas verticales, puesto que estas, muestran más claramente la tendencia en el perfil de temperaturas en el colector) se muestran a continuación en las siguientes graficas:

**Figura 57.** Perfil de temperatura de los puntos A en el colector.



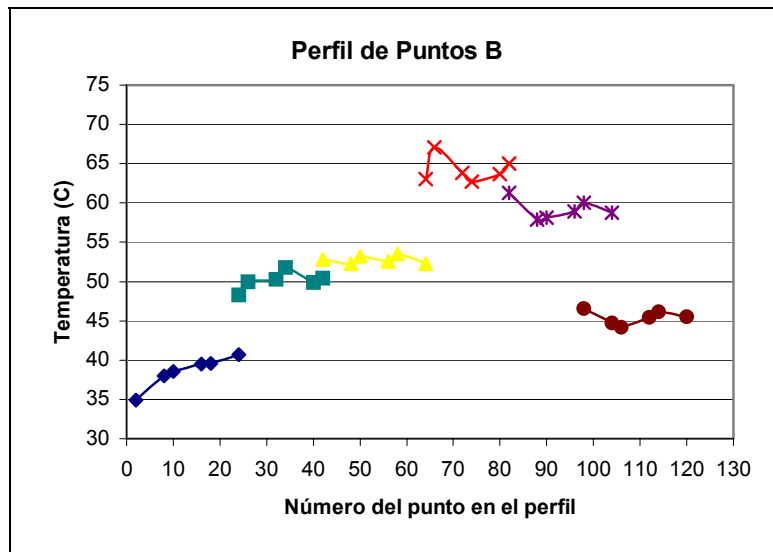
**Fuente:** Autores.

Como se ve en la figura 57, aunque la línea no es continua, puesto que se muestran varias pruebas, el punto final de una es a su vez el punto inicial de otra, tal y como se había explicado anteriormente; además, se puede observar que la tendencia ascendente en estos puntos se corta alrededor del punto 70.

En la figura 58, el perfil de los puntos B, se ven pequeñas oscilaciones térmicas donde la tendencia ascendente se corta en los puntos 67 y 98 respectivamente.

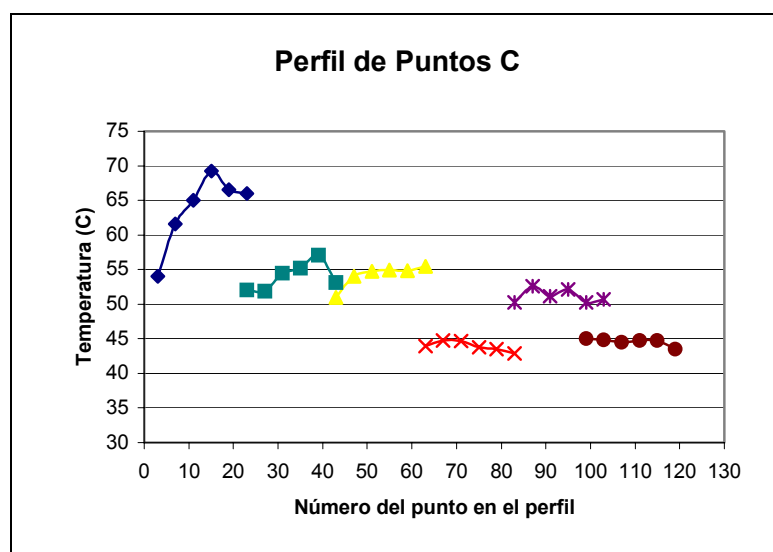
En la figura 59 se ve un perfil inestable; sin embargo, se destacan los puntos 15 y 39 por ser puntos finales de una tendencia ascendente y el punto 75, ya que a partir de este la tendencia en el comportamiento térmico es descendiente.

**Figura 58.** Perfil de temperatura de los puntos B en el colector.



**Fuente:** Autores.

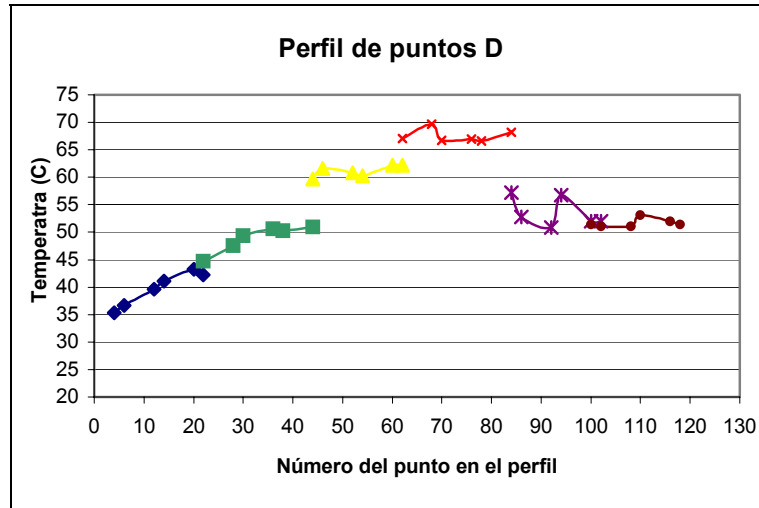
**Figura 59.** Perfil de temperatura de los puntos C en el colector.



**Fuente:** Autores.

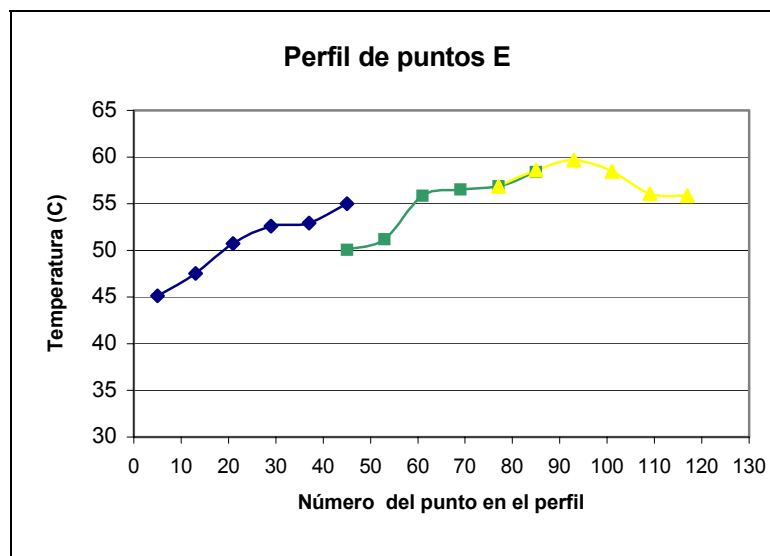
La figura 60 muestra una tendencia ascendente hasta el punto 68, y a partir del punto 78 aparecen oscilaciones de gran magnitud.

**Figura 60.** Perfil de temperatura de los puntos D en el colector.



**Fuente:** Autores.

**Figura 61.** Perfil de temperatura de los puntos E en el colector.



**Fuente:** Autores.

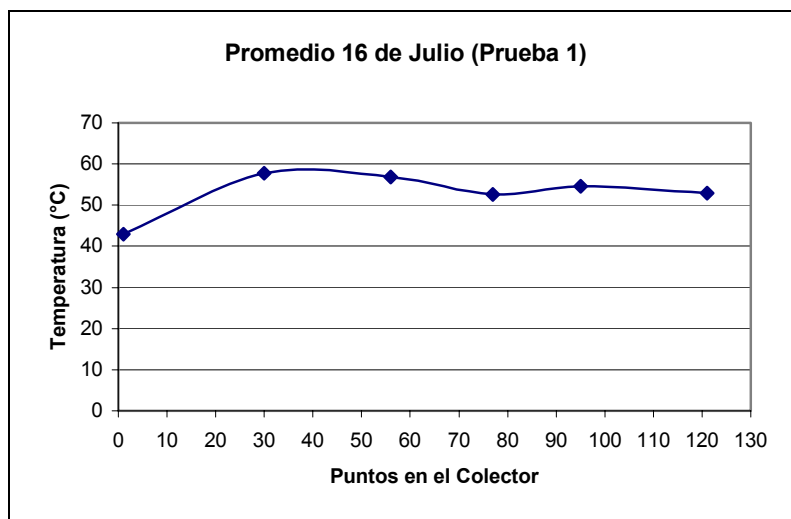
Como vemos en la figura 61, la tendencia ascendente en los puntos E es estable hasta el punto 93 donde cambia la tendencia, resaltando que no existen oscilaciones.

En general después de estas pruebas se puede observar que donde se encuentran los codos (secciones A y E) las tendencias se mantienen estables y no existen cambios fuertes en el comportamiento, que se reflejan en las secciones intermedias (B, C y D)

Luego de hacer estas pruebas y ya con una tendencia un poco mas clara del colector cuando no hay movimiento de fluido, se trabajaron las 5 pruebas globales con 6 puntos escogidos a partir de las observaciones que se tuvieron en cuenta luego de las anteriores pruebas. Estos puntos son: 1 (A1y primer punto del colector en el mapa de puntos), 30 (D8 en el mapa de puntos), 56 (B14 en el mapa de puntos), 77 (E19 en el mapa de puntos), 95 (C24 en el mapa de puntos), y 121 (A30 y último punto del colector en el mapa de puntos); estos puntos se distinguen en la figura 27 por tener un color diferente.

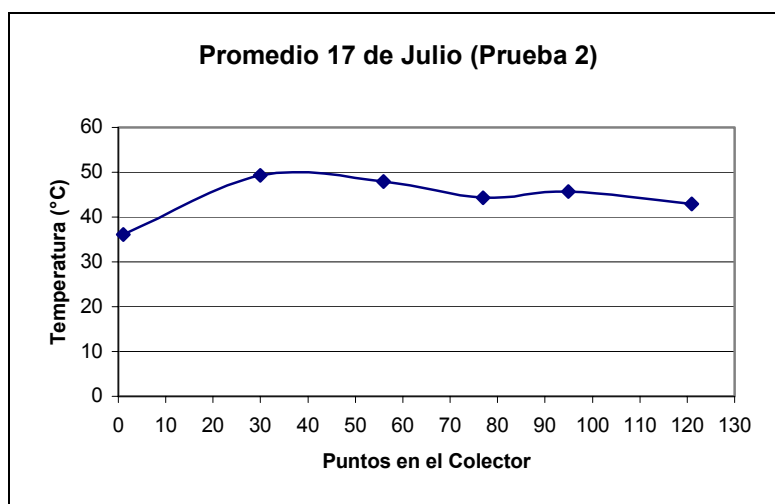
Las pruebas globales si hicieron los días 16, 17, 18, 21 y 22 de Julio de 2003; se trabajaron a diferentes set points para el control térmico del colector, así como en estado transitorio y estacionario (con y sin movimiento de fluido). Los resultados en promedio de estas pruebas se muestran a continuación en las siguientes figuras:

**Figura 62.** Prueba global del 16 de Julio de 2003.



**Fuente:** Autores.

**Figura 63.** Prueba global del 17 de Julio de 2003.

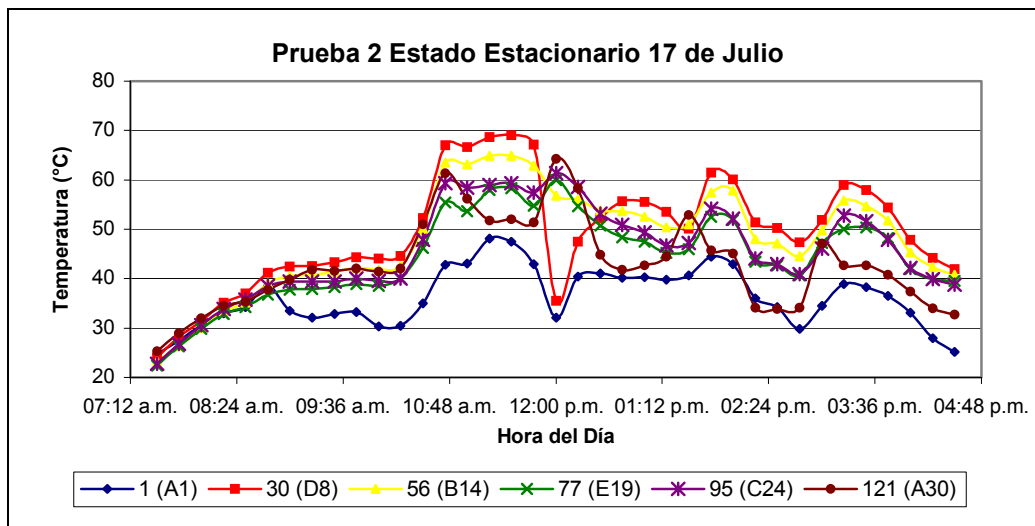


**Fuente:** Autores.

La figura 64 es de gran interés puesto que muestra el comportamiento térmico en relación con el tiempo durante la prueba, es de resaltar que mientras no hubo movimiento los puntos más altos en temperatura son el 30, y 56; el punto 77 que

corresponde a uno de los codos del colector mantiene una temperatura medio con respecto a los demás puntos que fueron sensados.

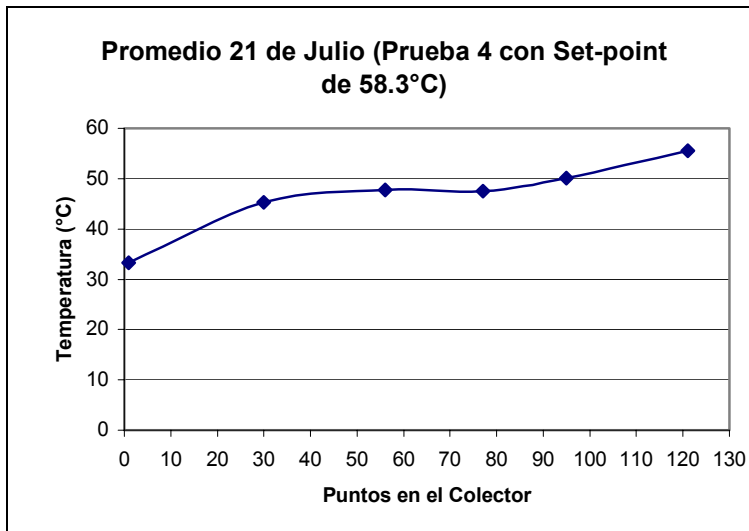
**Figura 64.** Prueba global del 17 de Julio de 2003 (comportamiento térmico en relación al tiempo).



**Fuente:** Autores.

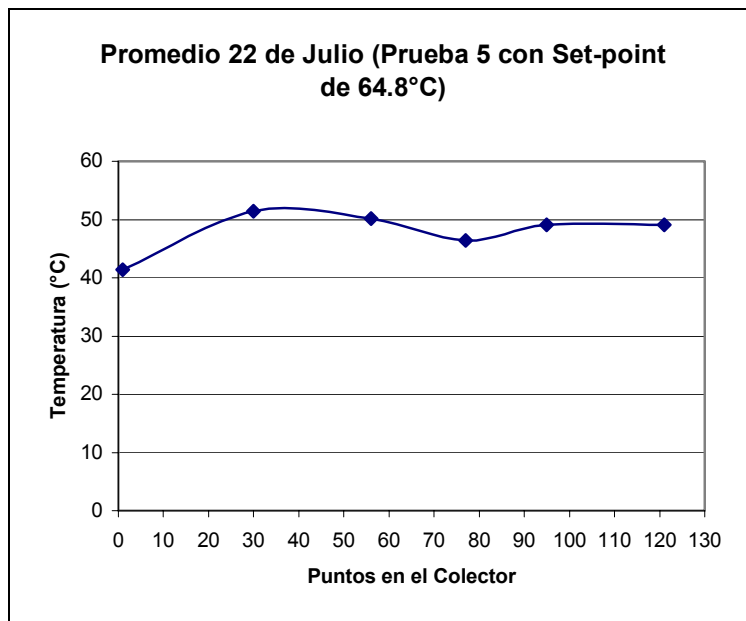
En cuanto se presentaron movimientos de agua dentro del colector, su perfil de temperaturas se mantuvo ascendente.

**Figura 65.** Prueba global del 21 de Julio de 2003.



**Fuente:** Autores.

**Figura 66.** Prueba global del 22 de Julio de 2003.



**Fuente:** Autores.

### 7.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Con base en los resultados obtenidos tanto en las pruebas parciales como globales, podemos decir que:

- En estado estacionario (llamando el estado en el que no hay movimiento de fluido, esto ocurre en la operación normal del colector cuando el fluido no ha llegado a la temperatura deseada) los puntos mas altos se encuentran entre el punto 30 y 70, después la temperatura disminuye levemente.
- En estado transitorio (fluido en movimiento), el perfil muestra un calentamiento ascendiente en todo el colector
- Los codos presentan pérdidas térmicas, con respecto a la secuencia de puntos.
- Es notoria la influencia del efecto invernadero (doble vidrio de cubierta), manteniendo el colector en temperaturas más altas, aun en momentos de leve nubosidad, donde la radiación directa disminuye.

Podemos concluir diciendo que este colector en mención se sobredimensionó casi en un 50% en cuanto a la relación longitud de tubería/ área de exposición solar; es decir, que se utilizó más tubería por donde se transporta el fluido con respecto al área de exposición para captar la radiación solar; por lo que este colector de 1m<sup>2</sup> se pudo haber trabajado con 12 m de tubería de cobre, en lugar de los 25 m utilizados.

También es crítico el uso de un número considerable de codos, ya que en estos se muestra una caída de temperatura considerable dentro del colector, por lo que se recomienda en el diseño de estos colectores trabajar con el número más bajo posible de codos.

Es importante resaltar que la necesidad de área expuesta a la radiación en este tipo de colectores sigue siendo la misma, la optimización en este caso se puede dar por la geometría del colector (con menor número de codos, tendiendo esto a una forma mas rectangular que cuadrada), y con esto la reducción en la tubería de transporte del fluido a tratar.

## **8. DISEÑO BÁSICO DEL COLECTOR CILINDRO PARABOLICO DE EXPERIMENTACION.**

El propósito en esta sección es la de determinar la viabilidad de trabajar con o sin cubiertas en el tubo receptor; esto con base a los parámetros anteriormente expuestos en el capítulo 5.

El colector de experimentación fue diseñado a una escala piloto para su análisis experimental, siendo modular en su construcción para así, poder cambiar su longitud dependiendo de su requerimiento (como se explicará en el siguiente capítulo); por ahora tomaremos los datos necesarios del colector para llegar a nuestro propósito de tomar una decisión con respecto a la implementación de cubiertas en este colector. Los datos están basados en propiedades meteorológicas de Bucaramanga (lugar de realización de las pruebas del colector)

### **8.1 CÁLCULO DEL FACTOR DE INTERSECCIÓN $F_{\phi}$ .**

Para este cálculo se dan las dimensiones necesarias a continuación:

- $A_a = 3.75 \text{ m}^2$ .
- Longitud de apertura del reflector ( $L_a$ )= 1.5 m.
- Distancia focal desde el eje = 0.38 m.
- Densidad de flujo de radiación ( $I$ ) =  $540 \text{ W/m}^2$ .
- $\rho$  reflectancia de la superficie del concentrador = 0.8 (Foil de aluminio, tomado el menor valor entre un rango de 0.8-0.95).
- $\tau = 1$  (Transmitancia sin cubierta).
- $\alpha$  absorptividad del tubo receptor = 0.95 (recubrimiento con negro de humo).

Al saber que el ancho de apertura del reflector es 1.5 m directamente se asume que  $x = 0.75$  m (en la ecuación de la parábola, ecuación 29), por lo que de esta ecuación podemos hallar la altura máxima:

$$y = \frac{x^2}{4f} = \frac{(0.75)^2}{4 * 0.38} = 0.37 \text{ m.}$$

El radio de la parábola, R, se obtiene de

$$R^2 = (y - r)^2 + x^2 = (0.37 - 0.38)^2 + 0.75^2 = 0.5626.$$

$$R = (0.5626)^{1/2} = 0.75007 \text{ m.}$$

de la ecuación de  $I_{max}$  tenemos

$$I_{max} = \frac{I\rho}{\pi} = \frac{540 * 0.8}{\pi} = 137.5 \text{ W/m}^2$$

siguiendo, obtenemos:

$$h = 137.5 * 0.75007 * \sqrt{\pi} = 182.81 \text{ W/m}$$

finalmente obtenemos de la ecuación 32

$$F\phi = 1 - e^{-\left(\frac{hr}{R}\right)^2} = 1 - e^{-\left(\frac{182.8 * 0.38}{0.75007}\right)^2} = 1$$

Este resultado quiere decir que la radiación por el concentrador es interceptada en su totalidad por el tubo receptor.

## 8.2 CÁLCULO DEL DESARROLLO TÉRMICO DEL COLECTOR SIN CUBIERTAS.

De la ecuación 36, obtenemos el coeficiente de pérdida por radiación .

$$h_r = 4\sigma\varepsilon_r\hat{T}^3$$

donde:

- $\hat{T}$ : Temperatura media de radiación =  $\frac{T_m + T_a}{2} = 37.75 \text{ °C (310.9 K)}$ .
- $T_a$ : Temperatura ambiente promedio en Bucaramanga =  $28 \text{ °C (301.15 K)}$ .
- $T_{fi}$ : Temperatura de entrada del fluido al colector =  $25 \text{ °C (298.15 K)}$ .
- $T_{fo}$ : Temperatura de salida del fluido del colector =  $70 \text{ °C (343.15 K)}$ .
- $T_m$ : Temperatura promedio del fluido =  $\frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} = 47.5 \text{ °C (320.65 K)}$ .
- $\varepsilon_r$ : Emitancia del reflector (Foil de aluminio) =  $0.04$ .
- $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman =  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Reemplazando en la ecuación 36 tenemos:

$$h_r = 4\sigma\varepsilon_r\hat{T}^3 = 4 * 5.67 * 10^{-8} * 0.04 * (310.9)^3 = 0.27 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Teniendo en cuenta que la velocidad promedio del viento en Bucaramanga es:  $V = 2 \text{ m/s}$ . de la ecuación 37 se obtiene:

$$h_{\text{viento}} = 5.7 + 3.8V = 5.7 + 3.8(2) = 13.3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

De la ecuación 35 encontramos el coeficiente de pérdidas al exterior  $U_c$ :

$$U_c = 13.57 \text{ W/m}^2\text{K}$$

De la ecuación 38 obtenemos el coeficiente de pérdida global:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_c} + \frac{d_e}{h_{CF} d_i} + \frac{d_e}{2k} \ln \frac{d_e}{d_i}$$

donde:

- $d_e$ : Diámetro exterior del tubo = 0.028575 m.
- $d_i$ : Diámetro interno del tubo = 0.0254 m.
- $A_f$ : Área de flujo del tubo =  $5.07 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .
- $K$ : Conductividad del tubo (Cobre) =  $386 \text{ W/mk}$
- $h_{CF}$ : coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del tubo.

Necesitamos conocer este último coeficiente, para esto se determinó una razón de flujo volumétrico (este valor fue obtenido experimentalmente en el colector):

$$\nabla = 1.667 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

**V**: Velocidad del flujo del agua dentro del tubo

$$V = \frac{\nabla}{A_f} = \frac{1.667 \cdot 10^{-5}}{5.07 \cdot 10^{-4}} = 3.288 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Hallamos las pérdidas térmicas del agua evaluadas a  $T_m$

- $\mu = 5.84 \cdot 10^{-4} \text{ Kg/m s}$
- $Pr = 3.8$

- $k = 0.641 \text{ W/mk}$
- $\rho = 989 \text{ Kg/m}^3$

con esto calculamos el número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{989 * 3.288 * 10^{-3} * 0.028575}{5.84 * 10^{-4}} = 159.1 \quad (\text{Flujo laminar})$$

obtenemos el número de Nusselt para flujos laminares en tubos cilíndricos, teniendo en cuenta que el largo del tubo es de:  $L = 2.5 \text{ m}$  (longitud del colector).

$$N_{UD} = 3.66 + \frac{0.065 \left( \frac{de}{L} \right) \text{Re} * \text{Pr}}{1 + 0.04 \left[ \left( \frac{de}{L} \right) \text{Re} * \text{Pr} \right]^{2/3}} = 4.05$$

Aplicamos la correlación para flujos en tubos

$$N_{UDC} = \left[ \frac{\mu_s}{\mu_b} \right]^n * N_{UD}$$

donde

- $n$  : Factor adimensional para fluidos que se calientan = -0.11
- $\mu_s$  : Viscosidad dinámica evaluada a temperatura de superficie,
- $\frac{T_m + T_a}{2} = 310.9\text{K}; \mu_s = 6.95 * 10^{-4} \text{ Kg/ms}$
- $\mu_b$  : Viscosidad dinámica evaluada a temperatura promedio de fluido,  $T_m$
- $\mu_b = 5.84 * 10^{-4} \text{ Kg/ms}$

Reemplazando términos, tenemos:

$$N_{UDC} = \left[ \frac{6.95 * 10^{-4}}{5.84 * 10^{-4}} \right]^{-0.11} * 4.05 = 3.97$$

Calculamos  $h_{CF}$  como

$$h_{CF} = \left( \frac{k}{de} \right) * N_{UDC} = \left( \frac{0.641}{0.028575} \right) * 3.97 = 89.055 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Ahora, reemplazando todos los valores en la ecuación 38 obtenemos el coeficiente de pérdida global

$$U = 11.58 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

reemplazando en la ecuación 39 obtenemos el factor de eficiencia:

$$F' = \frac{U}{U_c} = \frac{11.58}{13.57} = 0.853$$

sabiendo que el área superficial del tubo receptor es  $A_r = \pi * de * L = 0.2244 \text{ m}^2$ , reemplazamos en la ecuación 33:

$$q_u = (540 * 1 * 0.8 * 1 * 0.95) - \left( 13.57 * (343.15 - 301.15) * \left( \frac{0.2244}{3.75} \right) \right)$$

$$q_u = 376.295 \text{ W/m}^2$$

**La eficiencia óptica por lo tanto es: 0.76 = 76% .Para el rendimiento térmico, reemplazamos en la ecuación 40.**

$$\eta = \frac{Q_u}{I_s A_a} = \frac{q_u}{I_s} = \frac{376.295}{540} = 0.699$$

Por último, teniendo el área del receptor y el área de apertura del concentrador, se obtiene el índice de concentración de este colector (este índice no varía con el cambio de lugar de operación, ni varía con cambiar la longitud del colector):

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{3.75\text{m}^2}{0.2244\text{m}^2} = 16.7$$

Este valor coloca al colector, como un colector de alta concentración ( $C > 10$ ), con las características que estos tienen, descritas en el capítulo 4.

### **8.3 CÁLCULO DEL DESARROLLO TÉRMICO DEL COLECTOR CON CUBIERTAS.**

Lo primero es calcular la transmitancia del material de la cubierta, como se dijo anteriormente; el material es Vidrio Pyrex (debido a que en el mercado es el único que se consigue como tubo concéntrico). Para esto necesitamos el valor de la reflectancia del material, éste se obtiene de la ecuación 42 conociendo el índice de refracción del material:

$$r = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left( \frac{1.51-1}{1.51+1} \right)^2 = 0.0413$$

El espesor de la cubierta es 0.12 pulg., el coeficiente de extinción del material es  $0.2 \text{ pulg.}^{-1}$ , por lo que reemplazando en la ecuación 41, obtenemos el valor de la transmitancia de la cubierta:

$$\tau = e^{-kL} \left( \frac{1-r}{1+r} \right) = e^{-0.2*0.12} \left( \frac{1-0.0413}{1+0.0413} \right) = 0.90$$

Para realizar los cálculos necesitamos tener las temperaturas teóricas:

- $T_a$ : Temperatura ambiente promedio en Bucaramanga = 28 °C (301.15 K)
- $T_{fi}$ : Temperatura de entrada del fluido al colector = 25 °C (298.15 K)
- $T_{fo}$ : Temperatura de salida del fluido del colector = 70 °C (343.15 K)
- $T_m$ : Temperatura promedio del fluido =  $\frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} = 47.5$  °C (320.65 K)
- $T_c$ : Temperatura promedio de la cubierta (se calcula por método iterativo)
- $T_b$ : Temperatura promedio de la superficie del tubo (se calcula por el método de aproximación sucesiva)

**Método para el calculo de  $T_c$ :** Este método iterativo consiste en suponer una  $T_c$ , con el que se calcula el coeficiente de perdidas por radiación  $h_r$  (donde la temperatura a evaluar, es la temperatura media entre la cubierta y el ambiente), y el coeficiente de pérdidas por la convección debido al viento (este no depende de la temperatura por lo que será una constante), con lo que obtenemos el coeficiente de perdidas global entre el reflector y la cubierta ( $U$ ), tal como en el cálculo del colector sin cubiertas, este se divide con el calor neto útil, que para este caso será:

$$q_U = I_s \rho = 540 * 0.8 = 432 \text{ W/m}^2$$

con esto calculamos  $T_c$  como:

$$T_c = \frac{q_u}{U} + T_a$$

si la  $T_c$  calculada no es el misma  $T_c$  supuesta, seguimos calculando, ahora la  $T_c$  supuesta será la  $T_c$  calculada anteriormente y se sigue el mismo procedimiento hasta que  $T_c$  supuesta =  $T_c$  calculada.

Los resultados de este procedimiento son presentados a continuación en la siguiente tabla: (Se inicio con una suposición de  $T_c = 40$  °C (313.15 K)).

**Tabla 14. Resultados obtenidos para el cálculo de  $T_c$**

$T_c$ supuesta		$\hat{T}$ (K)	$h_r$ ( $W/m^2 K$ )	$U$ ( $W/m^2 K$ )	$T_c$ calculada	
$^{\circ}C$	K				$^{\circ}C$	K
40	313.15	307.15	0.263	13.563	59.85	333
59.85	333	317.075	0.289	13.589	59.79	332.94
59.79	332.94	317.045	0.289	13.589	59.79	332.94

**Fuente:** Autores.

por lo que la  $T_c$  a trabajar para los cálculos será;  $T_c = 59.79$   $^{\circ}C$ .

**Método de aproximación sucesiva de la  $T_b$ :** En este caso utilizaremos como  $q_u$ , el calor neto útil calculado sin cubiertas (como una aproximación); de lo que:

$$q_u = 376.295 \text{ W/m}^2$$

Además supondremos las mismas pérdidas internas que las calculadas para el colector sin cubiertas ( $78.965 \text{ W/m}^2 K$ ); y como una buena suposición tendremos que  $T_b > T_m$ .

Por lo que:

$$T_b = \frac{q_u}{U_i} + T_m = \frac{376.295 \text{ W/m}^2}{78.965 \text{ W/m}^2 K} + 320.65 K = 325.41 K = 52.26 \text{ } ^{\circ}C$$

Con las temperaturas ya supuestas y calculadas, procedemos a calcular las pérdidas con coeficientes, para hallar la eficiencia teórica y el respectivo cálculo de calor neto útil del colector.

Datos principales:

- $D_{eV}$  : Diámetro externo de la cubierta = 0.04 m.
- $D_{iV}$  : Diámetro interno de la cubierta = 0.037 m.
- $k_a$  : Conductividad térmica del aire = 0.0267 W/mk.
- $k_V$  : Conductividad térmica de la cubierta = 1.09 W/mk.
- $\varepsilon_c$  : Emitancia de la cubierta = 0.8 (Vidrio Pyrex).
- $\hat{T}_2$  : Temperatura promedio entre la cubierta y la superficie del tubo =

$$\hat{T}_2 = \frac{T_c + T_b}{2} = 329.175 \text{ K} = 56.025^\circ \text{ C} .$$

Reemplazando en la ecuación 44, obtenemos:

$$R_V = \frac{2k_V}{D_{ev} \text{Ln}\left(\frac{D_{ev}}{D_{iv}}\right)} = \frac{2*1.09}{0.04*\text{Ln}\left(\frac{0.04}{0.037}\right)} = 699.06 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

de la ecuación 45, tenemos:

$$R_a = \frac{2k_a}{D_{iv} \text{Ln}\left(\frac{D_{iv}}{De}\right)} = \frac{2*0.0267}{0.037*\text{Ln}\left(\frac{0.037}{0.028575}\right)} = 5.586 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

de la ecuación 46, obtenemos:

$$h_{ra} = 4\sigma\varepsilon_c \hat{T}_2^3 = 6.472 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

reemplazando los anteriores valores en la ecuación 43, obtenemos:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{13.3 + 0.289} + \frac{1}{699.06} + \frac{1}{5.586 + 6.472}$$

de lo que el coeficiente global de pérdidas será:

$$U_c = 6.331 \text{ W/m}^2\text{K}$$

las pérdidas internas son las mismas que en el cálculo de trabajo sin cubiertas por lo que:

$$U = 5.862 \text{ W/m}^2\text{K}$$

reemplazando en la ecuación 39 obtenemos el factor de eficiencia:

$$F' = \frac{U}{U_c} = \frac{5.862}{6.331} = 0.926$$

reemplazando en la ecuación 33:

$$q_u = (540 * 0.9 * 0.8 * 1 * 0.95) - \left( 6.331 * (343.15 - 301.15) * \left( \frac{0.2244}{3.75} \right) \right)$$

$$q_u = 353.448 \text{ W/m}^2$$

**La eficiencia óptica por lo tanto es: 0.684 = 68.4%. Para el rendimiento térmico, reemplazamos en la ecuación 40**

$$\eta = \frac{Q_u}{I_s A_a} = \frac{q_u}{I_s} = \frac{353.448}{540} = 0.654$$

Por lo que vemos mayor viabilidad en trabajar sin cubiertas, ya que al implementar la cubierta se pierde eficiencia óptica, y además baja el rendimiento térmico teórico, además su costo es relativamente alto. Sin embargo es importante resaltar que con el uso de cubiertas, estos colectores mantendrán una mayor inercia térmica, que puede resultar un importante aporte, ya que estos colectores son muy sensibles a los cambios de radiación directa.

#### **8.4 ÁREA COLECTORA NECESARIA PARA EL MONTAJE DE UN SISTEMA DE POTABILIZACIÓN DE 1 m<sup>3</sup>/día.**

El área colectora necesaria se calculará para la ciudad de Barrancabermeja (teniendo en cuenta que es el sitio de instalación), con base en los datos promedio de esta ciudad y trabajando con la radiación disponible en el peor de los meses en la evaluación de lo que se conoce como periodo más desfavorable, que como vimos en el capítulo anterior, es de 500 W/m<sup>2</sup> y con una duración promedio diaria de 8 horas. La velocidad promedio del viento es de 0.6 m/s.

Los cálculos para esta área estarán basados en las dimensiones del colector de experimentación y sin cubierta, ya que se analizó en la sección anterior su viabilidad en comparación a la implementación de cubiertas.

**8.4.1 Cálculo del área necesaria para el sistema propuesto:** Lo primero a calcular es el calor neto útil, para esto obtenemos el coeficiente de pérdidas globales, ya que las pérdidas por convección resultarán distintas a las calculadas para la ciudad de Bucaramanga. Reemplazando en la ecuación 36 tenemos:

$$h_r = 4\sigma\varepsilon_r\hat{T}^3 = 4 * 5.67 * 10^{-8} * 0.04 * (310.9)^3 = 0.27 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Teniendo en cuenta que la velocidad promedio del viento en Barrancabermeja es de  $V = 0.6 \text{ m/s}$ , de la ecuación 37 se obtiene:

$$h_{\text{viento}} = 5.7 + 3.8V = 5.7 + 3.8(0.6) = 7.98 \text{ W/m}^2\text{K}$$

De la ecuación 35 encontramos el coeficiente de pérdidas al exterior  $U_c$ :

$$U_c = 8.25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

reemplazando en la ecuación 33:

$$q_u = (500 * 1 * 0.8 * 1 * 0.95) - \left( 8.25 * (343.15 - 303.15) * \left( \frac{0.2244}{3.75} \right) \right)$$

$$q_u = 360.253 \text{ W/m}^2$$

Teniendo el calor neto útil, nos disponemos a calcular la carga térmica requerida por día, donde esta carga térmica es igual a:

$$Q_U = \frac{mC_p\Delta T}{\Delta t} \quad (54)$$

Donde:

- $m$ : Representa la masa de agua que calienta (Kg.).
- $C_p$ : Es el calor específico del agua (4186 J/(kg°C))
- $\Delta T$ : Incremento de la temperatura experimentado por el volumen de agua. (°C)
- $\Delta t$ : Tiempo durante el cual se llevo a cabo el calentamiento (s)

$$Q_U = \frac{991.4 * 4186 * 40}{28800}$$

$$Q_U = 5763.9 \frac{J}{s} = 5763.9 \text{ W}$$

y reemplazando en la ecuación 34, obtenemos:

$$Aa = \frac{Q_u}{q_u} = \frac{5763.9 \text{ W}}{360.253 \text{ W/m}^2} = 15.99 \text{ m}^2 \approx 16 \text{ m}^2$$

Este resultado desde ya, nos muestra una gran alternativa de implementación de este tipo de colector con respecto al colector de placa plana, ya que para los mismos cálculos, con el colector de placa plana, se requeriría un 75% más de área; en otros términos, con el tipo de colector de estudio se obtiene un ahorro en área del 42.8%, con respecto a la necesidad del sistema de colectores de placa plana, calculado para el mismo propósito por CASTILLO y BARRIOS (2002).

**8.4.2. Distribución geométrica del sistema propuesto:** Uno de los factores importantes en el sistema, ya habiendo calculado el área necesaria, es determinar la cantidad de colectores a usar y el tipo de conexión entre estos (serie y/o paralelo, siempre y cuando sea necesario mas de un colector).

Utilizando los datos del flujo volumétrico obtenidos experimentalmente, podemos hallar el volumen máximo a tratar por colector con el tiempo estimado de radiación (8 horas = 28800 segundos).

$$V_{\max} = \nabla * \theta = 1.667 * 10^{-5} \text{ m}^3/s * 28800s = 0.48 \text{ m}^3 \quad (55)$$

Como vemos no es posible tener un solo colector con las dimensiones estipuladas para nuestro sistema de  $1\text{m}^3$ , por lo que también se descarta la posibilidad de trabajar con colectores intercomunicados en serie.

**Por un factor de seguridad se recomienda para este sistema, trabajar con 3 colectores en paralelo;** con las dimensiones y características antes expuestas del tubo receptor. Sabiendo los parámetros básicos y el área necesaria ahora nos disponemos a encontrar la longitud adecuada para estos colectores, mediante:

$$Aa = La * L \quad (56)$$

donde:

- $Aa$ : Área de apertura por colector, es el área necesaria para el sistema dividida por el número de colectores sugeridos.  $Aa = 16 / 3 = 5.333 \approx 5.34\text{m}^2$
- $La$ : Longitud de apertura del reflector = 1.5 m

Por lo que la longitud de cada uno de los colectores será:

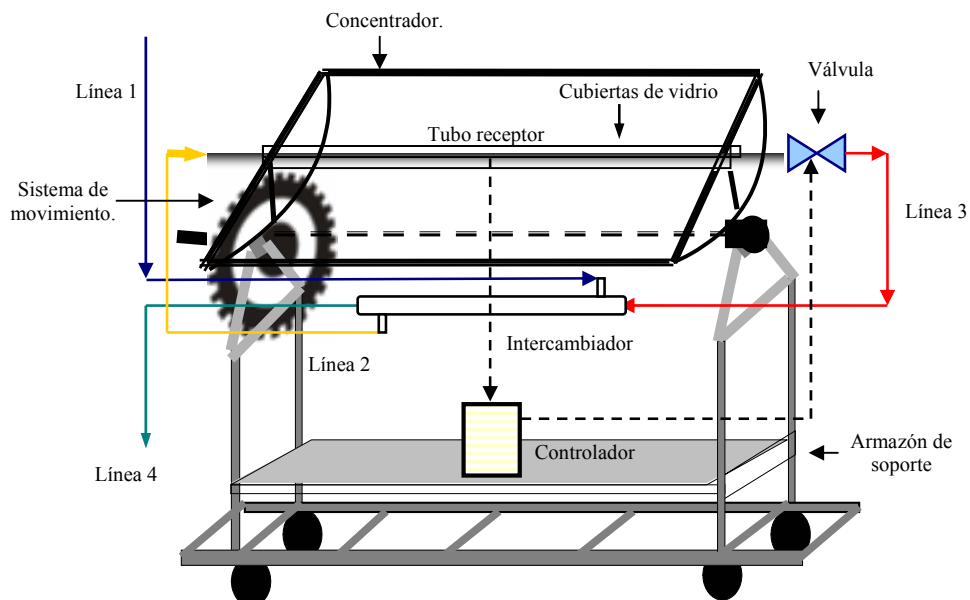
$$\mathbf{L = 3.56 \text{ m.}}$$

## 9. EVALUACION OPERACIONAL DEL POTABILIZADOR SOLAR PARABOLICO.

El colector solar cilindro parabólico que nos servirá de potabilizador en el presente proyecto, se terminó de construir en el mes de Octubre de 2003; luego de algunos cambios que fueron necesarios, el equipo empezó a operar satisfactoriamente a mediados del mes de Noviembre de 2003.

Este colector fué diseñado a pequeña escala para su análisis experimental, siendo modular en su construcción, para así, poder cambiar su longitud, dependiendo de su requerimiento (por ejemplo para el cálculo de un sistema para potabilización de  $1 \text{ m}^3/\text{día}$ , tal como se mostró en el capítulo anterior) Figura 67.

**Figura 67.** Esquema del colector cilindro parabólico.



**Fuente:** Autores.

En este esquema se muestran las principales partes de las que consta este potabilizador solar, en él también se encuentran bien diferenciadas cuatro líneas de flujo del fluido a tratar (para nuestro caso, agua).

La línea 1 de color azul, corresponde al agua a tratar; la línea 2, en amarillo, es el fluido una vez que ha pasado por el intercambiador de calor; la línea 3, en rojo, es el fluido una vez que ha pasado por el tubo receptor y ha sufrido el proceso de eliminación microbiológica; la línea 4, de color verde, corresponde al agua lista para consumo humano una vez que ha pasado por el intercambiador, ofreciendo un efecto de precalentamiento para la línea 2.

A continuación presentaremos un resumen del proceso en la construcción de las partes modulares que presenta el colector de experimentación, las cuales fueron sometidas a diferentes cambios durante el tiempo de ejecución del proyecto, todos ellos con el objetivo de optimizar su funcionamiento.

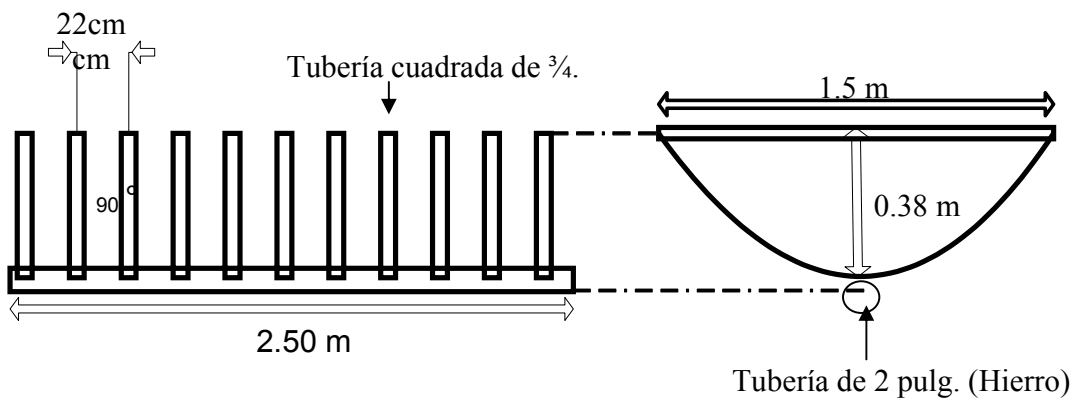
## **9.1 DESCRIPCION DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO.**

El colector cilindro parabólico, se construyó modularmente como se dijo anteriormente, por eso se reseñará cada una de las partes que constituyen este potabilizador, y que a medida que fué necesario se modificaron con el fin de obtener un punto óptimo de trabajo en el tratamiento de aguas.

**9.1.1 Esqueleto del concentrador:** A partir de las dimensiones estimadas para el concentrador, se procedió a realizar el diseño del esqueleto que serviría de soporte para dicho concentrador, buscando un material que no representara altos costos económicos y presentara un alto grado de confiabilidad en su resistencia y durabilidad, por lo que se escogió tubería cuadrada de 0.75 pulg. en material cold-rolled para construir las secciones parabólicas que dan la forma al

concentrador.(Ver figura 68). En esta figura se puede observar que el esqueleto está compuesto por brazos de forma parabólica a una distancia de 22 cm. entre cada uno de ellos; el eje central sobre el cual se soldaron los brazos debía ofrecer la resistencia necesaria para soportar el peso, por lo tanto se escogió un tubo de hierro de 2 pulg. El peso total de esta sección es de 50 Kg, el cual está acorde a las necesidades que se requieren para realizar el movimiento de rotación.

**Figura 68.** Esquema del esqueleto del colector parabólico.



**Fuente:** Autores.

**Figura 69.** Esqueleto del colector parabólico.



**Fuente:** Autores.

Para incrementar la resistencia presentada en el esqueleto, además de la soldadura, se colocaron en cada una de las raíces de los brazos un refuerzo consistente en un soporte auxiliar hecho en hierro.

**9.1.2 Concentrador :** En un principio se contempló la utilización de láminas de acero inoxidable calibre 22, pero se descartó este material por su alto costo; por lo que se utilizó lámina galvanizada pulida calibre 24, con la cual se esperaba un factor de reflectividad de 0.85 (reflectividad teórica).

Al ser instalada ésta lámina por efectos climatológicos, se generó una capa nueva sobre su superficie, generando opacidad y su reflectividad bajó considerablemente; entonces se cubrió con lámina de aluminio foil de 0.15 mm de espesor. Con esto el colector mejoró su reflectividad. La reflectividad teórica de este material es de 0.8 como se dijo en el capítulo anterior.

Ya seleccionado el material y basados en el estudio geométrico, las dimensiones finales del colector acopladas a las dimensiones del esqueleto son: (figura 68.)

- Área de apertura del colector: 3.75 m<sup>2</sup>
- Longitud de apertura del colector: 1.5 m
- Longitud del colector: 2.5 m
- Distancia focal: 0.38 m

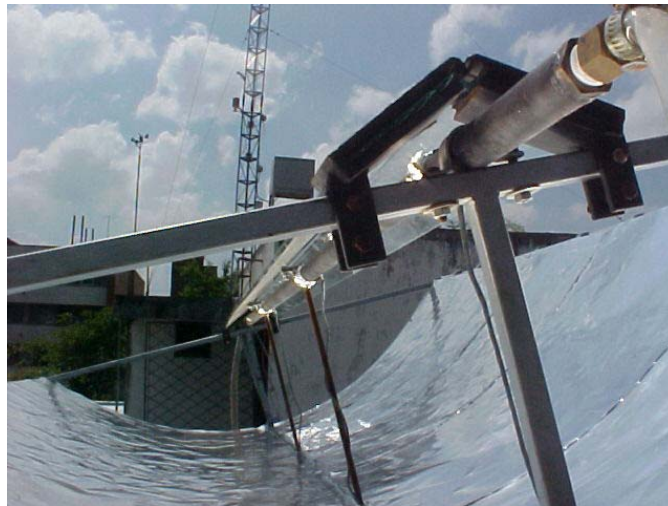
**9.1.3 Tubo receptor:** Es la sección del colector por donde circula el fluido a tratar (aguas subterráneas), por tal motivo es necesario que este tenga un factor de absorptividad alto, para aprovechar la combinación térmico-desinfectante que nos suministra el concentrador basado en la energía solar (rayos infrarrojo y UV-A); para esto se utilizó tubería de cobre por su alta conductividad térmica.

Para obtener un alto factor de absorptividad, es necesario utilizar un recubrimiento para el tubo, para esto existen varias sustancias que proporcionan este objetivo tal

como las diferentes pinturas en negro y blanco (Cromo, níquel y pintura mate entre otros); por lo que se utilizó negro de humo, el cual fué adherido al tubo haciendo una mezcla con aceite de higuera. Esta mezcla fué depositada sobre el tubo utilizando una espátula; una vez realizado esto se procedió a hacer un quemado de la superficie del tubo para obtener una adhesión completa de la mezcla.

La razón por la que se utilizó esta sustancia, es porque además de tener un alto factor de absorción (0.95), es por su alta resistencia a la intemperie y su bajo costo.

**Figura 70.** *Tubo receptor de cobre.*



**Fuente:** *Autores.*

Una vez seleccionado el material, se procedió a escoger el diámetro óptimo para este tubo receptor; se necesitaba un diámetro tal, que nos diera un equilibrio entre las pérdidas ópticas y las pérdidas térmicas que este pudiera llegar a tener, por tal motivo se escogió trabajar con un tubo de 1 pulg. de diámetro interno.

**9.1.4 Sistema de movimiento del colector:** Como se explicó en capítulos anteriores, este sistema es uno de los factores de influencia directa en la eficiencia del colector. En la mayoría de las aplicaciones el sistema utilizado presenta la necesidad de utilizar energía fotovoltaica como fuente de alimentación, dando vía

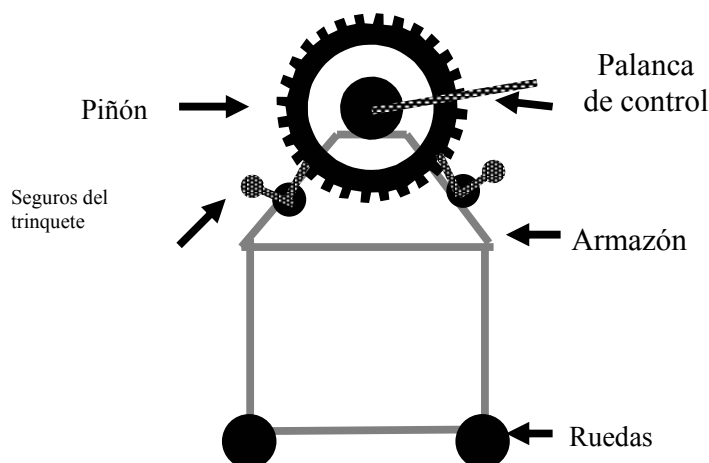
a la utilización de sensores solares y a un sistema mecánico, movido por dicho sistema de energía.

Retomando el enfoque para el cual se ha elaborado este proyecto, donde no es prioritario este sistema, se ha escogido un mecanismo manual que realiza una función similar al mecánico.

El sistema de rotación es manual y primario; consta de dos chumaceras que soporta unas puntas, que a su vez están unidas al eje principal del esqueleto del colector; en una de estas puntas elaboradas en hierro, fué acondicionado en primera instancia un piñón de 24 dientes, dando un cambio de posición cada hora. El colector estaba desenfocado durante un gran intervalo de tiempo con respecto al haz de luz creada por el concentrador, por tal razón se reemplazó el piñón utilizado inicialmente por un piñón de 140 dientes permitiendo que el movimiento se realice cada 10 minutos y con esto logrando una mayor precisión en el enfoque necesitado, arrojando una mayor eficiencia en la operación de este colector en las pruebas realizadas.

El sistema cuenta con un seguro conocido como trinquete, consistente en dos segmentos de hierro asegurados por medio de resortes que garantizan la estabilidad del colector en cada una de sus posiciones. En la figura 71 se presenta un esquema de este sistema.

**Figura 71.** Vista frontal del sistema de movimiento.

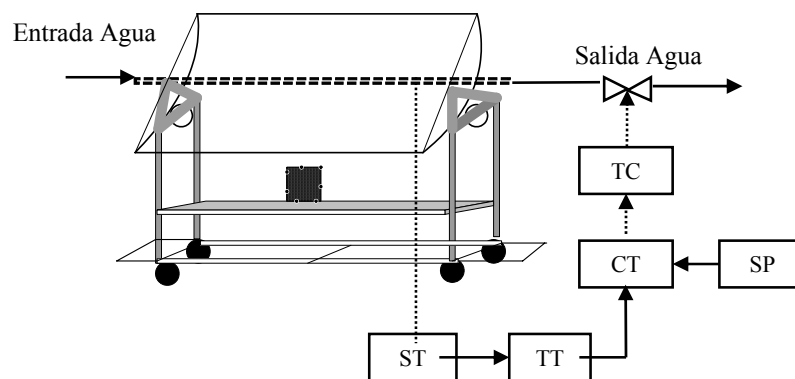


**Fuente:** Autores.

Para el mejoramiento de este sistema, se desarrolla un proyecto de grado en la escuela de Ingeniería Mecánica, patrocinado por el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) como complemento del sistema de movimiento, el cual requiere el colector cilindro parabólico.

9.1.5 Sistema de control térmico: Este sistema, tiene una estrategia de control de retroalimentación o feedback, conformado por un sensor de temperatura que en este caso fue una termocupla tipo J, un controlador Omron y una válvula solenoide. El objetivo del sistema de control es no permitir la salida del agua del colector hasta que esta no haya alcanzado una temperatura pre establecida o set point (SP) a la cual, como lo indicaran las pruebas de desinfección, se habrá eliminado la contaminación microbiológica presente en el agua.

La termocupla sensa la temperatura (ST) de la pared de la tubería y manda una señal eléctrica (---) al transmisor de señal de temperatura (TT) que en este caso es la misma termocupla. La señal llega hasta el controlador (CT) donde se encuentra el valor de referencia presetablecido (SP); el controlador compara la señal recibida con el set point y toma un acción de control que es llevada por el transmisor de la señal de control (TC) hasta el elemento de ejecución de la orden, que en este caso es la válvula solenoide. Tal como se muestra en el siguiente esquema (figura 72):



**Fuente:** Autores.

Además del punto de control, se utilizaron 3 puntos más dentro del colector para sensor temperatura, eso con el fin de mirar el perfil térmico que presenta este colector en su funcionamiento, como se mostrará en el análisis de pruebas térmicas.

Se presentaron problemas con las temperaturas sensadas por las termocuplas que están en la superficie del tubo receptor por lo que se aislaron estas termocuplas, esto con el fin de tener un dato más real; el punto de control que se estaba midiendo con una termocupla en el absorbedor, se reemplazó por un termopozo, esto con el fin de medir la temperatura real del agua dentro del absorbedor.

**9.1.6 Armazón:** Es la sección que soporta todo el peso de las demás secciones del colector, y además crea el equilibrio que se necesita para el movimiento de seguimiento solar. Una vez conocido el peso total y las dimensiones de las otras secciones del colector, se estimaron las dimensiones del armazón, él cual se construyó de manera modular en ángulo de hierro, al cual se le aplicó una pintura anticorrosiva previa a la pintura final de color plateado. Este armazón consta de secciones de soporte sobre el cual se localizaron el sistema de control, el intercambiador de calor y recipientes para la recolección del agua tratada. Para facilitar el desplazamiento de nuestro colector, a este armazón se le acondicionaron cuatro ruedas.

**9.1.7 Unidades Complementarias:** Comprenden todas las secciones o accesorios que una vez construido el prototipo inicial, fueron acondicionadas a este para lograr un incremento de la eficiencia del potabilizador.

- Cubiertas de vidrio: Posicionadas en ángulo en la parte superior del tubo absorbedor, con el fin de optimizar la absorción de los rayos solares en el día y disminuir las pérdidas por convección (no se utilizó cubierta de vidrio)

concéntricas debido a su alto costo, lo cual en relación costo/beneficio determinó la no viabilidad, como se explicó en el capítulo anterior); con estas cubiertas se incrementó la inercia térmica del colector, la cual se veía afectada al presentarse corrientes de viento.

- Intercambiador de Calor: Una vez realizadas las primeras pruebas se observó que la alta temperatura del agua que se obtenía para consumo humano era desperdiciada; por este motivo se elaboró un pequeño intercambiador de calor con el fin de precalentar el agua proveniente de la línea 1 (figura 72), acelerando así la obtención del set point, y con esto lograr una mayor productividad a lo largo del día.

Nuestro intercambiador fué elaborado utilizando dos pequeños tramos de tubos de aluminio con diferentes diámetros, unidos por una soldadura especial; este intercambiador cuenta con 1 m de longitud y una capacidad volumétrica interna de 250 ml.

- Manguera especial para agua potable: Para evitar pérdidas por convección en el agua de la línea 3, la cual es conducida al intercambiador se colocó una manguera para conservar la temperatura del agua tratada.
- Aislante térmico: Se utilizó cinta foil con el fin de mantener la temperatura al interior de la manguera especial y sobre el intercambiador de calor, descritos anteriormente.

## **9.2 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EN EL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO.**

Las pruebas realizadas con el colector estuvieron encaminadas hacia dos objetivos fundamentales: La evaluación de la eficiencia del colector y la

determinación de la temperatura a la cual era posible la eliminación de la contaminación microbiológica presente en el agua.

**9.2.1 Pruebas térmicas del colector parabólico experimental:** En estas pruebas se midieron todas las temperaturas de interés en el colector con el fin de establecer unas condiciones medias de operación del colector que nos permiten evaluar su eficiencia. Las pruebas se realizaron durante veinticuatro días bajo diferentes condiciones climáticas. Por cuestiones prácticas se mostrarán y analizarán los últimos seis días de evaluación operacional.

Se evaluaron la temperatura de entrada del agua al colector (1), la temperatura de salida (Control), las temperaturas en diferentes puntos del tubo receptor (2 y 3), la temperatura del agua a la salida del intercambiador de calor (Inter), la temperatura del reflector-concentrador (Reflector) y el volumen colectado durante el intervalo (Vol).

La condición climática en la que se encontraba el sitio de prueba en ese momento se expresa como despejado (D), parcialmente nublado (PN), nublado (N) y despejado con una velocidad considerablemente alta de viento (DV). El resultado de estas pruebas, con su nomenclatura respectiva mostrada entre los parentesis, se presentan en las tablas 15 a la 20.

Analizando estos resultados se muestra que el colector en estado estacionario (sin movimiento del fluido), muestra una temperatura constante en los cuatro puntos sensados del colector, lo que implica que su perfil térmico no muestra oscilaciones, por lo que se demuestra que el calentamiento de éste es uniforme; en algunos datos los tres primeros puntos muestran un ligero aumento con respecto al punto de control, esto se debe a que en los tres primeros puntos estamos sensando realmente la temperatura externa del tubo receptor, mientras en el punto de control se ha sensado la temperatura real del agua dentro del tubo por medio de un termopozo, como se explicó anteriormente.

En estado transitorio (movimiento del agua, que es en el momento en que se está recolectando agua tratada), el colector muestra una tendencia térmica ascendente, lo que nos muestra un comportamiento normal en su funcionamiento.

El uso del intercambiador de calor nos muestra una ganancia térmica de 10°C aproximadamente en la temperatura del fluido a la entrada del colector (línea 1), con lo que estamos aumentando la eficiencia del sistema.

Vemos claramente la influencia positiva de las cubiertas de vidrio en ángulo, ya que con estas, el colector mantiene una inercia térmica en los momentos en que la velocidad del viento es considerablemente alta.

**Tabla 15.** Parámetros térmicos del colector parabólico. 10 de Diciembre de 2003.

Temperatura (°C), set point : 70 °C								
Hora	1	2	3	(Inter.)	(Reflector)	(Control)	Vol. (L)	Clima
09:30	43	47	51	34	31	58	0	D
09:40	38	50	54	32	32	65	0,62	D
09:50	39	48	54	35	33	64	0,9	D
10:00	57	61	65	34	35	66	0	D
10:10	47	51	56	36	36	62	1,03	D
10:20	46	52	57	35	36	68	0,81	D
10:30	48	53	58	35	36	67	1	D
10:40	49	54	59	38	36	65	0,91	DV
10:50	51	54	57	40	38	66	0,95	DV
11:00	49	56	60	38	36	69	1,33	DV
11:10	50	55	60	38	36	68	1	DV
11:20	53	56	57	35	33	66	0,99	DV
11:30	49	52	56	40	35	64	1,03	DV
11:40	57	57	61	38	37	67	1,05	DV
11:50	57	62	59	33	32	59	0	PN
12:00	61	61	61	34	35	60	0	PN
12:10	57	62	57	29	34	59	0	PN
12:20	52	52	53	30	33	53	0	PN
12:30	45	49	47	32	32	47	0	N
12:40	45	47	48	31	35	46	0	PN
12:50	49	50	49	32	37	48	0	PN
13:00	52	53	52	32	36	50	0	PN
13:10	57	56	55	32	37	54	0	PN
13:20	63	64	62	33	36	63	0	D
13:30	65	67	64	33	36	62	0	D
13:40	63	67	63	33	36	63	0	D
13:50	59	60	61	33	34	62	0	D
14:00	59	62	60	32	33	60	0	D
14:10	61	65	64	33	36	64	0,95	D
14:20	52	57	57	42	37	66	0,85	D
14:30	43	48	51	41	33	58	0,6	PN
14:40	44	48	49	37	33	54	0	PN
14:50	47	48	48	37	34	50	0	PN
15:00	41	45	45	34	32	46	0	N
15:10	48	47	47	32	32	47	0	PN
15:20	45	49	49	31	32	49	0	PN
15:30	45	49	49	31	31	48	0	PN
15:40	43	46	45	30	30	46	0	N
15:50	42	45	44	30	30	44	0	N
16:00	48	52	52	29	31	49	0	N
16:10	49	53	52	28	30	56	0	PN
16:20	51	54	53	28	32	54	0	PN
16:30	52	57	55	28	30	56	0	PN

**Fuente:** Autores.

Tabla 16. Parámetros térmicos del colector parabólico. 11 de Diciembre de 2003.

Temperatura (°C), set point : 70 °C								
Hora	1	2	3	(Inter.)	(Reflector)	(Control)	Vol. (L)	Clima
07:00	21	21	21	21	22	22	0	D
07:10	23	22	22	22	23	22	0	PN
07:20	22	22	22	22	23	23	0	PN
07:30	22	22	22	22	23	23	0	PN
07:40	23	23	23	23	23	23	0	N
07:50	23	24	23	22	23	24	0	N
08:00	24	24	24	23	24	24	0	N
08:10	24	24	24	23	24	24	0	N
08:20	25	25	25	23	24	25	0	N
08:30	25	25	25	24	25	25	0	N
08:40	25	26	26	24	25	25	0	N
08:50	26	27	27	24	27	26	0	N
09:00	26	27	27	25	26	27	0	N
09:10	27	28	28	25	26	26	0	N
09:20	27	28	28	25	27	28	0	N
09:30	28	29	29	26	28	29	0	N
09:40	29	31	31	26	29	32	0	N
09:50	31	34	34	27	30	34	0	N
10:00	32	34	34	27	30	34	0	N
10:10	33	35	35	27	30	35	0	N
10:20	33	35	35	27	30	35	0	N
10:30	34	37	36	27	30	36	0	N
10:40	34	37	37	28	30	36	0	N
10:50	35	38	37	28	31	37	0	N
11:00	35	38	37	28	31	37	0	N
11:10	36	38	38	29	32	37	0	N
11:20	36	38	38	28	32	37	0	N
11:30	38	40	40	28	32	38	0	N
11:40	40	41	41	29	32	38	0	N
11:50	41	42	41	30	32	40	0	N
12:00	38	41	41	29	32	40	0	N
12:10	41	44	44	30	34	43	0	N
12:20	41	44	43	31	33	43	0	N
12:30	41	44	43	30	33	43	0	N
12:40	41	43	42	30	32	42	0	N
12:50	41	44	43	31	32	42	0	N
13:00	42	45	44	31	33	43	0	N
13:10	43	45	44	31	33	43	0	N
13:20	44	46	45	31	34	44	0	N
13:30	43	44	44	31	34	44	0	N
13:40	42	43	45	30	34	43	0	N
13:50	41	44	41	31	33	42	0	N
14:00	41	44	42	31	32	42	0	N
14:10	41	43	43	31	31	42	0	PN
14:20	41	44	44	31	32	43	0	PN
14:30	44	46	46	31	31	44	0	PN
14:40	42	45	44	30	32	43	0	PN
14:50	42	44	43	31	31	42	0	PN
15:00	40	42	42	29	29	39	0	N
15:10	39	42	41	29	30	39	0	PN
15:20	42	44	44	29	30	42	0	PN
15:30	42	44	44	29	29	42	0	PN

15:40	42	44	43	29	30	42	0	PN
15:50	39	42	41	29	29	38	0	N
16:00	37	40	39	28	28	37	0	N
16:10	39	40	40	28	29	38	0	PN
16:20	39	41	40	28	29	38	0	PN
16:30	40	42	40	28	28	38	0	PN

*Fuente: Autores.*

**Tabla 17.** *Parámetros térmicos del colector parabólico. 12 de Diciembre de 2003.*

Temperatura (°C), set point : 70 °C								
Hora	1	2	3	(Inter.)	(Reflector)	(Control)	Vol. (L)	Clima
07:20	33	34	34	25	26	34	0	D
07:30	36	37	37	25	26	37	0	D
07:40	38	38	39	26	27	39	0	D
07:50	41	40	42	26	28	42	0	D
08:00	43	42	44	26	29	43	0	D
08:10	47	46	47	27	28	46	0	D
08:20	50	49	50	26	28	48	0	D
08:30	55	52	54	26	28	53	0	D
08:40	59	55	57	26	29	56	0	D
08:50	68	70	66	28	30	67	0	D
09:00	42	51	55	38	32	64	0,93	D
09:10	64	62	64	36	33	68	0	D
09:20	63	62	64	35	34	66	0,85	D
09:30	43	51	56	38	35	62	0,84	D
09:40	63	62	64	35	32	66	0	D
09:50	52	54	58	40	35	64	0,83	D
10:00	66	64	66	37	35	68	0	D
10:10	67	68	66	33	34	66	0	D
10:20	69	70	68	32	34	67	0	PN
10:30	66	68	65	33	30	65	0	PN
10:40	64	67	64	33	32	65	0	PN
10:50	67	69	63	32	33	64	0	PN
11:00	66	68	62	31	34	62	0	PN
11:10	67	69	66	32	34	67	0	PN
11:20	60	60	60	40	34	66	1,04	D
11:30	71	69	68	37	35	67	0	D
11:40	61	63	64	39	37	66	1	D
11:50	61	64	61	37	35	63	0	PN
12:00	67	71	64	35	33	65	0	PN
12:10	57	62	57	34	32	57	0	PN
12:20	76	73	70	33	37	66	0,87	D
12:30	46	53	57	41	36	64	0	D
12:40	49	58	58	40	32	49	0	PN
12:50	59	63	58	34	32	59	0	D
13:00	71	71	68	33	37	64	0	D
13:10	73	75	67	32	37	67	0	PN
13:20	71	74	68	32	33	65	0	PN
13:30	70	73	66	32	34	65	0,87	PN
13:40	45	52	57	42	35	63	0,95	DV
13:50	54	54	61	37	33	67	0	DV

14:00	56	60	60	34	32	61	0	PN
14:10	66	68	66	31	33	67	0	PN
14:20	67	68	69	31	32	65	0	PN
14:30	71	70	69	32	32	64	2,34	PN
14:40	46	53	55	40	32	64	0	PN
14:50	47	52	52	37	32	58	0	PN
15:00	66	67	63	31	32	67	0	PN
15:10	66	68	67	30	32	66	0	PN
15:20	59	60	58	30	30	61	0	PN
15:30	51	54	51	31	29	51	0	PN
15:40	49	50	49	30	29	49	0	PN
15:50	47	47	48	28	29	47	0	PN
16:00	46	48	50	27	29	48	0	PN
16:10	57	58	59	27	30	58	0	PN
16:20	60	60	61	26	31	60	0	PN

Fuente: Autores.

Tabla 18. Parámetros térmicos del colector parabólico. 13 de Diciembre de 2003.

Temperatura (°C), set point : 70 °C								
Hora	1	2	3	(Inter.)	(Reflector)	(Control)	Vol. (L)	Clima
07:20	30	29	35	21	27	34	0	PN
07:30	33	31	37	21	27	35	0	D
07:40	36	33	39	21	27	37	0	D
07:50	41	40	45	21	26	44	0	D
08:00	60	55	56	21	25	57	0	D
08:10	72	69	66	23	26	68	0,96	D
08:20	56	54	59	30	26	66	0,75	D
08:30	42	52	56	33	29	63	0,8	D
08:40	51	53	59	33	31	66	1,12	D
08:50	45	55	60	33	32	68	1,25	D
09:00	46	55	60	36	32	68	0,87	D
09:10	43	55	60	35	32	68	1,2	D
09:20	46	55	61	34	32	68	0,95	D
09:30	51	56	61	34	34	68	0,75	D
09:40	51	55	61	37	33	68	1,04	D
09:50	49	54	62	38	35	68	1,12	D
10:00	47	52	60	37	35	67	1,17	D
10:10	48	53	60	38	35	67	1,17	D
10:20	52	56	60	38	36	67	0,7	PN
10:30	47	55	59	37	37	68	0,88	D
10:40	50	58	62	37	37	68	0	PN
10:50	59	58	61	35	34	64	0,94	D
11:00	55	55	59	39	36	64	0,9	D
11:10	44	47	54	40	34	55	0	N
11:20	50	54	54	35	32	57	0	PN
11:30	62	62	63	32	33	60	1,02	D
11:40	37	50	52	40	35	60	0	PN
11:50	51	52	53	35	35	57	0	PN
12:00	63	61	60	35	38	60	0	PN
12:10	54	59	54	33	35	56	0	PN
12:20	51	55	51	32	33	50	0	N
12:30	44	50	48	31	33	48	0	N

12:40	47	50	48	31	35	47	0	N
12:50	40	49	48	31	34	47	0	N
13:00	46	49	47	31	33	47	0	PN
13:10	61	62	59	31	37	57	0	D
13:20	59	61	58	31	34	57	0	PN
13:30	54	56	56	31	31	53	0	N
13:40	52	55	54	30	31	53	0	PN
13:50	51	53	51	31	31	49	0	N
14:00	75	73	67	31	35	64	0	D
14:10	73	74	68	30	34	66	0	D
14:20	69	72	68	32	33	65	0	D
14:30	64	70	63	31	33	64	0	N
14:40	62	67	67	30	32	61	0	PN
14:50	56	61	57	30	30	57	0	N
15:00	53	58	55	30	30	55	0	N
15:10	59	64	60	30	30	60	0	D
15:20	62	62	59	30	31	59	0	PN
15:30	64	60	58	29	31	58	0	PN
15:40	71	70	66	28	32	66	0	D
15:50	52	55	57	39	31	60	0,94	D
16:00	60	61	61	33	30	61	0	D
16:10	65	65	63	31	29	62	0	D
16:20	64	65	62	31	30	62	0	PN
16:30	57	59	57	30	30	57	0	PN
16:40	58	60	58	29	30	59	0	D

Fuente: Autores.

Tabla 19 . Parámetros térmicos del colector parabólico. 15 de Diciembre de 2003.

Temperatura (°C), set point : 70 °C								
Hora	1	2	3	(Inter.)	(Reflector)	(Control)	Vol. (L)	Clima
07:20	23	21	23	20	19	22	0	D
07:30	26	24	25	21	22	25	0	D
07:40	27	24	25	22	24	25	0	PN
07:50	28	25	25	23	25	26	0	PN
08:00	30	26	26	23	25	27	0	PN
08:10	31	26	27	24	26	27	0	PN
08:20	32	28	28	24	27	29	0	PN
08:30	34	30	28	25	28	33	0	D
08:40	47	42	42	25	29	40	0	D
08:50	50	46	38	25	30	46	0	D
09:00	49	52	54	39	34	66	0,92	D
09:10	49	52	49	37	34	63	0,95	D
09:20	62	62	62	35	35	67	0,63	DV
09:30	47	55	61	36	35	68	1,38	D
09:40	49	56	64	40	34	70	1,38	D
09:50	47	56	62	38	35	70	1,37	D
10:00	43	55	58	38	35	68	1	PN
10:10	52	56	58	39	33	64	0,49	PN
10:20	54	54	58	34	32	57	0	PN
10:30	50	52	52	31	31	54	0	PN
10:40	49	55	59	31	34	67	0	D
10:50	43	52	58	42	36	64	1,04	D
11:00	54	58	61	39	36	67	0	D
11:10	52	56	57	40	36	66	0,89	D

11:20	47	51	51	36	30	56	0	N
11:30	47	48	51	34	30	50	0	N
11:40	57	59	55	32	35	55	0	PN
11:50	55	58	54	33	34	54	0	N
12:00	47	51	48	32	32	48	0	N
12:10	56	54	53	32	32	49	0	PN
12:20	50	50	49	31	31	47	0	PN
12:30	54	56	54	31	36	51	0	DV
12:40	55	55	53	30	32	50	0	D
12:50	56	57	56	31	37	53	0	PN
13:00	54	56	54	31	34	48	0	D
13:10	53	56	55	30	32	50	0	D
13:20	52	57	51	30	31	52	0	PN
13:30	58	60	62	31	32	60	0	D
13:40	64	64	63	31	33	57	0	D
13:50	53	70	74	33	34	70	1,23	D
14:00	45	55	64	41	38	69	0,95	D
14:10	50	56	63	40	35	68	0,35	PN
14:20	52	56	59	36	33	64	0	PN
14:30	54	58	60	39	33	62	0,98	PN
14:40	51	57	58	37	33	61	0	PN
14:50	51	54	56	40	32	60	0,74	D
15:00	41	48	52	42	31	64	0	D
15:10	63	64	63	32	32	66	0	PN
15:20	64	65	67	32	31	66	1,54	PN
15:30	39	45	52	37	30	61	0	PN
15:40	48	50	58	33	30	64	0	D
15:50	57	61	64	31	31	66	0	D
16:00	69	71	70	34	31	70	0,87	PN
16:10	60	64	66	33	32	67	0,72	D
16:20	67	67	69	32	31	67	0	D

Fuente: Autores.

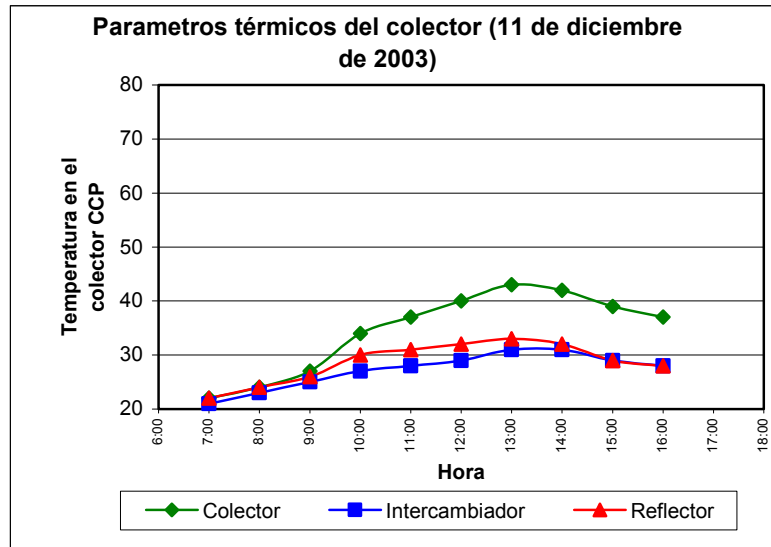
Tabla 20. Parámetros térmicos del colector parabólico. 16 de Diciembre de 2003.

Temperatura (°C), set point : 70 °C								
Hora	1	2	3	(Inter.)	(Reflector)	(Control)	Vol. (L)	Clima
08:00	33	32	30	29	28	28	0	D
08:10	36	34	35	29	30	31	0	D
08:20	39	35	37	30	30	37	0	D
08:30	42	39	40	30	30	40	0	D
08:40	55	55	52	29	31	53	0	D
08:50	66	66	63	28	32	61	0	D
09:00	73	74	70	28	32	67	0	D
09:10	43	50	55	37	33	66	1,01	D
09:20	57	55	60	37	34	67	0,76	D
09:30	51	54	59	37	34	67	0,89	D
09:40	48	57	65	37	34	70	0,82	D
09:50	46	56	62	39	36	68	0,84	D
10:00	49	56	62	38	37	69	0,9	D
10:10	50	54	62	38	35	68	1,52	D
10:20	49	55	62	40	37	68	1,41	D
10:30	46	54	60	39	37	68	0,98	DV
10:40	56	56	61	39	36	68	0,86	DV
10:50	54	59	62	42	38	69	0,82	DV

11:00	47	58	63	39	35	70	0,8	DV
11:10	52	57	63	40	37	68	1,54	DV
11:20	54	57	62	41	38	68	1,19	DV
11:30	50	56	61	41	38	69	0	DV
11:40	46	50	54	38	37	64	0,64	DV
11:50	44	47	54	40	37	65	1,07	D
12:00	47	50	57	41	37	67	1,14	D
12:10	53	57	60	40	36	64	0	D
12:20	60	62	63	38	36	66	0	DV
12:30	50	54	60	40	36	68	0,82	D
12:40	54	57	61	39	36	69	0,95	D
12:50	59	60	57	36	36	53	0	D
13:00	74	71	65	31	38	59	0	D
13:10	79	77	70	31	36	64	0	D
13:20	77	80	73	31	34	70	1,82	D
13:30	44	51	55	38	34	66	0,92	D
13:40	50	56	62	39	35	67	1,06	D
13:50	50	52	57	35	32	61	0,93	D
14:00	47	53	56	36	34	64	1,24	D
14:10	52	54	60	37	37	68	1,11	D
14:20	51	57	63	37	36	68	1,46	D
14:30	47	51	60	37	35	66	1,4	D
14:40	47	53	63	37	35	67	0,75	D
14:50	46	52	61	37	34	67	1,47	D
15:00	50	56	64	36	32	69	0,69	D
15:10	47	56	61	36	33	68	1,05	D
15:20	47	52	61	35	31	68	0,85	D
15:30	44	52	63	34	32	68	0	D
15:40	67	69	71	33	31	73	0,68	D
15:50	43	47	54	41	31	61	0,85	D
16:00	53	54	59	39	31	62	0	D
16:10	54	58	58	35	31	63	0	PN
16:20	47	53	52	34	29	54	0	PN

**Fuente:** Autores.

**Figura 73.** Grafica de los parametros térmicos del colector parabólico (11 de diciembre de 2003)



**Fuente:** Autores.

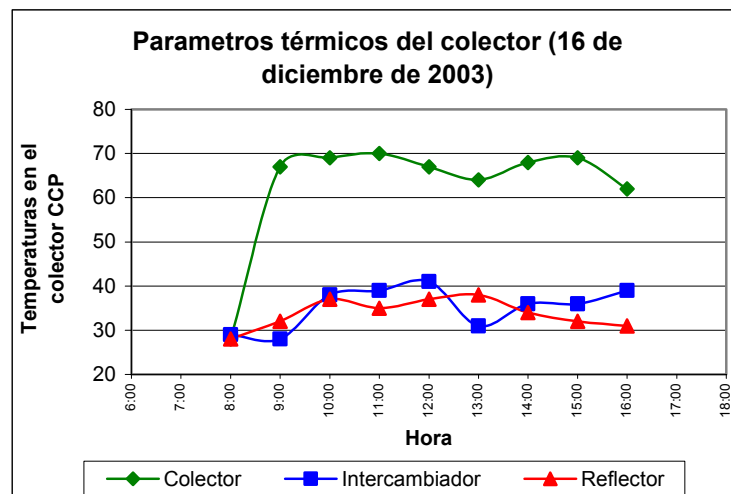
Es notoria la sensibilidad a los cambios de radiación directa por parte de este tipo de colectores; ya que con condiciones de nubosidad, las temperaturas en el tubo receptor descienden de una manera considerable. Esta afirmación se justifica en la prueba del día jueves 11 de Diciembre de 2003 (Figura 73), en el cual se presentó un día totalmente nublado y las temperaturas del colector no llegaron a los 50°C, razón por la cual el colector en esta prueba no obtuvo volumen de recolección de agua tratada. Además, se ve que en promedio la temperatura del reflector estuvo ligeramente por encima de la temperatura del intercambiador de calor, esto debido a que éste no tuvo ninguna función, ya que como dijimos este día no se obtuvo volumen de recolección de agua tratada, por lo que no existió fluido con el que se hiciera este intercambio calorífico.

Se puede observar la baja emisividad del material utilizado para el concentrador (foil de aluminio), esto se muestra en las bajas temperaturas

que se mantienen en el reflector-concentrador durante las pruebas de evaluación operacional del equipo (Temperaturas por debajo de los 40°C).

En la figura 74, vemos el colector con temperaturas promedio para la recolección de agua tratada; en este caso, vemos que las temperaturas en el tubo receptor están por encima de los 60 °C durante casi toda la prueba. Las temperaturas en el intercambiador están en promedio por encima de las temperaturas en el reflector, esto se debe a que el intercambiador está en pleno funcionamiento, ya que hay intercambio entre el agua tratada y el agua que entra al colector para ser tratada.

**Figura 74.** Grafica de los parámetros térmicos del colector parabólico (16 de diciembre de 2003)



**Fuente:** Autores.

**9.2.2 Pruebas de desinfección:** Es necesario establecer la capacidad del colector para eliminar contaminación microbiológica y la temperatura a la cual operará el sistema de control para garantizar que el agua sea completamente apta para consumo humano.

Se tomó una muestra de agua del Rio de Oro, en el sector de Bahondo ubicado en el municipio de Gíron. Los resultados del análisis microbiológico se muestran en la tabla 21, donde vemos que la concentración de coliformes de esta agua no tratada (460000 NMP de Coliformes totales y 43000 NMP de Coliformes fecales) es mucho más alta que la encontrada en el sitio de posible ejecución (1200 NMP de Coliformes totales y 43 NMP de coliformes fecales), donde NMP es Número mas probable de coliformes.

Lo importante de esta muestra de agua no es el sitio del cual se haya captado sino el grado de contaminación microbiológica presente en ella, que es en últimas el problema a resolver. Cabe anotar que este análisis fue realizado inmediatamente antes de iniciar con las pruebas e inmediatamente despues de terminarlal; esto se aclara, pues las bacterias al ser envasadas en un recipiente y a falta de refrigeración, tienen la capacidad de reproducirse y aumentar su concentración en el agua.

**Tabla 21.** Análisis microbiológico de aguas.

No PUNTO	COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES
MUESTRA INICIAL	460.000 N.M.P /ml	43.000 N.M.P /ml
PUNTO 30 GRADOS C.	460.000 N.M.P /ml	43.000 N.M.P /ml
PUNTO 35 GRADOS C.	460.000 N.M.P /ml	43.000 N.M.P /ml
PUNTO 37 GRADOS C.	460.000 N.M.P /ml	43.000 N.M.P /ml
PUNTO 40 GRADOS C.	460.000 N.M.P /ml	43.000 N.M.P /ml
PUNTO 45 GRADOS C.	240.000 N.M.P /ml	15.000 N.M.P /ml
PUNTO 53 GRADOS C.	43.000 N.M.P /ml	9.000 N.M.P /ml
PUNTO 60 GRADOS C.	4.000 N.M.P /ml	4.000 N.M.P /ml
PUNTO 65 GRADOS C.	< 3 /ml	< 3 /ml
PUNTO 70 GRADOS C.	< 3 /ml	< 3 /ml
PUNTO 81 GRADOS C.	< 3 /ml	< 3 /ml

**Fuente:** Autores.

El método utilizado para este análisis fue la fermentación en tubos múltiples; este método se describió anteriormente en el capítulo 4; en estos resultados cuando aparecen menos de 3 coliformes por mililitro ( $< 3/\text{ml}$ ) se descarta la presencia de estos coliformes.

Mirando los resultados de esta prueba podemos concluir que la temperatura para la eliminación de todos los microorganismos es de  $65^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, se descarta que el cobre esté ejerciendo un poder germicida, pues de ser así no se detectarían patógenos a las temperaturas por debajo de  $65^{\circ}\text{C}$ , teniendo en cuenta que entran en contacto directo con el cobre. Esto nos hace concluir que el efecto germicida es llevado a cabo por el efecto solar. Se recomienda entonces trabajar con un Set. Point de  $70^{\circ}\text{C}$  que como lo dijimos antes asegura la desinfección del agua, y con esto un rango de seguridad en los resultados microbiológicos del fluido tratado.

Si comparamos el alto grado de contaminación de las aguas utilizadas en este proyecto ( $460000\text{ NMP/ml}$ ) con las aguas tratadas en el colector de placa plana ( $46000\text{ NMP/ml}$ ), vemos que con el colector cilindro parabólico (CCP) el resultado de desempeño para la potabilización microbiológica de aguas altamente contaminadas, trabajando a una temperatura predeterminada de  $70^{\circ}\text{C}$  es de una altísima confiabilidad.

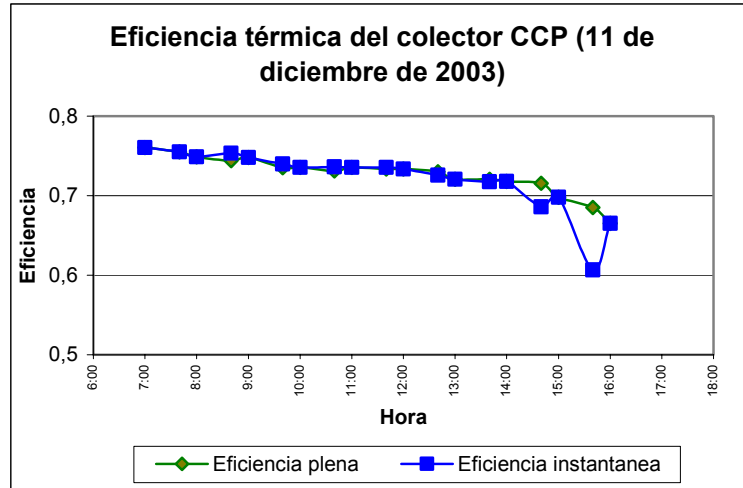
Las bacterias coliformes por no ser esporuladas no tienen la capacidad de reproducirse una vez han sido eliminadas; sin embargo, se recomienda el consumo del agua por lo menos en los cinco días siguientes a la desinfección para evitar problemas con la contaminación ambiental que podría afectar el agua una vez almacenada.

### **9.3 ESTIMACION DE LA EFICIENCIA TÉRMICA.**

Para efectos del presente proyecto, nos interesa evaluar la eficiencia instantánea del colector pues de ella depende el rendimiento térmico de nuestro sistema. En dicha evaluación se tomaron datos de radiación solar del lugar de realización de pruebas, suministrados por la *CDMB* (Ver anexo D) desde su estación metereológica UIS, correspondientes a los seis días de prueba mencionados anteriormente.

Debido a que se tienen datos de radiación total, la eficiencia se calculó a partir de la aproximación que la radiación difusa equivale aproximadamente a una tercera parte de la radiación directa, lo que nos indica que la radiación directa es aproximadamente las tres cuartas partes de la radiación total. Se halló la eficiencia instantánea y la eficiencia instantánea plena teniendo en cuenta que los datos de radiación se tienen para cada hora. De esta forma la eficiencia instantánea toma el valor de radiación de una hora, para la media hora anterior y posterior a esta; mientras que la eficiencia plena toma el valor de radiación de una hora para los siguientes sesenta minutos. Los resultados basados en las ecuaciones del capítulo 8, se presentan en las tablas 21 a 26. En estos resultados se encuentran dos de gran interés, que se presentan a continuación en las figuras 75 y 76.

**Figura 75.** Eficiencia térmica del colector parabólico (11 de diciembre de 2003)

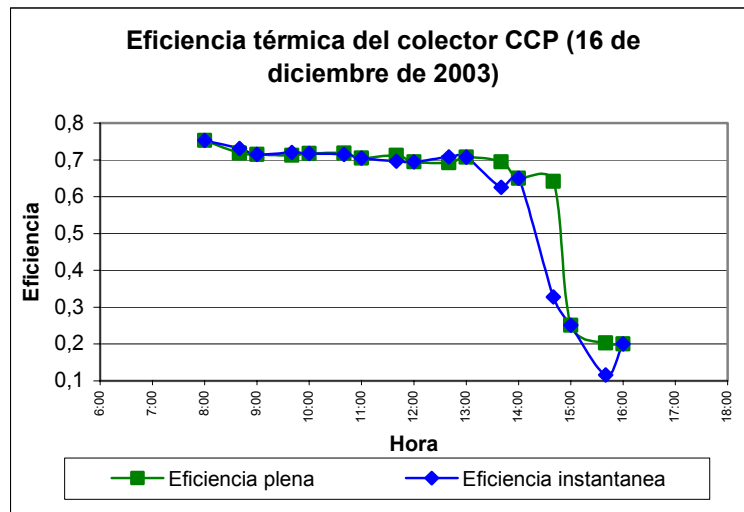


**Fuente:** Autores.

Analizando estos resultados, vemos que la eficiencia del colector se mantiene casi constante a través de los días de prueba; es importante resaltar que la eficiencia se mantiene aún cuando el colector no opera en flujo continuo, como es el caso de la prueba del día jueves 11 de Diciembre de 2003, donde no hubo recolección de agua tratada y su eficiencia media fué la mas alta de todas las pruebas analizadas.

Caso contrario se puede observar en la prueba del martes 16 de Diciembre, donde se obtuvo la mayor producción de agua tratada y la menor eficiencia media de todas las pruebas analizadas, debido a que el colector trabajó en pleno funcionamiento durante grandes intervalos de tiempo, lo que hace que baje su rendimiento térmico

**Figura 76.** Eficiencia térmica del colector parabólico (16 de diciembre de 2003)



Fuente: **Autores.**

Por último se determinó que la eficiencia promedio de este colector es de 0.6611, considerando este resultado como bueno para la operación de este tipo de dispositivos; además con esto se ha alcanzado uno de los objetivos iniciales, como es el de mejorar la eficiencia en sistemas de aprovechamiento de la energía solar, superando la eficiencia media dada por el colector de placa plana, estudiado por el Castillo-Barríos (2002); este último fue analizado en este proyecto, como punto de partida.

#### **9.4. INDICADORES DE DESEMPEÑO DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO (CCP)**

Uno de los parámetros importantes en este trabajo es medir la producción real del colector parabólico; esto implica mirar las capacidades volumétricas máximas y mínimas de recolección de agua tratada por  $m^2$  de área en uso de colector, así como la viabilidad que tendría este colector en implementación sobre este tipo de sistemas de potabilización, en comparación con el colector



Tabla 22. Eficiencias del Colector Parabólico. 11 de Diciembre de 2003.

HORA	Ta (°C)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	n plena	n instantánea
07:00	22,1	21	22	21,50	21,80	0,7605	0,7605
07:10	22,1	23	22	22,50	22,30	0,7605	0,7605
07:20	22,1	22	23	22,50	22,30	0,7551	0,7551
07:30	22,1	22	23	22,50	22,30	0,7551	0,7551
07:40	22,1	23	23	23,00	22,55	0,7551	0,7553
07:50	22,1	23	24	23,50	22,80	0,7496	0,7500
08:00	21,8	24	24	24,00	22,90	0,7490	0,7490
08:10	21,8	24	24	24,00	22,90	0,7490	0,7490
08:20	21,8	25	25	25,00	23,40	0,7440	0,7440
08:30	21,8	25	25	25,00	23,40	0,7440	0,7440
08:40	21,8	25	25	25,00	23,40	0,7440	0,7536
08:50	21,8	26	26	26,00	23,90	0,7390	0,7516
09:00	22,5	26	27	26,50	24,50	0,7482	0,7482
09:10	22,5	27	26	26,50	24,50	0,7508	0,7508
09:20	22,5	27	28	27,50	25,00	0,7456	0,7456
09:30	22,5	28	29	28,50	25,50	0,7430	0,7430
09:40	22,5	29	32	30,50	26,50	0,7351	0,7400
09:50	22,5	31	34	32,50	27,50	0,7299	0,7358
10:00	22,9	32	34	33,00	27,95	0,7357	0,7357
10:10	22,9	33	35	34,00	28,45	0,7335	0,7335
10:20	22,9	33	35	34,00	28,45	0,7335	0,7335
10:30	22,9	34	36	35,00	28,95	0,7313	0,7313
10:40	22,9	34	36	35,00	28,95	0,7313	0,7365
10:50	22,9	35	37	36,00	29,45	0,7291	0,7347
11:00	23,8	35	37	36,00	29,90	0,7355	0,7355
11:10	23,8	36	37	36,50	30,15	0,7354	0,7354
11:20	23,8	36	37	36,50	30,15	0,7354	0,7354
11:30	23,8	38	38	38,00	30,90	0,7336	0,7336
11:40	23,8	40	38	39,00	31,40	0,7336	0,7357
11:50	23,8	41	40	40,50	32,15	0,7299	0,7323
12:00	24,5	38	40	39,00	31,75	0,7335	0,7335
12:10	24,5	41	43	42,00	33,25	0,7283	0,7283
12:20	24,5	41	43	42,00	33,25	0,7283	0,7283
12:30	24,5	41	43	42,00	33,25	0,7283	0,7283
12:40	24,5	41	42	41,50	33,00	0,7300	0,7258
12:50	24,5	41	42	41,50	33,00	0,7300	0,7258
13:00	24,9	42	43	42,50	33,70	0,7208	0,7208
13:10	24,9	43	43	43,00	33,95	0,7208	0,7208
13:20	24,9	44	44	44,00	34,45	0,7187	0,7187
13:30	24,9	43	44	43,50	34,20	0,7187	0,7187
13:40	24,9	42	43	42,50	33,70	0,7208	0,7175
13:50	24,9	41	42	41,50	33,20	0,7230	0,7198
14:00	25,2	41	42	41,50	33,35	0,7180	0,7180
14:10	25,2	41	42	41,50	33,35	0,7180	0,7180
14:20	25,2	41	43	42,00	33,60	0,7155	0,7155
14:30	25,2	44	44	44,00	34,60	0,7129	0,7129
14:40	25,2	42	43	42,50	33,85	0,7154	0,6859
14:50	25,2	42	42	42,00	33,60	0,7180	0,6900
15:00	24,6	40	39	39,50	32,05	0,6982	0,6982
15:10	24,6	39	39	39,00	31,80	0,6982	0,6982
15:20	24,6	42	42	42,00	33,30	0,6853	0,6853
15:30	24,6	42	42	42,00	33,30	0,6853	0,6853
15:40	24,6	42	42	42,00	33,30	0,6853	0,6068
15:50	24,6	39	38	38,50	31,55	0,7025	0,6421
16:00	23,9	37	37	37,00	30,45	0,6653	0,6653
<b>Eficiencia Media:</b>						<b>0.7250</b>	<b>0.7222</b>

Fuente: Autores.

**Tabla 23. Eficiencias del Colector Parabólico. 12 de Diciembre de 2003.**

HORA	Ta (°C)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	n plena	n instantánea
07:20	21,50	33	34	33,50	27,50	0,7337	0,7337
07:30	21,50	36	37	36,50	29,00	0,7274	0,7274
07:40	21,50	38	39	38,50	30,00	0,7232	0,7402
07:50	21,50	41	42	41,50	31,50	0,7169	0,7368
08:00	22,60	43	43	43,00	32,80	0,7307	0,7307
08:10	22,60	47	46	46,50	34,55	0,7264	0,7264
08:20	22,60	50	48	49,00	35,80	0,7235	0,7235
08:30	22,60	55	53	54,00	38,30	0,7163	0,7163
08:40	22,60	59	56	57,50	40,05	0,7119	0,7258
08:50	22,60	68	67	67,50	45,05	0,6960	0,7145
09:00	24,00	42	64	53,00	38,50	0,7139	0,7139
09:10	24,00	64	68	66,00	45,00	0,7092	0,7092
09:20	24,00	63	66	64,50	44,25	0,7115	0,7115
09:30	24,00	43	62	52,50	38,25	0,7162	0,7162
09:40	24,00	63	66	64,50	44,25	0,7115	0,7080
09:50	24,00	52	64	58,00	41,00	0,7139	0,7106
10:00	24,90	66	68	67,00	45,95	0,6987	0,6987
10:10	24,90	67	66	66,50	45,70	0,7015	0,7015
10:20	24,90	69	67	68,00	46,45	0,7001	0,7001
10:30	24,90	66	65	65,50	45,20	0,7030	0,7030
10:40	24,90	64	65	64,50	44,70	0,7030	0,7179
10:50	24,90	67	64	65,50	45,20	0,7044	0,7190
11:00	25,40	66	62	64,00	44,70	0,7191	0,7191
11:10	25,40	67	67	67,00	46,20	0,7135	0,7135
11:20	25,40	60	66	63,00	44,20	0,7146	0,7146
11:30	25,40	71	67	69,00	47,20	0,7135	0,7135
11:40	25,40	61	66	63,50	44,45	0,7146	0,7010
11:50	25,40	61	63	62,00	43,70	0,7180	0,7054
12:00	26,00	67	65	66,00	46,00	0,7016	0,7016
12:10	26,00	57	57	57,00	41,50	0,7136	0,7136
12:20	26,00	76	66	71,00	48,50	0,7001	0,7001
12:30	26,00	46	64	55,00	40,50	0,7032	0,7032
12:40	26,00	49	49	49,00	37,50	0,7256	0,7183
12:50	26,00	59	59	59,00	42,50	0,7106	0,7001
13:00	26,60	71	64	67,50	47,05	0,6961	0,6961
13:10	26,60	73	67	70,00	48,30	0,6910	0,6910
13:20	26,60	71	65	68,00	47,30	0,6944	0,6944
13:30	26,60	70	65	67,50	47,05	0,6944	0,6944
13:40	26,60	45	63	54,00	40,30	0,6979	0,6718
13:50	26,60	54	67	60,50	43,55	0,6910	0,6620
14:00	26,30	56	61	58,50	42,40	0,6759	0,6759
14:10	26,30	66	67	66,50	46,40	0,6612	0,6612
14:20	26,30	67	65	66,00	46,15	0,6661	0,6661
14:30	26,30	71	64	67,50	46,90	0,6685	0,6685
14:40	26,30	46	64	55,00	40,65	0,6686	0,5165
14:50	26,30	47	58	52,50	39,40	0,6832	0,5553
15:00	25,30	66	67	66,50	45,90	0,4734	0,4734
15:10	25,30	66	66	66,00	45,65	0,4803	0,4803
15:20	25,30	59	61	60,00	42,65	0,5148	0,5148
15:30	25,30	51	51	51,00	38,15	0,5837	0,5837
15:40	25,30	49	49	49,00	37,15	0,5974	0,4816
15:50	25,30	47	47	47,00	36,15	0,6112	0,5051
16:00	24,90	46	48	47,00	35,95	0,5128	0,5128
<b>Eficiencia Media:</b>						<b>0.6615</b>	<b>0.6142</b>

**Tabla 24. Eficiencias del Colector Parabólico. 13 de Diciembre de 2003.**

HORA	Ta (°C)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	n plena	n instantánea
07:20	21,80	30	34	32,00	26,90	0,7284	0,7284
07:30	21,80	33	35	34,00	27,90	0,7258	0,7258
07:40	21,80	36	37	36,50	29,15	0,7206	0,7414
07:50	21,80	41	44	42,50	32,15	0,7024	0,7329
08:00	22,50	60	57	58,50	40,50	0,7091	0,7091
08:10	22,50	72	68	70,00	46,25	0,6928	0,6928
08:20	22,50	56	66	61,00	41,75	0,6958	0,6958
08:30	22,50	42	63	52,50	37,50	0,7003	0,7003
08:40	22,50	51	66	58,50	40,50	0,6958	0,7158
08:50	22,50	45	68	56,50	39,50	0,6929	0,7138
09:00	24,00	46	68	57,00	40,50	0,7115	0,7115
09:10	24,00	43	68	55,50	39,75	0,7115	0,7115
09:20	24,00	46	68	57,00	40,50	0,7115	0,7115
09:30	24,00	51	68	59,50	41,75	0,7115	0,7115
09:40	24,00	51	68	59,50	41,75	0,7115	0,7169
09:50	24,00	49	68	58,50	41,25	0,7115	0,7169
10:00	25,20	47	67	57,00	41,10	0,7095	0,7095
10:10	25,20	48	67	57,50	41,35	0,7095	0,7095
10:20	25,20	52	67	59,50	42,35	0,7095	0,7095
10:30	25,20	47	68	57,50	41,35	0,7083	0,7083
10:40	25,20	50	68	59,00	42,10	0,7082	0,7059
10:50	25,20	59	64	61,50	43,35	0,7131	0,7109
11:00	25,80	55	64	59,50	42,65	0,7086	0,7086
11:10	25,80	44	55	49,50	37,65	0,7208	0,7208
11:20	25,80	50	57	53,50	39,65	0,7181	0,7181
11:30	25,80	62	60	61,00	43,40	0,7140	0,7140
11:40	25,80	37	60	48,50	37,15	0,7141	0,6951
11:50	25,80	51	57	54,00	39,90	0,7181	0,7008
12:00	25,90	63	60	61,50	43,70	0,6991	0,6991
12:10	25,90	54	56	55,00	40,45	0,7063	0,7063
12:20	25,90	51	50	50,50	38,20	0,7170	0,7170
12:30	25,90	44	48	46,00	35,95	0,7206	0,7206
12:40	25,90	47	47	47,00	36,45	0,7224	0,7201
12:50	25,90	40	47	43,50	34,70	0,7224	0,7201
13:00	25,60	46	47	46,50	36,05	0,7157	0,7157
13:10	25,60	61	57	59,00	42,30	0,6949	0,6949
13:20	25,60	59	57	58,00	41,80	0,6949	0,6949
13:30	25,60	54	53	53,50	39,55	0,7032	0,7032
13:40	25,60	52	53	52,50	39,05	0,7032	0,6855
13:50	25,60	51	49	50,00	37,80	0,7115	0,6964
14:00	25,60	75	64	69,50	47,55	0,6553	0,6553
14:10	25,60	73	66	69,50	47,55	0,6499	0,6499
14:20	25,60	69	65	67,00	46,30	0,6526	0,6526
14:30	25,60	64	64	64,00	44,80	0,6554	0,6554
14:40	25,60	62	61	61,50	43,55	0,6636	0,6131
14:50	25,60	56	57	56,50	41,05	0,6745	0,6298
15:00	25,40	53	55	54,00	39,70	0,6479	0,6479
15:10	25,40	59	60	59,50	42,45	0,6289	0,6289
15:20	25,40	62	59	60,50	42,95	0,6326	0,6326
15:30	25,40	64	58	61,00	43,20	0,6364	0,6364
15:40	25,40	71	66	68,50	46,95	0,6060	0,5139
15:50	25,40	52	60	56,00	40,70	0,6289	0,5506
16:00	24,90	60	61	60,50	42,70	0,5621	0,5621
<b>Eficiencia Media:</b>						<b>0.6643</b>	<b>0.6301</b>

Fuente: Autores.

**Tabla 25. Eficiencias del Colector Parabólico. 15 de Diciembre de 2003.**

HORA	Ta (°C)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	n plena	n instantánea
07:20	21,40	23	22	22,50	21,95	0,7581	0,7581
07:30	21,40	26	25	25,50	23,45	0,7488	0,7488
07:40	21,40	27	25	26,00	23,70	0,7488	0,7522
07:50	21,40	28	26	27,00	24,20	0,7457	0,7500
08:00	22,20	30	27	28,50	25,35	0,7495	0,7495
08:10	22,20	31	27	29,00	25,60	0,7495	0,7495
08:20	22,20	32	29	30,50	26,35	0,7452	0,7452
08:30	22,20	34	33	33,50	27,85	0,7365	0,7365
08:40	22,20	47	40	43,50	32,85	0,7212	0,7421
08:50	22,20	50	46	48,00	35,10	0,7080	0,7360
09:00	24,50	49	66	57,50	41,00	0,7199	0,7199
09:10	24,50	49	63	56,00	40,25	0,7228	0,7228
09:20	24,50	62	67	64,50	44,50	0,7188	0,7188
09:30	24,50	47	68	57,50	41,00	0,7179	0,7179
09:40	24,50	49	70	59,50	42,00	0,7160	0,7117
09:50	24,50	47	70	58,50	41,50	0,7160	0,7117
10:00	25,00	43	68	55,50	40,25	0,7009	0,7009
10:10	25,00	52	64	58,00	41,50	0,7064	0,7064
10:20	25,00	54	57	55,50	40,25	0,7160	0,7160
10:30	25,00	50	54	52,00	38,50	0,7202	0,7202
10:40	25,00	49	67	58,00	41,50	0,7023	0,6918
10:50	25,00	43	64	53,50	39,25	0,7064	0,6967
11:00	25,50	54	67	60,50	43,00	0,6948	0,6948
11:10	25,50	52	66	59,00	42,25	0,6964	0,6964
11:20	25,50	47	56	51,50	38,50	0,7121	0,7121
11:30	25,50	47	50	48,50	37,00	0,7215	0,7215
11:40	25,50	57	55	56,00	40,75	0,7137	0,7257
11:50	25,50	55	54	54,50	40,00	0,7152	0,7269
12:00	26,10	47	48	47,50	36,80	0,7312	0,7312
12:10	26,10	56	49	52,50	39,30	0,7298	0,7298
12:20	26,10	50	47	48,50	37,30	0,7325	0,7325
12:30	26,10	54	51	52,50	39,30	0,7272	0,7272
12:40	26,10	55	50	52,50	39,30	0,7285	0,7156
12:50	26,10	56	53	54,50	40,30	0,7245	0,7100
13:00	26,20	54	48	51,00	38,60	0,7207	0,7207
13:10	26,20	53	50	51,50	38,85	0,7171	0,7171
13:20	26,20	52	52	52,00	39,10	0,7135	0,7135
13:30	26,20	58	60	59,00	42,60	0,6990	0,6990
13:40	26,20	64	57	60,50	43,35	0,7044	0,6706
13:50	26,20	53	70	61,50	43,85	0,6809	0,6328
14:00	26,30	45	69	57,00	41,65	0,6360	0,6360
14:10	26,30	50	68	59,00	42,65	0,6389	0,6389
14:20	26,30	52	64	58,00	42,15	0,6505	0,6505
14:30	26,30	54	62	58,00	42,15	0,6564	0,6564
14:40	26,30	51	61	56,00	41,15	0,6593	0,5319
14:50	26,30	51	60	55,50	40,90	0,6622	0,5385
15:00	26,00	41	64	52,50	39,25	0,4798	0,4798
15:10	26,00	63	66	64,50	45,25	0,4647	0,4647
15:20	26,00	64	66	65,00	45,50	0,4647	0,4647
15:30	26,00	39	61	50,00	38,00	0,5020	0,5020
15:40	26,00	48	64	56,00	41,00	0,4797	0,2030
15:50	26,00	57	66	61,50	43,75	0,4648	0,1734
16:00	25,20	69	70	69,50	47,35	0,0847	0,0847
<b>Eficiencia Media:</b>						<b>0.6535</b>	<b>0.7125</b>

**Fuente:** Autores.

**Tabla 26. Eficiencia instantánea del Colector 16 Diciembre de 2003.**

HORA	Ta (°C)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	n plena	n instantánea
08:00	22,7	33	28	30,5	26,6	0,7528	0,7528
08:10	22,7	36	31	33,5	28,1	0,7486	0,7486
08:20	22,7	39	37	38,0	30,4	0,7404	0,7404
08:30	22,7	42	40	41,0	31,9	0,7363	0,7363
08:40	22,7	55	53	54,0	38,4	0,7184	0,7309
08:50	22,7	66	61	63,5	43,1	0,7074	0,7231
09:00	24,2	73	67	70,0	47,1	0,7151	0,7151
09:10	24,2	43	66	54,5	39,4	0,7163	0,7163
09:20	24,2	57	67	62,0	43,1	0,7152	0,7152
09:30	24,2	51	67	59,0	41,6	0,7152	0,7152
09:40	24,2	48	70	59,0	41,6	0,7121	0,7198
09:50	24,2	46	68	57,0	40,6	0,7142	0,7216
10:00	25,8	49	69	59,0	42,4	0,7175	0,7175
10:10	25,8	50	68	59,0	42,4	0,7185	0,7185
10:20	25,8	49	68	58,5	42,2	0,7185	0,7185
10:30	25,8	46	68	57,0	41,4	0,7185	0,7185
10:40	25,8	56	68	62,0	43,9	0,7185	0,7149
10:50	25,8	54	69	61,5	43,7	0,7175	0,7138
11:00	26,5	47	70	58,5	42,5	0,7051	0,7051
11:10	26,5	52	68	60,0	43,3	0,7076	0,7076
11:20	26,5	54	68	61,0	43,8	0,7076	0,7076
11:30	26,5	50	69	59,5	43,0	0,7064	0,7064
11:40	26,5	46	64	55,0	40,8	0,7127	0,6963
11:50	26,5	44	65	54,5	40,5	0,7114	0,6946
12:00	26,2	47	67	57,0	41,6	0,6949	0,6949
12:10	26,2	53	64	58,5	42,4	0,6997	0,6997
12:20	26,2	60	66	63,0	44,6	0,6964	0,6964
12:30	26,2	50	68	59,0	42,6	0,6933	0,6933
12:40	26,2	54	69	61,5	43,9	0,6917	0,7082
12:50	26,2	59	53	56,0	41,1	0,7172	0,7276
13:00	27,1	74	59	66,5	46,8	0,7075	0,7075
13:10	27,1	79	64	71,5	49,3	0,6993	0,6993
13:20	27,1	77	70	73,5	50,3	0,6894	0,6894
13:30	27,1	44	66	55,0	41,1	0,6961	0,6961
13:40	27,1	50	67	58,5	42,8	0,6944	0,6253
13:50	27,1	50	61	55,5	41,3	0,7043	0,6456
14:00	27,0	47	64	55,5	41,3	0,6501	0,6501
14:10	27,0	52	68	60,0	43,5	0,6382	0,6382
14:20	27,0	51	68	59,5	43,3	0,6382	0,6382
14:30	27,0	47	66	56,5	41,8	0,6441	0,6441
14:40	27,0	47	67	57,0	42,0	0,6412	0,3273
14:50	27,0	46	67	56,5	41,8	0,6412	0,3273
15:00	26,6	50	69	59,5	43,1	0,2513	0,2513
15:10	26,6	47	68	57,5	42,1	0,2634	0,2634
15:20	26,6	47	68	57,5	42,1	0,2634	0,2634
15:30	26,6	44	68	56,0	41,3	0,2635	0,2635
15:40	26,6	67	73	70,0	48,3	0,2028	-0,1095
15:50	26,6	43	61	52,0	39,3	0,3476	0,1164
16:00	25,9	53	62	57,5	41,7	0,2004	0,2004
<b>Eficiencia Media:</b>						<b>0.6233</b>	<b>0.5985</b>

**Fuente: Autores.**

**9.4.1. Análisis comparativo en los indicadores de desempeño del colector cilindro parabólico y el colector de placa plana:** Teniendo como base los parámetros térmicos, la eficiencia térmica y el grado de potabilización del colector expuestos anteriormente, y con las referencias tomadas por Castillo y Barrios (2002), para el colector de placa plana, nos disponemos a hacer un análisis de la viabilidad operacional de nuestro colector.

Los resultados de estos dos colectores se muestran a continuación en la siguiente tabla (Tabla 27).

**Tabla 27.** Indicadores de desempeño de los colectores en estudio.

Indicador	Colector Parabólico (CCP)	Colector Placa Plana
Temperatura de Operación	70 °C	50 °C
Capacidad de producción (agua tratada por hora)	0 - 15 Litros.	0 - 10 Litros
Producción promedio de agua tratada por hora	7.5 Litros	5 Litros
Horas promedio de operación en el sitio de pruebas	5 Horas	5 Horas
Producción de agua tratada por m <sup>2</sup> de colector	4 Litros/m <sup>2</sup> hora	5 Litros/m <sup>2</sup> hora
Capacidad calorífica por m <sup>2</sup> de colector	0.933 KJ/m <sup>2</sup>	0.576 KJ/m <sup>2</sup>
Longitud de tubería por m <sup>2</sup> de colector	1 m	12 m
Área necesaria para un sistema de 1 m <sup>3</sup> /día en el sitio de pruebas.	27 m <sup>2</sup>	50 m <sup>2</sup>
Horas promedio en el sitio de posible ejecución	8 Horas	8 Horas
Área necesaria para un sistema de 1 m <sup>3</sup> /día en el sitio de posible ejecución. (Dato teórico)	16 m <sup>2</sup>	28 m <sup>2</sup>
Eficiencia instantánea térmica promedio	66.11 %	50.04 %

**Fuente:** Autores.

Observando estos resultados se aprecian claramente las ventajas que ofrece el colector cilindro parabólico construido en este proyecto, con respecto al colector de placa plana; es importante resaltar que los datos en comparación no tenían una misma base, pues el colector de placa plana fue evaluado a una temperatura predeterminada de 50 °C, diferente a la temperatura de operación del colector cilindro parabólico de 70 °C. De acuerdo con algunos indicadores teóricos (capacidad calórica y áreas necesarias), se hizo el

cálculo de los indicadores a 70 °C en el colector de placa plana al igual que en el colector cilindro parabólico, puesto que como se mencionó anteriormente, se determinó que ésta temperatura nos da un altísimo grado de confiabilidad en la potabilización del agua tratada. Sin embargo, para los demás indicadores se muestran los datos producto de la parte experimental de cada uno de los colectores.

Uno de los parámetros de gran interés es la longitud necesaria de tubería por metro cuadrado por colector, ya que aunque con el análisis del perfil de temperaturas en el colector de placa plana se mostró la posible reducción de la tubería en éste colector, la relación entre los dos colectores sigue siendo muy favorable para el colector cilindro parabólico, pues su necesidad de este accesorio es de una doceava parte con respecto al colector de placa plana.

Quizá los tres indicadores más importantes, son las áreas necesarias de exposición, las capacidades caloríficas, y por supuesto, la eficiencia térmica para cada uno de los colectores; estos indicadores nos permiten afirmar la gran ventaja y con esto, el gran avance de la investigación en esta rama, al implementar el colector cilindro parabólico, puesto que su capacidad calorífica y eficiencia térmica es mucho más alta que la que se podría esperar con el colector de placa plana, lo que demuestra, la alta reducción en la necesidad de área expuesta para cualquier sistema de potabilización microbiológica que se haga por este medio, debido a que el colector cilindro parabólico construido para este proyecto posee un factor de concentración muy alto con respecto al colector de placa plana.

#### **9.4.2. Determinación de costos del colector cilindro parabólico (CCP):**

Un análisis importante en todo proyecto, es mirar su factibilidad económica, como último parámetro de medida para la viabilidad de ejecución del colector

cilindro parabólico (CCP). En la tabla 28 se presentan los costos finales de cada una de las partes del colector construido en este proyecto.

Como se observa en esta tabla, el mayor costo del colector cilindro parabólico en mención, es el sistema de control térmico, ya que los controladores y la válvula solenoide constituyen el rubro de mayor valor. Las unidades complementarias: El intercambiador de calor, las cubiertas de vidrio en ángulo y mangueras junto con el concentrador constituyen las partes del colector que siendo unas de las más importantes presentan comparativamente el menor costo del equipo.

**Tabla 28.** Costos del colector cilindro parabólico

<b>Descripción</b>	<b>Valor (\$ pesos)</b>
Esqueleto	370.000
Concentrador	100.000
Tubo receptor	85.000
Sistema de movimiento	20.000
Sistema de control térmico	710.000
Armazón	280.000
Unidades complementarias	125.000
<b>Total</b>	<b>1'690.000</b>

**Fuente:** Autores.

A pesar que el costo de este equipo en comparación con los precios del mercado internacionales en equipos similares resulta muy económico, al fabricarse este tipo de colector en serie, ofrecerá un costo aún más económico, permitiendo un mayor acceso por parte de la población de escasos recursos, pudiendo convertirse en una solución viable para las comunidades rurales de nuestro país, y regiones como el Magdalena Medio.

**Tabla 29.** Parámetros de factibilidad económica del colector cilindro parabólico (CCP)

INDICADORES	COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO (CCP)
Precio del colector por m <sup>2</sup>	\$ 450.000
Sistema solar de bombeo	\$ 3'250.000
Costo total del sistema de potabilización por m <sup>2</sup> de colector	\$ 3'700.000
Litros de agua tratada por m <sup>2</sup> día en el sitio de pruebas	25 Litros
Precio por litro de agua tratada (5años de operación), en el sitio de pruebas	\$ 1.184
Litros de agua tratada por m <sup>2</sup> día en el posible sitio de instalación	40 Litros
Precio por litro de agua tratada (5años de operación), en el posible sitio de instalación	\$ 255

**Fuente:** Autores.

Analizando los resultados de la tabla 29, se observa la factibilidad de implementación de este colector, como una alternativa viable a corto plazo, con una duración de 5 años en su uso sin mantenimiento adicional, proyectando la región del Magdalena Medio para su instalación. El costo del sistema de bombeo se tomó en referencia al análisis expuesto por Castillo y Barrios (2002), para la implementación de sistemas de potabilización con energía solar.

En la tabla 30 se presenta una proyección estimada en los costos de un sistema para la potabilización microbiológica de 1 m<sup>3</sup> /día, utilizando el colector cilindro parabólico (CCP). El sistema solar de bombeo consta de una bomba que funciona con un panel fotovoltaico.

**Tabla 30.** Parámetros de factibilidad económica para un sistema de 1 m<sup>3</sup>/día con colectores cilindro parabólico (CCP)

INDICADORES	COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO (CCP)
<b>POSIBLE SITIO DE INSTALACIÓN</b>	
Precio estimado del sistema de colectores	\$ 1'750.000
Sistema solar de bombeo	\$ 3'250.000
Costo total del sistema de potabilización	\$ 5'000.000
Precio por litro de agua tratada (5años de operación)	\$ 3,00
<b>SITIO DE EJECUCION DE PRUEBAS.</b>	

Precio estimado del sistema de colectores	\$ 3`250.000
Sistema solar de bombeo	\$ 3`250.000
Costo total del sistema de potabilización	\$ 6`500.000
Precio por litro de agua tratada (5años de operación),	\$ 3,50

**Fuente:** Autores.

Como es de esperarse al trabajar para sistemas a mayor escala, el costo de producción baja considerablemente. En este caso, para el sistema planteado los costos de producción se hacen mínimos, considerando que tanto los equipos anexos como el sistema solar de bombeo es el mismo que se analizó en la tabla 29.

El incremento en la inversión inicial está en el sistema de colectores cilindro parabólicos (CCP) que se deben usar, pero debido a su gran producción, el precio estimado por litro de agua tratada presenta un costo ínfimo, tanto en el sitio de pruebas como en la zona a instalar, a pesar que en el sitio de prueba el área requerida es mayor, incrementando el costo de los equipos.

## 10. CONCLUSIONES

La radiación solar disponible en Bucaramanga ( $540 \text{ W/m}^2$ ) por año se considera aceptable, sin llegar a niveles óptimos ( $800 \text{ W/m}^2$ ), los cuales pueden encontrarse en ciudades que posean las características de radiación solar similares a la ciudad de Barrancabermeja, lugar donde se tiene proyectado la instalación del colector cilindro parabólico.

Por su diseño modular, el colector cilindro parabólico construido en este proyecto, ofrece la ventaja de acoplarse a diferentes sistemas, según la necesidad de obtener volúmenes específicos de agua microbiológicamente potable, tal como se mostró en la determinación de área necesaria para la obtención de  $1\text{m}^3$  /día.

Este colector fué construido con Foil de aluminio como reflector, mostrando una buena operabilidad, al lograr un alto grado de reflectividad y baja emisividad, según se muestra en las bajas temperaturas que presenta el material, las cuales estuvieron por debajo de los  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La instalación de unidades complementarias en nuestro colector, principalmente las cubiertas de vidrio en ángulo y el intercambiador de calor, redujeron considerablemente las pérdidas térmicas, mostrando una eficiencia que en promedio superó el 65%, considerándose alto este valor de eficiencia en este tipo de colectores.

Realizando el perfil de temperatura del colector de placa plana, este presentó una sobredimension de casi un 50% en cuanto a la relación longitud de

tubería/ área de exposición solar; es decir que se utilizó más tubería por donde se transporta el fluido con respecto al área de exposición para captar la radiación solar. Se recomienda utilizar el menor número de codos posible para optimizar el diseño de este tipo de colector.

La reducción en la necesidad de área expuesta con el colector cilindro parabólico construido en este proyecto, en comparación a sistemas con colectores de placa plana es de aproximadamente un 40%.

Si bien nuestro colector cilindro parabólico (CCP) muestra una eficiencia térmica más alta que los colectores de placa plana, también es notoria la sensibilidad a los cambios de radiación directa, ya que con condiciones de nubosidad las temperaturas en el tubo receptor descienden de una manera considerable, alcanzando en nuestro caso un descenso de 20 °C en un tiempo prolongado de esta condición.

Es importante resaltar que el desempeño inicial esperado del colector cilindro parabólico (CCP) de este proyecto, no fué posible alcanzarlo debido a la adversidad de las condiciones climatológicas durante el periodo de experimentación; la ciudad de Bucaramanga no presentó continuidad en el estado del tiempo, es decir que en general se presentaron días en los cuales la mitad de las horas fueron soleadas y la otra mitad lluviosas o con nubosidades.

La temperatura para la eliminación de todos los microorganismos es de 65°C. Se descarta que el cobre este ejerciendo un poder germicida, pues de ser así no se detectarían patógenos a las temperaturas por debajo de 65° C, teniendo en cuenta que entran en contacto directo con el cobre. Esto nos permite concluir que el efecto germicida es llevado a cabo por la radiación solar. Si comparamos el alto grado de contaminación de las aguas utilizadas en este proyecto (460000 NMP/ml) con las aguas tratadas en el colector de

placa plana (46000 NMP/ml), vemos que con el colector cilindro parabólico (CCP) el resultado de desempeño para la potabilización microbiológica de aguas altamente contaminadas, trabajando a una temperatura predeterminada de 70 °C es de una altísima confiabilidad.

La falta de instrumentos para medir la radiación solar directa, puede causar errores en el calculo de las eficiencias del colector; ya que sin estos instrumentos, el calculo se hace con base a aproximaciones en la relacion entre radiación solar total y radiación solar directa.

El colector cilindro parabólico construido para este proyecto posee un factor de concentración muy alto con respecto al colector de placa plana, lo cual nos permite afirmar la importancia y el gran avance de la investigación en esta rama, al implementar el colector cilindro parabólico (CCP), puesto que su capacidad calorífica y eficiencia térmica es mucho más alta que la que se podría esperar con el colector de placa plana.

Midiendo el costo-beneficio, donde el precio del colector es de \$1`690.000 para proporcionar un volumen de 25 litros de agua potabilizada por m<sup>2</sup> de colector, a un costo de \$1.184 en el sitio de pruebas, para un tiempo de operación de 5 años sin mantenimiento adicional, este colector muestra los beneficios tanto económicos como sociales, constituyéndose en una solución viable para las comunidades rurales de nuestro país y regiones como el Magdalena Medio, más aún si se piensa en la construcción de estos sistemas a mayor escala y en forma masiva.

## **11. RECOMENDACIONES**

Tomando en cuenta las ventajas y desventajas que presentan los colectores cilindro parabólicos (colectores compuestos) y los colectores de placa plana, se sugiere realizar un estudio de factibilidad sobre la implementación combinada de estos colectores, para sistemas de potabilización a una escala más grande que la presentada en este proyecto.

Aunque teóricamente no es factible la intervención del cobre como agente activo en la desinfección del agua; se recomienda realizar un seguimiento de las concentraciones de este metal en el agua ya tratada.

Como se vió, el mecanismo de movimiento del colector cilindro parabólico es uno de los parámetros importantes; por tal razón, se recomienda profundizar en el estudio de alternativas que optimicen este mecanismo.

El Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM), continúa trabajando en estos aspectos con el fin de hacer de este sistema de potabilización, una alternativa viable para los problemas de agua potable de las diferentes comunidades en el país.

## BIBLIOGRAFIA

CABLE, Robert G. Solar Thermal Parabolic Trough Power Plants. Raleigh NC, Estados Unidos: Duke Solar, 2000. [www.dukesolar.com](http://www.dukesolar.com)

CARDOZO, Carolina. Energía solar aplicada a la potabilización de aguas. Provincia de Santa Fé, Argentina. 2002.  
[http://www.aidisar.org/pajdaganadores\\_2002.htm](http://www.aidisar.org/pajdaganadores_2002.htm)

CASTILLO, Edgar y BARRIOS, Marlon. Desarrollo de un sistema prototipo para potabilización de agua mediante energía solar en comunidades rurales del Magdalena Medio. Bucaramanga, Colombia: UIS. 2002. p.95-159.

CHILE. Departamento de medio ambiente. El Agua. Chile: Ingeniería Ambiental y Medio Ambiente. 2002.  
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/agua.html>

COSTA RICA. Oficina Regional para Centroamérica de Biomass Users Network. Manuales sobre energía renovable: solar térmica. San José, C.R. Biomass Users Network (BUN-CA), 2002. 1ed. <http://www.bun-ca.org>

ESPAÑA. Ministerio del medio ambiente. Nuevas Tecnologías para la purificación de aguas: Contaminación de aguas subterráneas. Gobierno de España. 2003.  
<http://www.miliarium.com/PremiosMiliarium/2003/TratamientoAguas/TratamientoAguas.pdf>

\_\_\_\_\_. Centro para el control y la prevención de Enfermedades Infecciosas. Manual de sistema de agua segura. Madrid. 2002.  
<http://www.cdc.gov.es>

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy (DOE). Sun\*Lab–Advancing Concentrating Solar Power Technology. Washington: DOE national laboratories, 2000. <http://www.eren.doe.gov/sunlab>

\_\_\_\_\_. Concentrating Solar Power Program Overview. Washington: Sandia Lab, 1999.  
<http://www.energyland.sandia.gov/sunlab/sanpshop/overview.htm>

\_\_\_\_\_. Overview of solar thermal technologies. Washington: DOE national laboratories, 1997. [http://www.eren.doe.gov/csp/pdfs/solar\\_overview.pdf](http://www.eren.doe.gov/csp/pdfs/solar_overview.pdf)

FIERRO, Julieta. El sistema solar: la familia del sol. México. 2002.  
[http://www.omega.ilce.edu.mx:3000/sities/ciencia/volumen2/ciencia3/62/htm/sec\\_9.htm](http://www.omega.ilce.edu.mx:3000/sities/ciencia/volumen2/ciencia3/62/htm/sec_9.htm)

FERNANDEZ, D, Pedro. Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Universidad de Cantabria, España: Departamento de ingeniería eléctrica y energética.  
<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/solar/PDFs/Solar1.pdf>

GALETTI, Jonatan. Todo sobre el sistema solar: el sol. Buenos Aires: Argentina. 2000. <http://www.todosobreelsistemasolar.com.ar/sol.htm#evolu>

HERNANDEZ, Hildebrando. Diseño, construcción y evaluación experimental de un destilador solar en asbesto-cemento. Bucaramanga, Colombia: UIS.1982. p.49-55.

KALOGIROU, Soteris et al. Design and performance characteristics of a parabolic-trough solar-collector system. Nicosia, Cyprus: Applied Energy 47,1994. p. 341-354.

\_\_\_\_\_. Low cost high accuracy parabolic troughs construction and evaluation. En : WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS. Nicosia, Cyprus .1994. p. 384-386.

KERN Q, Donald. Procesos de transferencia de calor. México: Compañía editorial continental. 2001. p.905.

LEÓN, P et al. Efficiency improvement of parabolic trough collectors by means of additional end reflectors. Plataforma solar de Almería, España. 2001. <http://wire0.ises.org/wire/doclibs/SWC1999.nsf>

MARRUGO, Antonio y QUINTANA, Juan. Diseño y construcción de un prototipo de destilador solar multiefecto. Bucaramanga, Colombia: UIS. 2001. p.116-182.

MEIERHOFER, Regula y WEGELIN, Martín. Desinfección Solar del Agua. Lima, Perú: Fundación Sodis, América latina, 2003. p. 9-26.  
<http://www.sodis.ch>

MILLS. F, Antony. Transferencia de calor. España: Iberoamericana S.A. 1995. Apéndice A.

\_\_\_\_\_. Transferencia de calor. España: Iberoamericana S.A. 1995. p. 280-305.

PRICE, Hank y KEARNY, David. Parabolic-trough technology roadmap. Boulder, Colorado: U.S. Department of energy concentrating solar power program.1999. p.1-35.

ROMERO ÁLVAREZ, Manuel. Energía solar termoeléctrica. Plataforma solar de Almería, España: Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas (CIEMAT), 2002. p.1-21.

SANCHEZ M, Carlos et al. Atlas de radiación solar en Colombia. Bogotá, Colombia: Ministerio de minas y energía. 1993. p. 1-60.

UNIVERSIDAD DE TEXAS. Observatorio Mc Donald. El sol: guía del sistema solar. Austin, Texas. 2003.  
<http://www.radiouniverso.org/resources/gdss/sol.html>

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA. Laboratorio de evaluación solar: Instrumentos actuales. Valparaíso, Chile. 2003.  
<http://www.labsolar.utfsm.cl/gal-inst.asp>

## ANEXO A. INSTRUMENTACIÓN PARA LA OBSERVACIÓN DEL FLUJO SOLAR.

Los aparatos utilizados en la medición de la radiación solar, se dividen en tres tipos principales, según sea la medida a realizar; a continuación se describen algunos de ellos.

### ▪ **HELIÓGRAFOS.**

**Los heliógrafos sirven para medir la duración de la luz solar**, que se puede definir como el intervalo de tiempo durante el cual se ve el disco solar y determinan los períodos del día durante los cuales la intensidad de la radiación directa es superior a un cierto umbral, que está reconocido a nivel mundial y vale  $120 \text{ W/m}^2$ .

#### ***Heliógrafo de Campbell-Stokes.***



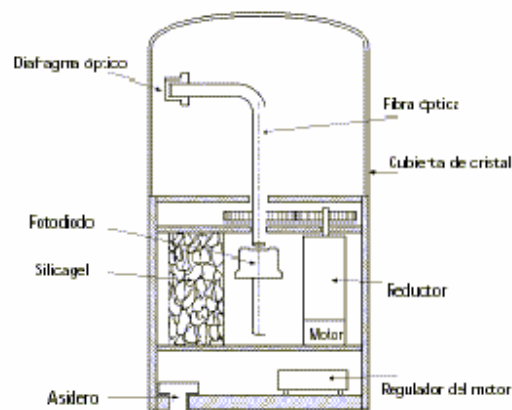
**Fuente:** Laboratorio de Evaluación Solar. Universidad técnica Federico Santa María

El intervalo de tiempo transcurrido entre la salida y la puesta de Sol, define el máximo tiempo de radiación solar diaria posible, para un día concreto del año y para un lugar determinado. Los heliógrafos no comienzan a registrar la radiación solar hasta que la radiación directa es superior a un cierto valor, variable de un tipo de aparato a otro.

El registrador de referencia intermedio de luz solar (IRSR) tiene un mínimo de intensidad de  $210 \text{ W/m}^2$ , equivalente a  $1/5$  de la máxima posible; debido a las variaciones entre los instrumentos, este umbral puede oscilar entre  $7$  y  $28 \mu\text{W/cm}^2$ .

Entre los heliógrafos más utilizados podemos destacar los de Campbell-Stokes y Denis-Jordan.

### ***Heliógrafo de Denis-Jordan.***



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.*

En el Campbell-Stokes, la radiación directa se concentra con ayuda de una lente esférica sobre un papel coloreado de textura definida; enseguida se produce una quemadura o una decoloración del papel indicando que la radiación directa es más o menos intensa, siendo la longitud de la misma proporción a la duración de la radiación solar, efectuándose su examen bajo normas muy estrictas. El proceso es manual.

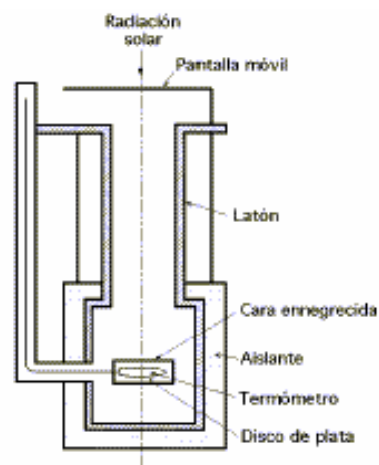
El heliógrafo de Denis-Jordan, está constituido por una fibra óptica acodada  $90^\circ$ , accionada por un motor de corriente continua, girando a razón de una

vuelta por cada 1/100 de hora. La extremidad de la fibra óptica recibe la radiación solar a través de un diafragma y una célula fotoeléctrica situada en el otro extremo de la fibra produce una señal cuya magnitud es proporcional a la intensidad de la radiación.

#### ▪ **PIRHELIÓMETROS.**

**Los pirheliómetros sirven para medir la radiación solar directa.** Tienen una abertura colimada y una cara de recepción que debe permanecer siempre normal a los rayos solares. El pirheliómetro recibe energía sólo del disco solar y de un estrecho anillo de cielo contiguo, a través de un tubo largo; este aparato está dotado de un dispositivo automático de seguimiento del Sol. El error provocado por una abertura excesiva, aumenta en proporción a la cantidad de radiación del cielo admitida.

#### **Pirheliómetro de Abbot.**



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura.* Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.

El pirheliómetro de disco de plata de Abbot, mostrado en la figura, permite deducir la intensidad de la radiación directa a partir de lecturas termométricas sucesivas, abriendo y cerrando alternativamente la entrada del aparato, estando sometido a unas normas muy estrictas, ya que el tiempo de

exposición tiene que ser muy preciso. Consiste en un disco de plata ennegrecida por una de sus caras, con un agujero ciego en el que se inserta un termómetro aislado por un manguito de madera. El disco está situado en el fondo de un tubo de latón que se puede obturar con ayuda de una pantalla móvil situada en el otro extremo; de esta forma se puede exponer el disco durante un tiempo determinado a la radiación solar, actuando el aislante como elemento refrigerante. El ángulo de abertura es de  $5,7^\circ$ .

▪ **PIRANÓMETROS.**

**Los piranómetros sirven para medir la radiación global, directa y difusa,** que se recibe en todas direcciones, por lo que el instrumento tiene que descansar sobre una base horizontal. La banda de frecuencias medida por el piranómetro está comprendida entre  $0,3 \mu\text{m}$  y  $3 \mu\text{m}$ ; si está protegido de la radiación directa por un anillo protector desvanecedor, entonces mide sólo la radiación difusa.

Los piranómetros más usuales se basan en la detección de la diferencia de temperaturas entre una superficie negra y una superficie blanca mediante termopilas o células fotoeléctricas, que deben estar protegidas del viento y compensadas para cambios de temperatura ambientales, mediante una doble semiesfera de vidrio, para suprimir los fenómenos de convección. Mediante un nivel se consigue la horizontalidad del aparato.

**Piranómetro de Kipp y Zonen.**



**Fuente:** Laboratorio de Evaluación Solar. Universidad técnica Federico Santa María

El piranómetro de Kipp y Zonen, está constituido por una termopila contenida en una caja metálica cerrada en su parte superior por dos hemisferas de cristal de 3 a 5 cm. de diámetro y 2 mm de espesor.

La caja está fijada sobre un zócalo metálico y la pila está protegida de la radiación difundida por el suelo por una gran corona blanca horizontal circular que actúa también como pantalla térmica. La termopila está formada por una serie de 14 termopares, láminas planas de 10 mm de longitud, 1 mm de anchura y 5 mm de espesor, dispuestas en un plano horizontal, en el que las extremidades están soldadas a unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza.

El conjunto está protegido por un barniz negro mate especial que absorbe la radiación. El calor emitido al nivel de la superficie negra es evacuado en parte por conducción y el resto por radiación y convección.

El flujo térmico por conducción se transmite a la masa de la termopila que es buena conductora; por el contrario, las láminas son débilmente conductoras, por lo que aparece una diferencia de temperatura del orden de 20 °C entre la línea mediana y las extremas y, por consiguiente, una diferencia de potencial del orden de 500 mV/°C.

El aparato se calibra comparándole con otro ya calibrado que indica el valor ( $I_{dir}$ ) de la radiación directa. El piranómetro facilita el valor de la radiación global  $I_{T(h)}$ . La radiación global que incide sobre una superficie horizontal es:

$$I_{T(h)} = I_{dif(h)} + I_{o(h)} * \cos \theta_s$$

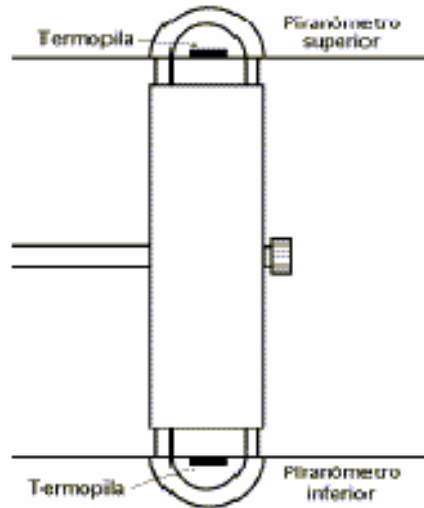
La radiación directa se elimina poniendo el aparato a la sombra, con ayuda de una pantalla, para que la superficie sensible del piranómetro capte sólo la radiación difusa.

▪ ***ALBEDÓMETRO.***

Para medir la radiación difusa, o radiación del cielo, se adapta al piranómetro una pantalla destinada a ocultar la radiación solar directa sin esconder, sin embargo, una parte importante del cielo.

Se puede utilizar un disco móvil dotado de un movimiento ecuatorial, en el que la sombra se proyecta permanentemente sobre la superficie sensible del piranómetro, o también se puede adaptar una banda parasol que se desplaza manualmente a lo largo del año. Se necesita una corrección para tener en cuenta la radiación difusa interceptada.

## Albedómetro.



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura.* Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.

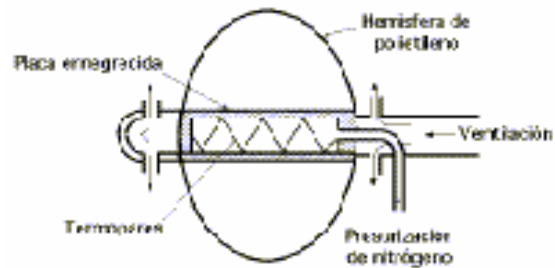
### ▪ **PIRRADIÓMETRO DIFERENCIAL O BILANMETRO.**

Estos aparatos, muy delicados, miden la diferencia entre las radiaciones dirigidas hacia el suelo y hacia el espacio y permiten establecer dos balances radiactivos. Poseen una doble superficie sensible, una vuelta hacia arriba y la otra hacia abajo.

Están destinados a medir radiaciones de longitud de onda comprendidas entre  $0,3 \mu\text{m}$  y  $100 \mu\text{m}$ , mediante detectores térmicos (termopilas de doble cara) protegidos por una cúpula de polietileno especial, transparente de hasta 15 mm y barridos por una corriente de nitrógeno para evitar las

condensaciones que falsearían las medidas a causa de la absorción de radiación infrarroja por el agua.

**Bilanmetro.**



**Fuente:** FERNANDEZ, Pedro. *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura.* Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.

**ACTINOGRAFO BIMETÁLICO.**

Robitzsch Fuess. Registra el transcurso de la irradiación 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 irradiación, y tres tiras bimetálicas blancas, dispuestas debajo de ellas, cuya tarea es compensar el influjo 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 (las de los rayos ultravioletas e infrarrojos más allá de unos  $2\mu\text{m}$ ).

*Actinógrafo bimetálico.*



**Fuente:** *Laboratorio de Evaluación Solar. Universidad técnica Federico Santa María*

## **ANEXO B. FOTOGRAFIAS DEL COLECTOR PARABÓLICO (CCP)**

Vista superior del colector cilindro parabólico (CCP).



Vista del sistema de potabilización microbiológica con el colector cilindro parabólico en el sitio de pruebas (Terraza de la Escuela de Ingeniería Química – UIS).



Vista lateral del sistema de potabilización microbiológica con el colector cilindro parabólico en el sitio de pruebas (Terraza de la Escuela de Ingeniería Química – UIS).







CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES  
**ANALISIS MICROBIOLÓGICO DE AGUAS**  
**FORMATO DE RESULTADOS**

Nº 01

CLASE DE MUESTRA: AGUA NO TRATADA  
LUGAR DE RECOLECCION: RIO DE ORO  
FECHA DE RECOLECCION: DICIEMBRE 18 DE 2003  
FECHA DE ANALISIS: DICIEMBRE 18 DE 2003  
HORA DE ANALISIS: 12:00 p.m. - 4:00 p.m.

**TECNICA DE ANALISIS**

\* FERMENTACION EN TUBOS MULTIPLES

No. PUNTO	COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES
MUESTRA INICIAL	460.000 N.M.P. / ml	43.000 N.M.P. / ml
PUNTO 30 GRADOS C.	460.000 N.M.P. / ml	43.000 N.M.P. / ml
PUNTO 35 GRADOS C.	460.000 N.M.P. / ml	43.000 N.M.P. / ml
PUNTO 37 GRADOS C.	460.000 N.M.P. / ml	43.000 N.M.P. / ml
PUNTO 40 GRADOS C	460.000 N.M.P. / ml	43.000 N.M.P. / ml
PUNTO 45 GRADOS C	240.000 N.M.P. / ml	15.000 N.M.P. / ml
PUNTO 53 GRADOS C	43.000 N.M.P/ ml	9.000 N.M.P/ ml
PUNTO 60 GRADOS C	4.000 N.M.P/ ml	4.000 N.M.P/ml
PUNTO 65 GRADOS C	<3/ ml	<3/ ml
PUNTO 70 GRADOS C	<3/ ml	<3/ ml
PUNTO 70 GRADOS C	<3/ ml	<3/ ml
PUNTO 81 GRADOS C	<3/ ml	<3/ ml

FIRMA *Eleida Bernabé Beltrán*  
Bacterióloga y Laboratorista Clínico CEIAM - UIS

### ANEXO D. Datos de radiación para los días de prueba

Fecha	Hora	Temp	Precip	Humr	Solar	Presión	Vel	Dir
12/10/2003	0	22.6	0	81.7	0	679.0	0.6	184
12/10/2003	1	22	0	83.8	0	678.55	0.8	191
12/10/2003	2	22.2	0	83.1	0	678.15	0.4	314
12/10/2003	3	21.5	0	86.1	0	678.03	0.1	139
12/10/2003	4	21.6	0	84.6	0	678.28	0.3	7
12/10/2003	5	20.8	0	88.7	1	678.54	0.4	182
12/10/2003	6	21.5	0	78.6	50	679.03	0.6	320
12/10/2003	7	22.8	0	75.8	271	679.66	0.5	105
12/10/2003	8	24.1	0	73.6	495	679.96	0.6	147
12/10/2003	9	25.2	0	70.4	655	679.91	1.2	132
12/10/2003	10	26.7	0	62.1	829	679.53	1.1	163
12/10/2003	11	27.8	0	63.6	956	679.04	2	132
12/10/2003	12	27.2	0	67.8	467	678.43	1.4	146
12/10/2003	13	27.4	0	67.9	569	677.74	1.6	166
12/10/2003	14	27.2	0	70	449	677.23	1.7	175
12/10/2003	15	26.5	0	75.2	137	676.84	1.1	144
12/10/2003	16	26.1	0	77.3	69	676.91	1.5	131
12/10/2003	17	25.2	0	82.4	14	677.37	0.8	158
12/10/2003	18	24.2	0	88.8	0	677.66	0.9	176
12/10/2003	19	24	0	89.4	0	678.34	0.4	154
12/10/2003	20	23.7	0	90.3	0	678.95	0.9	191
12/10/2003	21	23.4	0	91.7	0	679.16	1.3	191
12/10/2003	22	23.4	0	82.9	0	679.47	1	207
12/10/2003	23	23.2	0	77.3	0	679.2	1.2	229
Fecha	Hora	Temp	Precip	Humr	Solar	Presión	Vel	Dir
12/11/2003	0	22.9	0	72.6	0	678.98	1.3	242
12/11/2003	1	22.8	0	75.4	0	678.3	0.1	7
12/11/2003	2	21.9	0	78.8	0	678.06	0.2	248
12/11/2003	3	21.7	0	84.9	0	678.15	0.2	297
12/11/2003	4	21.5	0	78.2	0	678.23	0.6	270
12/11/2003	5	21.2	0	82.1	1	678.59	0.2	26
12/11/2003	6	21.5	0	76.9	71	679.25	0.6	234
12/11/2003	7	22.1	0	80	114	679.76	0.5	81
12/11/2003	8	21.8	0	75.6	119	680.39	0.4	194
12/11/2003	9	22.5	0	74.2	297	680.32	1	181
12/11/2003	10	22.9	0	80.7	369	680.37	1.1	179
12/11/2003	11	23.8	0	81.2	451	679.92	1.2	169
12/11/2003	12	24.5	0	78.1	490	679.31	1.2	175
12/11/2003	13	24.9	0	76.5	430	678.53	1.5	166
12/11/2003	14	25.2	0	76	396	678.15	1.7	148
12/11/2003	15	24.6	0	78.8	238	677.85	1.8	142
12/11/2003	16	23.9	0	80.9	116	677.78	1.2	138
12/11/2003	17	22.6	0	86.6	14	677.99	0.9	189
12/11/2003	18	22.3	0	88	0	678.37	0.5	226

analizados.  
(Estación meteorológica UIS).

12/11/2003	19	22.1	0	90	0	679.09	0.9	195
12/11/2003	20	21.7	0	92	0	679.83	1.2	189
12/11/2003	21	21.2	0	93.9	0	679.96	1	196
12/11/2003	22	21.5	0	91.6	0	679.83	0.3	10
12/11/2003	23	20.8	0	95.2	0	679.57	0.3	155
Fecha	Hora	Temp	Precip	Humr	Solar	Presión	Vel	Dir
12/12/2003	0	20.8	0	94.7	0	679.25	0.4	68
12/12/2003	1	20.5	0	93.7	0	679.04	0.6	201
12/12/2003	2	20.9	0	87.7	0	678.91	0.8	201
12/12/2003	3	20.9	0	81.9	0	679	0.5	225
12/12/2003	4	20.5	0	84.4	0	679.5	0.1	153
12/12/2003	5	20.7	0	80.6	1	679.82	0.2	314
12/12/2003	6	20.4	0	91.1	49	680.39	0.3	61
12/12/2003	7	21.5	0	85.6	269	680.69	0.3	91
12/12/2003	8	22.6	0	74.5	500	680.96	0.8	148
12/12/2003	9	24	0	71.9	703	681	1.1	184
12/12/2003	10	24.9	0	69.1	656	680.62	1.5	164
12/12/2003	11	25.4	0	69.4	889	680.16	1.7	173
12/12/2003	12	26	0	67.6	684	679.41	1.8	183
12/12/2003	13	26.6	0	65.1	564	678.59	1.6	144
12/12/2003	14	26.3	0	67.6	397	677.98	1.6	146
12/12/2003	15	25.3	0	73.6	149	677.59	1.8	140
12/12/2003	16	24.9	0	76.3	87	677.58	1.5	138
12/12/2003	17	23.9	0	83.3	14	677.84	0.7	147
12/12/2003	18	23	0	90	0	678.29	0.8	147
12/12/2003	19	22.7	0	92.5	0	678.8	0.6	158
12/12/2003	20	22.5	0	92.7	0	679.49	0.6	184
12/12/2003	21	22.5	0	92.1	0	680.05	0.6	174
12/12/2003	22	21.9	0	92.4	0	679.95	0.8	218
12/12/2003	23	21.8	0	89.2	0	679.61	0.7	232

<i>Fecha</i>	Hora	Temp	Precip	Humr	Solar	Presión	Vel	Dir
12/15/2003	0	21.5	0	87.4	0	679.37	1.2	197
12/15/2003	1	21.7	0	80.6	0	678.86	1	233
12/15/2003	2	21.7	0	78.3	0	678.44	0.5	260
12/15/2003	3	21.1	0	81.3	0	678.2	0.2	174
12/15/2003	4	20.9	0	84.1	0	678.44	0.4	226
12/15/2003	5	20.6	0	82.8	1	678.91	0.2	175
12/15/2003	6	20.6	0	80.6	60	679.56	0.7	210
12/15/2003	7	21.4	0	74.8	240	680.33	0.9	211
12/15/2003	8	22.2	0	69.4	343	680.63	0.9	189
12/15/2003	9	24.5	0	64.9	744	680.61	0.8	159
12/15/2003	10	25	0	70.5	678	680.2	1.5	141
12/15/2003	11	25.5	0	70.5	574	679.57	1.4	162
12/15/2003	12	26.1	0	67.1	776	678.78	1.8	142
12/15/2003	13	26.2	0	67.6	550	678.02	1.7	157
12/15/2003	14	26.3	0	67.6	342	677.5	1.7	163
12/15/2003	15	26	0	69.8	151	677.16	2.1	134
12/15/2003	16	25.2	0	74	76	677.21	2.2	129
12/15/2003	17	24.1	0	81.5	21	677.5	1	137
12/15/2003	18	23.1	0	88.7	0	677.96	0.6	165
12/15/2003	19	22.6	0	91.8	0	678.49	1	187
12/15/2003	20	22.4	0	90.7	0	679.03	1.1	194
12/15/2003	21	22.3	0	89.3	0	679.46	0.4	233
12/15/2003	22	22	0	86.4	0	679.52	1	215
12/15/2003	23	22.2	0	79	0	679.41	0.9	224

<i>Fecha</i>	Hora	Temp	Precip	Humr	Solar	Presión	Vel	Dir
12/16/2003	0	21.5	0	84.6	0	679.07	0.3	193
12/16/2003	1	20.8	0	80.9	0	678.74	0.8	149
12/16/2003	2	20.9	0	80.9	0	678.88	0.8	267
12/16/2003	3	20.4	0	80.9	0	678.45	0.8	218
12/16/2003	4	20.9	0	86.5	0	678.27	0.9	262
12/16/2003	5	20.7	0	72.6	0	678.42	0.4	257
12/16/2003	6	20.6	0	88.9	38	678.96	0.2	11
12/16/2003	7	20.8	0	78.8	272	679.37	0.4	138
12/16/2003	8	22.8	0	68.8	539	680.75	0.7	103
12/16/2003	9	24.5	0	64.9	787	680.89	0.9	144
12/16/2003	10	24.8	0	63.7	898	680.19	1.2	161
12/16/2003	11	26.3	0	69.6	789	678.84	1.9	168
12/16/2003	12	26.8	0	69.5	561	678.84	1.8	160
12/16/2003	13	25.9	0	68.7	578	679.58	2.6	159
12/16/2003	14	25.6	0	72.15	598	678.86	2.9	138
12/16/2003	15	26.6	0	64.3	383	676.59	2.9	168
12/16/2003	16	25.9	0	69.1	264	676.89	1.6	158
12/16/2003	17	24.8	0	78.8	169	676.99	0.9	147
12/16/2003	18	23.8	0	82.4	27	677.51	0.4	238
12/16/2003	19	23.8	0	89.9	0	678.86	0.7	206
12/16/2003	20	23.8	0	89.9	0	678.85	0.4	294
12/16/2003	21	23.5	0	99.8	0	678.96	0.4	283
12/16/2003	22	22.8	0	87.9	0	678.68	0.9	232
12/16/2003	23	21.8	0	85.2	0	678.49	0.9	287
12/13/2003	23	21.7	0	83.2	0	679.48	0.7	188