

**DISEÑO DE UN COLECTOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN PRTOTIPO**

**EDISON BAGAROTTA BASTIDAS
JUAN JERÓNIMO DEL RISCO DE LEÓN**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DEL BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN
CARTAGENA D. T Y C.**

2002

**DISEÑO DE UN COLECTOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN PRTOTIPO**

**EDISON BAGAROZZA BASTIDAS
JUAN JERÓNIMO DEL RISCO DE LEÓN**

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

**Director
JULIO CANTILLO
Ingeniero Mecánico**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DEL BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN
CARTAGENA D. T Y C.**

2002

NOTA DE ACEPTACIÓN

Jurado

Jurado

Jurado

Cartagena, 15 de Abril de 2002

ARTÍCULO 105

La institución se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los Trabajos de Grado aprobados, los cuales no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización. Esta observación debe que dar impresa en una parte visible del proyecto.

***A nuestros padres con mucho amor, quienes
fueron los forjadores de este título; y a
quienes creyeron en nosotros, y nos motivaron
continuamente para salir adelante***

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan sus agradecimientos a:

Hugo Rodríguez, Fabio Gonzáles y Julio Gonzáles licenciados en Física de la Universidad Nacional, por sus valiosas orientaciones.

Julio Cantillo Ingeniero Mecánico y Director de la Investigación, Alfredo Abuchar Ingeniero Mecánico y Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Bolívar, Miguel A. Romero Ingeniero Mecánico y a Carlos Gómez propietario del Taller Gómez, por sus constantes motivaciones en esta tesis.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. DISEÑO DE UN COLECTOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO Y CONSTRUCCIÓN DE N PROTOTIPO	24
1.1. RESEÑA HISTÓRICA DE LA ENERGÍA SOLAR	24
1.2. EL SOL	27
1.2.1. Ángulos Solares	28
1.3. NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR	39
1.3.1. La Constante Solar	41
1.3.2. Radiación Extraterrestre	41
1.3.3. Introducción de la Radiación a la Atmósfera	44

1.4. DURACIÓN ASTRONÓMICA DEL DÍA.	46
1.5. RADIACIÓN DIARIA PROMEDIO SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS.	48
2. ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA.	56
2.1. ESTRUCTURA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA	57
2.2. ENERGÍA SOLAR EN LA COSTA ATLÁNTICA.	59
3. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR APLICABLES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR.	62
3.1. MECANISMOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.	64
3.1.1. Conducción	64
3.1.2. Convección	66
3.1.3. Radiación	69
4. COLECTORES SOLARES.	79
4.1. INTRODUCCIÓN.	79
4.2. COLECTORES PLANOS.	82
4.2.1. Desarrollo Histórico	82
4.2.2. Principios de Operación y Tecnología	83
4.3. COLECTORES SOLARES DE ENFOQUE.	83
4.3.1. Desarrollo Histórico	84
4.3.2. Principios de Operación y Tecnología	86
4.3.3. Sistema Distribuidos	87
4.4. EL DISCO SOLAR Y LA IMAGEN SOLAR TEÓRICA	91

4.5.	BALANCE DE ENERGÍA.	94
4.6.	DESEMPEÑO TÉRMICO DE LOS COLECTORES DE ENFOQUE.	98
4.7.	PÉRDIDAS EN LOS CONCENTRADORES DE ENFOQUE.	103
4.7.1.	Pérdidas Ópticas ρ , $\tau\alpha$ y	103
4.7.2.	Pérdidas de los Extremos	107
4.7.	INTERVENCIÓN ÓPTICA.	108
4.8.	DESEMPEÑO DEL SISTEMA	109
4.8.1.	Tamaño del Receptor	109
4.8.2.	Posición del Receptor	111
4.8.3.	Seguimiento Del Receptor	112
4.8.4.	Formación de pérdidas debido al sombreado	113
4.9.	APLICACIONES Y PROYECTO EN MARCHA A NIVEL MUNDIAL.	114
5.	CÁLCULOS DE RADIACIÓN SOLAR.	119
5.1.	ÁNGULOS SOLARES	123
5.2.	DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA	123
5.3.	DURACIÓN ASTRONÓMICA DEL DÍA.	125
5.4.	RADIACIÓN DIARIA PROMEDIO SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS.	126
6.	CÁLCULOS DEL COLECTOR SOLAR CILINDRICO PARABÓLICO Y SELECCIÓN DE LOS MECANISMOS PARA EL SEGUIMIENTO DEL DISCO SOLAR.	130

6.1. SELECCIÓN DEL ÁNGULO RIM PÁRA EL COLECTOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO.	130
6.2. CALCULO DEL SISTEMA ÓPTICO	134
6.2.1. Selección del Materiales	134
6.2.2. Selección del Área de la Superficie óptica	135
6.2.3. Cálculo de la Temperatura adquirida por la Superficie óptica	135
6.2.4. Análisis de la Energía en el Sistema óptico	139
6.3. CÁLCULOS DEL TUBO ABSORBEDOR Y EL VIDRIO ENVOLVENTE.	143
6.3.1. Selección de Materiales	143
6.3.2. Cálculo del Área de la Superficie Reflectora	145
6.3.3. Balance de Energía para el Absorbedor y el Vidrio Envolverte	145
6.4. CÁLCULO DE LA EFICIENCIAS DEL COLECTOR.	161
6.5. SELECCIÓN DE LOS MECANISMOS PARA EL SEGUIMIENTO DEL DISCO SOLAR.	167
6.5.1. Seguimiento	167
6.5.2. Selección del Sistema de Seguimiento	170
6.5.3. Selección del Mecanismo para el Sistema de Seguimiento	173
7. CALCULOS DE ACCESORIOS Y VARIOS.	177
7..1.DISEÑO DEL TANQUE.	177
7.1.1. Materiales	177
7.1.2. Análisis	178

7.1.3. Calor perdido por las Paredes	178
7.1.4. Calor perdido por la Tapa	182
7.1.5. Calor disipado por las Aristas y Esquinas	184
7.1.6. Ahorro de Calorías	186
7.2. CÁLCULO DE LA TUBERÍA.	186
7.2.1. Materiales	187
7.2.2. Análisis	187
7.2.3. Evaluación del costo de Energía en la Tubería	194
7.2.4. Selección de la Estructura	195
7.3. CALOR NECESARIO PARA EL AGUA DEL TANQUE.	195
7.4. CALOR TOTAL QUE DEBE SUMINISTRAR EL COLECTOR	196
7.5. CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN EN TUBERÍAS.	196
7.5.1. En el Colector	197
7.5.2. En la Tubería de Suministro	197
7.5.3. En la Tubería de Descarga	198
7.5.4. En la Tubería de Realimentación	199
7.6. CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN.	200
7.6.1. En el Colctor	200
7.6.2. En la Tubería de Suministro	201
7.6.3. En la Tubería de Descarga	203
7.6.4. En la Tubería de Realimentación	206
7.7. POTENCIA NECESARIA PARA BOMBEAR EL FLUIDO	208

7.8. SELECCIÓN DE LA BOMBA.	209
7.9. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	210
8. FUNCIONAMIENTO Y PLAN DE MANTENIMIENTO.	213
8.1. EQUIPOS.	213
8.2. FUNCIONAMIENTO.	216
8.3. PLAN DE MANTENIMIENTO	218
9. PRESUPUESTO TOTAL DEL COLECTOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO.	220
9.1. GASTOS ADMINISTRATIVOS	220
9.2. GASTOS DE CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y MANTENIMIENTO	220
10. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DEL PROYECTO.	222
BIBLIOGRAFÍA.	
ANEXOS.	

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Movimiento Aparente del Sol.	29
Figura 2. Ángulos de Posición del Sol.	30
Figura 3. Variación de la Declinación Solar a través del año.	32
Figura 4. Movimiento y Declinación de la Tierra respecto al Sol.	35
Figura 5. Definición de la Altura Solar A y el Azimut Z .	36
Figura 6. Carta Solar Estereográfica para las Islas Canarias.	38
Figura 7. Carta Solar Cilíndrica para las Islas Canarias.	39
Figura 8. Espectro de la Energía Solar Extraterrestre y a Nivel del Mar.	42
Figura 9. Esquema de la Absorción y Dispersión de la Radiación Solar en Cielo Claro.	45

Figura 10. Espectro Electromagnético.	71
Figura 11. Ángulo de Incidencia θ en función de otros ángulos.	75
Figura 12. Ángulo de Incidencia el función de dos latitudes.	76
Figura 13. Radiación Directa sobre un plano horizontal y sobre un plano inclinado.	77
Figura 14. Esquema de la Imagen Solar Teórica formada por un Concentrador.	91
Figura 15. Sección transversal de una Imagen Solar Teórica en una Superficie Normal al eje de un Reflector Parabólico asumiendo un disco circular uniforme.	93
Figura 16. Sección esquemática y vista de un Concentrador Cilíndrico Parabólico con receptor cilíndrico aislado en una porción de la superficie.	94
Figura 17. Ejemplo de la división de Potencia para un Colector de Concentración	108
Figura 18. Relación de Concentración para varias geometrías de receptores	111
Figura 19. Comparación de ángulos RIM: a. Sistema óptico para un ángulo RIM de 90° . b. Sistema óptico para un ángulo RIM de 115° .	130
Figura 20. Diagrama Esquemático del Concentrador Cilíndrico Parabólico seleccionado.	132

Figura 21. Balance de Energía Superficial para la Superficie óptica.	135
Figura 22. Factor de Concentración $C(X')$ como una función de las Coordenada x' sobre el plano del receptor para concentradores Cilíndrico Parabólico con varios valores de σ .	150
Figura 23. Dependencia entre la Emisión Calorífica del Cilindro y el ángulo de ataque ϕ .	159
Figura 24. Tanque de Acero para ducto de Aire Acondicionado.	177
Figura 25. Diagrama de la Tubería requerida para el Colector.	186
Figura 26. Corte Transversal de la Tubería implementada.	187
Figura 27. Análisis de Rentabilidad	227

LISTA DE TABLAS.

	Pág.
Tabla 1. Ángulos de Declinación δ , diaria del Sol.	34
Tabla 2. Albedo de distintas superficies.	52
Tabla 3. Día promedio recomendado para cada mes	54
Tabla 4. Radiación Extraterrestre diaria promedio en el mes. $\frac{KJ}{m^2 \text{ día}}$	55
Tabla 5. Diferentes tipos de Concentradores de Radiación Solar.	90
Tabla 6. Generación de calor para procesos industriales a nivel mundial.	115
Tabla 7. Conversión fototérmica de Energía Solar en electricidad	118
Tabla 8. Pruebas de Funcionamiento del Colector.	211

LISTA DE ANEXOS.

Anexo A. Mapa de Radiación Solar en Colombia.

Anexo B. Resumen de los grupos adimensionales más importantes usados para caracterizar la transferencia de momento y la transferencia de calor convectiva.

Anexo C. Datos para días recomendados.

Anexo D. Radiación Extraterrestre Diaria Promedio en el Mes.

Anexo E. Características detalladas de la Radiación y Brillo Solar para la ciudad de Cartagena.

Anexo F. Propiedades de Emitancia y Absortancia Solar para materiales.

Anexo G. Propiedades Térmicas de Líquidos y Gases.

Anexo H. Propiedades del Tubo de Cobre.

Anexo I. Propiedades de Metales Sólidos.

Anexo J. Dimensiones de Tuberías Comerciales.

Anexo K. Propiedades de la Lámina para Ducto de Aire Acondicionado.

Anexo L. Propiedades de Aislante Térmicos (Cañuela).

Anexo M. Propiedades físicas de algunos fluidos y características de Válvulas, Accesorios y Tuberías.

GLOSARIO

ABSORCIÓN: Retener o captar energía por medio de un material.

ACIMUT: Ángulo que forma el meridiano con el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo.

ADYACENTES: Objetos próximos al colector que se interponen a la radiación solar.

CENIT: Punto del hemisferio celeste superior al horizonte que corresponde a un lugar de la tierra.

COMBADO: Inflexión que toman algunos cuerpos sólidos cuando se encorvan.

CONCENTRADOR: Aparato que reúne en un centro o punto(lo que estaba separado).

DISCO SOLAR: Figura plana con que a parece a nuestra vista el Sol, la luna y los planetas.

EJE DE SEGUIMIENTO: Eje sobre el cual se desplaza libremente el sistema mecánico del Colector de Enfoque.

EMISIÓN: Arrojar, exhalar hacia fuera (una cosa): - rayos luminosos .

ENERGÍA ÚTIL: Porcentaje de la Energía que es utilizada y aprovechada para un fin específico.

EQUINOCCIO: Momento del año en que el Sol, en su movimiento aparente, pasa por el Ecuador y en que el día es igual a la noche en toda la Tierra: - de Primavera, del 20 al 21 de Marzo; - de Otoño, del 22 al 23 de Septiembre.

ERROR DE SEGUIMIENTO: Error de apuntamiento a la ubicación del Sol con respecto al observador.

ESTEREOGRÁFICA: Geom.. (proyección de la superficie esférica) Que se efectúa desde un punto de ella sobre un plano perpendicular al diámetro que pasa por dicho punto.

FOCO: Punto donde vienen a reunirse los rayos de luz, calor, etc., reflejados por un espejo curvo o refractados por una lente convergente: - real; o de donde parece un haz de rayos divergentes: - virtual.

FUSIÓN: Reacción Nuclear, producida por la unión de dos elementos ligeros, sometidos a elevadas temperaturas, quedan lugar a otro elemento más pesado, con gran desprendimiento de energía nuclear.

GRADIENTE: En las magnitudes cuyo valor es distinto en los diversos puntos de una región del espacio, proporción en la que varía la magnitud en función de la distancia, a lo largo de la línea en que esta variación es máxima.

IMAGEN SOLAR: Reproducción del sol formada por la reflexión o refracción de los rayos de luz que de él dimanar, ya sea la formada realmente en el punto donde convergen los rayos reflejados o refractados (~ *real*), ya sea la que se ve detrás de un espejo, una lente, etc., en el punto donde se encuentran las prolongaciones de los rayos luminosos divergentes que llegan al ojo del observador (~ *virtual*).

INTERCEPTAR: Apoderarse de los antes que llegue al lugar o a la persona a que se destina.

ISOTRÓPICO: Que posee las mismas propiedades en todas direcciones. De propiedad física no dependiente de la dirección de observación. ²

LONGITUD DE ONDA: distancia entre dos puntos correspondientes a una misma fase en dos ondas consecutivas. ¹

LONGITUD FOCAL: distancia existente entre el vértice de la parábola y el foco.

MACROSCÓPICO: Que se ve a simple vista, sin auxilio del microscopio

MERIDIANO LOCAL: La hora del mediodía en una localidad determinada.

MICROCONTROLADOR: Pequeño dispositivo electrónico basado en un microprocesador, que suele llevar incorporado el programa específico, y es de tamaño y potencia muy reducidos.

OCASO: Puesta del Sol o de otro astro por el horizonte.¹

OPTIMIZACIÓN: Lograr el resultado que se desea.

ORTO: Salida del Sol o de otro astro por el horizonte. ¹

OZONO: Gas muy oxidante, de color azulado y olor a marisco, que es un estado alotrópico del oxígeno producido por la electricidad, y se encuentra en pequeñas proporciones en la atmósfera después de las tempestades.¹

RADIO ESPECULAR: Se refiere al radio de la superficie receptora.

RAYOS GAMMA: rayos producidos por radioactividad

RAYOS X: ondas electromagnéticas de corta longitud de ondas derivadas de los rayos catódicos, cuando éstos, en su propagación, inciden sobre la materia. Tienen entre otras propiedades, la de atravesar los cuerpos opacos a la luz ordinaria, con mayor o menor facilidad, según sea la materia de que éstos están formados, produciendo detrás de ellos, en superficies convenientemente preparadas, imágenes o impresiones, que son utilizadas para la exploración médica y para otros fines. ¹

REFLEXIÓN: Hacer retroceder o cambiar de dirección [la luz, el calor, el sonido, etc.], oponiéndoles una superficie lisa: *el espejo refleja los rayos del sol; la luz se refleja en, o sobre, el espejo.*²

RELÉ: Dispositivo electromagnético que, estimulado por una corriente eléctrica muy débil, abre o cierra un circuito en el cual se disipa una potencia mucho mayor que en el circuito estimulador.

REVESTIMIENTO: Capa o cubierta con que se resguarda una superficie.

SOLEAMIENTO: Tiempo en el cual, el Sol irradia la una superficie determinada de la tierra.

UNESCO – UIS: convenio con el que se inició en Colombia el Programa de investigación de energía solar. Este programa tuvo como primer objetivo el estudio de las bases para el diseño de calentadores y destiladores solares.

RESUMEN.

DISEÑO DE UN COLECTOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO.

EDISON BAGAROZZA BASTIDAS.

JUAN JERÓNIMO DEL RISCO DE LEÓN.

DISEÑO DE UN COLECTOR SOLAR CILÍNDRICO PRABÓLICO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO.

Observamos la creciente demanda del país para aprovechar otras formas de energía como lo son: el Gas Natural, el GLP y la Energía Solar debido principalmente a los altos costos de la Energía Eléctrica y que en nuestros días el gobierno ha seguido con su política de privatización de las empresas generadoras, lo cual a su vez eleva los costos.

Analizamos que los Colectores Solares alcanzan una mayor eficiencia al utilizar precalentadores.

Al cubrir el Tubo Absorbedor con un Tubo de Vidrio Envolverte y realizar vacío entre ellos, las pérdidas de transferencia de calor disminuyen, por lo cual mejora el diseño del Colector.

INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de avance tecnológico que Colombia debe poseer para hacer parte de la competencia de los grandes mercados, está el desarrollo inminente de estas nuevas tecnologías a través de quienes se han atrevido en incursionar en dichos cambios.

Por eso, los estudiantes de Ingeniería Mecánica, se deben constituir en parte primordial de estos cambios, generando una nueva cultura científica que permita desarrollar el interés de quienes buscan en esta disciplina una nueva esfera del conocimiento.

Es así que nace la idea de construir un *Colector Cilíndrico Parabólico*, que va a permitir hacer un estudio más cercano en lo referente a la transferencia de calor, de una forma práctica y didáctica.

Por lo tanto, se comenzará a desarrollar esta investigación desde una reseña histórica de la energía solar, que va a permitir una ubicación en el tiempo y espacio, estudiada la reseña histórica se continuará con el estudio más detallado de la energía solar en Colombia, especialmente en la Costa Atlántica, que

permitirá observar el desarrollo científico y técnico que sobre el tema se ha hecho en el país; se aplicarán los principios de transferencia de calor, se describirán los tipos y funcionamiento de los distintos colectores existentes, incluyendo los materiales analizados para su construcción.

Abordados todos estos temas, se tendrán las bases teóricas para el desarrollo y construcción del Colector en estudio, no sin antes haber desarrollado la parte de diseño que incluye un análisis térmico y óptico del sistema detalladamente, incluyendo igualmente los materiales; para finalmente llegar a su construcción, funcionamiento y mantenimiento.

Es de observar que dentro de todo este proceso, es imperioso hablar del análisis económico y rentabilidad del proyecto, que permitirá observar su viabilidad, pues si bien es cierto, muchos trabajos pueden ser muy ambiciosos, pero de poca productividad.

Finalmente, se espera que los resultados sean los deseados, y que este Colector se constituya en un aporte valioso para quienes vienen siguiendo los pasos de quienes hicieron parte de esta investigación y se constituya en material didáctico y de estudio en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar.

1. DISEÑO DE UN COLECTOR SOLAR CILINDRICO PARABÓLICO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO

1.1. RESEÑA HISTÓRICA DE LA ENERGÍA SOLAR.

Alrededor de este tema se han generado una serie de conceptos que el hombre ha diseñado para definir la energía. El Diccionario de la Academia Española lo define escuetamente como “virtud para obrar”. Más simplemente, la energía es lo que hace que las cosas sucedan. De lo que se deduce, que no hay nada de lo que realice el hombre que no tenga el consumo de energía, ejemplo de ello es cuando se come, se bebe, se conduce, se realiza la práctica de algún deporte, etc.

Hoy en día, como resultado del acelerado desarrollo industrial y socioeconómico, uno de los problemas de mayor trascendencia, y que ha afectado a las economías nacionales, es la problemática que prestan los energéticos. La limitación de los recursos petrolíferos - principal fuente de hidrocarburos - y su encarecimiento, permiten prever que en países en vía de desarrollo la posibilidad de ascender a niveles de vida más alto estará cada vez más condicionada.

Lamentablemente, ni siquiera la estimación más optimista de reservas adicionales de combustibles puede o debe justificar un continuado consumo acelerado.

Irónicamente, el modelo para una central de energía termonuclear, el Sol, es una fuente de energía prácticamente ilimitada que suministra millones de kilowatts (o kilovatios), y que a pesar de desperdiciarla casi totalmente, sirve para mantener a una temperatura agradable, para obtener todos los alimentos y maderas, y para proporcionar energía por medio del viento. Además, la energía solar es segura, está libre de contaminación, no requiere transporte, no tiene productos de desecho que deban eliminarse, y con ella han prosperado todos los seres vivos desde su aparición en la tierra. Todos los días el planeta recibe del Sol un caudal de energía del que aprovechamos una fracción varios miles de veces menor que el total. Hasta la ínfima proporción que llega al techo de las casas es muy superior, si se pudiera utilizar, a toda la energía que recibe a través de los conductores eléctricos. La utilización de la energía solar para diversos fines prácticos no es, por cierto una idea reciente. El Sol figuró, naturalmente, entre los primeros intentos del hombre por explorar el mundo que lo rodea. Era tan obvia la dependencia del hombre con respecto al Sol, que sus primeras religiones y culturas se forman alrededor de este cuerpo celeste.

“El Sol ha sido, al mismo tiempo, una bendición y un desafío a partir del mitológico Ícaro, que estando prisionero junto a su padre Dédalo en la isla de Creta, huyó de

ahí valiéndose de unas alas que pegó con cera a su cuerpo. Sin embargo, como se sabe, los rayos del Sol derritieron la cera, e Ícaro cayó al mar, cerca de Samos. En un momento dado el mito y la leyenda a dar paso a los hechos. En el año 212 a. C., según se dice Arquímedes incendió la flota romana que atacaba a su patria. Con vidrios que quemaban -dijo Galeno- puso fuego a las naves de los enemigos, y los alejó de Siracusa”¹.

Por otra parte a fines del siglo XVIII, el científico francés Antoine Lavoisier casi llegó a fundir platino, logrando una temperatura cercana a los 1750° C, por medio de poderosos lentes que enfocaban los rayos del Sol.

“En 1872 en el desierto de Atacama, en Chile se construyó un solar de agua salada, con una superficie de 5000 m², que produjo para una mina de nitrato de sodio un caudal de 20000 litros de agua dulce por día”².

“En 1878, Auguste Mouchot, profesor del Liceo de Tours, inventó una máquina de vapor accionada por un gran espejo cóncavo, y que sirvió para impulsar una imprenta en la Exposición Universal”³.

¹ ENERGÍA SOLAR, FUNDAMENTOS Y APLICACIÓN FOTOTERMICA. José A Manríquez. Editorial Harla S.A. México. 1984. Pág. 2.

² *Ibíd.*, Pág. 2

Samuel Pierpont Langley creó una cocina que aprovechaba la energía solar, y mostró el modo de usarla en lo alto del Monte Whitney, en California. Más tarde Charles Greely Abbot, en 1916, construyó un honor (u hogar) que fue sometido a pruebas durante varios años en el Monte Wilson.

A partir de 1973, la energía solar ha sido motivo de múltiples investigaciones, y sin necesidad de técnicas complicadas, cada vez encuentra más aplicaciones sumamente prácticas y atractivas en la calefacción y enfriamiento de edificios, calentamiento de agua para consumo doméstico e industrial, bombeo de agua en áreas rurales apartadas. Volver a inventar la rueda es un riesgo periódico al que está sometida la Ciencia, y nada le demuestra mejor que el redescubrimiento periódico que el uso de la energía solar.

1.2. EL SOL.

El sol es una esfera de $1,4 \times 10^6 \text{ Km}$ de diámetro, en cuyo seno se desarrolla ininterrumpidamente un proceso de fusión. “Su temperatura superficial es de 6.000°K , y la temperatura de la zona interna de la masa en reacción se estima de varios millones de grados. Entre este núcleo y la superficie, tienen lugar

³ *Ibíd.*, Pág. 2

fenómenos de convección y radiación, estando este último localizado en la zona de los rayos gamma y X, creciendo su longitud de onda hacia el exterior, a medida que su temperatura disminuye”⁴. En consecuencia, el Sol no se comporta realmente como un cuerpo negro a temperatura constante, sino que su radiación es la resultante de varias capas, a distintas temperaturas, que emiten y absorben radiaciones de distintas longitudes de onda.

Sin embargo, y para los efectos de cálculos y estimaciones relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar en el ámbito terrestre, es suficiente considerar el Sol como un cuerpo negro radiando a una temperatura de 6.000°K.

1.2.1. Ángulos Solares: Cada día, el Sol, para un observador situado en la Tierra, sigue una trayectoria circular a través del firmamento, alcanzando su punto más alto al mediodía. Por otra parte, esta trayectoria circular aparente se mueve hacia puntos más altos en el firmamento a medida que el invierno transcurre y llega el verano, en el diagrama se observa que el amanecer acontece más temprano, y el atardecer, más tarde, durante el verano. (Véase la figura 1)

⁴ TÉCNICAS DE LA ENERGÍA Y SUS RECURSOS. Aplicaciones de la Energía Solar a Baja Temperatura. Tomo III. Editorial Index. Madrid – Barcelona. 1984. pág. 11

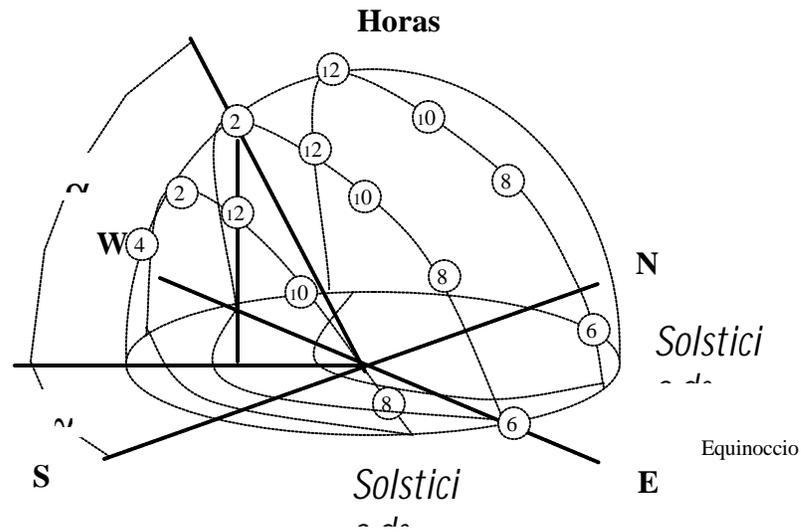


Figura 1. Movimiento Aparente del Sol

Obviamente la posición del Sol en la bóveda celeste depende del lugar en que se encuentra el observador. Así, al mediodía de marzo 21 y septiembre 23 - los equinoccios de primavera y otoño - el Sol se encuentra directamente sobre el Ecuador.

Dado que los movimientos de la Tierra y el Sol son relativos entre sí, en el análisis que sigue se supondrá que la Tierra está fija en el espacio, que el Sol describe un movimiento virtual alrededor de ésta, y que el origen del sistema de coordenadas se localiza en el lugar de interés situado en la Tierra. Desde este punto de vista tolemeico, el Sol está restringido a moverse con dos grados de libertad en la esfera celeste. En consecuencia, su posición en el firmamento queda descrita

mediante dos variables angulares: La *altura solar* A y el *acimut solar* g_s . Como se desprende la primera de estas variables define el ángulo que la visual al Sol forma con el horizonte (Véase la figura 2), en tanto que la segunda define la desviación que tienen los rayos del Sol con respecto al sur verdadero. (En este caso se considera que el acimut se mide con respecto al sur, y no con relación al norte, como es usual) El cálculo preciso de estas variables depende fundamentalmente de tres parámetros: la *latitud del lugar* f , la *declinación* d y el *ángulo horario* w .

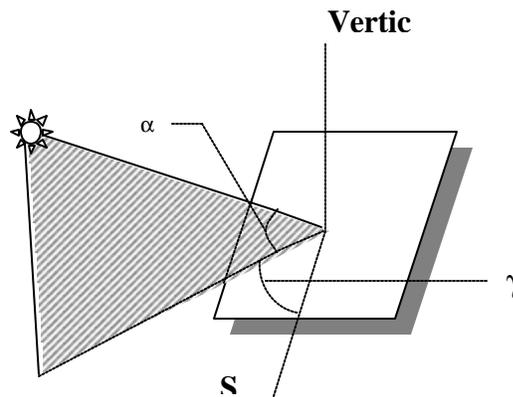


Figura 2. Ángulos de Posición del Sol

La **latitud** ϕ es el arco que existe entre el paralelo que pasa por el lugar y el Ecuador. La latitud media de la Isla de Gran Canaria se puede estimar en 28° norte, y queda definida mediante el ángulo que determina el lugar de interés sobre la Tierra, con respecto al plano del Ecuador. Este ángulo es positivo cuando se mide hacia el norte del Ecuador, y negativo cuando lo es hacia el sur de éste.

La **declinación** d define la posición angular del Sol al mediodía solar, es decir, en el momento en que el Sol está más alto en el firmamento con respecto al plano del Ecuador. En otras palabras, la declinación es un índice del alejamiento que experimenta el Sol hacia el norte o hacia el sur del Ecuador. Este parámetro, que depende del día del año, puede calcularse con la expresión.

$$d = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (1)$$

Donde n es el día del año. A continuación se muestra el cambio de la declinación a través de los distintos meses del año (Véase la figura 3). La tabla 1 indica los valores correspondientes:

El **ángulo horario** w es el formado entre la posición del sol a la hora considerada y su posición al mediodía, medido sobre el círculo de su órbita. El sol recorre 15° a la hora (360° en 24 horas), y se mide a partir del mediodía (12:00 hora solar local), con ángulos negativos antes del mediodía y positivos después del mediodía. Para determinar el ángulo horario se usa la siguiente expresión en función de la *hora solar local* T (0:00 a 24:00 horas):

$$w = 15(t - 12) \quad ??$$

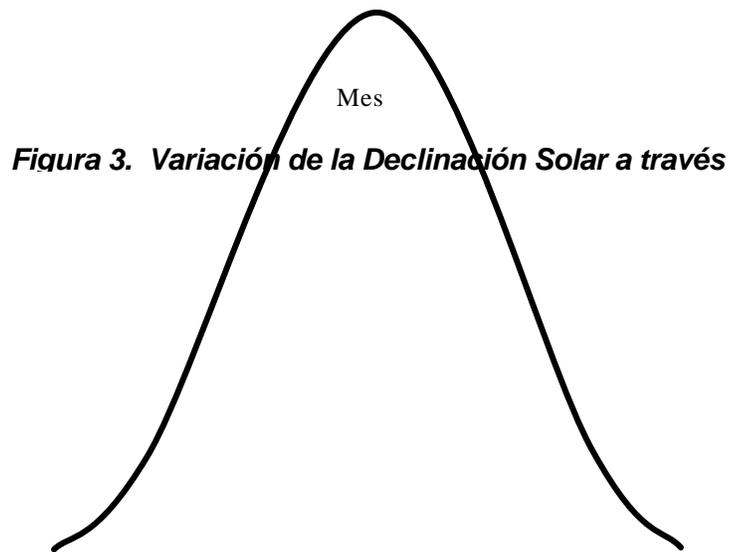
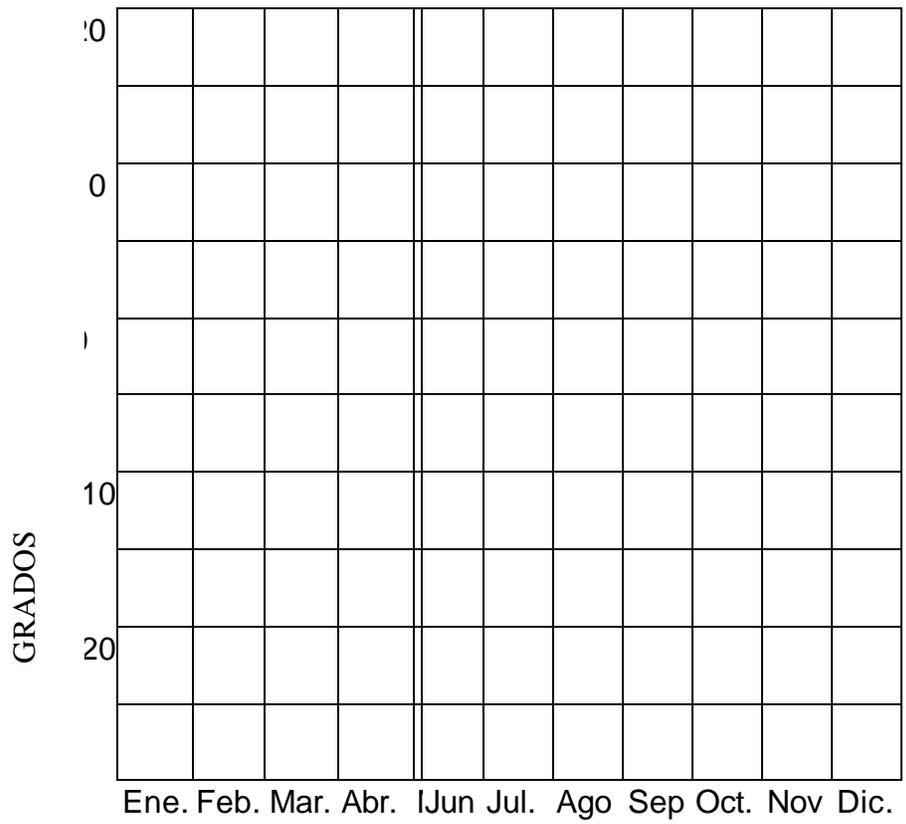


Figura 3. Variación de la Declinación Solar a través

¿ . . .
!
.

Ya que por definición el mediodía solar local (12:00) es el instante que el sol está en el cenit de su recorrido, no es necesario realizar correcciones debido a la hora legal o la ecuación del tiempo.

1.2.1.1. Movimiento aparente del Sol. Es de conocimiento general que el sol sale por el este, al mediodía se levanta sobre el sur y se pone por el oeste, y también que los días de verano son más largos que los de invierno. Sin embargo, para el estudio científico de la influencia del soleamiento es preciso determinar con suficiente precisión la posición del sol en la bóveda celeste para cualquier localidad, fecha e instante del día (Véase la figura 4).

Afortunadamente, el movimiento aparente del sol en el espacio está regido por las leyes de la mecánica celeste, y sus relaciones geométricas se expresan en fórmulas de trigonometría esférica, en función de la *latitud del lugar* ϕ , la

declinación de la época del año δ y el *ángulo horario* ω del instante del día, parámetros que se describen a continuación:

Tabla 1. Ángulos de Declinación d Diaria del Sol.

Día.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Octub.	Nov.	Dic.
01	-23°05'	- -		04°03	15°0	22°0	23°0	18°0	08°19'	-	-	-21°47'
02	-23°00'	17°24'	07°3	0'	3'	2'	7'	2'	07°57'	03°0	14°24'	-21°56'
03	-22°55'	- 7'		04°5	15°2	22°1	23°0	17°4	07°35'	9'	-	-22°05'
04	-22°49'	17°07'	-	4'	1'	0'	3'	7'	07°13'	-	14°43'	-22°14'
05	-22°43'	-	07°1	05°1	15°3	22°1	22°5	17°3	06°51'	03°3	-	-22°21'
06	-22°37'	16°50'	4'	7'	9'	8'	8'	2'	06°29'	2'	15°02'	-22°29'
07	-22°30'	-	-	05°4	15°5	22°2	22°5	17°1	06°06'	-	-	-22°36'
08	-22°23'	16°33'	06°5	0'	6'	5'	3'	6'	05°44'	03°5	15°21'	-22°42'
09	-22°15'	-	1'	06°0	16°1	22°3	22°4	17°0	05°21'	5'	-	-22°49'
10	-22°07'	16°15'	-	2'	4'	2'	8'	0'	04°59'	-	15°39'	-22°54'
11	-21°58'	-	06°2	06°2	16°3	22°3	22°4	16°4	04°36'	04°1	-	-22°59'
12	-21°49'	15°57'	8'	5'	1'	9'	2'	4'	04°13'	9'	15°57'	-23°04'
13	-21°39'	-	-	06°4	16°4	22°4	22°3	16°2	03°50'	-	-	-23°09'
14	-21°29'	15°38'	06°0	8'	7'	5'	6'	7'	03°27'	04°4	16°15'	-23°12'
15	-21°19'	-	5'	07°1	17°0	22°5	22°2	16°1	03°04'	2'	-	-23°16'
16	-21°08'	15°20'	-	0'	4'	0'	9'	0'	02°41'	-	16°33'	-23°19'
17	-20°57'	-	05°4	07°3	17°2	22°5	22°2	15°5	02°18'	05°0	-	-23°21'
18	-20°45'	15°01'	2'	3'	0'	5'	2'	3'	01°54'	5'	16°50'	-23°23'
19	-20°33'	-	-	07°5	17°3	23°0	22°1	15°3	01°31'	-	-	-23°25'
20	-20°21'	14°42'	05°1	5'	34 6'	0'	5'	6'	01°08'	05°2	17°07'	-23°26'
21	-20°08'	-	9'	08°1	17°5	23°0	22°0	15°1	00°45'	8'	-	-23°26'

22	-19°55'	14°22'	-	7'	1'	5'	7'	8'	00°21'	-	17°24'	-23°26'
23	-19°42'	-	04°5	08°3	18°0	23°0	21°5	15°0	-	05°5	-	-23°26'
24	-19°28'	14°03'	5'	9'	7'	6'	9'	0'	00°02'	1'	17°40'	-23°25'
25	-19°13'	13°03'	-	09°0	18°2	23°1	21°5	14°4	-	-	-	-23°24'
26	-18°59'	-	04°3	1'	2'	2'	1'	2'	00°26'	06°1	17°56'	-23°22'
27	-18°44'	13°43'	2'	09°2	18°3	23°1	21°4	14°2	-	4'	-	-23°20'
28	-18°29'	-	-	2'	6'	6'	2'	4'	00°49'	-	18°12'	-23°17'
29	-18°13'	13°23'	04°0	09°4	18°5	23°1	21°3	14°0	-	06°3	-	-23°14'
30	-17°57'	-	8'	4'	1'	8'	2'	5'	01°12'	6'	18°28'	-23°10'
31	17°41'	12°42'	-	10°0	19°0	23°2	21°2	13°4	-	-	-	-23°06'
			-	03°4	5'	5'	1'	3'	6'	01°36'	06°5	18°43'
		12°22'	5'	10°2	19°1	23°2	21°1	13°2	-	9'	-	
		-	-	7'	8'	3'	3'	7'	01°59'	-	18°58'	
		12°01'	03°2	10°4	19°3	23°2	21°0	13°0	-	07°2	-	
		-	1'	8'	2'	4'	3'	8'	02°22'	2'	19°12'	
		11°40'	-	11°0	19°4	23°2	20°5	12°4	-	-	-	
		-	02°5	8'	5'	5'	2'	8'	02°46'	07°4	19°26'	
		11°18'	8'	11°2	19°5	23°2	20°4	12°2	-	4'	-	
		-10°57'	-	9'	8'	6'	1'	9'	-	-	19°40'	
		-	02°3	11°4	20°1	23°2	20°2	12°0	-	08°2	-	
		10°35'	4'	0'	0'	6'	9'	9'	-	9'	19°54'	
		-	-	12°1	20°2	23°2	20°1	11°4	-	-	-	
		10°13'	02°1	0'	2'	6'	8'	9'	-	08°5	20°07'	

-	0'	12 ⁰³	20 ⁰³	23 ⁰²	20 ⁰⁰	11 ⁰²	1'	-
09 ⁰⁵² '	-	0'	4'	6'	6'	9'	-	20 ⁰¹⁹ '
-	01 ⁰⁴	12 ⁰⁵	20 ⁰⁴	23 ⁰²	19 ⁰⁵	11 ⁰⁰	09 ⁰¹	-
09 ⁰²⁹ '	7'	0'	5'	5'	3'	8'	3'	20 ⁰³² '
-	-	13 ⁰¹	20 ⁰⁵	23 ⁰²	19 ⁰⁴	10 ⁰⁴	-	-
09 ⁰⁰⁷ '	01 ⁰²	0'	6'	4'	1'	8'	09 ⁰³	20 ⁰⁴⁴ '
-	3'	13 ⁰²	21 ⁰⁰	23 ⁰²	19 ⁰²	10 ⁰²	5'	-
08 ⁰⁴⁵ '	-	9'	7'	2'	7'	7'	-	20 ⁰⁵⁵ '
-	00 ⁰⁵	13 ⁰⁴	21 ⁰¹	23 ⁰²	19 ⁰¹	10 ⁰⁰	09 ⁰⁵	-
08 ⁰²² '	9'	8'	7'	0'	4'	6'	7'	21 ⁰⁰⁷ '
-	-	14 ⁰⁰	21 ⁰²	23 ⁰¹	19 ⁰⁰	09 ⁰⁴	-	-
08 ⁰⁰⁰ '	00 ⁰³	7'	7'	7'	0'	5'	10 ⁰¹	21 ⁰¹⁷ '
-	5'	14 ⁰²	21 ⁰³	23 ⁰¹	18 ⁰⁴	09 ⁰²	8'	-
-	-	6'	6'	4'	6'	4'	-	21 ⁰²⁸ '
	00 ⁰¹	14 ⁰⁴	21 ⁰⁴	23 ⁰¹	18 ⁰³	09 ⁰⁰	10 ⁰⁰	-
	2'	5'	5'	1'	2'	2'	1'	21 ⁰³⁸ '
00 ⁰¹	-	21 ⁰⁵	-	18 ⁰¹	08 ⁰⁴		-	-
	2'		4'		7'	1'	11 ⁰⁰	
	00 ⁰³						1'	
	6'						-	
	00 ⁰⁵						11 ⁰²	
	9'						2'	
	01 ⁰²						-	

3'	11⁰⁴
01⁰⁴	3'
7'	-
02⁰¹	12⁰⁰
0'	4'
02⁰³	-
4'	12⁰²
02⁰⁵	5'
7'	-
03⁰²	12⁰⁴
1'	5'
03⁰⁴	-
4'	13⁰⁰
04⁰⁰	5'
7'	-
	13⁰²
	5'
	-
	13⁰⁴
	5'
	-
	14⁰⁰
	5'

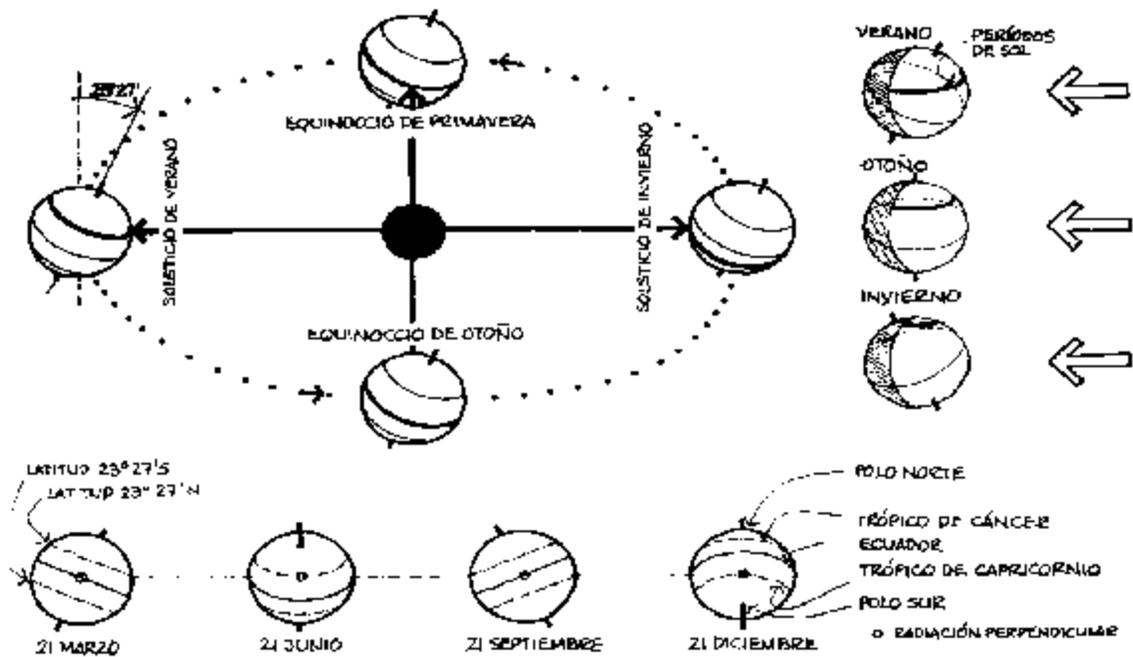


Figura 4. Movimiento y Declinación de la Tierra respecto al Sol.

1.2.1.1. Cálculo de la Posición del Sol. La posición del sol en el cielo se suele determinar por la elevación del sol sobre el horizonte o *altura solar* A , y por el ángulo entre la proyección del sol sobre el horizonte y el sur, llamado *azimut* g , midiéndose con valores negativos hacia el este y con valores positivos hacia el oeste. Estos ángulos dependen de la *latitud* ϕ , de la *declinación* δ y del *ángulo horario* h (Véase la figura 5). La *altura solar* A y el *azimut* g se pueden determinar por las siguientes ecuaciones:

$$A = \arcsen(\sen f \sen d + \cos f \cos d \cos w) \quad (3)$$

$$g = \arcsen\left(\frac{\cos d \sen w}{\cos A}\right) \quad (4)$$

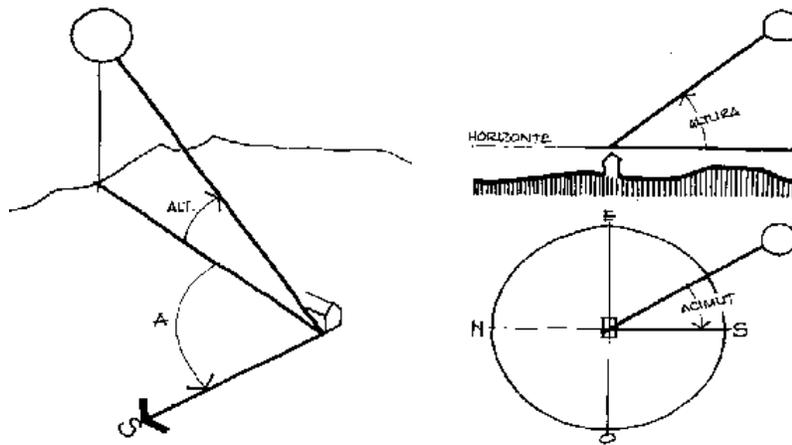


FIGURA 5. Definición de la Altura Solar A y el Azimut g

Esta ecuación del azimut presenta dificultades de cómputo ya que la función del arco del seno no discrimina cuando el azimut es superior a 90° , valores que se pueden dar a primeras y últimas horas del día en época de verano, por que es recomendable utilizar una ecuación alternativa (4a) en función del coseno, que permite evaluar un azimut superior a 90° , pero que no discrimina el signo de g (este u oeste), lo cual se corrige aplicando la función $\text{SGN}(x)$ del ángulo horario, habitual en los lenguajes de programación y cuyo valor es de +1 o -1 para positivo o negativo respectivamente.

$$\mathbf{g} = \arccos \frac{\text{sen} \mathbf{f} \text{sen} A - \text{sen} \mathbf{d}}{\cos \mathbf{f} \cos A} \times \text{SGN}(\mathbf{w}) \quad (4a)$$

El **ángulo horario del orto y el ocaso** w_0 se precisa para determinar la posición del sol para dicho instante, y se determina por la expresión:

$$w_0 = \arccos \left(\frac{-\text{sen} \mathbf{f} \text{sen} \mathbf{d}}{\cos \mathbf{f} \cos \mathbf{d}} \right) \quad (5)$$

Y la **hora solar del orto y el ocaso** t_0 se determina simplemente mediante la expresión:

$$t_0 = 12 \pm \frac{w_0}{15} \quad (6)$$

Igualmente, se puede determinar el **número de horas de sol teóricas** N del día considerado:

$$N = 2 \frac{w_0}{15} \quad (7)$$

El movimiento aparente del sol es sencillo de representar gráficamente mediante cartas solares como la *estereográfica*, que representa la planta de la bóveda celeste correspondiendo la curva más próxima al cenit al 22 de junio. Mas prácticas de utilizar son las *cartas solares cilíndricas* que muestran el recorrido aparente del sol en un cilindro en torno al observador y que se despliega desde el norte, siendo habitual disponer el eje de la altura solar en una escala uniforme. Cada latitud precisa de un gráfico específico, mostrándose en las siguientes figuras dos ejemplos para las Islas Canarias:

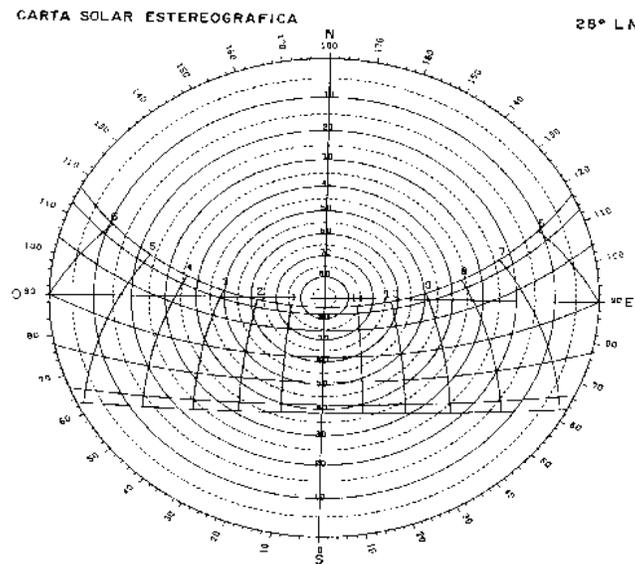


Figura 6. Carta Solar Estereográfica para Las Islas Canarias.

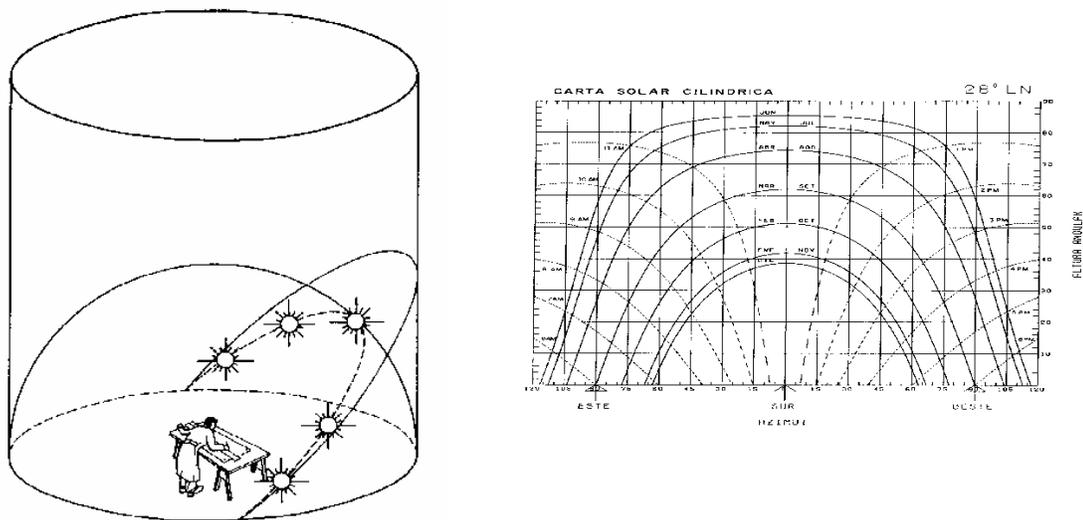


Figura 7. Carta Solar Cilíndrica para Las Islas Canarias

1.3. NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR.

Con el objeto de poder aprovechar la energía solar incidente sobre la superficie de la Tierra, es conveniente examinar de manera sucinta la naturaleza de la radiación que emana del Sol. Así como las características de esta energía al incidir sobre la superficie de la Tierra.

El Sol es una estrella que tiene aproximadamente una masa 334 000 veces mayor que la de la Tierra. Para un observador en ésta, el Sol manifiesta un giro alrededor de su eje de una vez cada cuatro semanas. Por otra parte, esta esfera de materia gaseosa inmensamente caliente, tiene un diámetro de 1.39 millones de kilómetros, y en promedio, se encuentra a una distancia media de 150 millones de kilómetros de la Tierra. La distancia mínima (en el *perihelio*) se alcanza alrededor del 15 de enero, mientras que la máxima (en el *afelio*) se tiene a fines de junio. La discrepancia entre las distancias mínima y máxima es 1/60 del valor medio. Es decir, la órbita elíptica que describe la Tierra alrededor del Sol es prácticamente circular. A una distancia media, el Sol es visto desde la Tierra según un ángulo de 32'.

La estructura solar es enormemente compleja. Se estima que la temperatura en el núcleo central varía entre 8 y 40 millones de grados kelvin, tiene una densidad entre 80 y 100 veces la del agua, y se genera ahí cerca del 90% de la energía total. En esta región central, comprendida entre 0 y 0.23 R (siendo R el radio solar), está contenido el 40% de la masa total del Sol. A una distancia radial, a partir del centro, igual a 0.7R la temperatura disminuye sensiblemente hasta unos

130.000°K, en donde la densidad es del orden de 0.07 g/cm^3 . Por encima de la región comprenda entre $0.7R$ y $1.0R$, conocida como zona convectiva, la temperatura desciende hasta 5000°K , y la densidad hasta 10^{-8} g/cm^3 , aproximadamente. Esta capa bien definida de aproximadamente 300 Km de espesor y que envuelve a la zona convectiva, se conoce como *fotosfera* (o fostósfera), y es la región en donde se origina la mayor parte de la radiación solar que recibe la tierra. La presión en la fotosfera es aproximadamente de $1/100 \text{ bar}$.

1.3.1. La Constante Solar. Se puede definir la “constante solar I_{cs} ” como la energía recibida del Sol por unidad de superficie normal a la dirección de los rayos y por unidad de tiempo, a la distancia media entre el Sol y la Tierra. Se habla de distancia media, $1,5 \times 10^8 \text{ Km}$, a causa de la variación del 3,3%. La constante solar, hasta la puesta en órbita de satélites, había sido estimada por extrapolación de valores terrestres, basándose en hipótesis de coeficientes de transmisión y de absorción atmosféricas. De esta forma, se adoptó el valor de 1.322 W/m^2 en 1954, el cual ha sido posteriormente ajustado hasta el valor actual de 1.353 W/m^2 , o $1,940 \text{ Cal/cm}^2\text{min}$.

1.3.2. Radiación Extraterrestre. Es necesario, para las posteriores aplicaciones que se tratarán, el conocer la distribución espectral de la radiación solar extraterrestre, esto es, antes de penetrar en la atmósfera.

El espectro de la energía solar extraterrestre, al igual que la constante solar, la curva representativa de la distribución espectral ha sido objeto de modificaciones a lo largo del tiempo, a causa de las nuevas posibilidades que han ido abriendo los elementos de exploración espacial. En consecuencia, la NASA confeccionó una curva espectral de radiación, que fue propuesta como tipo en el año 1971 (Véase la figura 8).

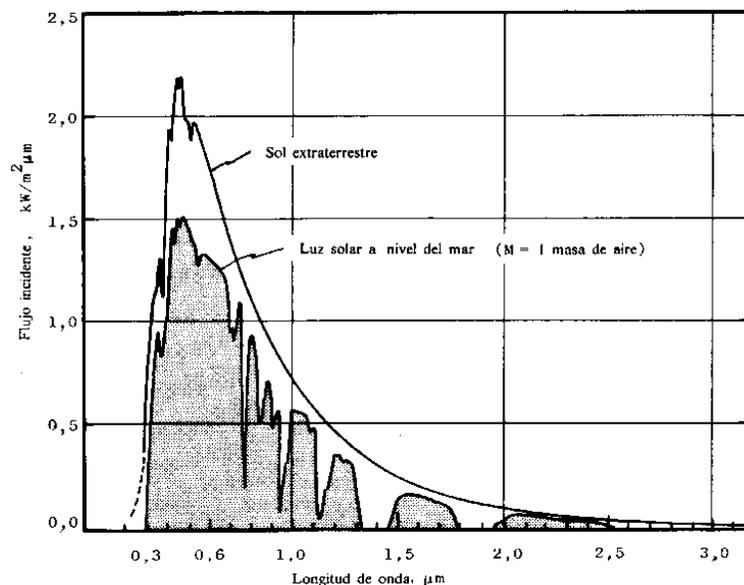


Figura 8. Espectro de la Energía Solar Extraterrestre y al Nivel del

Como se apuntaba al principio, para fines de aplicaciones terrestres de la energía solar, se puede considerar que la radiación emitida por el Sol es prácticamente constante. Sin embargo, sí influye en la intensidad de la radiación recibida, la variación anteriormente mencionada del 3,3% correspondiente a la interdistancia Sol/Tierra.

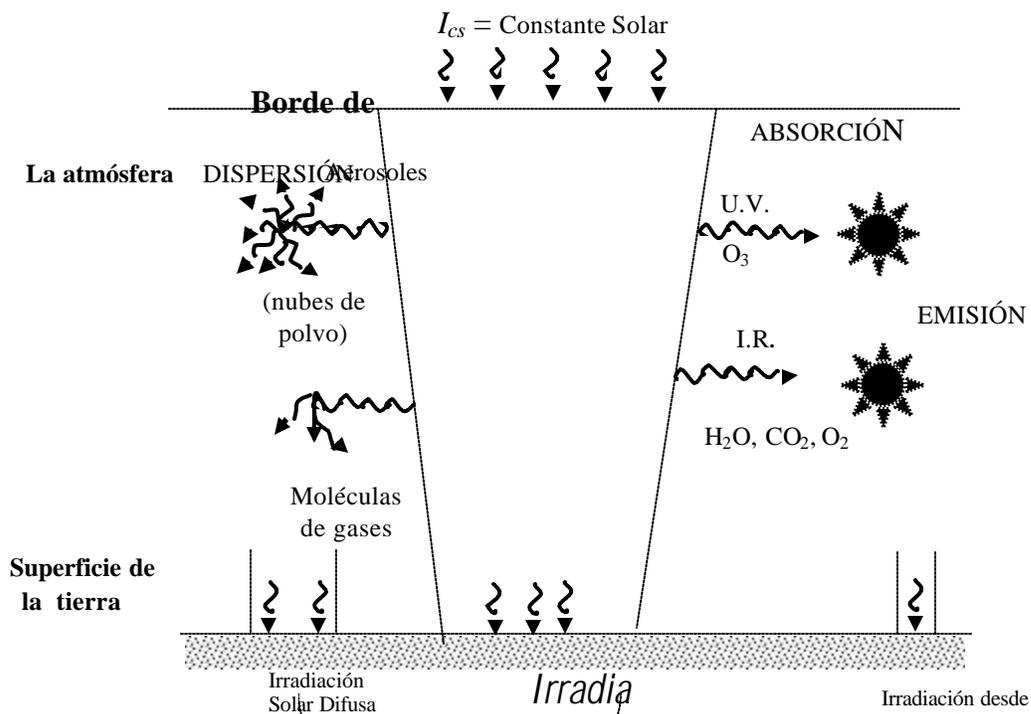
1.3.2.1. Distribución Espectral de la Radiación Solar Extraterrestre. La energía solar consiste de ondas electromagnéticas (de la misma naturaleza que las ondas de radio y TV) de diferentes longitudes de onda. La constante solar es la energía total por unidad de área y de tiempo sin tener en la cuenta la frecuencia de la radiación solar. Sin embargo, para muchos propósitos (por ejemplo la fotosíntesis y celdas solares) es útil conocer cómo está distribuida esa energía de acuerdo con su longitud de onda o frecuencia, es decir, su distribución espectral como se mostró en la figura 8 de la NASA (1971) de la radiación extraterrestre, esto es, en el tope de la atmósfera. Se suelen considerar las siguientes regiones:

1. La región llamada visible ($0.38 < \lambda < 0.78$) porque es el rango que puede detectar el ojo humano y dentro de la cual están los colores violeta (0.42 nm), azul (0.48 nm), verde (0.52 nm), amarillo (0.57 nm), anaranjado (0.68 nm) y rojo (0.70 nm).
2. La región invisible más allá del rojo ($\lambda > 0.78 \text{ nm}$), conocida como infrarrojo lejano o región de las ondas de calor.
3. La región invisible antes del violeta ($\lambda < 0.38 \text{ nm}$), denominada ultravioleta.

De acuerdo con lo anterior, a cada región le corresponde una fracción de la constante solar, distribuida así: 7% al ultravioleta (o sea 94.7 W/m^2), 47.3% al visible (o sea 639.8 W/m^2) y 45.7% al infrarrojo (o sea 618.5 W/m^2).

1.3.3. Interacción de la Radiación con la Atmósfera. La atmósfera terrestre es la capa gaseosa de la tierra que se mantiene alrededor de ella por la acción de la fuerza gravitacional. La figura 9 muestra esquemáticamente los diferentes procesos que ocurren.

Parte de la radiación directa incidente se transforma en difusa (o radiación sin ninguna dirección preferencial) a causa del fenómeno de la dispersión, el cual se debe a la presencia en la atmósfera de vapor de agua, de las moléculas que componen el aire y partículas de polvo. Otra parte de la radiación solar es absorbida en la atmósfera. La absorción del ultravioleta se debe predominantemente al ozono (O_3), la del infrarrojo al vapor de agua y la de visible nuevamente al ozono. Como resultado de la absorción se tiene entonces una atenuación de la radiación solar.



La atenuación y el cambio en el espectro dependen de la masa de aire atravesada. Esta se suele designar por AMn (Air Mass n). Así, $AM0$ corresponde a la radiación solar extraterrestre, $AM1$ a la masa atravesada por la radiación cuando el sol está en el cenit y el observador a nivel del mar a presión atmosférica de 760 mm Hg .

Por esta razón, para efectos prácticos en energía solar, se considera solamente la radiación comprendida entre $0,3 \text{ } \mu\text{m} \ll 1,9 \text{ } \mu\text{m}$. Esta interacción con la atmósfera hace que finalmente a escala terrestre se tengan que considerar las componentes directas, difusa y reflejada de la radiación solar mientras que a escala extraterrestre sólo se tiene la componente directa.

1.4. DURACIÓN ASTRONÓMICA DEL DÍA.

La Duración astronómica del día es especialmente útil en energía solar para calcular el tiempo que están expuestas a la radiación solar las superficies horizontales, además de que se emplea en otros cálculos.

Esta puede calcularse para cualquier latitud mediante la siguiente ecuación, la cual mide la dirección de la radiación solar directa sobre una superficie de orientación arbitraria, introducida por Duffie y Beckman:

$$\begin{aligned} \cos q = & \sin \delta \sin \phi \cos \theta - \sin \delta \cos \phi \sin \theta \cos \gamma_s + \cos \delta \cos \phi \cos \theta \cos \omega \cos \beta \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \theta \cos \gamma_s \cos \omega + \cos \delta \sin \theta \sin \gamma_s \sin \omega. \end{aligned} \quad (9)$$

Donde:

q Ángulo de incidencia, esto es, el ángulo entre la radiación directa sobre la superficie y la normal a la superficie.

f Latitud del lugar, esto es, la posición angular hacia el norte o hacia el sur del Ecuador, es positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur.

d Declinación, esto es, la posición angular del Sol al medio día con respecto al plano del Ecuador.

b Inclinación de la superficie, esto es, el ángulo entre la superficie en consideración y la horizontal.

g_s Ángulo azimutal del Sol, esto es, la desviación de la proyección de la radiación directa del meridiano local.

w Ángulo horario, esto es, el desplazamiento angular del Sol hacia el este o el oeste del meridiano local, en virtud del movimiento de rotación de la Tierra alrededor de su eje.

Ahora, teniendo en cuenta que cuando el Sol se levanta (sale), $w = w_s$ y $qz = 90^\circ$:

$$\text{Cos}90^\circ = 0 = \text{Sen}d\text{Sen}f + \text{Cos}d\text{Cos}f\text{Cos}(w_s) \quad (10)$$

o sea que: $\text{Cos}w_s = -\text{Tan}f\text{Tan}d$

Por consiguiente, la duración del día X está dada por

$$X = \left(\frac{2}{15} \right) \arccos(-\tan f \tan d) \quad (11)$$

Los valores de la duración del día para la latitud de Cartagena son:

LATITUD	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGOS.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.
10.25	11.47	11.67	11.94	12.23	12.47	12.59	12.53	12.33	12.05	11.76	11.52	11.41

1.5. RADIACIÓN DIARIA PROMEDIO SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS.

Existen varios modelos para calcular la radiación total diaria promedio sobre una superficie inclinada a partir de datos de radiación diaria promedio sobre un plano horizontal. Uno de ellos es el desarrollado por Liu y Jordan el cual considera que la radiación solar incidente sobre un plano inclinado, H_T , está formada por tres partes: la radiación directa del Sol, la difusa procedente de la bóveda celeste, y la reflejada por el suelo sobre la superficie inclinada. Es decir:

$$\overline{H_T} = \overline{I_{b,h}} \overline{R_b} + \overline{I_{d,h}} \overline{R_d} + (\overline{I_{b,h}} + \overline{I_{d,h}}) \overline{R_p} \quad (12)$$

Donde $\overline{R_b}$, $\overline{R_d}$ y $\overline{R_p}$ son, respectivamente, los factores de conversión para las componentes de radiación directa, difusa y reflejada sobre la superficie inclinada.

$\overline{R_b} =$ Radiación directa diaria promedio en un mes sobre la superficie inclinada
Radiación directa diaria promedio en un mes sobre un plano horizontal

$\overline{R_d} =$ Radiación difusa diaria promedio en un mes sobre la superficie inclinada
Radiación difusa diaria promedio en un mes sobre un plano horizontal.

$\overline{R_r} =$ Radiación diaria promedio en un mes que es reflejada por el suelo sobre la superficie
Radiación global diaria promedio en el mes

El factor $\overline{R_b}$ es una función de la transmitancia de la atmósfera (excepto durante los equinoccios), y depende de la nubosidad atmosférica, la concentración de vapor de agua y otras particular. Sin embargo, Liu y Jordan sugieren que $\overline{R_b}$

puede estimarse como el cociente de la radiación extraterrestre sobre la superficie inclinada, y la correspondiente a una superficie horizontal para el mes en cuestión.

Así:

$$\overline{R_b} = \frac{w_s' \operatorname{sen} d \operatorname{sen}(f - b) + \cos d \cos(f - b) \operatorname{sen} w_s'}{w_s \operatorname{sen} d \operatorname{sen} f + \cos d \cos f \operatorname{sen} w_s} \quad (13)$$

Donde

$$w_s' = \min \{w_s, \arccos[-\tan(f - b) \tan d]\} \quad (14)$$

Por otra parte, la radiación difusa no sólo varía en intensidad dependiendo de los contenidos atmosféricos de vapor de agua, polvo, etc., sino que también varía en distribución angular con los cambios en las condiciones atmosféricas. Si se supone que la radiación procedente de la bóveda celeste es isotrópica, esto es, si se supone que es uniforme en todas las direcciones, entonces puede demostrarse que el cociente de la radiación difusa incidente sobre una superficie inclinada un ángulo b , y la radiación difusa incidente sobre una superficie horizontal es igual a $\frac{1 + \cos b}{2}$. Dado que este cociente es independiente de la posición del Sol en el firmamento.

$$\overline{R_d} = \frac{1 + \cos \mathbf{b}}{2} \quad (15)$$

Similarmente, dado que la mayoría de los materiales que constituyen el suelo (césped o pasto, concreto, arena, tierra, etc.) reflejan la radiación solar de una manera más o menos difusa, aquí se supondrá que la reflexión es perfectamente difusa. En consecuencia, considérese que el suelo localizado frente a la superficie inclinada es muy grande y tiene una reflectancia hemisférica uniforme (o albedo) r , ante la radiación solar. Si la radiación global diaria promedio en el mes es, $\overline{H_G}$ la radiación reflejada por el suelo es $r\overline{H_G}$, y la fracción de ésta que intercepta la superficie inclinada es:

$$\overline{R_r} = \frac{1 - \cos \mathbf{b}}{2} r\overline{H_G} \quad (16)$$

En consecuencia.

$$\overline{R_r} = \frac{1 - \cos \mathbf{b}}{2} r \quad (17)$$

A continuación se muestran algunos valores de albedo para distintas superficies (Véase la tabla 2). En la práctica se emplea un valor de 0.20 para suelos comunes, y de 0.70 cuando se encuentran cubiertos de nieve.

Tabla 2. Albedo de distintas superficies

Superficie	Albedo
Desierto	0.24 - 0.28
Campos, varios tipos	0.03 - 0.25
Bosque, verde	0.03 - 0.10
Pasto, varias condiciones	0.14 - 0.37
Suelo, común	0.07 - 0.20
Moho, negro	0.08 - 0.14
	0.18 - 0.40

Arena, seca	0.09 - 0.18
Arena, húmeda	0.46 - 0.86
Hielo o nieve	0.02
Agua ($\alpha= 47^\circ$)	0.71
Agua ($\alpha= 5.5^\circ$)	

Combinando las ecuaciones 12, 15 y 17 tenemos:

$$\bar{H}_T = (\bar{H}_G - \bar{I}_{d,h})\bar{R}_b + \bar{I}_{d,h} \frac{1 + \cos b}{2} + H_G \frac{1 - \cos b}{2} r \quad (18)$$

Cabe apuntar que la componente de radiación $\bar{I}_{d,h}$ rara vez se conoce, por lo que es necesario estimarla a partir de un conocimiento de la radiación global diaria promedio en el mes.

Liu y Jordan, así como Page, sugieren la siguiente expresión para evaluar el cociente:

$$\frac{\bar{I}_{d,h}}{\bar{H}_G} = \begin{cases} 1,390 - 4,027\bar{K}_T + 5,531\bar{K}_T^2 - 3,108\bar{K}_T^3 & (Liu \& Jordan) \\ 1,00 - 1,13\bar{K}_T & (Page) \end{cases} \quad (19)$$

Donde \bar{K}_T es el cociente de la radiación global diaria promedio en un mes a la radiación extraterrestre diaria promedio sobre una superficie horizontal en el mismo mes. Es decir,

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}_G}{\bar{H}_o} \quad (20)$$

\bar{H}_o también puede evaluarse a partir de la latitud del lugar según la tabla anterior seleccionando para cada mes, el día del año en que la radiación diaria extraterrestre es numéricamente igual en forma aproximada al valor medio en ese mes. Finalmente, haciendo uso de las ecuaciones (18,19, y 20), puede evaluarse la radiación total diaria promedio en un mes para una superficie inclinada.

Analíticamente:

$$\bar{H}_T = \overline{RH_G} = \overline{RK_T} \cdot H_o \quad (21)$$

Tabla 3. Día Promedio Recomendado para cada Mes.

Enero	17	Enero	17
Febrero	47	Febrero	16

Marzo	75	Marzo	16
Abril	105	Abril	15
Mayo	135	Mayo	15
Junio	162	Junio	11
Julio	198	Julio	17
Agosto	228	Agosto	16
Septiembre	258	Septiembre	15
Octubre	288	Octubre	15
Noviembre	318	Noviembre	14
Diciembre	344	Diciembre	10

Tabla 4. Radiación Extraterrestre Diaria Promedio en el mes,

itud	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Octub.	Nov.	Dic.
10	29260	32411	35518	37648	38671	38484	38428	38098	36103	33180	2997	28262

0	26644	30359	34307	37515	38884	39144	38893	37864	35300	31402	2751	25519
5	22902	28115	32848	37111	39356	40046	39606	37832	34238	29413	2490	22669
10	21034	25679	31141	36436	39569	40706	40461	37534	32917	27213	2216	19714
15	18069	23072	29200	35498	39530	41129	40292	36976	31348	24820	1929	16687
20	15043	20319	27040	34303	39247	41328	40281	36166	29542	22255	1634	13626
25	11998	17443	24677	32869	38737	41322	40055	35118	27515	19541	1334	10579
30	8987	14490	22131	31209	38025	41147	39644	33851	25283	16705	1034	7605
35	6082	11486	19423	29345	37152	40863	39100	32391	22863	13778	739	4791
40	3395	8486	16576	27308	36188	40585	38513	30779	20277	10798	459	2277

2. ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA

“En el año de 1965 se realizó el convenio UNESCO - UIS con el que se inició en Colombia el Programa de investigación de energía solar. Este programa tuvo como primer objetivo el estudio de las bases para el diseño de calentadores y destiladores solares”⁵

Los resultados obtenidos, entre aciertos y desaciertos, despertaron un gran interés en todo el país para continuar las investigaciones en este campo, extendiéndose a diferentes centros de estudio donde se fomentaron programas similares.

En la actualidad Colombia cuenta con estudios importantes sobre al aprovechamiento de energía solar en calentamiento de agua para uso doméstico e industrial, destilación de agua salada o con impurezas, refrigeración y calefacción, bombeo de agua, generación fotovoltaica de energía, secado de productos agrícolas, secado y deshidratación de carnes, cocción de alimentos con la utilización de concentradores de energía solar.

⁵ PROCENCIA. Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia. Volumen 5. Colombia. 1982. Pág.9

Dentro de las formas mencionadas de utilización de energía solar, algunas han tenido un desarrollo más acelerado que otras por tener una importancia social para satisfacer necesidades primarias del hombre, como es el caso de los calentadores y destiladores de agua.

2.1. ESTRUCTURA DE LA DEMANDA ENERGETICA.

La demanda de formas comerciales de energía creció al 4.35 promedio anual, el consumo no energético de gas natural representó el 3.2% del volumen total del final del período.

“El consumo final con propósitos energéticos creció al 5.6% promedio anual. Dentro de ello, el consumo de fines industriales creció a una mayor tasa (6.6% promedio anual). La fuente más importante de energía para la industria la constituyen el gas natural (75.1%) del total en la industria seguida del carbón, con un (11.1%) del consumo energético industrial el cual ha venido aumentando su participación creciendo al 37% promedio anual en el período y de la energía eléctrica (11%) del total. Los refinados han mantenido su baja participación del 2.8% del consumo total industrial”⁶.

⁶ ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ENERGÉTICA DE LA COSTA ATLÁNTICA. Tomo XIV Recomendaciones, Resumen y Conclusiones. Barranquilla – Colombia. 1989. Pág. 44.

El consumo de refinados para el sector transporte creció el 3.9% promedio anual en el lapso en un periodo de 10 años bajando su participación total del 42.7% al 39.5%.

Por otra parte, como era de esperarse por la limitación en la oferta, el consumo de GLP con destino a residencias y comercio se ha mantenido estable en términos absolutos, pasando su participación del 2.5% al 2.7%.

El consumo de energéticos con fines exclusivamente residenciales aumentó brevemente su participación, pasando del 8.8% al 9.5% al final del período, creciendo , por tanto, a un tasa superior a la del crecimiento total (7.1% promedio anual). La participación del gas natural dentro de la canasta energética residencial es cada vez más importante (creció al 39.8% promedio anual del período). Así mismo, el energético más importante en este renglón es la energía eléctrica (con una participación del 53.4% y un crecimiento promedio anual del 4.7%) mientras que la importancia de los refinados ha venido reduciéndose.

El consumo energético en los otros sectores (comercial, oficial y agrícola) tienen una relativa baja participación (del 6.5% en 1989) y es atendido principalmente en energía eléctrica en proporción creciente y con refinados.

2.2. ENERGÍA SOLAR EN LA COSTA ATLÁNTICA.

El potencial de la Energía Solar en la Costa Atlántica es alto (comparado también con otros lugares del mundo de reconocido alto potencial) , principalmente en la Guajira, el litoral de la Costa desde Bolívar hasta la Guajira y la región vecina a Valledupar, con un nivel del más de $20.0 \text{ MJ} / \text{m}^2 \text{ día}$ ($5.5 \text{ KWh} / \text{m}^2 \text{ día}$) de energía solar diaria, promedio anual.(Ver Anexo A).

Hacia el interior del país, el nivel de radiación desciende hasta los $18 \text{ MJ} / \text{m}^2 \text{ día}$ como es el caso de todas las estaciones de Bolívar, la mayor parte de Córdoba y las estaciones del Cesar. Inferior a $18 \text{ MJ} / \text{m}^2 \text{ día}$ se tiene la zona sur de Córdoba, hacia la frontera con Antioquia.

En general, la variación mensual de la Energía Solar en relación con la media anual, es pequeña. Esto es supremamente importante para el diseño de sistema de acumulación de energía, ya que permite la reducción significativa de la capacidad de estos sistemas y sus costos.

Los niveles de Radiación Directa son elevados en toda la Costa Atlántica desde Bolívar hasta la Guajira. Por esta razón esta fuente energética renovable puede resultar competitiva en usos térmicos, tales como:

- ✓ Calentamiento de agua para uso doméstico
- ✓ Calentamiento de agua en el sector hotelero e industrial (también como calor de proceso a bajas temperaturas)
- ✓ Secado de productos agrícolas
- ✓ Destilación de agua.

En el caso del calentamiento de agua para el sector hotelero e industrial, los sistemas solares pueden suministrar agua caliente con temperaturas hasta de 90° C. A causa de la variabilidad de la Energía Solar y de la importancia que tiene la confiabilidad del suministro cuando se trata de procesos industriales, resulta conveniente emplearlos como unidad precalentadora.

Para el caso de la Costa estos sistemas pueden emplear entre 900 y 1050 kWh / m² con costos competitivos frente al calentamiento con gas natural y aún más frente al uso de la electricidad.

Así mismo, la aplicación fotovoltaica para el suministro de energía eléctrica para hogares y fincas en zonas aisladas (para servicio básico de iluminación, comunicación y otros usos con bajo requerimiento de energía) constituyen una aplicación promisoras y competitiva frente al alto costo de la electrificación rural tradicional que se tendría en muchas áreas de la Costa. En particular, la tecnología del uso de corriente continua y baterías para este efecto puede combinarse con opciones ventajosas según el caso, de paneles solares u otras fuentes primarias para la carga de las batería

3. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR APLICABLES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR.

En cualquier sistema de conversión de energía fototérmica se busca captar la energía solar y transformarla en calor útil hacia algún medio de trabajo v. gr, agua, aire u otro fluido. También se busca en algunas aplicaciones que la temperatura de operación del sistema sea lo suficientemente alta para que su disponibilidad termodinámica sea satisfactoria. Tal es el caso en sistemas de bombeo de agua o generación de electricidad que hacen uso de un ciclo Rankine⁷ para su operación.

Para estimar el tamaño, la eficiencia y el costo del equipo necesario para producir y aprovechar una cantidad específica de calor en un tiempo determinado, debe efectuarse un análisis de transferencia de calor. Así, las dimensiones de un colector solar, un intercambiador de calor o un refrigerador no dependen tanto de la cantidad de calor transmitida como del régimen al cual el calor es transferido en condiciones extremas determinadas.

⁷ RANKINE Mcquorn, William John. (1820 - 1872) Físico Alemán, que invento el ciclo termodinámico que lleva su nombre.

La determinación del régimen de transferencia de calor a una específica diferencia de temperatura, es la clave para determinar el tamaño del colector necesario para proveer una determinada temperatura.

El calor se transfiere de tres modos diferentes:

- ✓ *Conducción:* o transferencia de calor debida a la vibración y rotación molecular.

- ✓ *Convección:* o transferencia de calor debida al movimiento de fluidos. Este modo es, además, una forma de conducción.

- ✓ *Radiación:* o transferencia de calor por fotones o cuantos de energía.

En un colector solar cilíndrico-parabólico, el porcentaje de incidencia de cada uno de los tres factores (radiación, conducción y convección) depende de la temperatura del colector, los materiales que se utilizan y las características ambientales. Para tener una idea más exacta, la siguiente es una explicación de los tres mecanismos de transferencia de calor.

3.1. MECANISMOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

3.1.1. Conducción. Es el proceso de propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso, mediante comunicación molecular directa o entre cuerpos a distintas temperaturas. En el caso de líquidos y gases esta transferencia es importante, siempre y cuando se tomen las precauciones debidas para eliminar las corrientes naturales de flujo que pueden presentarse como consecuencia de las diferencias en densidad que experimentan éstos. De aquí que la transferencia de calor por conducción sea de particular importancia en sólidos sujetos a una diferencia de temperaturas.

Al existir un gradiente de temperatura dentro del medio de la segunda ley de la Termodinámica establece que la transferencia de calor se lleva a cabo desde la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura.

La relación básica de transferencia de calor por conducción establece que el régimen de flujo de calor por conducción (q_x) en un material es igual a:

$$q = \frac{Q}{A} = -k \frac{\nabla T}{\nabla x} \quad (22) \text{ "Ley de Fourier de la Conducción de Calor"}$$

$$q_x = \frac{kA}{X} (T_1 - T_2) = \frac{kA}{X} \Delta T \quad (23)$$

Donde:

q = Flujo de calor por unidad de área o densidad del flujo térmico en la dirección x .

k = Conductividad térmica del material, generalmente expresado en (W/m °C)

A = Área seccional del medio a través del cual fluye calor (m²)

ΔT = Diferencia en temperatura de dos puntos o $T_1 - T_2 = \Delta T$ (°C) donde $T_1 > T_2$.

X = Distancia en dirección del flujo de calor (m) .

El signo negativo de la ecuación es introducido al fin de que la segunda ley de la termodinámica sea satisfecha, es decir, que el calor debe fluir de mayor a menor temperatura. Esta ecuación (22) se conoce como la "Ley de Fourier de la Conducción de Calor"⁸. Debe hacerse notar que esta expresión define la

⁸ TRANSFERENCIA DE CALOR. Anthony .F. Mills. Editorial McGRAW – HILL/ IRWIN. España. 1995. Pág. 65

conductividad térmica, aun cuando esta varía con la temperatura, en muchas aplicaciones puede suponerse constante.

La conducción de calor es muy parecida a la conducción de electricidad: en ambas se requiere una diferencia en temperatura (en electricidad la diferencia es de voltaje) y una vía material de transmisión; las propiedades de los conductores de electricidad y de calor son similares (los metales conducen muy bien, mientras que los plásticos ofrecen gran resistencia); las vías cortas y anchas conducen mejor que las vías largas y angostas; la razón del flujo depende de la diferencia en temperatura entre los dos puntos.

3.1.2. Convección. El fenómeno de transferencia de calor por convección es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas) y está íntimamente relacionado con el movimiento de éste. Considérese como vía de explicación una placa cuya superficie se mantiene a una temperatura T_s , la cual disipa el calor hacia un fluido cuya temperatura es T_f . La experiencia indica que el sistema disipa más calor cuando se le hace pasar aire proveniente de un ventilador, que cuando se encuentra expuesto al aire ambiente simple, de lo cual se deduce que la velocidad

del fluido tiene un efecto importante sobre la transferencia de calor en la superficie. De manera análoga, la experiencia indica que el flujo de calor es diferente si la placa se enfría en agua o aceite en vez de en aire. De aquí que las propiedades del fluido tengan también un efecto importante sobre la transferencia de calor.

Puesto que la velocidad relativa del fluido con respecto a la placa es, en general, idénticamente igual a cero en la interfase sólido - fluido, el calor se transfiere por conducción solamente en este plano del fluido.

El fenómeno de transferencia de calor por convección usualmente se clasifica como convección forzada o convección libre o natural. En el primer caso el fluido se hace pasar sobre el sistema mediante la acción de algún agente externo, como un ventilador, una bomba o agentes meteorológicos. Por otra parte, el movimiento del fluido resulta en el segundo caso como una consecuencia de los gradientes en densidad que experimenta éste, al estar en contacto con una superficie a mayor temperatura y en presencia de un campo gravitacional (o centrifugo). Un ejemplo típico de convección forzada sería el caso de un colector plano en el que el agua se hace circular por su interior mediante la acción de una bomba.

De igual manera, un ejemplo típico de convección libre sería el calentamiento de agua en un colector plano operando según el principio termosifón.

La transferencia de calor por medio de convección es un factor muy importante de considerar en el diseño y construcción de colectores solares. La fórmula general de la convección es:

$$q = h_c(T_s - T_f) \quad (24)$$

Donde:

q = pérdida por convección por unidad de área.

h_c = coeficiente convectivo de transferencia de calor.

$\Delta T = (T_s - T_f)$ = diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido.

Para el adecuado funcionamiento de un colector solar se requiere controlar la convección de dos formas. Primero, se debe tratar de disminuir la convección de calor que ocurre entre las superficies de la lámina de absorción y la cubierta del colector. Esto ocurre naturalmente por el calentamiento del aire por la lámina

(convección natural). Segundo, se debe tratar de disminuir la pérdida de calor por medio del flujo de aire que pasa encima del colector por el viento (convección forzada). Estas medidas tienen el propósito de reducir las pérdidas de calor de los colectores solares de placa plana con el fin de mejorar su eficiencia.

La convección natural que existe entre dos placas es de gran importancia en el estudio de colectores de energía solar de placa plana. Para hacer un estudio de este régimen de transferencia de calor, hay que establecer correlaciones entre varios parámetros adimensionales, con el propósito de determinar el valor de h lo que permitirá conocer la transferencia de calor por convección.

Dos de esas correlaciones son los números de *Nusselt* (Nu), *Rayleigh* (Ra), *Grasshof* (Gr) y *Prandtl* (Pr) (Véase anexo 2).

$$h_c = \frac{k}{D} Nu \quad (25) \quad Nu = f(Ra) = f(Gr * Pr) \quad (26)$$

$$Gr = \frac{b \Delta T g D^3}{\nu^2} \quad (27) \quad Ra = \frac{g \cdot b \Delta T D^3}{\nu a} \quad (28)$$

Donde:

D = Diámetro del Tubo

k = coeficiente de conductividad térmica

g = constante de la gravitación

β = coeficiente de expansión volumétrico (para un gas ideal, $\beta = 1/T$)

ν = viscosidad cinemática

α = difusividad térmica

3.1.3. Radiación. Una vez que se han presentado los principios más relevantes de la transferencia de calor por conducción y por convección en lo que respecta a la conversión fototérmica de la energía solar, es importante destacar ahora los fundamentos de la transferencia de calor por radiación. Dada la naturaleza de los fenómenos de transmisión, reflexión, absorción y emisión de energía que se llevan al cabo en un colector de energía solar, el mecanismo de transferencia de calor por radiación requiere de un análisis preciso que coadyuve a la comprensión clara de los fenómenos físicos que ocurren en la naturaleza.

A diferencia de los mecanismos de transferencia de calor por conducción, en donde el transporte de energía requiere de un medio material para ser llevado a

cabo, el calor puede propagarse por radiación incluso en el vacío. Aun cuando no se conoce por completo el mecanismo físico de la radiación en cuanto así ésta es transportada por ondas electromagnéticas o por fotones, si se sabe, sin embargo, que la radiación viaja en el vacío a la velocidad de la luz

La radiación electromagnética se caracteriza por su longitud de onda, la radiación térmica está asociada a la agitación de moléculas, es decir, a transiciones atómicas o moleculares.

Dentro de todo el espectro de radiación electromagnética, (Véase la figura 10) la radiación térmica se encuentra comprendida entre 0,2 y 100 μm aproximadamente. A la luz de los principios presentados con anterioridad debe hacerse notar que la energía solar extraterrestre corresponde un intervalo mucho más pequeño: - 0,2 a 4 μm -. Más aún, la energía solar que recibe la superficie de la tierra se encuentra en el intervalo de 0,3 a 2,5 μm aproximadamente.

La Radiación es un proceso en el cual el calor fluye de un cuerpo a otro. La Radiación la emite cualquier cuerpo que tiene calor, como las ondas de radio parten de una antena.

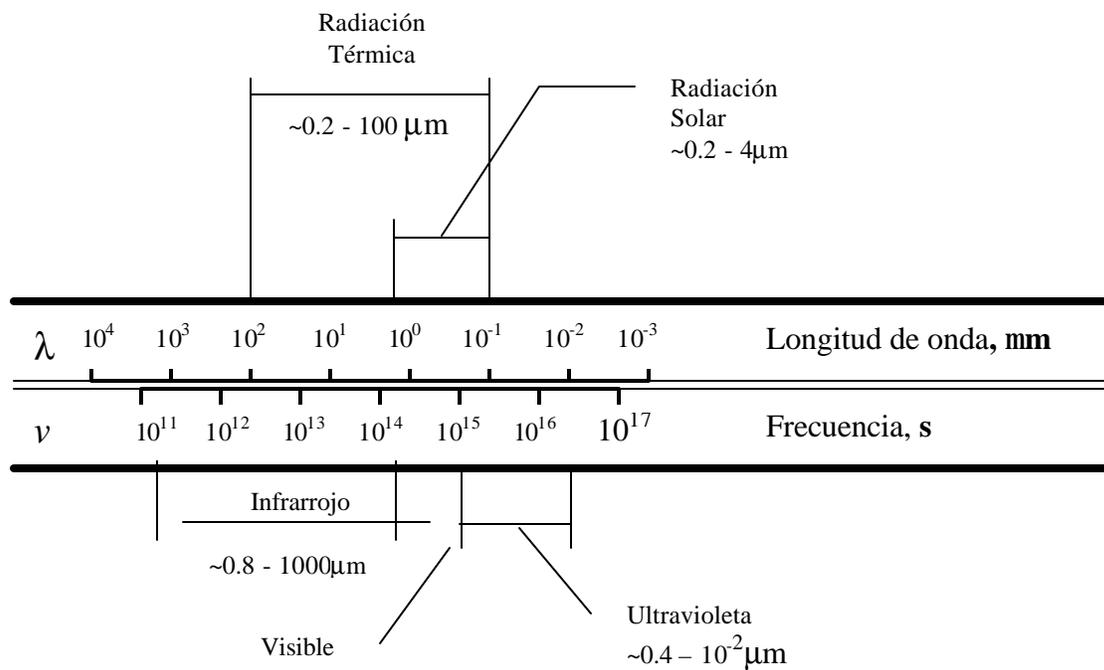


Figura 10. Espectro Electromagnético

El flujo de calor depende de la temperatura ambiente del objeto, sin tomar en cuenta la distancia. Un colector solar está normalmente más caliente que el medio que lo rodea y va irradiar calor hacia afuera así como una chimenea en un cuarto sin flujo de aire irradia calor hacia la persona que está cerca.

La radiación o intensidad de calor que emite una superficie está en función de la temperatura a la cuarta potencia por la emisividad de la superficie y por la constante de Stephen Boltzman; es decir $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$. Como consecuencia de esto, la radiación de una superficie se obtiene de la siguiente manera:

$$Q = eAT^4 \quad (29)$$

Donde:

T = temperatura absoluta de la superficie

e = Emisividad de la superficie

Q = Razón de radiación térmica

s = Constante de Stephen Boltzman

A = Área del Colector

Con respecto al cálculo de la radiación para efectos de colectores solares, hay dos casos especiales cuyos cálculos se realizan en forma más simplificada.

El primer caso especial es cuando se quiere establecer la radiación térmica entre dos superficies planas paralelas a infinito.

El segundo caso es particular cuando un colector solar está rodeado por una superficie grande (como el cielo), en este caso la fórmula es:

$$Q = \epsilon A t (T^4_{\text{cielo}} - T^4_{\text{colector}}) \quad (30)$$

Donde:

Q: razón de radiación térmica que intercambia el colector con el cielo.

3.1.3.1. Radiación Solar: Directa y Difusa. Para diseñar colectores solares, sistemas de control de temperatura para vehículos espaciales y sistemas de aire acondicionado para autos y edificios se requieren métodos que permitan calcular la absorción de radiación solar. Sin embargo, la cantidad de radiación solar que incide sobre un colector depende de muchas variables, que incluyen la hora del día, la estación del año, la altitud y el estado del tiempo.

La potencia emisiva total del Sol equivale a la de un cuerpo negro $5762\text{ }^{\circ}\text{K}$, pero su distribución espectral difiere ligeramente a la correspondiente un cuerpo negro. A medida que la radiación solar pasa a través de la atmósfera de la Tierra, una parte de la energía de la radiación solar es dispersada por moléculas de gas, en particular de CO_2 , y de H_2O . Por lo tanto, la radiación solar que incide sobre la superficie de la Tierra consiste tanto en una componente *directa* como una componente *difusa* de radiación dispersada. La suma de estas dos componentes es la irradiación solar, G_s , y su valor para una superficie horizontal se llama Insolación, así, la insolación depende de la hora del día, la estación del año y la altitud. En el diseño minucioso de elementos tales como los colectores solares es necesario además, separar la irradiación solar en sus componentes *directa* y *difusa*, lo cual constituye una tarea complicada.

3.1.3.2. Radiación Directa sobre Superficies Inclinadas (Parabólica). Cuando se considera una superficie inclinada, un ángulo \mathbf{b} con respecto a un plano horizontal y que forma un ángulo azimutal \mathbf{g}_s con respecto al sur. En estas circunstancias, como se observa en el esquema de la figura 11, el ángulo de incidencia \mathbf{q} de la radiación directa queda definido como el ángulo entre la normal a la superficie y el haz de radiación. La relación entre \mathbf{q} y los otros ángulos, está

dada por la ecuación (9) indicada en el inciso relacionado con la duración astronómica del día.

Varios casos particulares de la ecuación (9) son de interés:

- a. Superficie horizontal. En este caso $b = 0^\circ$ y $q = q_z$. Según la ecuación (9)

$$\cos q_z = \sin d * \sin f + \cos d * \cos f * \cos w$$

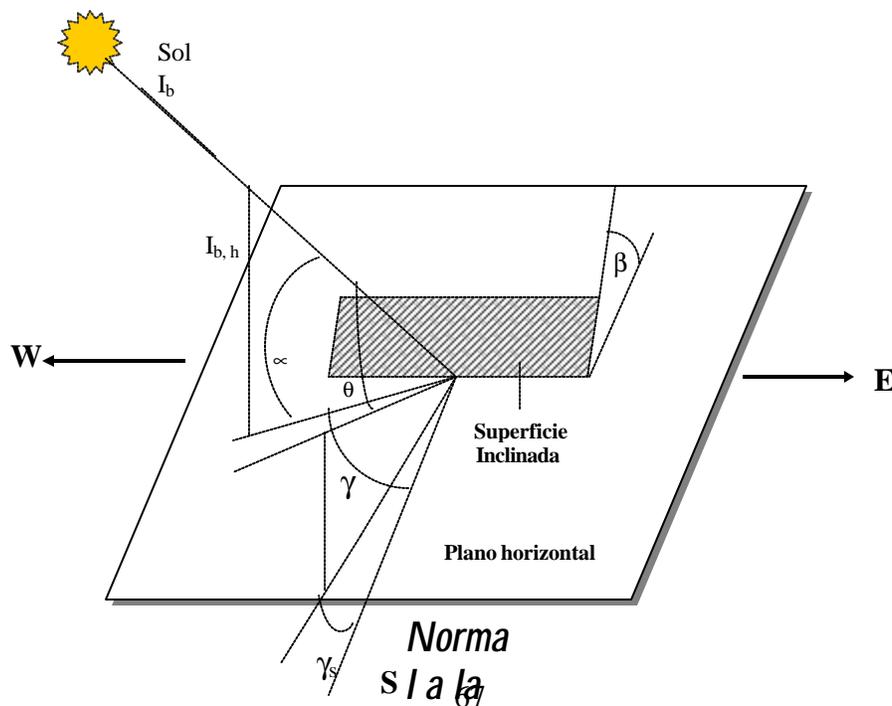
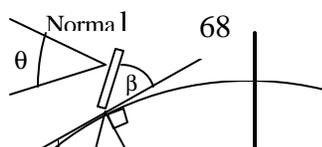


Figura 11. Angulo de incidencia q en función de otros ángulos

b. Superficie inclinada hacia el sur. Por ejemplo, un colector plano. Se observa que el ángulo de incidencia q es idéntico al ángulo azimutal, para una superficie horizontal localizada en un lugar en el que la latitud es igual a $(f - b)$ (Véase la figura 12). En consecuencia, de la ecuación anterior, se origina la siguiente ecuación:

$$\cos q = \sin d * \sin(f - b) + \cos d * \cos(f - b) \cos w \quad (31)$$



c.

d.

e.

f.

g.

h.

i.

j.

k.

c. Superficie vertical orientada hacia el sur. En este caso $b = 90^\circ$ y $g_s = 0^\circ$ según

la ecuación (9)

$$\cos \mathbf{q} = -\text{sen} \mathbf{d} \cos \mathbf{f} + \cos \mathbf{d} \text{sen} \mathbf{f} \cos \mathbf{w} \quad (32)$$

A menudo es necesario conocer la radiación directa sobre una superficie inclinada cuando solamente se conoce la componente sobre un plano horizontal. Haciendo referencia a la figura 13 puede definirse el cociente de la radiación directa sobre un plano inclinado $I_{b,c}$ a la radiación directa sobre un plano horizontal $I_{b,h}$. Es decir:

$$R_b = \frac{I_{b,c}}{I_{b,h}} = \frac{I_b \cos \mathbf{q}}{I_b \cos \mathbf{q}_z} = \frac{\cos \mathbf{q}}{\cos \mathbf{q}_z} \quad (33)$$

Si la superficie se encuentra inclinada hacia el sur pueden emplearse las ecuaciones anteriores es decir:

$$R_b = \frac{\text{sen} \mathbf{d} \text{sen}(\mathbf{f} - \mathbf{b}) + \cos \mathbf{d} \cos(\mathbf{f} - \mathbf{b}) \cos \mathbf{w}}{\text{sen} \mathbf{d} \text{sen} \mathbf{f} + \cos \mathbf{d} \cos \mathbf{f} \cos \mathbf{w}} \quad (34)$$

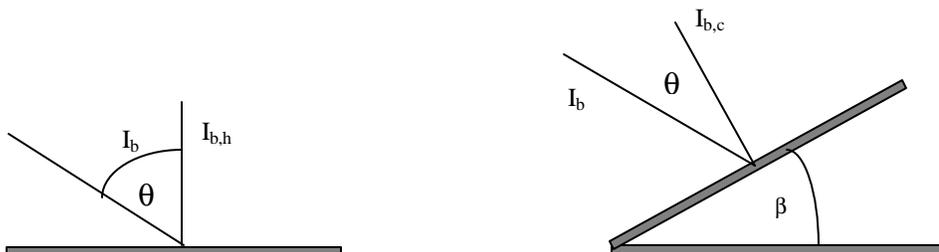


Figura 13. Radiación directa sobre un plano horizontal y sobre un plano inclinado

Donde q_z puede calcularse mediante la siguiente ecuación, haciendo $b = 0$,

$$\cos q_z = \sin d * \sin f + \cos d * \cos f * \cos w \quad (35)$$

Donde:

q_z Ángulo de incidencia de la radiación directa o sea el ángulo entre la radiación directa sobre la superficie horizontal y la normal de la superficie (o cenit).

4. COLECTORES SOLARES.

4.1. INTRODUCCIÓN.

Los Colectores de Enfoque utilizan sistemas ópticos-reflectores o refractores, que incrementan la intensidad de radiación solar en la superficie de la energía absorbida. El más alto flujo de energía en la superficie significa una más pequeña área superficial para una dada cantidad total de energía y correspondientemente reduce las pérdidas térmicas. Considerando los balances de energía, los cuales son similares a los de un Colector de plato-plano, muestra que la operación a altas temperaturas es posible. Por lo cual las pérdidas térmicas son reducidas, dos clases adicionales de pérdidas podrían ser significativas: muchos sistemas de enfoque operando con la componente directa de radiación solar y la difusa es pérdida, y las pérdidas ópticas adicionales en términos llegarían a ser significativas.

Un Concentrador de Enfoque puede ser visto como un caso especial de colector de plato-plano, modificado por la interposición de una concentración de la radiación el cual sirve para levantar de otro modo el bajo nivel de radiación en el

absorbedor. Aunque los conceptos básicos son aplicables a sistemas de enfoque, es necesario tener en cuenta un número de consideraciones que salen del uso de concentradores. Entre las complicaciones están: extensas variaciones en la forma, temperatura y pérdidas térmicas características de los absorbedores y la introducción de factores ópticos adicionales en el balance de energía.

Los Colectores de Enfoque pueden tener intensidades de radiación en la superficie absorbiendo e incrementando por un ancho rango de radios, con valores bajos de 1,5 a 2 a valores altos del orden de 10.000. El incremento de los radios significa incrementos en la temperatura por lo cual la energía es entregada, pero esto también significa aumentos en los requisitos en la precisión del sistema óptico de lo cual se incrementan los costos. Los costos de energía entregada para sistemas de colectores de enfoque es una función directa de la temperatura de la cual es obtenible.

Desde el punto de vista de ingeniería, los Colectores de Enfoque presentan algunos problemas adicionales. Muchos de ellos (excepto los de muy baja escala de concentración final) están orientados en variación de grados, el “seguimiento” del Sol de la radiación directa sería dirigido a la superficie del absorbedor. A menudo, el diseño está abierto al rango de configuraciones del sistema lo cual

permite un juego de parámetros en el diseño para ser manipulados. Estos son nuevos requisitos de mantenimiento, particularmente para mantener la calidad del sistema óptico por largos períodos de tiempo, en contra de factores como oxidación, el aire, las lluvias, etc.

El resultado de la combinación de problemas de operación y costos de colector están restringidos a la utilización de Colectores de Enfoque. Nuevos materiales y mejores sistemas de ingeniería se lograrían luego de importantes aplicaciones prácticas.

El Receptor es el elemento del sistema donde la radiación es absorbida y convertida en cualquier otra forma de energía e incluye el Absorbedor asociado con el revestimiento, aislamiento y así sucesivamente. El Concentrador o Sistema Óptico es la parte del colector que envía la radiación directa sobre el Receptor. En general, la ingeniería aplicada a la buena óptica, transferencia de calor, termodinámica, y prácticos diseños de configuraciones especiales seleccionadas para evaluaciones.

“Poca información concerniente a mediciones de balance de energía en colectores de enfoque ha sido publicada; por otra parte, se han realizado estudios para sistemas reflectores cilíndrico-parabólicos, en donde, los datos son usados en el desempeño del sistema y un método para calcular este desempeño, convirtiéndose en otros métodos, los cuales son discutidos, los cuales a menudo se han ido analizando y describiendo las propiedades ópticas de los concentradores, técnicas del tarazado de rayas y programas de computador en general para evaluar sistemas ópticos que constituyen herramientas útiles para detalles de evaluación de problemas ópticos de sistemas de enfoque”⁹.

4.2. COLECTORES PLANOS.

4.2.1. Desarrollo Histórico. Los Colectores Planos forman parte de la tecnología más antiguas para el aprovechamiento de la energía solar. Desde tiempos muy remotos los indígenas de África, los países árabes y otros, han empleado la energía solar para calentar agua mediante vasijas de forma especial. Sin embargo el naturalista suizo Horace de Saussure fue quizás el primero en diseñar

⁹ SOLAR ENERGY THERMAL PROCESS. Duffie John A. A. Wiley – Interscience publication. EE.UU. 1974. Pág. 178 – 179.

formalmente sistemas de colectores planos para calentamiento de agua (“cajas calientes”) durante la mitad del Siglo XVII.

Los colectores solares para calentamiento de aire son de invención mucho más reciente. El calentador de aire con vidrio superpuesto fue introducido por KW. Miller en 1943, poco después, en 1945, G. Löff fue el primero en emplear colectores planos para calentar el espacio interior de una construcción.

4.2.2. Principios de Operación y Tecnologías. Los colectores planos han sido ampliamente estudiados teórica y experimentalmente. Son dispositivos relativamente robustos, operan en una posición fija, pueden captar eficientemente la energía solar y permiten alcanzar bajas temperaturas ($< 100^{\circ}\text{C}$) en un fluido, existe una abundante variedad de diseños, con variaciones relativamente pequeñas en cada uno de ellos.

4.3. COLECTORES SOLARES DE ENFOQUE.

Cuando se desean alcanzar temperaturas medio o altas ($>250^{\circ}\text{C}$) mediante el aprovechamiento de la energía solar, se hace necesario, dada la baja densidad energética de la radiación solar, el uso de colectores con una mayor relación de concentración que la obtenible en los colectores solares estacionarios con concentración. Los colectores de alta razón de concentración deben reflejar los rayos solares en áreas muy pequeñas comparadas con la de captación (tan pequeñas como sea posible, para reducir las pérdidas de calor). Para lograr esto los colectores deben ser capaces de seguir el movimiento diario aparente del Sol, ya sea en una o en dos direcciones.

4.3.1. Desarrollo Histórico. “En el siglo IV AC los griegos conocían ya el principio básico de los colectores solares con seguimiento o de enfoque; sabían que apuntando varios espejos a un mismo lugar podría prenderse fuego a un objeto (lo espejos empleados eran de plata o de cobre pulido). Para el siglo III AC se construían ya espejos cilíndricos y parabólicos siendo la geometría una de las ramas más desarrolladas por los griegos pudieron ofrecer explicaciones de las diferencias de eficiencias observadas entre los espejos cilíndricos y parabólicos, apareciendo incluso en el siglo II AC un tratado de Diocles titulado “Sobre espejos que queman”, se cuenta también que Arquímedes empleó reflectores solares para

quemar barcos enemigos de Siracusa, pero esto al parecer es parte de un anecdotario”¹⁰.

En 1860 August Mouchot, profesor francés de matemáticas, inició las primeras investigaciones científicas sobre las aplicaciones de los colectores solares de enfoque con seguimiento del Sol. Mouchot inició sus trabajos siguiendo los pasos de Saussure en el uso de “Cajas Calientes”, pero pronto abandonó esta línea y construyó la primera caldera solar de que se tenga noticia, con un concentrador con seguimiento, el éxito de su experimento indujo al gobierno francés a patrocinar su investigación, durante esta misma época y también en Francia, A. Pifre¹¹ experimentaba con colectores parabólicos en lugar de conos truncados.

En 1907, después de construir algunos prototipos de prueba, el ingeniero americano Frank Shuman construyó cerca de Philadelphia su primera planta solar para producir vapor, en 1910 Shuman cambió su diseño para obtener una mayor eficiencia, en junio de 1913, 7 años de trabajo patrocinados por inversionistas

¹⁰ ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS. Antonio Alfonso Concheiro. Mc Graw hill. México. 1989. Pág. 113 - 117

¹¹ *Ibíd.*, Pág. 118

británicos interesados en construir plantas solares por irrigación culminaron con la instalación de la mayor planta solar del mundo en Meadi, Egipto, a orillas del Nilo.

“En 1936 C. Abbot empleó colectores de tipo canal parabólica para producir energía mecánica. En 1941 y 1946, en la antigua URSS, F. Molero empleó grandes colectores parabólicos de enfoque puntual para producir vapor”¹².

En la India N. Ghai y M. Khanna trabajaron entre 1951 y 1955 con motores para aire a altas temperaturas semejante a los Ericsson, calentando el aire con colectores solares parabólicos.

En la década de los cincuenta el interés por los colectores con seguimiento cobró una nueva importancia. F. Trombe construyó en Mount Louis, en los Pirineos franceses, su primer horno importante con base en un disco colector parabólico.

Durante los setentas el número de plantas de demostración con colectores solares con seguimiento (de canal parabólica, discos parabólicos y helióstatos)

¹² *Ibíd.*, Pág. 118

implantadas en el mundo (EE.UU, Austria, la antigua URSS, Francia, España, etc.) creció considerablemente.

4.3.2. Principios de Operación y Tecnología. Entre los sistemas que emplean colectores de concentración y seguimiento del movimiento diario aparente del Sol suelen distinguirse dos grandes grupos: a) los llamados Distribuidos, a los cuales pertenecen los Colectores Cilíndrico-Parabólicos, que pueden ser de enfoque lineal o puntual, y b) los de Torre Central, que emplean espejos planos llamados helióstatos, para concentrar la radiación solar en un punto sobre ellos. En los sistemas Distribuidos cada módulo de espejos o colector tiene su propio absorbedor; en los de Torre Central todos los espejos se enfocan hacia un absorbedor común. Los sistemas con concentración aprovechan solo la componente directa de la radiación solar.

4.3.3. Sistemas Distribuidos. Como en el caso de los colectores estacionarios con concentración, en los concentradores con seguimiento, un conjunto de espejos (o lentes) recibe la radiación solar y la refleja (o refracta) hacia un absorbedor, cuya superficie es mucho más pequeña que el área de captación, con una razón de concentración mayor que de 10, esto permite aumentar la densidad energética de

la radiación recibida por el absorbedor, pero requiere que el colector siga el movimiento del Sol en una o dos direcciones, lo que se logra con dispositivos especiales. El absorbedor eleva su temperatura y al ponerse en contacto con un fluido de trabajo que circula por su interior le cede calor, los fluidos de trabajo más comúnmente empleados son agua y los aceites térmicos. La energía ganada por el fluido de trabajo es después convertida energía útil. Las temperaturas alcanzables con estos sistemas son mayores que con cualquiera de los colectores solares tratados anteriormente. Según la geometría de los objetos empleados y el arreglo utilizado en el absorbedor pueden obtenerse temperaturas máximas de 150 a 600°C.

Los sistemas solares distribuidos han sido propuestos para aplicaciones en sistemas de bombeo e irrigación, generación de calor para uso industrial y acondicionamiento ambiental, y también para la generación de energía eléctrica. Los concentradores de estos sistemas pueden ser de curvatura simple, en forma de canal cilíndrica parabólica, o de curvatura compuesta, de tipo platillo parabólico o casquete semiesférico. Con los primeros es posible lograr razones de concentración entre 10 y 60 y con los segundos de hasta 1.000. Los colectores cuyo espejo coincide con un paraboloides de revolución son también llamados de Enfoque Puntual. El resto refleja la energía solar que reciben sobre una línea y

son por tanto también llamados de Enfoque Lineal. En la tabla 5 se muestra esquemáticamente los diferentes tipos de concentradores que se encuentran en desarrollo a nivel mundial; dentro de cada tipo de movimiento los concentradores están presentados en orden equivalente, en orden creciente de su calidad óptica. Para cada caso se indica el intervalo de los factores de concentración geométricos que se logran actualmente.

4.3.3.1. Con Seguimiento en un Eje. Los colectores con seguimiento en un eje pueden ser de tipo Reflectivo (espejos), Refractivo (lentes) o Combinado (reflectivos y refractivos).

Entre los Reflectivos el más común es el llamado de tipo Canal Parabólica, dado que el tamaño del Sol es infinito, el límite máximo para la razón de concentración de estos colectores es alrededor de 200, aunque en la práctica se emplean razones de concentración de 25 a 35, buscando un compromiso entre calidad geométrica y costo del colector. Otras configuraciones que han sido propuestas y probadas, emplean espejos planos para aproximar la geometría parabólica mediante tiras estrechas o bien canales de sección transversal circular, los últimos tienen razones de concentración menores que los de geometría parabólica.

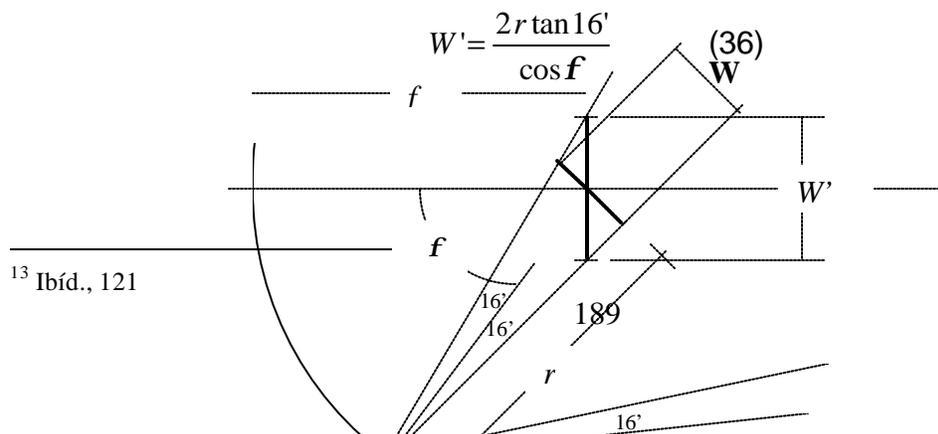
Para los colectores de tipo Refractivo se pueden emplear lentes cilíndricos, pero debido a su gran masa se han descartado y probablemente no merezcan mayor atención. El uso de lentes Fresnel ha sido tratado más favorablemente, habiéndose alcanzado en dispositivos experimentales arzones de concentración de hasta 45 y 60. En la mayor parte de los diseños los colectores (o colectores y absorbedores) son los que se mueven para seguir el Sol; existen sin embargo Colectores que los espejos están fijos y el absorbedor es el que se mueve para colocarse en el eje focal de los espejos, conforme este cambia de posición.

Tabla 5: Diferentes Tipos de Concentradores de Radiación Solar

4.4. EL DISCO SOLAR Y LA IMAGEN SOLAR TEÓRICA.

“La función de un Sistema Óptico es la de formar una imagen en el Receptor, la imagen comienza, en general, no como un reflejo. La relación del tamaño del Sol y la distancia a la tierra determina que el ángulo subtendido por el disco solar es 32' a un observador en la tierra”¹³. Así una imagen teórica del Sol creada por el Sistema óptico en la geometría del sistema.

Esto es ilustrado en la figura 14, donde W' (o W) es el tamaño de la imagen teórica (ancho o radio) para una imagen formada por parte del receptor. Para un reflector que es plano y normal al eje del concentrador, el ancho, W' , es hallado usando la aplicación del “radio especular”. r , donde:



La distancia r a partir de un punto en el reflector al foco puede ser derivado para la forma

particular del reflector. Para un reflector de sección parabólica, la longitud focal es definida por la ecuación de superficie,

$$y^2 = 4fx \quad (37)$$

y res dado por,

$$r = \frac{2f}{1 + \cos f} \quad (38)$$

Donde f es la longitud focal de la parábola, y f es el ángulo entre el eje y el rayo reflejado al foco mostrado por la figura 14. Note que como f varía de 0 a f_{\max} , r se incrementa para f a r_{\max} y el tamaño de la imagen teórica se incrementa de

$$W|_r = f \text{ a } W|_r = r_{\max} \left(\text{desde } 2f \tan 16' \text{ a } 2r_{\max} \frac{\tan 16'}{\cos f_{\max}} \right).$$

Así, el tamaño de la imagen es finito y ampliando la imagen plana para sistemas de geometría perfecta. La figura 15 muestra una sección de una imagen solar ideal en un punto normal al eje de la parábola.

La Apertura es la abertura o el área proyectada del sistema óptico. Para superficies de revolución, la apertura es usualmente caracterizada por el diámetro del reflector, o para los sistemas cilíndricos, por el ancho. La longitud focal es un factor determinante en el tamaño de la imagen mostrada, por las ecuaciones (36) y (38), y la apertura, a , es un factor determinante en la energía total; así la claridad de la imagen o la concentración sería una función de la relación a/f .

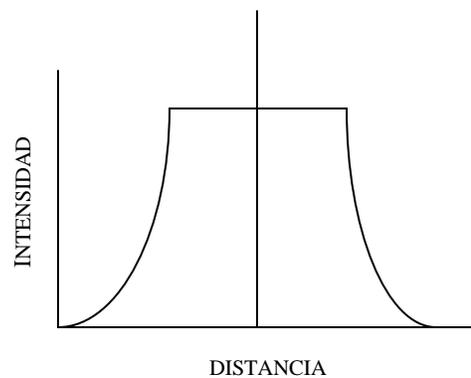


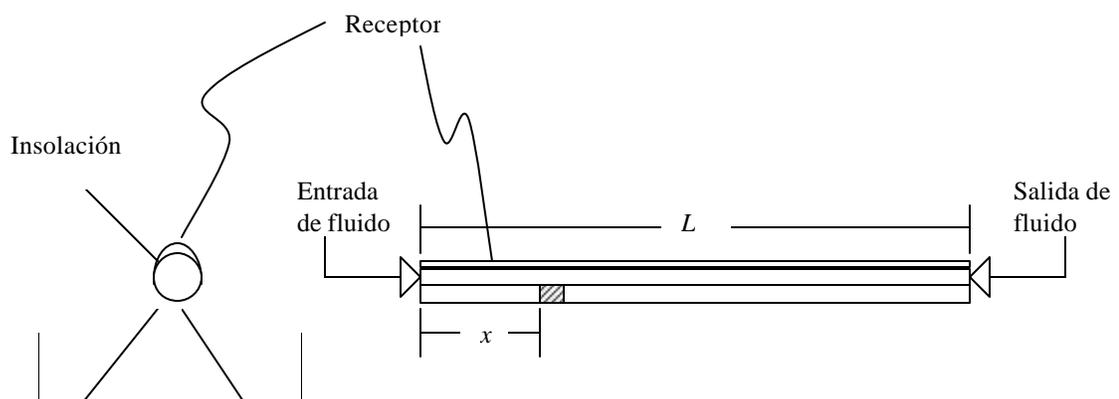
Figura 15. Sección transversal de una imagen solar teórica en una superficie plana

La radiación no es recibida uniformemente en el disco solar total, como lo anota De La Rue (1957), el centro del Sol es brillante en las capas oscuras (la edad del Sol). Así esta es una distribución adicional no uniforme de radiación a través de la imagen solar teórica que tendería a distorsionar la imagen solar teórica de la

figura 15. Esta sección tiene referencia a las imágenes teóricas y solamente aplicaciones más precisas a sistemas ópticos. Más reflectores solares de interesante potencial práctico no son interesados precisamente en instrumentos ópticos, y produce imágenes substancialmente más largas que la teórica; en estas más largas imágenes es que nosotros estaríamos interesados.

4.5. BALANCE DE ENERGIA.

Como en los colectores de plato-plano, los balances de energía son usados para describir el desempeño de los sistemas colectores de enfoque. En una manera análoga de colectores plato-plano, primero hablaremos del desempeño térmico en términos generales y luego describiremos los diversos términos en detalle. Como un ejemplo, considere un colector cilíndrico-parabólico, como se muestra en la figura 16.



Por unidad de área de apertura, el balance de energía en una ubicación x sería escrito como:

$$q_u = H_b R_b \mathbf{rgta} - U_L \frac{A_r}{A_a} (T_{r,x} - T_a) \quad (39)$$

o, si todo el receptor esta a una temperatura uniforme, T_r (como esta puede ser si esta sería un calentador) la generación de energía útil para el receptor es:

$$Q_u = A_a H_b R_b \mathbf{rgta} - U_L (T_r - T_a) \quad (40)$$

Donde los términos significan lo siguiente:

r : la reflectancia especular de la superficie del reflector (promedio sobre el ángulo apropiado).

g : la fracción de radiación especular reflejada que es interceptada por la superficie del absorbedor, es el factor de intercepción.

ta : la transmitancia del revestimiento (cuando está presente el revestimiento) y absortancia del receptor.

$H_b R_b$: estos términos tienen algún significado básico para los cambios plato-plano, H_b incluye solamente la componente de la radiación solar incidente (excepto para sistemas con muy bajo radio de concentración donde alguna radiación difusa sería colectada); y R_b es el radio del rayo de radiación en la apertura del reflector que en lo que la superficie H_b sería medido (para el rayo de radiación, algunas mediciones en la superficie normal a la dirección de propagación son obtenidas). Así, el producto $H_b R_b$ es el rayo de radiación en el plano de la apertura del colector.

A_a/A_r : Es la relación del área efectiva de la apertura al área de la energía solar absorbida y es definida por la “relación de concentración”. Note que A_a es el área proyectada sin sombra del sistema reflector, el cual, puede ser más pequeño que el área de apertura total y A_r es el área del receptor.

Para un colector solar plato-plano, $A_a = A_r$ y el máximo flujo de energía es aproximadamente $1 \text{ KW}/\text{m}^2$ que limita la tasa de transferencia de calor útil neto en el intercambio. Para colectores de enfoque, la relación A_a/A_r puede cambiar un rango de uno a muchos miles; en el rango alto, la tasa de flujo de energía se puede comparar con los cambios de calor en industrias convencionales.

$U_L(T_r - T_a)$: las pérdidas térmicas por unidad de área para un receptor a temperatura T_r alrededor de T_a , pueden algunas veces ser expresadas por esta linealidad del calor de pérdidas térmicas. La evaluación de estos términos es muy similar al colector de plato-plano.

Desde las pérdidas térmicas a lo largo de la superficie del colector solar de plato-plano se incrementan con la temperatura, la baja energía útil entrega resultados de altas temperaturas. Por incrementar la relación de concentración $\frac{A_a}{A_r}$ como constantes A_a y U_L las pérdidas térmicas son reducidas (esto es equivalente al reducir U_L para un colector de plato-plano).

Este método de ir controlando las pérdidas térmicas permite la colección a altas temperaturas. De cualquier modo, las pérdidas por reflexión, las pérdidas por intersección, y el fracaso de colector radiación difusa reduce la energía del absorbedor la cual debería estar en un colector de plato-plano.

4.6. DESEMPEÑO TÉRMICO DE LOS COLECTORES DE ENFOQUE.

Los métodos para calcular las pérdidas térmicas para receptores de cambio de enfoque no son fácilmente aumentados en el caso de cambios de plato-plano, aunque algunos principios son usados.

Para Reflectores, las formas son muy variables, las temperaturas son más altas, los efectos en el borde son más significativos, los términos de conducción serían totalmente altos y los problemas serían compuestos por el factor que el flujo de radiación en los receptores no es uniforme. Así, los gradientes substanciales de temperatura pueden existir por las superficies de energía absorbida. Por esto no es posible presentar un método general y singular de estimación de las pérdidas térmicas y últimamente cada geometría del receptor sería analizada como un caso especial.

La naturaleza de las pérdidas térmicas para receptores del tipo de colectores de enfoque son en general algunos como cambios del plato-plano, y algún método básico es usado para estos cálculos. Los Receptores tendrían revestimiento transparente a la radiación solar; las pérdidas exteriores del absorbedor por conducción y radiación a la atmósfera son correspondientemente modificados y ecuaciones similares a estas pueden ser usadas para estimar sus magnitudes. Como son sistemas plato-plano, las pérdidas pueden ser estimadas siendo independiente de la intensidad de radiación incidente, aunque esto no sería estrictamente así, particularmente si un revestimiento transparente del absorbedor apreciable para la radiación solar. En unos eventos el producto de transmitancia-

absortancia puede ser definida por sistemas de enfoque. Además, con sistemas de enfoque la intensidad de radiación en el receptor es generalmente solamente los materiales del revestimiento con baja absortancia para la radiación solar puede ser usado sin daños térmicos del revestimiento. Las pérdidas de conducción ocurren a través de una insolación en porciones no irradiadas del receptor y a través de una estructura soportada para el receptor.

El análisis generalizado de sistemas de colectores de enfoque es muy similar al colector de palto-plano, este es necesariamente derivado apropiadamente de expresiones F' , el factor de eficiencia del colector, y U_L , el coeficiente de pérdidas. Con F' y U_L conocidos.

Considere un reflector cilíndrico-parabólico y un receptor circular destapado. Asume que este no es el gradiente de temperatura alrededor del tubo receptor. El coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y el tubo es h_i , y el coeficiente de pérdidas en el exterior del tubo es U_L . Note que U_L es utilizado como motivo para la radiación esencialmente con el cielo debido al reflector. El coeficiente de pérdidas U_L es encontrado por:

$$U_L = \left(\frac{1}{h_{wind}} + \frac{1}{h_r} \right)^{-1} \quad (41)$$

El coeficiente de radiación linearizado, h_r , es hallado por,

$$h_r = 4\epsilon_r \bar{T}^3 \quad (42)$$

Donde T es el punto medio de la temperatura de radiación y ϵ_r es la emitancia del receptor. Desde el flujo de calor en un sistema de concentración sería alto, la resistencia de la transferencia de calor para la superficie exterior del tubo recibiendo el fluido debería incluir la pared del tubo. El coeficiente de transferencia de calor total (basado en el diámetro exterior del tubo) para los alrededores del fluido es:

$$U_0 = \left(\frac{1}{U_L} + \frac{D_0}{h_i D_i} + \frac{D_0 \ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)}{2k} \right)^{-1} \quad (43)$$

Donde D_i y D_o son el diámetro interior y exterior del tubo, h_i es el coeficiente de transferencia de calor en el interior del tubo, y k es la conductividad térmica del tubo.

Rescribiendo el balance de energía de la sección 4.5, la energía útil ganada q_u por unidad de longitud del colector L puede ser expresado en términos de la temperatura del receptor local, T_r , como:

$$q_u = \frac{A_a}{L} H_b R_b \mathbf{rag} - \Pi D_0 U_L (T_r - T_a) \quad (44)$$

y también en términos de la energía transferida al fluido como:

$$q_u = \frac{\Pi D_0 (T_r - T_f)}{(D_0)/(h_i D_i) + (D_0 l_n D_0 / D_i) / 2k} \quad (45)$$

Si eliminamos Tr de las ecuaciones (44 y 45) tenemos:

$$q_u = F' \frac{A_a}{L} \left[S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_f - T_a) \right] \quad (46) \quad \text{y} \quad F' = \frac{U_0}{U_L} \quad (47)$$

Donde:

$$A_r = \Pi D_0 L; \quad S = H_b R_b \mathbf{r} \mathbf{g} \mathbf{a} \quad (48)$$

Si algún procedimiento es desarrollado resulta la ecuación siguiente:

$$Q_u = A_a F_r \left[S - \frac{A_r U_L}{A_a} (T_{F,i} - T_a) \right] \quad (49)$$

Con el factor de flujo del reflector F'' equivale a:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L F'} \left[1 - e^{-A_r U_L F' / \dot{m} C_p} \right] \quad (50)$$

Algún análisis es aplicado al receptor que es revestido, pero es necesariamente incluido en el producto efectivo transmitancia-absortancia en S y propiamente evaluado en U_L con el motivo de arreglar las resistencias de transferencia de calor. Si un receptor de este tipo discutido anteriormente sirve como una caldera, F' esta dado por la ecuación (47), pero F_R es luego identificado igual a F' , como esto no es gradiente de temperatura en la dirección del flujo. Si una parte del receptor sirve como una caldera y otra parte como calentador del fluido.

4.7. PERDIDAS EN LOS CONCENTRADORES DE ENFOQUE

4.7.1. Pérdidas Ópticas: r , ta , y g . La reflectancia especular r , es definida como una fracción especular de una colisión incidente del rayo lo cual es reflejado a un ángulo de reflexión equivalente al ángulo de incidencia. Esto es función de la naturaleza de la superficie y de su acabado. La alta reflectancia especular tiende comúnmente a ser lograda para uso de materiales depositados o capas en substratos de metales (superficies reflectoras frontales) o vidrios (superficies de revés de los reflectores). Láminas de aluminio anodizado tienden a ser usados en unidades experimentales de enfoque, particularmente del tipo cilíndrico-parabólico. Para sistemas prácticos de colectores de enfoque, es importante que altos valores de r sean obtenidos a través de la vida del colector.

La *Transmitancia* t , y *Absortancia* a , tienen algún significado como para el colector de plato-plano. Sus valores quizás, algunas veces, difieren de los colectores de palto-plano, por las siguientes razones las cuales difieren en particular del diseño del sistema:

- ✓ Frecuentemente, los colectores de enfoque, no tienen revestimiento, y t no entra en el balance de energía.
- ✓ La cavidad del absorbedor son algunas veces causadas como receptores lo cual resulta en a aprovechada por unidad (con una correspondiente alta emitancia).
- ✓ t y a dependen del promedio del ángulo de incidencia de la radiación en el revestimiento y en el receptor.

El ángulo de incidencia de un rayo de la radiación reflejada sobre el receptor estaría en función de la posición del reflector, cuyo rayo es reflejado, y de la forma del receptor.

El valor apropiado del producto ta debería estar dado por una integración de la radiación pasando a través del revestimiento y la incidencia en el receptor de todas las partes del concentrador. Para un diseño apropiado, esto sería posible guardando todos los ángulos de incidencia menores de 60° por estar formando el receptor. Estas pérdidas serían significativas y su análisis exacto y son necesarias para la propia descripción de los cambios en el desempeño; de

cualquier modo, un riguroso análisis sería muy difícil, particularmente para concentradores de baja calidad.

El Factor de Intersección g representa la fracción de la radiación reflejada especularmente que es interceptada por la superficie absorbidora de energía. Este es un concepto importante como g puede, bajo algunas circunstancias, representar un factor importante en el balance de energía. El factor de intersección es una propiedad del concentrador el cual está orientando y produciendo una imagen en el reflector y esta posición relativa del concentrador está interceptando parte de la imagen.

El óptimo desempeño de un sistema con un reflector con propiedades ópticas dadas usualmente sería obtenido con el factor de intersección siendo menor que la unidad. En general, un óptimo tamaño del receptor resulta en la máxima energía útil ganada por minimizar la suma de pérdidas ópticas y térmicas; un largo receptor resulta en grandes pérdidas térmicas y bajas pérdidas ópticas por lo cual un pequeño receptor significa bajar las pérdidas térmicas pero aumentan las ópticas por que reduce el factor de intersección. La distorsión del flujo de distribución teórica como se muestra en la figura 15 a la distribución normal puede ser vista como el origen de 4 distintas causas, como:

- ✓ Pequeña escala de errores o irregularidades en la superficie del reflector lo cual causa dispersión de la imagen. Este efecto puede ser considerado como una disminución de la reflectancia especular r , e incremento por la reflectancia difusa si los errores pequeños son considerados de la naturaleza de los, errores macroscópicos.
- ✓ Errores macroscópicos en el reflector, resultado de la distorsión de la imagen solar.
- ✓ Errores en la posición relativa del receptor al reflector; y
- ✓ Errores en la orientación del sistema del colector, lo cual resulta una imagen aumentada y dispereja.

Experimentalmente, los efectos de errores de orientación angular o errores de posicionamiento del receptor relativo al reflector pueden ser estimados por procedimiento de trazado de flujos.

Dos factores adicionales están considerados en el ángulo RIM del reflector y la forma del reflector influida en ellos como ellos influyen en g y, así, en el desempeño del sistema. El ángulo RIM del reflector es definido como el ángulo

entre el eje y la línea trazada del foco al reflector RIM ; en la figura 14, el máximo valor de f es el ángulo RIM . El ángulo RIM es un parámetro de descripción importante, en efecto, los límites de dirección el cual alcanza la radiación en el receptor; la forma del receptor depende de esto. El ángulo RIM fija el tamaño de la imagen en la superficie del receptor de una orientación en particular y forma así fijando un tamaño del receptor mínimo para interceptar la imagen solar total.

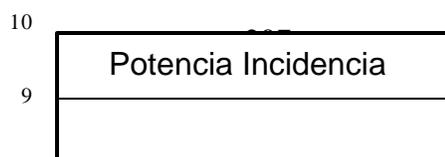
Los Receptores tendrían una variedad de formas, dependiendo de la geometría del concentrador; estos pueden incluir platos, cilindros, hemisférico, cavidad y otras formas. El método de trazado de rayos puede ser usado para mostrar los efectos de uno de estos factores producidos en la distribución del flujo de radiación por un concentrador y en la radiación reflejada interceptada por un receptor.

4.7.2. Pérdidas de los Extremos . Todos los dispositivos de seguimiento de un eje sufren pérdidas en los extremos. Esto es, cuando en la normal apertura no apunta directamente al Sol, la radiación reflejada desde los terminales del concentrador más distante del Sol no golpeará a menos que el absorbedor sea mas largo que el concentrador. En el otro extremo habrá una longitud del absorbedor que no será iluminado y tendrá pérdidas térmicas pero no ganancias térmicas. La magnitud de esta pérdida dependerá de la longitud focal del concentrador a la proporción de

medida longitudinal y en la orientación del eje de seguimiento. Entre más larga la medida del colector para una longitud focal dada, menos significantes son las pérdidas en el extremo. Para longitudes del colector fijas y longitudes focales, los ejes de seguimiento horizontal Este-Oeste sufren las más grandes pérdidas en los extremos que la orientación del eje Norte-Sur, desde un rango más ancho de ángulos de incidencia encontrado.

4.8. INTERVENCIÓN ÓPTICA.

Varios factores afectan la habilidad de un sistema óptico para dirigir la radiación del rayo entrante al absorbedor u objetivo y reúne esta energía para la transferencia de calor del fluido. Estos incluyen la absorción de la radiación en los elementos refractantes o reflexivos, irregularidades de la superficie de estos elementos, y tamaño y posicionamiento del absorbedor, todos las “pérdidas del espejo” se encuentran en la figura 17. Las pérdidas sobre el receptor primarían sobre las “pérdidas de transmitancia” mientras la absorción incompleta sobre el receptor prima sobre las “pérdidas de la capa absorbente”.



4.9. DESEMPEÑO DEL SISTEMA.

Para un concentrador dado hay muchos temas, los cuales un diseñador debe considerar en orden para investigar la sensibilidad del sistema. Se discuten aquí solamente cuatro cosas: tamaño del receptor, posición del receptor, seguimiento del colector, y el sombreado por colectores adyacentes, los cuales son tenidos en cuenta para temperaturas muy altas ($>350\text{ }^{\circ}\text{C}$).

4.9.1. Tamaño del Receptor. Un receptor ubicado en el plano focal no interceptará toda la radiación si este es muy pequeño, considerando que uno que es demasiado grande puede tener pérdidas termales innecesarias. Así, que una de las claves para optimizar la eficiencia del colector es optimizando el receptor; esto es difícil de hacer analíticamente sin acudir a los cálculos de un computador e igualmente, es difícil de hacer experimentalmente sin un control de prueba de exactitud, mediciones y sin el gasto de construcción de receptores de varios tamaños y formas.

Cobble¹⁴ estudió las formas de un receptor óptimo que podía interceptar toda la radiación reflejada cuando usó los concentradores parabólicos reflectivos. Él encontró que la forma de los receptores parabólicos era mejor teóricamente. El corte transversal de este consistía de la región formada por la intersección de dos parábolas idénticas, una rotada a 180° (3.14 rad.) con respecto a la otra (Ellos pensaban que se parecía al corte transversal de un balón de football). Lumsdaine y Cherng¹⁵ demostraron que el corte seccional de receptores de una forma elíptica ofrecieron ventajas sobre aperturas relativas (esencialmente números f) alrededor de 5. La figura 18 muestra sus resultados junto con algunos resultados anteriores de Cobble.

El modelo del computador sobre el original para concentradores de recipiente parabólico ha mostrado que la eficiencia del colector, afortunadamente, puede ser una función no tan dependiente del tamaño del receptor. Por ejemplo, un 25% de cambio en el diámetro del receptor produce bruscamente un cambio del 2 al 3 por ciento de cambio en la eficiencia únicamente. Este estudia indirectamente que el esfuerzo extra en la fabricación de receptores no circulares no puede justificarse. En esencia, las pérdidas del factor de forma (energía pérdida cuando hay

¹⁴ M.H. Cobble, Theoretical Concentration For Solar Furnaces, Solar Energy 5 (2) 1961

¹⁵ E. Lumsdaine and J. C. Cherng, On Heat Exchangers Used with Solar Concentrators, Solar Energy 18, 157 (1976)

radiación errada sobre el absorbedor) pueden ser parcialmente balanceadas por el desempeño térmico mejorado con un buen diseño.

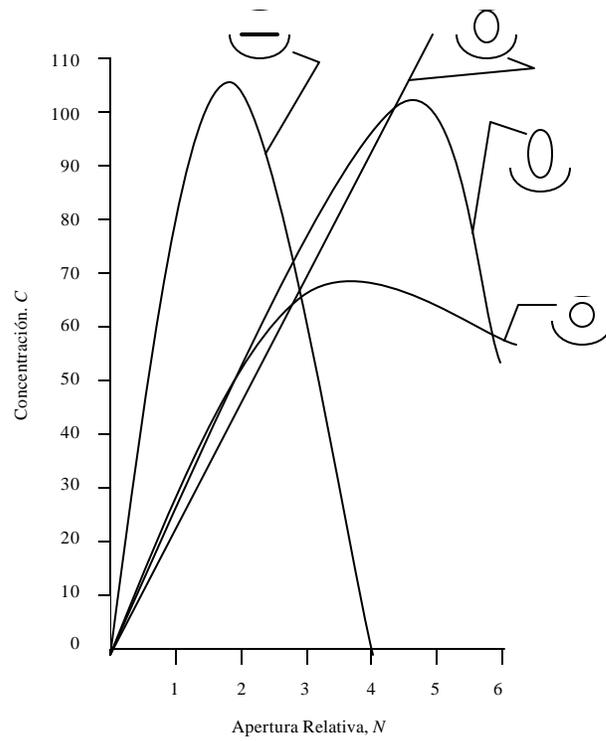


Figura 18. Relación de Concentración para varias Geometrías de los Receptores

4.9.2. Posición del Receptor. El posicionamiento del receptor dentro del área focal puede ser mucho más crítico que el tamaño del receptor para concentradores en el que el rango CR está por debajo de 20 y demuestra el fenómeno de desenfoque de un concentrador parabólico perfecto de corte transversal con un absorbedor de plato. Como con el tamaño del receptor, el efecto de la posición del absorbedor sobre la eficiencia térmica depende de la magnitud de las pérdidas térmicas y del tamaño relativo del absorbedor para el tamaño de la imagen producida por el concentrador. Lo más importante, quizás, es la distancia entre el absorbedor y el colector centrado en la línea (por lo menos para concentradores simétricos). Estudios del computador hechos sobre colectores de recipiente parabólico original muestran Eficiencia vs. Distancia de la curva montada con desfase en el centro que estaba en forma de campana con una (media) media anchura alrededor del 3% de la longitud focal.

Esto es, si el tubo receptor era movido $\pm 3\%$ de la longitud focal (o el 60% del diámetro del receptor) fuera del plano focal, la eficiencia era reducida por un medio. Así, el combado del receptor entre los soportes puede ser muy importante. Estos resultados, acoplados con los resultados del estudio del tamaño del receptor, sugieren que los receptores sean sobredimensionados para compensar las variaciones de longitud-focal. Para este tipo de concentradores, también es importante que el absorbedor sea paralelo al eje longitudinal. Si existe paralelismo, cualquier desplazamiento lateral, asumiendo que este sea pequeño, posiblemente podría compensarse para ajustes de seguimiento. Sin embargo, el desempeño fuera del eje puede degradarse rápidamente, especialmente en alta concentración.

4.9.3. Seguimiento. El primer propósito del sistema de seguimiento es, de acuerdo, guardar el apuntamiento de la apertura del colector en una dirección óptima, también para minimizar el ángulo de incidencia y guardar la imagen solar centrada sobre el absorbedor por lo que el sol se mueve por el cielo. La exactitud con la cual el sol hace esta tarea puede ser medida por el declarado error de seguimiento en términos de grados (o radianes) que la normal apertura real se permite desviarse desde su óptimo.

Normalmente se piensa como el error de seguimiento máximo o la desviación estándar de una distribución aleatoria de errores de seguimiento. Además para este propósito primario, un sistema de seguimiento podría también tener algunos atributos secundarios, los cuales son discutidos cortamente.

4.9.4. Formación de Pérdidas debido al Sombreado. Si un colector de energía solar es aislado de los elementos que producen sombras entonces la forma particular y la dimensión de su apertura no tienen efecto sobre la energía colectada por unidad de área, sin embargo cuando el colector es localizado en una fila de colectores, la capacidad de energía colectada será reducida debido al ocultamiento por sombras por los colectores vecinos. Cuando el costo de la tierra es tomado en consideración, este puede esperar que se optimicen las condiciones para la forma y el tamaño del colector y asociado a una ubicación óptima de los colectores en el tamaño de la fila la cual minimiza el costo de energía producida por el sistema. Una óptima configuración experimentará algún sombreado.

4.10. APLICACIONES Y PROYECTOS EN MARCHA A NIVEL MUNDIAL.

Se han construido, a nivel mundial, varias plantas experimentales, principalmente con el fin de obtener experiencia en el diseño, la construcción, y la operación de los diferentes tipos de concentradores. En el caso de producción de electricidad, se han encontrado en la etapa de planta de producción. En la tabla 6 se da a modo de ejemplo una lista de algunos de los principales proyectos de energía solar para la generación de calor aplicado a procesos industriales, indicando los datos más relevantes. El Instituto de Investigación de Energía Solar (Solar Energy Research Institute) de los EE.UU. analizó (kreith y Davenport, 1981).

En la tabla 6, las convenciones son las siguientes:

- C.P.: Cilindro Parabólico
- N.E.C.G.: Múltiples Espejos Concavos Giratorios
- P.R.: Paraboloide de Revolución
- C.F.F.P.: Concentrador Fresnel Foco Puntual

Tabla 6: Generación de Calor para Procesos Industriales a nivel Mundial

COMPAÑÍA Y UBICACIÓN	APLICACIONES	DATOS DEL CONCENTRADOR		
		TIPO	TEMPERATURA DEL PROCESO °C	TAMAÑO DEL CAMPO m ²
CAPITOL				
CONCLETE Topeka, Kansas EE.UU	Cuadro de Bloques de cemento	C.F.F.P	153	80
RAM, DAIREY				
	Preesterilización de leche	C.P.	150	580
HOME LAUNDEY				
Pasada, California EE.UU	Proceso de lavado	C.P.	180	600
CAMBELL SOUP				
Co Sacramento, California EE.UU	Lavado de envases	C.P.	80-90	680
WEST POINT	Secado Industrial	C.P.	160	700

PEPPEREL Inc	Textil			
Fairfax, Alabama				
EE.UU.				
THEMIS				
Targassonne	Fundición de Sales	P.R.	320	825
FRANCIA	para Almacenaje			
YORK BUILDING				
PRODUCTS				
Harrisburg,	Cuadro de Bloques	M.C.G.E.	80	860
Pensylvania	de cemento			
EE.UU				
LONE STAR				
BREWIN Co. San	Vapor para	C.P.	178	880
Antonio, Texas	Cervecería			
EE.UU				
ORE-IDA FOODS				
Ontario, Oregon	Elaboración de	C.P.	214	890
EE.UU	papas fritas			
SOUTHERN				
UNION Co Hobbs,	Vapor para	C.P.	190	910
	Refinería			

New Mexico				
EE.UU.				
DOW CHEMICAL	Fabricación de			
Co Dalton, George	Latex	C.P.	185	920
EE.UU				
JOHNSON AND				
JOHNSON	Blanqueo de			
Sherman, Texas	Gasas	C.P.	175	1070
EE.UU.				
CARNES Y				
CONSERVAS S.A	Esterilización de			
Merida, Badaloz	Carne	C.P.	220	1120
ESPAÑA				

Los datos de operación de algunas de las plantas presentadas señalan un número de resultados positivos, indicando también la necesidad de mejorar los sistemas y sus componentes. La eficiencia de los sistemas analizados es sólo del 25% al 50% del valor predicho por sus diseñadores; entre los problemas que producen esta menor eficiencia se destaca la falta de coordinación entre la demanda de

energía del proceso industrial y las horas de funcionamiento del sistema solar. No se dispone la información de proyectos en esta aplicación.

En la tabla 7 se muestra la lista de los principales prototipos de demostración de aplicaciones de conversión fototérmica de energía solar en electricidad, cabe destacar que los proyectos NIO, EURELIOS y THEMIS se encuentran actualmente fuera de operación.

De la experiencia obtenida en los mismos, solo se ha iniciado un programa de aplicaciones en sistema de potencia conectados a la red a escala comercial para los concentradores cilíndrico parabólicos. La empresa LUZ, con sede central en Israel, ha construido para la compañía de Electricidad Southern California Edison de los Estados Unidos un total de cinco centrales conectadas a la red. Dos de ellas de potencia 13,8 y 30 MW cada una están instaladas en Kramer Junction, California, habiendo entrado en operación dos en 1987 y la tercera en 1988. Recientemente LUZ ha firmado un contrato para construir para la Compañía de Electricidad de Israel una Central de 25 MW en el desierto de Negev, Israel y ha completado el estudio de factibilidad de una central de 30 MW para la India.

En la tabla 7, las convenciones son las siguientes:

C.P.	:	Cilíndrico Parabólico
P.R.	:	Paraboloide de revolución
C.F.E.F.	:	Concentrador Fijo a Espejo Facetado
T.C.	:	Torre Central
S.C.F.L.	:	Sistema Central Foco Lineal

(*) Sistema de cogeneración con una central diesel de 100 kWe

Tabla 7: Conversión Fototérmica de Energía Solar en Electricidad

COMPAÑÍA Y UBICACIÓN	POTENCIA	DATOS DEL CONCENTRADOR		
		TIPO	TEMPERATURA DEL PROCESO °C	TAMAÑO DEL CAMPO m ²
White Cliffs - Australia	25 kWe	P.R.		275
Perth - Australia	35 kWe	C.P.	300	300
Meekatarra - Australia (*)	50 kWe	C.P. 2 ejes	300	960
Corsega - Francia	100 kWe	C.F.E.F.	250	1176
Kuwait	100 kWe	P.R.	400	1000
Almería - España	500 kWe	C.P. 1 eje	925	2674
	500kWe	2 ejes	530	2688

		T.C.		3655
Nio - Japón	1 MWe	T.C.	250	12912
	1 MWe	S.C.F.L.	530	11160
EURELIO - Sicilia, Italia (CEE)	1 MWe	T.C.	510	6216
CESA I – Almeria, España	1 Mwe	T.C.	520	11880
THEMIS - Targasonne, Francia	2.3 Mwe	T.C.	450	10740
SOLAR ONE - Barstow, EE.UU.	10 Mwe	T.C.	510	72700

5. CÁLCULOS DE RADIACIÓN SOLAR

5.1. ÁNGULOS SOLARES.

- *Declinación d :*

$$d = 23,45 \operatorname{sen} \left[360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (51)$$

Donde, n es el día del año.

Se escogieron los días promedios recomendados para cada mes ver tabla 3 del capítulo 1 de la presente investigación.

Resolviendo:

$n = 17$ por ser 17 de enero

Reemplazando en la ecuación (51) tenemos que: $d = -20^{\circ} 57'$

Los datos para todos los días del año están en la tabla 1 del capítulo 1 de la presente investigación:

- *Ángulo horario (w:)*

$$w = 15^\circ (12 - h); h = \text{Hora del día (0 -24 hrs.)} \quad (52)$$

- *Altura solar (μ):*

$$\text{sen } a = \cos f \cos d \cos w + \text{sen } f \text{sen } d \quad (53)$$

Se procede a calcular la altura solar el día 17 de enero para las 12:00 m.

Resolviendo en la ecuación (52):

$$12 :00 m \rightarrow w = 0$$

$$f = 10^\circ 27' \text{ (latitud de Cartagena)}$$

$$d = 20^\circ 57' \text{ para 17 de Enero}$$

reemplazando la ecuación (53) se tiene que:

$$\begin{aligned} \text{sen}(\mathbf{a}) &= \cos(10,27)\cos(-20,57)\cos(0) + \text{sen}(10,27)\text{sen}(-20,57) \\ \text{sen}(\mathbf{a}) &= 0,8586 \\ \mathbf{a} &= 59^{\circ},16' \end{aligned}$$

- *Azimut Solar (g):*

$$\text{sen} \mathbf{g} = \cos \mathbf{d} \left(\frac{\text{sen} \mathbf{w}}{\cos \mathbf{a}} \right) \quad (54)$$

Se calcula el *Azimut Solar* el día 17 de enero a las 12:00 m:

$$\mathbf{d} = 20^{\circ},57' \text{ para el 17 de enero}$$

$$\mathbf{w} = 0 \rightarrow 12 \text{ m.}$$

$$\boldsymbol{\mu} = 59,16' \text{ (17 de enero)}$$

Reemplazando en la ecuación (54):

$$\text{sen} \mathbf{g} = \cos(-20,57) \frac{\text{sen}(0)}{\cos(59,16)}$$

Tenemos que $\mathbf{g} = 0$ (*Azimuth* es 0)

- *Angulo horario del orto y el ocaso (w_0)*

$$w_0 = \cos^{-1}\left(\frac{-\operatorname{sen} f \operatorname{sen} d}{\operatorname{cos} f \operatorname{cos} d}\right) \quad (55)$$

Calcular el ángulo horario (w_0) para el 17 de enero:

Latitud (f) = $10^\circ 27'$ y 17 de enero $\rightarrow d = -20^\circ 57'$:

Remplazando en la ecuación (55):

$$w_0 = \operatorname{Cos}^{-1}\left(\frac{-\operatorname{Sen}(10,27)\operatorname{Sen}(-20,57)}{\operatorname{Cos}(10,27)\operatorname{Cos}(-20,57)}\right)$$

$$w_0 = 86^\circ,01'$$

- *Hora Solar del Orto y el Ocaso (t_0):*

$$t_0 = 12 \pm \frac{w_0}{15} \quad (56)$$

Se calcula la hora solar (t_0) para el 17 de enero $\rightarrow w_0 = 86,01$

$$t_0 = 12 \pm \frac{86,01}{15}$$

$t_0 = 17,734$ (orto) (+) y $t_0 = 6,266$ (ocaso) (-).

Los datos para días recomendados están en el anexo 3 del presente escrito.

- *Número de horas del sol teóricas (N)*

$$N = \frac{2w_0}{15} \quad (57)$$

Para el 17 de enero

$$w_0 = 86^{\circ}01' \rightarrow N = 2 \frac{(86,10)}{15} = 11,48hrs.$$

$$N = 11,48hrs.$$

5.2. DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA.

Tenemos en cuenta los siguientes parámetros:

f = latitud del lugar

d = declinación

w = ángulo horario

b = inclinación superficie ($b = 15^\circ$)

g = ángulo Azimutal

g_s = ángulo Azimutal del sol

a = altitud del sol

q = ángulo de incidencia

q_z = ángulo cenital

- *Ángulo de Incidencia (q)*

$$\begin{aligned} \cos q = & \sin d \sin f \cos b - \sin d \cos f \sin b \cos g_s + \cos d \cos f \cos w \cos b \\ & + \cos d \sin f \sin b \cos g_s \cos w + \cos d \sin b \sin g_s \sin w. \end{aligned} \quad (58)$$

Para el 17 de enero, a las 12:00 $m \rightarrow d = -20,57$

12 $m \rightarrow \omega = 0 \rightarrow \delta = 0$

$f = 10,27$

$$q = 15,84$$

5.3. DURACIÓN ASTRONÓMICA DEL DÍA (Z).

$$Z = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan f \tan d) \quad (59)$$

Para Cartagena Z tendrá los siguientes valores según el mes:

ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
11,47	11,67	11,94	12,24	12,47	12,54	12,53	12,33	12,05	11,76	11,52	11,41

- **Radiación Solar Extraterrestre:**

Valores de radiación solar extraterrestre diaria promedio mensual para Cartagena con $f = 10,5$ se presentan en la siguiente tabla:

ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
31,43	33,94	36,37	37,5	37,25	36,75	36,84	37,16	36,56	34,48	31,88	30,51

- *Ángulo Cenital (o cenit) (q_z):*

$$\cos q_z = \sin d \sin f + \cos d \cos f \cos w \quad (60)$$

Para el 17 de enero a las 12 m:

17 de enero $\rightarrow d = -20,57$ y $12\text{ m} \rightarrow w=0$

$$f_z = 30,84$$

5.4. RADIACIÓN DIARIA PROMEDIO SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS.

Considérese un colector cilíndrico parabólico de $1,5\text{ m}$. de ancho y 2 m de largo el cual tiene una inclinación de 15° sobre la horizontal y se encuentra orientado este-oeste en Cartagena. Se estima la radiación solar incidente sobre el sistema óptico del colector para el mes de Enero. Según los datos:

$$A = 1,5 \times 2$$

$$\text{Enero } 17 \rightarrow d = 20,57$$

$$f = 10,27^\circ \text{ N (Cartagena)}$$

Según la ecuación (20), y la tabla 4 del presente trabajo se tiene:

$$K_T = \frac{\overline{H_s}}{\overline{H_o}} \left\{ \begin{array}{l} \overline{H_s} = 6,01 \frac{kwh}{m^2 dia} = 21,636 \frac{MJ}{m^2 dia} \\ \rightarrow \overline{H_o} = 31215 \text{KJ} / m^2 dia = 31,215 \frac{MJ}{m^2 dia} \end{array} \right.$$

$$K_T = \frac{21,636}{31,215} = 0,6931$$

Por la ecuación (19) según Page:

$$\frac{\overline{I_{d,h}}}{\overline{H_o}} = 1,0 - 1,13(0,69) = 0,2203$$

$$\overline{I_{d,h}} = 0,2203(10,27) = 4,7664 \text{MJ} / M^2 dia$$

Se nota que el 22% de radiación total es difusa, lo cual el restante 78% es directa, el cual es un buen porcentaje para nuestro colector que aprovecha esta clase de radiación.

$$\cos w_s = \tan f \tan d \quad (61)$$

$$\cos w_s = -\tan(10,27)\tan(-20,57)$$

$$w_s = 86,10^\circ = 1,50 \text{ rad.}$$

$$\cos w_s = -\tan(f - b) \operatorname{tg} d \quad (62)$$

$$\cos w_s = -\tan(10,27 - 15)\tan(-20,57)$$

$$w_s = 91,78^\circ = 1,60 \text{ rad.}$$

$$w'_s = \min(w_s, w_s) = \min(1,5 \text{ y } 1,6) \rightarrow w'_s = w_s = 1,5 \text{ rad.}$$

Ahora, según la ecuación (13) o (63) se tiene que

$$\bar{Rb} = \left(\frac{w'_s \operatorname{sen} d \operatorname{sen}(f - b) + \cos d \cos(f - b) \operatorname{sen} w'_s}{w'_s \operatorname{sen} d \operatorname{sen} f + \cos d \cos f \operatorname{sen} w_s} \right) \quad (63)$$

$$\bar{Rb} = \frac{1,5 \operatorname{sen}(-20,57) \operatorname{sen}(10,27 - 15) + \cos(-20,57) \cos(10,27 - 15) \operatorname{sen} 86,1}{1,5 \operatorname{sen}(-20,57) \operatorname{sen}(10,27) + \cos(-20,57) \cos(10,27) \operatorname{sen} 86,1}$$

$$\bar{Rb} = \frac{0,044 + 0,9285}{-0,095 + 0,9168} = 1,1833$$

Remplazando en ecuación (18), $r = 0,2$ para suelos comunes:

$$\bar{R} = \left(1 - \frac{\overline{Id, h}}{HS}\right) \bar{R}_b + \frac{\overline{Id, h}}{HS} \left(\frac{1 + \cos f}{2}\right) + \left(\frac{1 - \cos 10,27}{2}\right) \bar{R} = 1,2142$$

Finalmente, de la ecuación (21):

$$\bar{H}_T = (1,21)(0,6931)(31215) = 26267,4 \frac{Kj}{m^2} dia = 26,26 \frac{Mj}{M^2} dia$$

En resumen:

$$Q = \bar{H}_T Ac \quad (64)$$

$$Q = 26267,4[(1)(2)] = 52534,8 \frac{Kj}{M^2} dia = 52,534 \frac{Kj}{M^2} dia \left(\frac{1kwh}{3,6Mj}\right)$$

$$Q = 14,6 \frac{Kwhr}{dia}$$

Donde Ac es el área del concentrador y Q la radiación solar incidente.

6. CALCULO DEL COLECTOR CILINDRICO PARABOLICO.

6.1. SELECCIÓN DEL ANGULO RIM PARA EL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO.

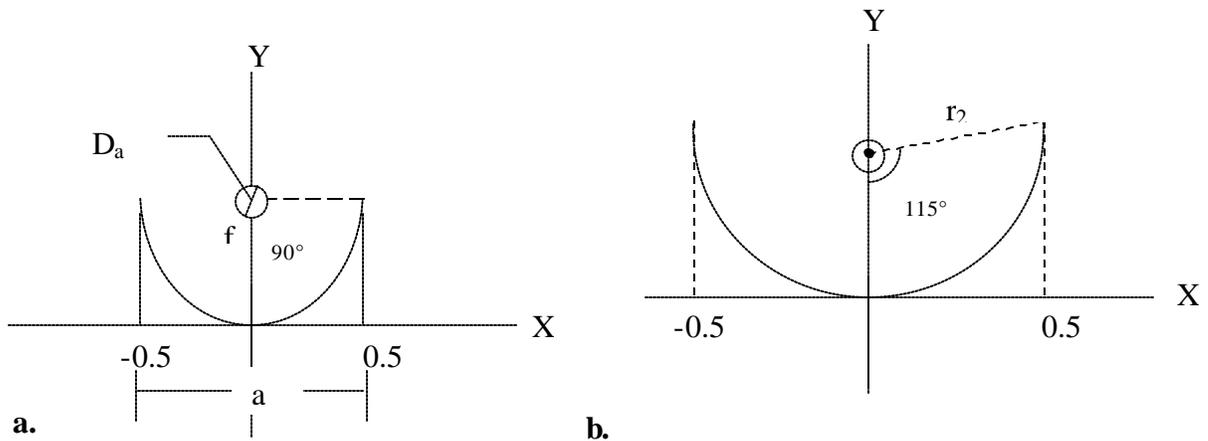


FIGURA 19. a. Sistema óptico para un ángulo RIM de 90°. b. Sistema óptico para un ángulo RIM de 115°.



- **Longitud Focal (f)**

Según la ecuación de la parábola con vértice en los ejes X,Y:

$$X^2 = 4fY$$

$$X^2 = 4f^2 \quad (65)$$

$$\frac{(0.5)^2}{4} = f^2$$

Despejando de la ecuación (65), tenemos que: $\frac{0.5}{2} = f$
 $25cm = f$

De donde la mayor distancia del tubo absorbedor al sistema óptico es la longitud focal de 25 *cm* lo cual favorece la concentración de la energía solar en dicho tubo y por lo tanto el fluido de trabajo adquiere una mayor temperatura. Se muestra en el diagrama esquemático el concentrador que se utilizará en el Colector Cilíndrico Parabólico (Véase la Figura 20)

Figura 20. Diagrama Esquemático del Concentrador que se utiliza en Termosolar.

Para Ángulo RIM = 90°

Radio del sistema óptico (r):

$$r_1 = \frac{2f}{1 + \cos(Rim)}$$

$$r_1 = \frac{2(0,25)}{1 + \cos(90^\circ)} \quad (66)$$

$$r_1 = 50cm$$

Imagen en el tubo absorbedor (W)

$$W' = \frac{2r_1 \tan(16')}{\cos(f)}$$

$$W' = \frac{2(50) \tan(4^\circ)}{\cos(90^\circ)}$$

$$W' = \infty(\text{receptor plano}) \quad (67)$$

$$W = 2r_1 \tan(4^\circ)$$

$$W = 7cm$$

Diámetro del absorbedor (D_a)

$$D_a = \frac{2r_1 \sin(q/2)}{\sin(60^\circ) \sin(Rim)}$$

$$q = 15' = 3,75^\circ$$

$$D_a = \frac{2(0,5) \sin\left(\frac{3,75^\circ}{2}\right)}{\sin(60^\circ) \sin(90^\circ)} \quad (68)$$

$$D_a = 0,037m \approx 4cm$$

Factor de concentración (F_c)

Para Ángulo RIM = 115°

Radio del Sistema óptico(r):

$$r_2 = \frac{2f}{1 + \cos(Rim)}$$

$$r_2 = \frac{2(0,25)}{1 + \cos(115^\circ)} \quad (66^a)$$

$$r_2 = 87cm$$

Imagen en el tubo absorbedor (W)

$$W' = \frac{2r_2 \tan(16')}{\cos(f)}$$

$$W' = \frac{2(87) \tan(4^\circ)}{\cos(115^\circ)}$$

$$W' = -28,8cm \quad (70)$$

$$W = 2(87) \tan(4^\circ)$$

$$W = 12,2cm$$

Diámetro del absorbedor (D_a)

$$D_a = \frac{2r \sin(q/2)}{\sin(60^\circ) \sin(Rim)}$$

$$q = 15' = 3,75^\circ$$

$$D_a = \frac{2(0,87) \sin\left(\frac{3,75^\circ}{2}\right)}{\sin(60^\circ) \sin(115^\circ)} \quad (71)$$

$$D_a = 0,065m \approx 7cm$$

Factor de concentración (F_c)

$$F_c = \frac{A_a}{A_r} = \frac{2}{2prl}$$

$$F_c = \frac{2}{2(3,1416)(0,02)(2)} \quad (69)$$

$$F_c = 7,95$$

$$F_c = \frac{A_a}{A_r} = \frac{2}{2prl}$$

$$F_c = \frac{2}{2(3,1416)(0,035)(2)} \quad (72)$$

$$F_c = 4,54$$

Diámetro del absorbedor (D_a)	4 cm	5 cm	6 cm
Factor de Concentración (F_c)	7.95	6.36	5.30

Debido a las características anteriores seleccionamos un ángulo RIM (ángulo de apertura del sistema óptico) de 90° con un $D_a = 5\text{cm}$ y $F_c = 6,36$.

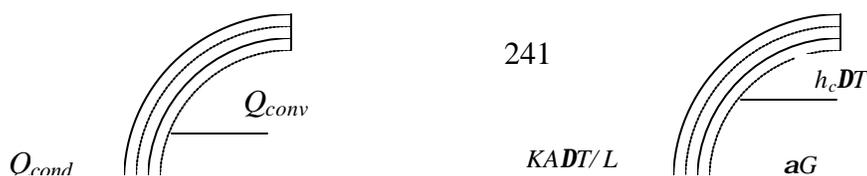
El tubo de vidrio que envuelve el tubo absorbedor y que nos disminuye las pérdidas de conducción y convección entre más cerca se encuentre de este, por lo cual el diámetro del tubo de vidrio (D_v) lo tomamos de 9cm .

6.2. CÁLCULO DEL SISTEMA ÓPTICO.

6.2.1. Selección Del Material. Las superficies reflectivas más comunes son acrílicos aluminizados (por electrodepositado), FEK y Kingston (aluminios electropulidos), Teflón aluminizado (Mylar), y se exploran vidrios muy delgados ($< 1\text{mm}$). Seleccionamos un Acero Inoxidable 430 (5 x 10) Acabado 2B (Espejo) su característica de ser Inoxidable con buenas propiedades para el medio salino y además es brillante como superficie reflectiva de los rayos solares al absorbedor.

6.2.2. Selección del Área de la Superficie Óptica. Seleccionamos un área de 2 m^2 (de igual medida que tiene el colector plano). Estos 2 m^2 los distribuimos de 2 m de largo y 1 m de ancho, ya que por efectos de diseño entre más largo sea el colector mayor es la energía captada hacia el tubo absorbedor y por lo tanto se obtendrá una mayor temperatura del fluido de trabajo, que es el objetivo de este proyecto.

6.2.3. Cálculo de la Temperatura Adquirida Por la Superficie Óptica



- Análisis

Se cede calor por conducción y convección, con una superficie imaginaria a cada lado de la superficie de contacto real, una superficie s en el fluido adyacente a la interfaz y una superficie m en el sólido, ubicada de tal manera que toda la radiación se emite o es absorbida entre esta y la interfaz.

- Balance de Energía

La Primera ley aplicada al sistema cerrado entre las superficies m y s exige que

$$\sum \dot{Q} = 0,$$

Donde:

$$Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} = 0 \quad (73)$$

O bien, por área unitaria $\left(q = \frac{Q}{A} \right)$,

$$q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} = 0 \quad (74)$$

Si el sólido es isotérmico (calor constante en toda el área) y $q_{cond} = 0$ debido a la superficie opaca, tenemos que:

$$q_{conv} + q_{rad} = 0 \quad (75)$$

Donde el calor por convección es:

$$\begin{aligned} q_{conv} &= h_c \Delta T \Rightarrow h_c = 1.24 \Delta T^{1/3} \\ q_{conv} &= 1.24 \Delta T^{1/3} \Delta T \\ q_{conv} &= 1.24 (T - T_a)^{4/3} \end{aligned} \quad (76)$$

T es la temperatura de la superficie óptica y T_a , es la temperatura ambiente.

Y la radiación neta se obtiene a partir de la ecuación (77):

$$q_{rad} = eE_b - a_s G_s - aG \quad (77)$$

Donde,

$$E_b = sT^4 \Rightarrow s = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

e es la emitancia de la superficie

a_s es la absortancia solar de la superficie

G_s es la irradiación solar global (ver anexo E)

$$G_s = \frac{5,64 \frac{KWhr}{m^2 día}}{0,31 \frac{hr}{día}} = 0,7715 \frac{kW}{m^2} \left(\frac{1000W}{1kW} \right) = 771,54 \frac{W}{m^2}$$

a es la absortancia total de la superficie

G es la irradiación, incluye tanto la radiación proveniente del cielo (con J_{cielo}) como de las superficies vecinas,

$G \cong J_{cielo} = F_{1_{cielo}} e_{cielo} s Ta \Rightarrow F_{1_{cielo}} = 1$, Factor de forma entre el cielo y el sistema óptico, y $e_{cielo} = 0,77$, es la emisividad del cielo.

Remplazando en la ecuación (77), tenemos que:

$$q_{rad} = e(sT^4) - a_s G_s - a(e_{cielo} sTa^4) \quad (78)$$

$$q_{rad} = e \left(5,67 \times 10^{-8} \frac{Wm^2}{K^4} \right) T^4 - \left(771,54 \frac{W}{m^2} \right) - a(0,77) \left(5,67 \times 10^{-8} \frac{Wm^2}{K^4} \right) (301 K)^4$$

Datos:

Material del Superficie óptica: Acero 430, con $\alpha_s = 0,89$ y $\varepsilon = 0,75$

Temperatura Ambiente, $T_a = 28^\circ C = 301 K$

Remplazando en ecuaciones (76) y (78) en la ecuación (75) se tiene que:

$$1,24(T - 301)^{4/3} + e(5,67 \times 10^{-8}) T^4 - a_s(771,54) - a(0,77)(5,67 \times 10^{-8})(301)^4$$

Haciendo $\varepsilon = \alpha$, (todo lo que absorbe lo emite, caso ideal) y reordenando, se tiene:

$$1,24(T - 301)^{\frac{4}{3}} + e \left[(5,67 \times 10^{-8}) T^4 - 0,77(5,67 \times 10^{-8})(301)^4 \right] - \alpha_s(771,54) = 0$$

$$1,24(T - 301)^{\frac{4}{3}} + e \left[(5,67 \times 10^{-8}) T^4 - 358,4 \right] - \alpha_s(771,54) = 0$$

Al resolver la ecuación anterior por el método de Newton, o bien elaborando una gráfica, obtenemos que:

$$T = 294,53 \text{ °K} = 21,53 \text{ °C (no es correcta)}$$

$$T = 361,56 \text{ °K} = 88,56 \text{ °C (es válida)}$$

Obtenemos que el Sistema óptico en su superficie adquiere una temperatura de 88,56 °C.

6.2.4. Análisis de Energía en el Sistema Óptico. Según la figura 21 del balance de energía superficial mostrado para la superficie óptica con material *Acero 430 con Acabado Superficial 2B* que le proporciona la característica de ser brillante en toda su superficie, debido a esto se opacó por al tratamiento de Sand Blasting al que fue sometido por la parte de atrás para que el $q_{cond} = 0$ y quedo brillante por delante, en el cual cede calor a su entorno por convección y radiación.

- Balance de Energía Superficial

Hay una superficie imaginaria de cada lado de la superficie de contacto real entre el sólido y el fluido: una superficie s en el fluido adyacente a la interfaz, y una superficie m en el sólido, ubicada de tal manera que toda la radiación se emite o es absorbida entre ella y la interfaz. Así, la energía se transfiere sólo por conducción a través de la superficie m .

La primera ley aplicada al sistema cerrado entre las superficies m y s exige que

$\sum \dot{Q} = 0$; entonces,

$$\dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = 0 \quad (79)$$

o bien, por área unitaria $\left(q = \frac{Q}{A} \right)$

$$q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} = 0 \quad (80)$$

donde la convección de signos para los flujos se muestra en la figura, si el sólido es isotérmico, y $q_{cond} = 0$ debido a la superficie opaca, la ecuación se reduce a:

$$q_{conv} + q_{rad} = 0 \quad (81)$$

Sabiendo la temperatura adquirida por la superficie óptica y según el balance de energía superficial, podemos calcular las pérdidas del sistema óptico al ambiente

$(q_{perd})_{so,amb}$ están dadas por:

$$(q_{perd})_{so,amb} = q_{conv} + q_{rad} \quad (82)$$

Donde, las pérdidas de calor por convección son:

$$\begin{aligned} q_{conv} &= h_c \Delta T = 1,24(T - T_a)^{1/3}(T - T_a) \\ q_{conv} &= 1,24(T - T_a)^{4/3} = 1,24(361,56^\circ K - 301^\circ K)^{4/3} \\ q_{conv} &= 294,89 \frac{W}{m^2} \end{aligned} \quad (83)$$

Y las pérdidas por radiación son:

$$q_{rad} = eE_b - a_s G_s - aG \quad (84)$$

Material de la superficie óptica: Acero 430 con $e = 0,75$, $a = 0,89$ y $t = 6$ mm.

$$e_{cielo} = 0,77 \text{ y } G_s = 771,54 \frac{W}{m^2},$$

$$E_b = \sigma T^4$$

$$E_b = \left(5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) (361,56 K)^4$$

$$E_b = 968,95 \frac{W}{m^2}$$

$$G \cong J_{cielo} = \epsilon_{cielo} \sigma T^4$$

$$G = (0,77) \left(5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) (301 K)^4$$

$$G = 358,37 \frac{W}{m^2}$$

Remplazando E_b y G en ecuación (84), se obtiene:

$$q_{rad} = 0,75(920,27) - 0,89(771,54) - 0,75(358,37)$$

$$q_{rad} = 265,24 \frac{W}{m^2}$$

Remplazando ecuaciones (83) y (84) en la ecuación (82), se tiene que:

$$(q_{perd})_{so,amb} = 265,22 + 265,24$$

$$(q_{perd})_{so,amb} = 530,26 \frac{W}{m^2}$$

Donde,

$$\begin{aligned} Q &= (q_{perd})_{so,amb} A_a \Rightarrow A_a = (1 - D_a)L = (1 - 0,09)2 = 1,82m^2 \\ (Q_{perd})_{so,amb} &= (530,26)1,82 = \\ (Q_{perd})_{so,amb} &= 965,07W \end{aligned}$$

6.3. CÁLCULOS DEL ABSORBEDOR Y EL VIDRIO ENVOLVENTE.

6.3.1. Selección de Materiales. Los absorbedores más comunes son Tubos Circulares de Cobre o Aceros recubiertos con una superficie selectiva (siendo la más común Cromo negro electrodepositado). Se han propuesto también colectores planos de estos materiales, con tubos delgados soldados a una placa plana.

Normalmente el Absorbedor se encuentra dentro de un tubo envolvente de vidrio para reducir pérdidas de calor al ambiente. En el espacio que queda entre el absorbedor y el envolvente puede haber aire a presión atmosférica, aire enrarecido con algún gas, o vacío; las pérdidas de menor magnitud se logran en

este último caso eliminando la convección, pero los costos se elevan. Los Metales más comunes empleados en los absorbedores son: cobre, aluminio, latón y acero. Para los colectores que emplean agua como fluido de trabajo, las tubos de cobre tienen ventajas desde el punto de vista de la corrosión; el acero y el aluminio pueden emplearse si se utilizan sustancias corrosivas. Los colectores que emplean aire no presentan tales problemas de corrosión.

Entre los recubrimientos que comúnmente son empleados para obscurecer el absorbedor están: Pintura enamel negra, Negro de Níquel sobre níquel pulido, Negro de Níquel sobre hierro galvanizado; Negro de Níquel con dos capas de níquel electrodepositadas sobre acero, Oxido de Cobre sobre níquel, mediante electrodepositado de cobre y oxidación, Oxido de Cobre sobre aluminio, Etanol C sobre cobre, y Cromo Negro electrodepositado sobre un recubrimiento de níquel, este último es uno de los más utilizados. Los aislantes comúnmente empleados son: Lana mineral, Corcho granulado, Corcho regran en partículas de aproximadamente medio centímetro, Paja, Aserrín en polvo, Espuma de poliuretano rígida y Poliestireno expandido.

El tubo absorbedor está rodeado por un tubo de vidrio el cual reduce o eliminan las pérdidas de convección y radiación al ambiente especialmente si existe vacío entre ellos debido a la baja presión. Seleccionamos un tubo absorbedor de cobre rígido el cual eleva su temperatura y nos cede muy buen calor al fluido de trabajo que circula por su interior, la energía ganada por el fluido de trabajo es después convertida en energía útil, y luego seleccionamos un tubo de vidrio envolvente Duran que nos disminuye las pérdidas con el ambiente.

6.3.2. Cálculo del Área de la Superficie Receptora. El tubo absorbedor tiene $2m$ de largo debido a la longitud del colector (L_c), y habíamos seleccionado su diámetro debido a la imagen teórica de 5 cm , por lo cual el área del absorbedor es;

$$A_a = \pi D_a L_c = \pi 0,05m (2m) =$$

$$A_a = 0,3141m^2 = 0,32m^2$$

El tubo de vidrio que envuelve el tubo absorbedor y que nos disminuye las pérdidas de conducción y convección entre más cerca se encuentre de este, debido a esto seleccionamos un diámetro del tubo de vidrio (D_v) de 9 cm . De lo cual el área del tubo de vidrio envolvente (A_v) es:

$$A_v = \pi D_v L_c = \pi 0,09m(2m) =$$

$$A_v = 0,5654m^2 = 0,57m^2$$

6.3.3. Balance de Energía para el Tubo Absorbedor y el Vidrio Envoltente

6.3.3.1. Modelo de Análisis . Del conjunto de concentradores discutidos, se van a estudiar algunos parámetros que ayudan a analizar el correcto diseño de los concentradores cilíndrico-parabólicos.

La selección de estos concentradores se basa en que son los más adecuados para producción de calor para procesos industriales; para realizar un correcto diseño de los concentradores resulta necesario realizar una simulación numérica del funcionamiento de los mismos.

Para ello se ha propuesto combinar el análisis óptico que permita obtener la distribución de intensidades de la radiación solar en un receptor tubular de sección circular, con un modelo que permita simular el comportamiento térmico de un receptor compuesto por un tubo envoltente de vidrio Pirex, ambos de sección circular y concéntricos. De esta manera se puede obtener la energía útil

entregada al fluido de trabajo y la eficiencia de conversión de energía solar en térmica en función de diferentes parámetros útiles para el diseño del concentrador.

En el análisis óptico, el concentrador cilíndrico parabólico se considera no perfecto o sea, que la normal a cada elemento diferencial de superficie especular se aparta de su posición correcta un ángulo θ tal que siga una distribución gaussiana del valor medio ε y desviación estándar σ .

La simulación del comportamiento térmico se basa en el análisis de las pérdidas conductivas, convectivas y radiactivas, tanto del absorbente como del envolvente, suponiendo el espacio entre ambos tubos ocupado por aire y considerando, además, la posibilidad de efectuar vacío.

6.3.3.2. Cálculo de la Energía Útil. El método de cálculo empleado consiste en utilizar las ecuaciones de balance de energías en estado estacionario para el absorbedor y para el tubo de vidrio envolvente, considerando que cada uno de ellos se encuentra a una temperatura homogénea y despreciando la componente reflejada de la radiación incidente en el absorbedor, o sea:

- Para el Absorbedor:

$$(Ea)_a = E_{util} + (E)_{v,a} + (P_{cond,conv})_{a,v} \quad (85)$$

Para el Vidrio:

$$(Ea)_v + (P_{con,conv})_{v,amb} + (Pr_{ad})_{v,amb} \quad (86)$$

Donde $(Ea)_a$ es la energía radiactiva absorbida por el absorbedor; E_{util} , es la energía útil entregada al fluido de trabajo; $(E)_{v,a}$ es el intercambio de energía radiactiva entre el vidrio y el absorbedor; $(P_{cond,conv})_{a,v}$ son las pérdidas de conducción y convección del absorbedor al vidrio; $(Ea)_v$ es la energía radiactiva absorbida por el vidrio; $(P_{cond,conv})_{v,amb}$ son las pérdidas por conducción y

convección del vidrio al medio ambiente y $(Pr_{ad})_{v,amb}$ son las pérdidas por radiación del vidrio al ambiente.

Para una dada temperatura de operación, un conjunto de parámetros característicos de los sistemas colector (absortancias y emitancias de los elementos que componen el receptor, reflectancia de la superficie espejada, etc.) y para un conjunto de parámetros externos (velocidad del viento, intensidad de la radiación solar directa, etc.), es posible obtener, realizando un cálculo iterativo en la ecuación (86), la temperatura del vidrio envolvente; reemplazando esta expresión en la ecuación (85) se obtiene la energía útil.

El Estudio de cada uno de los términos de las ecuaciones de Balance de Energías para los tubos del Receptor son:

- *Energía Radiactiva absorbida por el Absorbedor (E_a),*

$$(E_a)_a = I_o \cos kC (r = r_c) \mathbf{r}_a A_a \quad (87)$$

Donde:

I_o : Intensidad de la Radiación Solar Directa. Su valor es función de la latitud, día del año y hora del día (Ver Anexo E).

K : ángulo que forma el rayo proveniente del centro del sol con el plano perpendicular a la línea focal; su valor es función de la hora respecto del medio día solar y de la orientación del concentrador (Véase figura 22).

$C(r=r_c)$: Factor de concentración medio es el cociente entre la intensidad media de radiación incidente sobre el receptor I y la intensidad de Radiación Solar Directa I_o (medida en un plano perpendicular a la dirección de incidencia (Véase figura 22))

r : reflectividad de la superficie.

a_c : absorptancia de la superficie del absorbedor.

A_a : área total del absorbedor.

Del Anexo E (H_b y S), tenemos que;

$$I_o = \frac{H_b}{S} = \frac{3,55 \frac{kWhr}{m^2 \text{ día}}}{7,31 \frac{hr}{\text{día}}} = 0,4856 \frac{kW}{m^2} \left(\frac{1000W}{1kW} \right) = 485,63 \frac{W}{m^2} (1,86m^2) = 903,28W$$

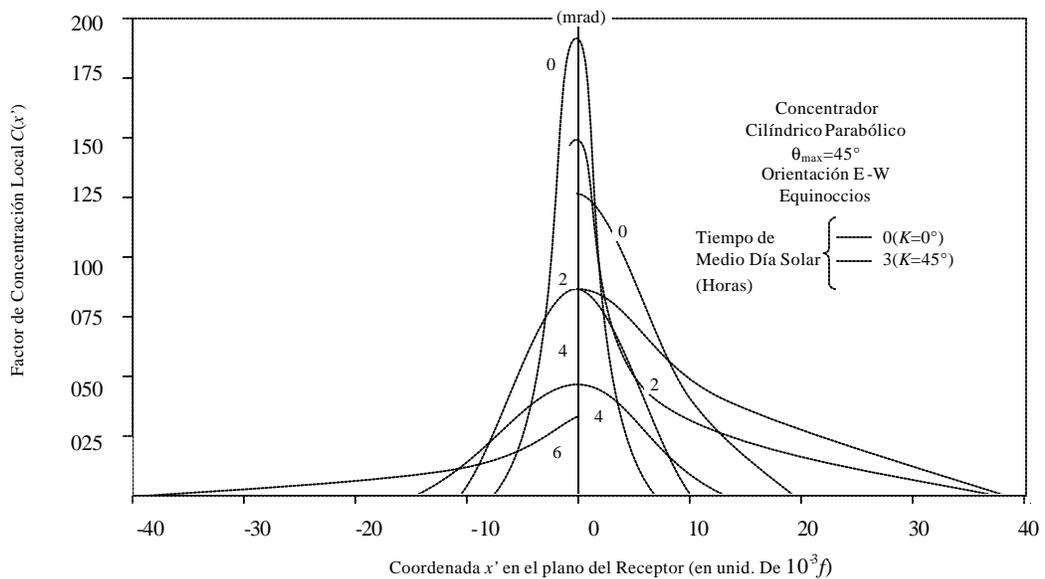


Figura 22. Factor de Concentración Local $C(x')$ como una función de la coordenada x' sobre el plano del receptor para concentradores cilíndrico parabólicos con varios valores de s

De la figura 22 observamos que para una distribución del flujo de $s=3$, y $K=45^\circ$ entonces $C = 42$ como factor de concentración medio,

$r = 0,2$ para Suelos Comunes (ver Tabla 2)

Para el material del absorbedor que es un tubo de Cobre rígido con $a_a = 0,85$

Y $A_a = 0,32m^2$.

Reemplazando en la ecuación (87), tenemos que:

$$(Ea)_a = \left(485,63 \frac{W}{m^2} \right) \cos 45^\circ (42) 0,2 (0,85) 0,32m^2$$
$$(Ea)_a = 784,58W$$

- *Energía Útil entregada al fluido de trabajo (E_{util});*

$$E_{util} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (88)$$

Donde:

\dot{m} : flujo másico del fluido de trabajo.

C_p : calor específico del fluido de trabajo.

ΔT : diferencia de temperaturas entre la entrada y salida del fluido

- *Intercambio de Energía Radiactiva entre el Vidrio y el Absorbedor (E)v, a;*

$$(E)_{v,a} = \frac{A_a \mathbf{s} (T_a^4 - T_v^4)}{\frac{1}{e_a} + \left(\frac{A_a}{A_v}\right) \left(\frac{1}{e_v} - 1\right)} \quad (89)$$

Donde:

\mathbf{s} : constante de Stephan-Boltzman

T_a : temperatura del absorbedor

T_v : temperatura del vidrio

e_c : emisividad del absorbedor.

e_v : emisividad del vidrio

A_v : área del vidrio

A_a : área del absorbedor.

Este término surge de estudiar el intercambio neto de energía radiactiva entre el vidrio y el caño: la energía inicial emitida por el caño es $A_a e_a$, toda la cual incide en A_v . De este total $(1 - \epsilon_v) \cdot \epsilon_a A_a$ incide en A_a . Si este análisis se continúa el $(E)_{v,a}$ se representará como una serie geométrica, cuyo resultado es el dado en la ecuación anterior.

Según los datos, tenemos lo siguiente:

$$s = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

$$T_a = 80 \text{ }^\circ\text{C} = 353 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_v = 70 \text{ }^\circ\text{C} = 343 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$A_v = 0,57 \text{ m}^2$$

$$A_a = 0,32 \text{ m}^2$$

Del Anexo F, se tiene:

El tubo de vidrio envolvente es Duran (Pirex) con $\alpha_s = 0,51$ y $\varepsilon = 0,8$.

El tubo absorbedor es Cobre Rígido con $\alpha_s = 0,85$ y $\varepsilon = 0,85$.

Reemplazando los datos en la ecuación (89), y resolviendo, tenemos que:

$$(Ea)_{v,a} = 12,13W$$

- *Pérdidas de Conducción y Convección entre el Caño y Vidrio ($P_{cond, conv}$)_{a,v}*

De acuerdo a los datos bibliográficos¹⁶, se puede pensar este fenómeno de conducción y convección, como un fenómeno de convección pura:

$$(P_{cond, conv})_{a, v} = h_c A \Delta T \quad (90)$$

Donde:

A: Área de transferencia de calor (área media entre A_a y A_v).

DT: $T_a - T_v$

h_c : Coeficiente de transferencia de calor, función de la temperatura del fluido (en este caso, aire)¹⁷;

Casos:

$$1. N_{U_i}: 0,124 (Gr Pr)^{1/3} / \ln (D_v/D_c) \text{ si } Gr Pr = (10^7, 10^{10}) \quad (91a)$$

$$2. N_{U_i}: 0,44 (Gr Pr)^{1/4} / \ln D_v/D_c \text{ si } Gr Pr = (10^3, 10^7) \quad (91b)$$

$$3. N_{U_i}: 2 / \ln (D_v / D_c) \text{ si } Gr Pr < 10^3 \quad (91c)$$

¹⁶

¹⁷

Donde N_u , G_r y P_r son los números adimensionales de *Nusselt*, *Grasfhof* y *Prandtl*,
y donde las magnitudes que se refieren a la longitud se basan en:

Para N_u :

$$L = \frac{D_v - D_a}{2} \quad (92)$$

Par Gr :

$$L = D_a \quad (93)$$

Donde:

D_v : Diámetro del vidrio

D_a : Diámetro del absorbedor

Reemplazando ecuaciones (87) y (89), en ecuación (85), tenemos que:

$(P_{cond,conv}) = 84,38$, Debido a que existe vacío entre el vidrio y el tubo del
Absorbedor.

- Para el Absorbedor:

$$784,58 = E_{util} + 12,13 + 84,38$$

$$E_{util} = 688,07 \text{ W}$$

Donde:

$$E_{util} = mC_p\Delta T = (Qr)C_p\Delta T$$

Donde:

$$Q = E_{util} / (rC_p\Delta T) \quad (94)$$

Donde:

Q : caudal del fluido de trabajo

r : densidad volumétrica del fluido de trabajo

Del Anexo G,(Agua) y para una temperatura de 323°K, tenemos las siguientes propiedades:

$$C_p = 4,175 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}; r = 987,8 \text{ Kg/m}^3.$$

Entonces,

$$Q = \frac{688,07}{987,8(4,175)323} = 5,17 \times 10^{-4} \frac{m^3}{sg} \left(\frac{1000 dm^3}{1 m^3} \right) \left(\frac{1 Lt}{1 dm^3} \right) =$$
$$Q = 0,5165 \frac{Lt}{seg} \left(\frac{0,26 gal}{1 Lt} \right) \left(\frac{60 seg}{1 min} \right) = 8,06 gpm.$$

Necesitaríamos un Caudal (Q) de 8,06 galones por minuto (*gpm*) para el funcionamiento de nuestro colector.

- *Para el Vidrio:*
- *Energía Radiactiva absorbida por el Vidrio ($(Ea)_v$)*

$$(Ea)_v = I_0 \cos kC \overline{(r = rc)} \mathbf{ra}_v A_v \quad (95)$$

Donde:

μ_v : absorción del vidrio

El área del vidrio es la siguiente:

$$A_v = \pi D_v L_c = \pi (0,09)^2 = 0,5654 \text{ } 0,57 \text{ m}^2$$

Por ser un tubo de vidrio envolvente *Duran (Pirex)*, con $r_v = 0,08$ y $a_v = 0,51$.

Reemplazando en la ecuación (95), y calculando tenemos que:

$$(Ea)_v = 832,52 \text{ W}$$

- *Pérdidas de Radiación del Vidrio al Ambiente* $(Prad)_{v, amb}$.

$$(P_{rad})_{v, amb} = A_v \epsilon_v \sigma (T_v^4 - T_{amb}^4) \quad (96)$$

Donde:

T_{amb} : Temperatura ambiente

Reemplazando los datos en la ecuación (96), tenemos que:

$$\begin{aligned} (P_{rad})_{v,amb} &= 0,57(0,8)5,67 \times 10^{-8} [(343)^4 - (301)^4] = \\ (P_{rad})_{v,amb} &= 145,63W \end{aligned}$$

- *Pérdidas de Conducción y Convección del Vidrio al*

Ambiente $(P_{cond, conv})_{v, amb}$:

Este término debido a las pérdidas por convección al medio ambiente, debe tener en cuenta la dirección y velocidad del viento:

$$(P_{cond, conv})_{v,amb} = h_c A_v (T_v - T_{amb}) \quad (97)$$

donde h_c sale de las relaciones:

1. $N_u = 0,49 Re^{0.5}$ si $Re > 10^3$
2. $N_u = 0,245 Re^{0.6}$ si $Re < 10^3$

Válidas si el viento es perpendicular al eje del receptor; si incide con un cierto ángulo de ataque ψ .¹⁸

¹⁸ Ver Bibliografía 5

$$h_{\Psi} = e_{\Psi} h_c(\Psi = 90^{\circ})$$

Donde e_{Ψ} se obtiene de la figura 23:

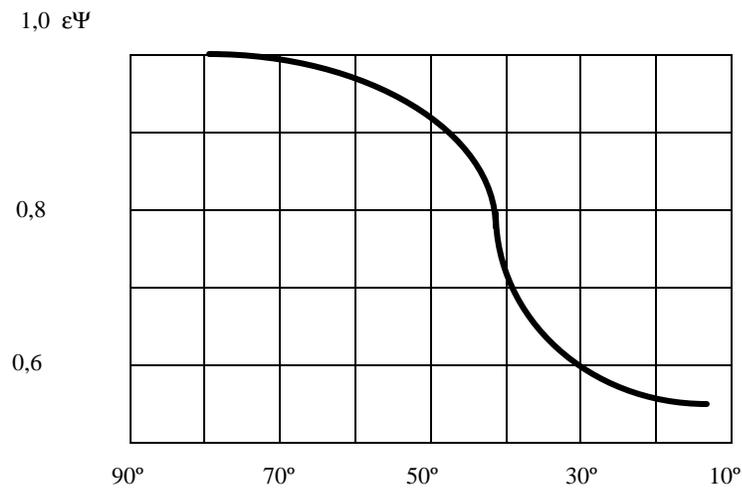


Figura 23. Dependencia entre la emisión calorífica del cilindro y el ángulo de ataque j .

Según los datos, tenemos que:

$$h_c = \frac{k}{D_v} Nu \quad (98)$$

Del Anexo G (para el Aire), y para una temperatura de 315 °K tienen las siguientes propiedades:

$v=16,99 \times 10^{-6} \text{ m/seg}; k=0,02775 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}; Pr=0,69.$

$$Re = \frac{4Q}{\rho D_v J} = \frac{4(5,7988 \times 10^{-4})}{\rho(0,09)16,99 \times 10^{-6}} =$$

$$Re = 482,85$$

Según el caso 2 de la ecuación (97), tenemos que:

$$Nu = 0,24(493,13)^{0,6} = 9,9$$

Entonces,

$$h_c = \left(\frac{0,02775}{0,09} \right) (9,9) = 3,05 \frac{W}{m^2 \text{ }^\circ\text{K}}$$

Por las pérdidas del viento con un ángulo de ataque de 10° (véase figura 23),

entonces,

$$hj = 0,55(3,05) = 1,68 \frac{W}{m^2 \text{ }^\circ\text{K}}$$

Reemplazando Los datos en la ecuación (97), tenemos que:

$$(P_{cond, conv})_{v, amb} = 301,68W$$

Reemplazando en la ecuación (86):

Para el Vidrio:

$$838,52 + 301,68 + 145,63 = (E)_v$$
$$(E)_v = 1285,5W$$

6.4. CÁLCULO DE EFICIENCIAS DEL COLECTOR.

La eficiencia instantánea de un colector solar es el mérito útil. Para el diseño esta sección describe los métodos de calcular la eficiencia.

- **Medida De Insolación**

Es natural definir la eficiencia del colector desde el primer punto de vista como la ley que muestra:

$$h_c = \frac{E_{util}}{I_{acc}} \quad (99)$$

Donde I_{acc} es la incidencia de insolación de la apertura del colector dentro del ángulo de aceptación del colector. Y E_{util} el calor útil del colector, y es la diferencia entre el E_{abs} de flujo absorto y E_{loss} de pérdida de calor.

$$E_{util} = E_{abs} - E_{loss} \quad (100)$$

Para reducir los datos de radiación debido a las condiciones atmosféricas las siguientes convenciones son recomendadas:

- ⌚ La eficiencia de un colector de plato plano puede estar basada en I_T (piranómetro)
- ⌚ Mientras que los concentradores de seguimiento están basados en I_B (pirheliómetro)

Para evitar cualquier equivocación es aconsejable indicar claramente, por ejemplo por subíndices, el tipo de insolación en la que la eficiencia es basada. La conversión desde

$$h_B = \frac{E_{out}}{I_B} \quad (101)$$

Para

$$h_T = \frac{E_{out}}{I_T} \quad (102)$$

Es

$$h_T = \left(\frac{I_B}{I_T} \right) h_B \quad (103)$$

Para días claros I_B y h_B pueden ser menos del 10% y menor que I_T y h_T . Para el propósito de estudio de la eficiencia instantánea es mejor usar datos con una incidencia normal suplida por una curva separada mostrando el efecto del ángulo de incidencia q sobre una eficiencia óptica.

La eficiencia de conversión de energía solar en térmica ht está dada por el cociente entre la energía útil entregada al fluido de trabajo E_{util} y la energía total E_o que incide en el concentrador, o sea:

$$h_T = \frac{E_{util}}{E_o} \quad (104)$$

Donde:

$$E_o = I_o \cos K A_{conc} \quad (105)$$

Con:

I_o : intensidad de la radiación solar directa

K : ángulo que forma el rayo proveniente del centro del Sol con el plano perpendicular a la línea focal. (Véase figura 22)

A_{conc} : área de apertura del concentrador.

En la realidad esta eficiencia no es obtenible, por lo cual se aproxima a una eficiencia real (obtenida en la práctica); esta aproximación es de un 70%.

La Eficiencia óptica h_{op} se define como el cociente entre la energía incidente en el receptor y E_o , o sea:

$$h_{op} = \frac{(Ea)_v}{a_v E_o} = r \frac{A_{rec}}{A_{conc}} C(r = r_v) \quad (106)$$

Donde:

a_v : absorptancia del vidrio.

r : reflectividad de la superficie.

A_{rec} : área del receptor.

$C(r = r_v)$: factor de concentración medio (promedio del factor de concentración puntual sobre el área del receptor) para un receptor de radio igual al del vidrio envolvente. (Ver figura 22)

Definiendo, entonces, la Eficiencia Térmica h_{term} como el cociente entre la *Eutil* y la energía incidente en el receptor:

$$h_{term} = \frac{E_{util} a_v}{(Ea)_v} \quad (107)$$

Se verifica la relación:

$$h_T = h_{op} \times h_{term} \quad (108)$$

Reemplazando los datos en la ecuación (100), tenemos que:

$$\begin{aligned}
 E_{util} &= E_{abs} - [(P_{cond, conv, rad})_{a, amb} + (P_{cond, conv, rad})_{v, amb} + (P_{cond, conv, rad})_{v, a}] \\
 772,45 &= E_{abs} - [(986,65) + (447,31) + (0)] \\
 772,45 &= E_{abs} - 2;1433,96 \\
 E_{abs} &= 2206,41W
 \end{aligned}$$

Reemplazando los datos en la ecuación (99), tenemos que:

$$h_c = \frac{788,88W}{\left(771,54 \frac{W}{m^2}\right) 2m^2} = 0,5112 = 51,12\%$$

Reemplazando en ecuación (101), tenemos que:

$$h_B = \frac{788,88W}{\left(485,63 \frac{W}{m^2}\right) 2m^2} = 0,8122 = 81,22\%$$

Según la ecuación (105), tenemos que:

$$\begin{aligned}
 E_o &= \left(485,63 \frac{W}{m^2}\right) \cos 45^\circ (2m^2) \\
 E_o &= 686,78W
 \end{aligned}$$

Reemplazando en la ecuación (104), tenemos que:

$$\mathbf{h}_T = \frac{772,45}{686,78} = 1,12$$
$$\mathbf{h}_{T,REAL} = 1,12(0,7) = 0,784 = 78,4\%$$

Según la ecuación (106), tenemos que:

$$\mathbf{h}_{op} = \frac{838,52}{(0,51) 686,78} = 2,39$$

Y según la ecuación (107), tenemos que:

$$\mathbf{h}_{term} = \frac{772,45 (0,51)}{838,52} = 0,4698 = 47\%$$

6.5. SELECCIÓN DE LOS MECANISMOS PARA EL SEGUIMIENTO DEL DISCO SOLAR.

6.5.1. SEGUIMIENTO. El primer propósito del sistema de seguimiento es, de acuerdo, guardar el apuntamiento de la apertura del colector en una dirección óptima, también para minimizar el ángulo de incidencia y guardar la imagen solar centrada sobre el absorbedor por lo que el Sol se mueve por el cielo. La exactitud con la cual el Sol hace esta tarea puede ser medida por el declarado error de seguimiento en términos de grados (o radianes) que la normal apertura real se permite desviarse desde su óptimo. Normalmente se piensa como el error de seguimiento máximo o la desviación estándar de una distribución aleatoria de errores de seguimiento. Además para este propósito primario, un sistema de seguimiento podría también tener algunos atributos secundarios, los cuales son discutidos cortamente.

6.5.1.1. Sistemas de Seguimiento Activos. Hay dos métodos comúnmente discutidos del control de seguimiento. Estos son el sistema de control activo, o de vuelta cerrada, y el sistema de control pasivo, o de vuelta abierta. El de tipo "Activo" hace alguna medición de donde está el Sol y entonces, si el alineamiento no es el apropiado, dispositivos activos pueden cambiar la orientación del colector. A menos que los colectores se agrupen con alguna unión

mecánica, los sistemas de control activos individuales deben ser ubicados en cada colector.

Los sensores hacen que un sistema activo sea usualmente de detectores sensibles a la luz tales como las celdas fotovoltaicas o los fototransistores. Los dispositivos anteriores, si operan dentro de ciertas exigencias, producen corrientes eléctricas y voltajes que están relacionados a la intensidad de la luz del Sol que cae sobre estos. Dispositivos posteriores cambian la impedancia tal como cambia la luz del Sol que cae sobre estos.

Idealmente estos sensores podrían ser ubicados sobre los receptores para asegurarse que los receptores siempre estén en el punto focal. Debido a la forma del receptor y los problemas de intensidad de radiación, esto no es posible en la práctica. Una alternativa común ha sido el uso de detectores sensitivos a la luz montados de a dos sobre la estructura del concentrador, para que el reflejo de alguna sombra por alguna ocultación, o capas de protección de mitades opuestas de cada detector. El movimiento del Sol causa que la sombra se mueva fuera de un detector hacia el otro, creando una condición de desbalance que puede ser usado para activar un controlador de seguimiento a través de un amplificador

diferencial o circuito de potencia por ejemplo. El ajuste de la caja del detector debe ser con tal que el receptor sea alineado al plano focal cuando las salidas del detector son balanceadas. Tal detector de caja electrónica comercialmente es disponible.

Los problemas que ocurren con este tipo de sensores pueden ser seguimiento no intencional de nubes brillantes en cambio del Sol, mal alineamiento mecánico de los detectores, envejecimiento y flotamiento de los detectores y dispositivos electrónicos, y la posibilidad de un calentamiento constante y aceleración rápida del sistema de seguimiento. El desalineamiento y problemas de envejecimiento pueden requerir de ajustes que pueden volverse molestias intolerables, especialmente en el campo de un colector grande. El problema de calentamiento y aceleración rápida depende de la respuesta del sistema por un desequilibrio en el sistema y una inercia del sistema. Si es serio, este puede degradar el tiempo de vida del controlador de seguimiento. Antirepercusiones y un contador que equilibra el sistema son requisitos fundamentales.

6.5.1.2. Sistemas de Control Pasivos. Sistemas de control pasivo, o de vuelta abierta de tipo control, responden a un control programado en pasos en orden

para seguir al Sol. Por ejemplo, un minicomputador trabajando en conjunto con un reloj exacto y programado para calcular la posición requerida del colector en función del tiempo del día y el año se alimenta de información para controlar el tren. Usualmente no hay una retroalimentación que pueda hacer el chequeo del sistema mas seguro. Una mejor ventaja es la habilidad para comandar varios colectores desde un solo computador, haciendo así el costo por colector potencialmente mucho más pequeño que el requerido por sensores individuales.

En tales sistemas las antirepercusiones y el contador de equilibrio del sistema son necesarios, desde que no haya una señal retroalimentada. También, el viento o un desenfoque mecánico causado pueden ser mas de un problema que con los sistemas activos, desde que el computador nunca se desentienda de la posición exacta del colector en cualquier instante y, por consiguiente, no pueda reparar cualquier desacierto.

6.5.2. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO.

6.5.2.1. Selección del Circuito para el Sistema de Seguimiento. Comparando los dos sistemas de control anteriormente mencionados, se ha elegido el sistema pasivo debido a que, si se empleara el sistema activo, ya que en Cartagena se encuentran muchas nubes brillantes, puede hacer que el sistema de seguimiento se desalinee y no siga su objetivo (El Sol). Además el viento juega un papel importante, debido a que en sistemas pasivos, el colector se halla más anclado que en sistemas activos, ya que de acuerdo a su funcionalidad los sistemas activos deben tener mayor facilidad de movimiento (menor anclaje).

Otro factor primordial es el calentamiento de los dispositivos que acompañan a los fototransistores o fotoceldas, los cuales con el tiempo se ven afectados y hacen fluctuaciones de los verdaderos valores de voltajes y corrientes correspondientes al sistema de seguimiento. Existen semiconductores que no tienen problema alguno al calentamiento de estos, pero en el comercio son muy costosos, e incrementan notablemente el precio del colector, más aún si se necesitan varios colectores.

La velocidad del viento está por encima de los $3m/s$, en tanto que, el sistema debe tener un buen soporte, para evitar cualquier desbalance que pueda afectar el

seguimiento del sistema hacia el Sol. La estructura del soporte será mencionada posteriormente y tratada de acuerdo a estas exigencias.

El mecanismo de seguimiento pasivo va a estar compuesto por las siguientes cuatro etapas:

- ✓ Regulador: Alimenta el circuito Reloj-Temporizador con 12V y 5V.

- ✓ Circuito Reloj-Temporizador de alta precisión: Está compuesto por un microcontrolador PIC 16F84, el cual envía las ordenes de movimiento al motor por medio de un programa en lenguaje ASSEMBLER. Estas órdenes (que están relacionadas con un reloj interno cuya hora es precisa) se envían por medio de pulsos eléctricos hacia el motor para que solamente opere de 7 a.m. a 5 p.m.(15° por hora) y vuelva a su posición inicial (Stand By, 7 a.m. = 15°) debido a que el tiempo de asolamiento está involucrado en el tiempo de operación. El reloj puede programarse para funcionar a una hora determinada y desde esta empezar su ciclo de seguimiento.

- ✓ Etapa de Conexión: Compuesta por un Relé, que conecta el circuito Reloj-Temporizador con el motor y que funciona como interruptor para el manejo del motor.

- ✓ Moto-Reductor: Etapa compuesta por un motor-reductor (seleccionado posteriormente) de $1/2$ HP (Caballos de Fuerza), y 60 rpm (ya que el funcionamiento de seguimiento es demasiado lento, 15° por hora) y está conectado al colector por medio de una conexión corona-piñón con una relación de 10 que reduce aún mas la velocidad. La conexión de piñones esta elaborada por medio de cadena para evitar problemas de deslizamiento.

6.5.3. Selección del Mecanismo para el Sistema de Seguimiento

6.5.3.1. Cálculo del Motor

De la figura 19.a. del capítulo 6 tenemos que:

Ancho de la lámina doblada(a) 1m

Longitud Focal (f): 0,25m

Longitud de Desarrollo o Perímetro (p):

$$p = 0,5\sqrt{a^2 + 16f^2} + \frac{a^2}{8f} \ln \left(\frac{4f + \sqrt{a^2 + 16f^2}}{a} \right) \quad (109)$$

$$p = 1,1478m$$

Longitud de la Parábola (l): 2m

- **Área Total de la Parábola (A_T):**

$$A_T = l \times p = 2,2956m^2 \quad (110)$$

Espesor de la Lámina (E): 1mm = 0,001m

Volumen de la Parábola (V):

$$V = A_T \times E = 0,0023m^3$$

(111)

Densidad de la Lámina de Acero 316L (D): $7980 \frac{Kg}{m^3}$

Peso de la Lámina (P_{par}):

$$P_{par} = V \times D = 18,354 Kg \quad (112)$$

Distancia del Centroide de la Parábola (arco) al centro de giro (C_{par}):

$$C_{par} = \frac{6}{11} f = 0,1363m \quad (113)$$

Área de una Tapa Lateral Parabólica (A_l):

$$A_l = \frac{2}{3} af = 0,1667m^2 \quad (114)$$

Peso de las Dos Tapas Laterales:

$$P_t = D \times E \times A_t \times 2 \quad (115)$$

$$P_t = 7.980 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0,001\text{m} \times 0,1667\text{m}^2 \times 2 = 2,66\text{Kg}$$

Distancia del Centroide de las Tapas laterales(C_t):

$$C_t = f - \frac{3}{5}f = \frac{2}{5}f = 0,1\text{m} \quad (116)$$

Momento de la Parábola y las Tapas(M):

$$M = P_{par} \times C_{par} + P_t \times C_t = \quad (117)$$

$$M = 18,354\text{Kg}(0,1363\text{m}) + 2,66\text{Kg}(0,1\text{m}) = 2,7676\text{Kg} \cdot \text{m}$$

Relación de Piñón-Corona(R_{p-c}): 10

Este valor es escogido debido a que el movimiento del motor debe ser muy lento.

Torque Requerido a la Salida del Motor(T_i):

$$T_i = \frac{M}{R_{p-c}} = \frac{2,7676\text{Kg} \cdot \text{m}}{10} = 0,27676\text{Kg} \cdot \text{m} \quad (118)$$

En *libras-pie* se expresa como:

$$T_i = 0,27676Kg \cdot m \left(\frac{1pie}{0,3048m} \right) \left(\frac{1lb}{0,45359Kg} \right) = 2,001lb \cdot pie$$

Factor de Seguridad(F.S): 1,25

- **Torque requerido a la salida del Motor Final (T_f):**

$$T_f = F.S \times T_i = 1,25 \times 0,27676 = 0,34595Kg \cdot m \quad (119)$$

En *libras-pie* se expresa como:

$$T_f = 0,34595Kg \cdot m \left(\frac{1pie}{0,3048m} \right) \left(\frac{1lb}{0,45359Kg} \right) = 2,5022lb \cdot pie$$

Velocidad del Motor: 60 rpm

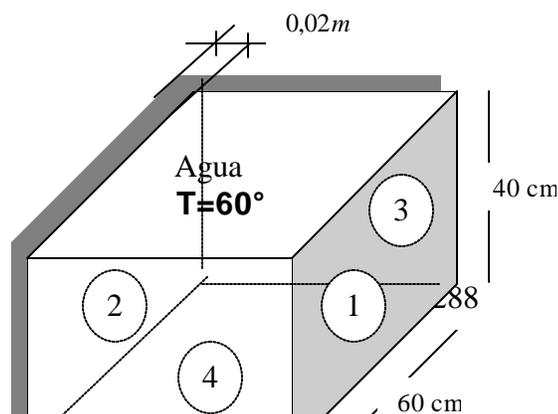
Velocidad de la estructura: 6 rpm

Como resultado se tienen las siguientes características:

- ✓ Torque de Salida del Motor: $0,2767\text{Kg.m}$ ($2,001\text{lb.pie}$)
- ✓ Factor de Seguridad de un 25%
- ✓ Torque de Salida del Motor Final: $0,34595\text{Kg.m}$ ($2,5022\text{lb.pie}$)
- ✓ El piñón del Moto-reductor puede tener de 8 a 15 dientes
- ✓ El piñón de la Corona debe tener diez veces la cantidad de dientes del piñón.
- ✓ Con lámina de Acero Inoxidable Brillante de $1,1478\text{m}$ de ancho y 2m de largo como dimensiones mínimas.

7. CALCULO DE ACCESORIOS Y VARIOS.

7.1. DISEÑO DEL TANQUE



Velocidad del Viento
 5 m/s

$$T_{amb} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$= 303^{\circ}\text{K}$$

Figura 24: Tanque de Acero Para Ducto de Aire Acondicionado

7.1.1. Materiales. *El tanque está hecho de Acero AISI 1020 (1010) aislado con una lámina para ducto de aire acondicionado y pintado con pinturas anticorrosivas (Ver Plano).*

7.1.2. Análisis: *Presenta pérdidas de calor por conducción y convección, no se tiene en cuenta la radiación por el buen aislamiento.*

Las pérdidas de calor en el tanque se presenta por la ecuación 120:

$$Q_T = Q_{P1-2} + Q_{P3-4} + Q_{tapa} + Q_{aristas-esquinas} \quad (120)$$

Para una mejor comprensión se analizará según las paredes del tanque.

7.1.3. Calor Perdido Por Las Paredes

7.1.3.1. Paredes 1-2

$$Q_{P1-2} = 2Q_1 \quad (121)$$

$$Q_1 = Q_{cond} + Q_{conv}$$

Sin aislante

$$Q_{cond} = \frac{K_{AC} \cdot A(T_a - T_{amb})}{L_{AC}}$$

$$Q_{cond} = \frac{(62,35)(0,6 * 0,4)(333 - 303)}{0,002} = 224460 \text{ W} \quad \text{No aislado}$$

Con aislante

$$Q_{cond} = K_{IC} \cdot A(T_a - T_{amb})$$
$$Q_{cond} = \frac{(41,8)(0,6 * 0,4)(333 - 303)}{0,02} = 15048 \text{ W} \quad \text{Aislado}$$

$$Q_{conv} = h_c A_c (T_p - T_{amb}) \quad (122)$$

Analicemos el tipo de flujo presente

$$c_{ir} = \left(\frac{Gr \cdot V^2}{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)g} \right)^{1/3} \quad (123)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \Delta T &= 60 - 30 = 30^\circ C = 303^\circ K & b &= \frac{1}{T} = \frac{1}{288} \\ T &= \frac{\Delta T}{2} = \frac{30}{2} = 15^\circ C & g &= 9,8 \text{ m/seg}^2 \\ T &= 15 + 273 = 288^\circ K & Gr &= 10^9 \end{aligned}$$

Según Anexo G (Agua) a una temperatura de 303°K

$$J = 0,819 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{seg} ; r = 5,51 ; K = 0,6161 \text{ W/m}^\circ K$$

reemplazando en la ecuación (123)

$$c_{tr} = \left(\frac{10^9 (0,819 \times 10^{-6})^2}{\left(\frac{30}{288}\right)^{9,81}} \right)^{\frac{1}{3}} 0,087m = 8,7cm \quad (\text{Flujo laminar})$$

Entonces,

$$h_c = \frac{1}{A} \int_0^A h_c dA \quad ; A = W \cdot L \quad ; dA = W \cdot dX$$

$$h_c = \frac{1}{L} \left[\int_0^{l_r} 1,07 \left(\frac{\Delta T}{X} \right)^{\frac{1}{4}} dX + \int_{l_r}^L 1,3 \Delta T^{\frac{1}{3}} dX \right]$$

$$h_c = 10,1769 \text{ W/m}^2\text{K}$$

reemplazando en ecuación (122)

$$Q_{conv} = 73,27368 \text{ W}$$

Según ecuación (121)

$$Q_1 = Q_{cond} + Q_{conv}$$

$$Q_1 = 15121,273 \text{ W aislado}$$

$$Q_1 = 224533,28 \text{ W No aislado}$$

$$Q_{P1-2} = 2Q_1 = 30242,56 \text{ W aislado}$$

$$Q_{P1-2} = 2Q_1 = 449066,6 \text{ W No aislado}$$

7.1.3.2. Paredes 3-4

Sin aislante

$$Q_{cond} = \frac{K_{AC} \cdot A(T_a - T_{amb})}{L_{AC}}$$

$$Q_{cond} = \frac{(62,35)(0,4 * 0,4)(333 - 303)}{0,002} = 149640 \text{ W} \quad \text{No aislado}$$

Con aislante

$$Q_{cond} = K_{IC} \cdot A(T_a - T_{amb})$$

$$Q_{cond} = \frac{(41,8)(0,4 * 0,4)(333 - 303)}{0,02} = 10032 \text{ W} \quad \text{Aislado}$$

$$Q_{conv} = h_c A_c (T_p - T_{amb})$$

$$h_c = 10,1769 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Entonces

$$Q_{conv} = 48,84912 \text{ W}$$

$$Q_2 = Q_{cond} + Q_{conv}$$

$$Q_2 = 10080,85 \text{ W} \quad \textit{aislado}$$

$$Q_2 = 149688,86 \text{ W} \quad \textit{No aislado}$$

$$Q_{P3-4} = 2Q_2$$

$$Q_{P3-4} = 20161,7 \text{ W} \quad \textit{aislado}$$

$$Q_{P3-4} = 299377,8 \text{ W} \quad \textit{No aislado}$$

7.1.4. Calor Perdido Por La Tapa. Se construyó con el mismo material y aislante del tanque con $t = 0,02 \text{ m}$

$$Q_T = Q_{cond} + Q_{conv}$$

$$Q_T = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{L} + h_c A_c \Delta T$$

$$Q_T = \Delta T \cdot A \left(\frac{k \cdot A_c}{L} + h_c \right) \quad \textit{aislado} \quad (124)$$

$$Q_T = \Delta T \cdot A \left(\frac{k \cdot I_c}{L} + h_c \right) \quad \textit{No aislado}$$

Utilizaremos la siguiente correlación para el h_{conv}

$$h_{conv} = 0,71 \cdot \frac{k}{L} (d)^{1/4} \quad (125)$$

Donde

$$d = \frac{L^3 r^2 g \cdot b \cdot \Delta T}{mk} \quad ; 10^3 < d < 10^9 \quad (126)$$

según el Anexo G (Aire) a una temperatura $T = 303^\circ K$

$$r = 1,1662 \frac{Kg}{m^3} \quad ; \quad m = 18,586 \times 10^{-6} \frac{Kg}{m \cdot seg}$$

$$k = 0,02691 \frac{W}{m^\circ K} \quad ; \quad C_p = 1003 \frac{J}{Kg^\circ K}$$

$$T = \frac{\Delta T}{2} = \frac{30^\circ C}{2} = 288^\circ K \quad ; \quad b = \frac{1}{T} = 1/288$$

Reemplazando en la ecuación (125) se tiene

$$h_c = 0,71 \left(\frac{0,02691}{0,6} \right) (1225197,65)^{1/4}$$

$$h_c = 1,4921 \frac{W}{m^\circ K}$$

Según la ecuación (124)

$$Q_T = (333 - 303)(0,6 * 0,4) \left[\frac{62,35}{0,6} + 1,4921 \right]$$

$$Q_T = 758,94W \quad \text{No aislado}$$

$$Q_T = (333 - 303)(0,6 * 0,4) \left[\frac{41,8}{0,6} + 1,4921 \right]$$

$$Q_T = 512,34W \quad \text{aislado}$$

7.1.5. Calor Disipado Por Las Aristas Y Las Esquinas. El tanque pierde calor por las cuatro aristas y las cuatro esquinas y es dada por la siguiente ecuación

$$\begin{aligned} Q_{A-E} &= k_{AC} \cdot S_T \Delta T \\ Q_{A-E} &= k_{IC} \cdot S_T \Delta T \end{aligned} \quad (127)$$

Para las Aristas: $S_A = 0,54L_A$

Para las Esquinas: $S_E = 0,15 \cdot \Delta X = 0,15t$

En cada Arista:

$$S_{A1} = 0,54(0,6) = 0,324$$

$$S_{A2} = 0,54(0,4) = 0,216$$

$$S_{A3} = 0,54(0,4) = 0,216$$

Entonces,

$$S_{AT} = 2S_{A1} + S_{A2} + 4S_{A3}$$

$$S_{AT} = 1,944$$

Por cada Esquina

$$S_{ET} = 4S_E$$

$$S_{ET} = 4(0,15)(0,02) = 0,012$$

En total se tiene:

$$S_T = S_E + S_{AT}$$

$$S_T = 1,956$$

Según la ecuación (127) para un sistema aislado y uno no aislado se tiene

$$Q_T = 449066,6 + 149640 + 758,94 + 3658,7$$

$$Q_T = 603124,24W \quad \text{No aislado}$$

$$Q_T = 30242,56 + 10032 + 512,34 + 2452,8$$

$$Q_T = 43239,7W \quad \text{aislado}$$

7.1.6. Ahorro De Calorías

$$Q_{Ah} = Q_{SA} - Q_{CA} \quad (128) \text{ En Vatios}$$

Reemplazando se tiene:

$$Q_{Ah} = 603124,24 - 43239,7$$

$$Q_{Ah} = 559884,54 \text{ W}$$

7.2. CÁLCULO DE LA TUBERÍA.

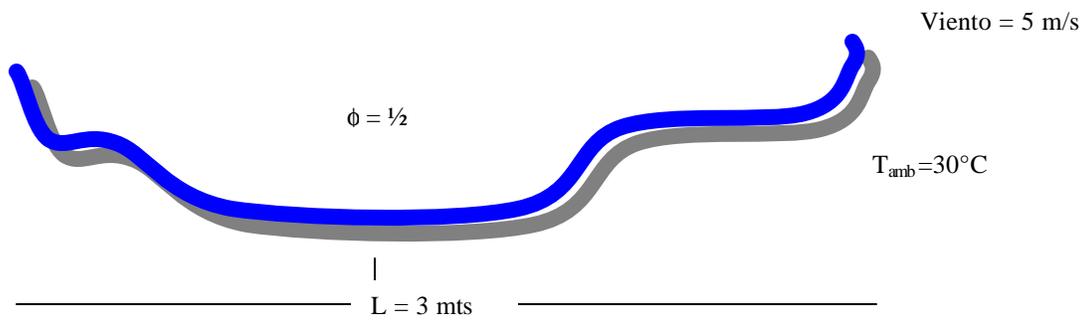


Figura 25: Diagrama de la Tubería Requerida por el Colector

A la entrada y salida del Colector Solar se instalo su respectiva tubería de descarga proveniente de la Bomba y su tubería de succión que llega al tanque (ver planos).

7.2.1. Material. Se usa tubería galvanizada de $\frac{1}{2}$ " y 3 m de longitud de cada lado con algunos accesorios (codos, niples, Ts, uniones universales y simple válvula de globo), aislada con cañuela .

7.2.2. Análisis. Se presenta pérdidas e calor (fibra de vidrio) por conducción y convección no se toman en cuenta la radiación por el aislamiento de la tubería. Se realizo el análisis de la tubería con aislante y sin aislante.

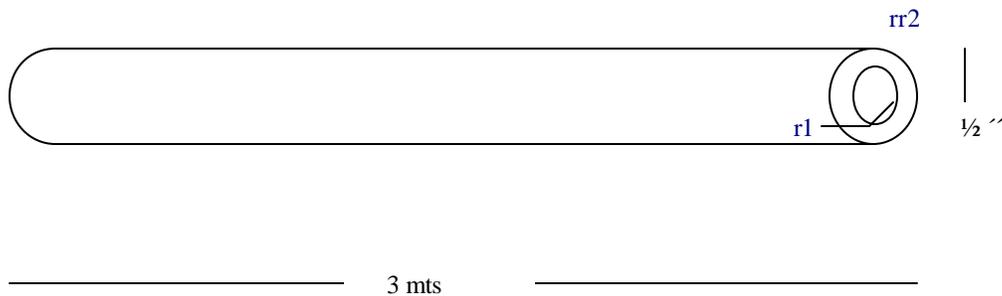


Figura 26: Corte Transversal de la Tubería Implementada

Las pérdidas de calor vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\Delta T}{\text{Re } q} \quad (129)$$

El cual a su vez presenta convección forzada en el fluido (agua) y del interior del tubo, le sigue una conducción en el espesor del tubo y por último una convección natural con el aire.

$$\text{Re } q = \frac{1}{UP} = \frac{1}{hc_1Ac_1} + \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2p \cdot K_{AC}L}} + \frac{1}{hc_2Ac_2} \quad \text{No aislado} \quad (130)$$

$$\text{Re } q = \frac{1}{UP} = \frac{1}{hc_1Ac_1} + \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot p \cdot K_{ca}L}} + \frac{1}{hc_2Ac_2} \quad \text{aislado} \quad (131)$$

Según anexo G (agua) A un $T = 60^\circ \text{C}$ $X = 333^\circ \text{K}$

Tiene las siguientes propiedades:

$$k = 0,6547 \text{ W/m}^\circ\text{K} \quad ; \text{Pr} = 3,05 \quad ; \text{J} = 0,482 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}.$$

Según correlación del coeficiente convectivo¹⁹

¹⁹ ANTHONY F. WILLS. "Transferencia de Calor", Editorial Mc Graw –Hill. España 1995. pág.281
188

$$hc = Nu_D \left(\frac{k}{D_{int}} \right) \quad (132)$$

Donde:

$$Nu_D = 8,023 Re_D^{0,8} Pr^{0,4} (Re_D > 10000 ; Pr > 0,5) \quad \text{Flujo dentro del tubo}$$

Por lo cual:

$$Re_D = \frac{4Q}{\rho \cdot D_{int} J} =$$

$$\text{De la ecuación 129} \rightarrow Q = 0,5125 \frac{Lt}{seg} = 8 \text{ gpm}$$

$$Q = 5,1253 \times 10^{-4} \frac{m^3}{seg}$$

Según anexo J: (tubería galvanizada)

$$f = 1 \frac{1}{2}'' \rightarrow D_{ext} = 21,336 \text{ mm} ? \quad r_2 = 0,010668 \text{ m}$$

$$Pared = 1,651 \text{ mm}$$

$$D_{int} = 18,034 \text{ mm} ? \quad r_1 = 0,009017 \text{ m}$$

Entonces:

$$Re_D = \frac{4(5,1253 \times 10^{-4})}{\rho(0,018034)(0,482 \times 10^{-6})} = 75074,13$$

$$Nu_D = 0,023(75074,13)^{0,8} (3,05)^{0,4}$$

$$Nu_D = 285,65$$

$$hc_1 = Nu_D \frac{k}{D_{int}} = (285,65) \frac{(0,6547)}{0,018034}$$

$$hc_1 = 10370,27 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$Ac_1 = \frac{2\rho \cdot r_i}{L} = \frac{2\rho(0,0090 + 7)}{3} = 1,8885 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

Para el coeficiente convectivo exterior (hc_2)

$$hc_2 = Nu_D \frac{K}{D_{ext}}$$

Según correlación del número Nusselt²⁰

²⁰ ANTHONY F. MILLS. Transferencia de Calor. Editorial Mc Graw Hill. España 1995. Pág. 307

$$Nu_D = 0,36 + \frac{0,518R_{Ab}^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}; \quad 10^6 < R_{Ab} \leq 10^9$$

Según anexo G (Aire) a una $T = 30^\circ\text{C} = 303\text{K}$ presenta las siguientes propiedades:

$$K = 0,02699 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}; \quad \mathbf{J} = 15,924 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{seg}}; \quad Pr = 0,69$$

$$R_{AD} = Gr_b Pr = \frac{\mathbf{b} \cdot \Delta T g D^3_{ext}}{\mathbf{J}^2} \quad Pr \leq 109 \text{ Flujo en cilindros horizontales.}$$

Donde:

$$\mathbf{b} = \frac{333 + 303}{2} = 318$$

$$\Delta T = 333 - 303 = 30$$

Entonces:

$$R_{AD} = \frac{\left(\frac{1}{318}\right)(301)(9,81)(0,021336)^3}{(15,924 \times 10^{-6})^2} (0,69)$$

$$R_{AD} = 24459,46$$

$$\rightarrow Nu_D = 0,36 + \frac{0,518(24459,46)^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,59}{0,69}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} = 5,2436$$

$$\rightarrow hc_2 = (5,2436) \frac{(0,02691)}{0,021336} = 6,6135 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\rightarrow Ac_2 = \frac{2pr_2}{L} = \frac{2p(0,010668)}{3} = 2,2343 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

Según el Anexo I: el Acero AISI 1020 \approx 1010 (Tubería Galvanizada) a una

Temperatura de $60^\circ\text{C} \rightarrow K_{AC} = 62,35 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Según el Anexo L (Aislante de la Tubería) a Temperatura Ambiente

$$T_{amb} = 30^\circ\text{C} \rightarrow k_{Ca} = 45,4262 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Reemplazando en la ecuación (130)

$$\text{Re } q = \frac{1}{UPr} = \frac{1}{10370,27(1,885 \times 10^{-2})} + \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{0,010668}{0,009017}\right)}{2p(62,35)(3)}} + \frac{1}{6,6135(2,2343 \times 10^{-2})}$$

$$\text{Re } q = 6996,73 \rightarrow UP = 1,4292 \times 10^{-4}$$

Según la ecuación (129)

$$Q = \frac{\Delta T}{\text{Re } q} = \frac{30}{1,4292 \times 10^{-4}} = 209901,88 \text{ W} \quad \text{No aislado}$$

Reemplazando en ecuación (131)

$$Re\ q = \frac{1}{UP} = \frac{1}{10370,27(1,885 \times 10^{-2})} + \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{0,010668}{0,009017}\right)}{2 \cdot p(45,4262)(3)}} + \frac{1}{6,6135(2,2343 \times 10^{-2})}$$

$$Re\ q = 5099,43 \rightarrow UP = 1,9610 \times 10^{-4}$$

Según la ecuación (129)

$$Q = \frac{\Delta T}{Re\ q} = \frac{30}{1,9610 \times 10^{-4}} = 152982,9\ W \quad \text{aislado}$$

- **Ahorro de Calor en Vatios**

$$Q_T = Q_{SA} - Q_{CA} = 209901,8 - 152982,9 = 59618,9\ W$$

7.2.3. *Evaluación Del Costo De Energía En La Tubería. También podemos calcular los costos de la energía disipada, mediante la siguiente expresión*

$$Costo = \frac{1,1Q \cdot L \cdot P \cdot t}{H \cdot E} \quad (133)$$

Donde:

$$P = \text{Costo del combustible} = \$2425/\text{gal} \quad \text{ACPM}$$

$$H = \text{Poder Calorífico del Combustible} = \$140.000 \text{ BTU}/\text{galon}$$

$$Q = \text{Pérdidas de Energía} = 152982,9 \text{ W. aislado}$$

$$Q = 209901,8 \text{ W. No aislado}$$

$$t = \text{Tiempo de Operación} = 10 \text{ hr}/\text{día} \left(\frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \right) = 3650 \text{ hr}/\text{año}$$

$$L = \text{Longitud de tubería a aislar} = 6 \text{ m}$$

$$E = \text{Eficiencia de Conversión} = 0,8$$

Por lo cual se tiene que:

$$\text{Costo} = \$45.147,63/\text{año} \quad \text{No aislado}$$

$$\text{Costo} = \$32.904,9/\text{año} \quad \text{aislado}$$

7.2.4. Selección de la Estructura. La estructura fue realizada en tubo de hierro negro de diámetro de 1" con dos tubos verticales de 70 cm y un determinado espacio requerido para el movimiento libre del Colector, ubicando así el mecanismo para el seguimiento del Disco Solar, un tubo horizontal de 60 cm a cada lado lo requerido para soportar el colector y evitar su caída al moverse con otro tubo que une los anteriormente mencionados. (Ver planos)

7.3. CALOR NECESARIO PARA EL AGUA DEL TANQUE.

$$Q = r \cdot \forall C_p \Delta T \quad (134)$$

El agua en el tanque se encuentra a una $\Delta T = 30^\circ C = 303^\circ K$. (Ver Anexo G)

$$\forall (\text{Volumen del tanque}) = 0,6 * 0,4 * 0,4 = 0,096\text{m}^3$$

$$r = 995,13 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

$$C_p = 4176,8 \text{ J} / \text{Kg}^\circ K = 4,176 \text{ KJ} / \text{Kg}^\circ K$$

Según la ecuación (134)

$$Q = 995,13(0,096)(4,176)(30)$$
$$Q = \frac{11968,31}{24\text{hr}} = 498,68 \text{ KJ} / \text{hr} = 138,52 \text{ J} / \text{seg} = 138,52\text{W}$$

7.4. CALOR TOTAL QUE DEBE SUMINISTRAR EL COLECTOR.

$$Q_T = Q_{TANQUE} + Q_{AGUA}$$

$$Q_T = 698425,22 \text{ W}$$

Con un Factor de Seguridad de 1,2 si presenta mayores pérdidas, tenemos que:

$$Q_i = F.S * Q_T$$

$$Q_i = 1,2 * 698425,22$$

$$Q_i = 8381110,264 \text{ W.}$$

7.5. CALCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN EN TUBERÍAS.

$$Re = \frac{4m}{\rho \cdot D_{int} \cdot r \cdot V} \quad (135)$$

7.5.1. En el Colector

Se uso Tubería de D =2" con cedula 5 (Ver Anexo J)

Donde,

$$D_{\text{int}} = 18,034\text{mm} = 0,018034\text{m}$$

$$Q = 0,5124\text{Lt}/\text{seg}$$

Según Anexo 7(Agua) a una $T = 45^\circ\text{C}$: (Ver planos)

$$J = 0,612 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{seg}$$

$$r = 989,8\text{Kg}/\text{m}^3$$

Según ecuación (135)

$$\text{Re} = \frac{4(0,5124)}{\rho(0,00508)(989,8)(0,612 \times 10^{-6})} = 59721,17$$

Según anexo M : $f = 0,01787$

7.5.2. En La Tubería De Suministro

Se uso Tubería de $D = 3/4$ con shcedule 5 (Ver Anexo J):

$$D_{\text{int}} = 23,368\text{mm} = 0,023368\text{m}$$

$$Q = 0,54211\text{Lt}/\text{seg}$$

$$J = 0,612 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{seg} \quad (T_{H_2O} = 45^\circ\text{C}) \text{ Ver planos}$$

$$r = 989,8\text{Kg}/\text{m}^3$$

Según ecuación (135)

$$Re = \frac{4(0,542)}{\rho(0,023368)(989,8)(0,612 \times 10^{-6})} = 48751,61$$

Según anexo M $f=0,01768$

7.5.3. En La Tubería De Descarga

Se uso tubería de $D = \frac{1}{2}$ con schedule 5:

$$D_{int} = 0,018034m$$

$$Q = 0,521 \text{ Lt/seg}$$

A una $T_{agua} = 45^{\circ}C$

$$J = 0,612 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{sg} \quad (\text{Ver Planos})$$

$$r = 989,3 \text{ kg/m}^3$$

Según ecuación (135)

$$Re = \frac{4(0,521)}{\rho(0,018034)(989,3)(0,612 \times 10^{-6})}$$

$$Re = 60723,51$$

Según Anexo M, $f=0,01768$

7.5.4. En la Tubería de Realimentación

Se uso Tubería de D =1/2 con shcedule 5 (Ver Anexo J):

$$\begin{aligned}D_{\text{int}} &= 18,034\text{mm} = 0,018034\text{m} \\Q &= 0,487 \text{ Lt}/\text{seg} \\J &= 0,612 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg} \quad (T_{H_2O} = 45^\circ\text{C}) \text{ Ver planos} \\r &= 989,8 \text{ Kg}/\text{m}^3\end{aligned}$$

Según ecuación (135)

$$\text{Re} = \frac{4(0,487)}{\rho(0,018034)(989,8)(0,612 \times 10^{-6})} = 56760,75$$

Según anexo M: $f=0,01762$

7.6. CALCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN.

$$\Delta P = \frac{0,0025 \cdot K_T \cdot r \cdot Q^2}{D_{\text{int}}^4} \quad \text{Ecuación (136)}$$

Donde:

K_T = Coeficiente de resistencia incluyendo curvas de 180°

7.6.1. En el Colector

Propiedades

a. $Q = 0,81 \text{ Lt/seg} = 30,6 \text{ Lt/min}$

b. $f = 0,01787$

c. $r = 989,8 \text{ Kg/m}^3$

d. $J = 0,612 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$

Accesorios

1. $L = 1,55m$

2. $D_{\text{int}} = 0,00508m$

Para Tubería recta se tiene:

$$K = \frac{f \cdot L}{D_{\text{int}}} = \frac{0,01727(1,55)}{0,00508} = 5,45$$

Donde:

$$\Delta P = \frac{0,0025(5,45)(989,8)(30,6)^2}{(0,00508)^4}$$

$$\Delta P = 1,89 \times 10^{-3}$$

7.6.2. En La Tubería De Suministro

Propiedades

a. $Q = 0,542 \text{ Lt/seg} = 32,5 \text{ Lt/min}$

b. $f = 0,01768$

c. $r = 989,8 \text{ Kg/m}^3$

d. $J = 0,612 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$

Accesorios

1. $L = 0,3m$

2. $D_{\text{int}} = 23,36mm = 0,02336m$

3. $\text{Unión Universal} = \frac{3}{4}$

Para Tubería recta se tiene:

$$K_1 = \frac{f \cdot L}{D_{int}} = \frac{0,01768(0,3)}{0,00233} = 0,22$$

Para Unión Universal:

$$K_2 = 2f_t = 0,03568$$

$$K_t = K_1 + K_2 = 0,25336$$

Donde:

$$\Delta P = \frac{0,0025(0,25336)(989,8)(32,52)^2}{(0,0233)^4}$$

$$\Delta P = 2,24 \times 10^{-3}$$

7.6.3. En La Tubería De Descarga

Propiedades

a. $Q = 0,521 \text{ Lt/seg} = 31,26 \text{ Lt/min}$

b. $f = 0,01758$

$$c. r = 989,8 \frac{Kg}{m^3}$$

$$d. D_{int} = 0,018034m$$

Accesorios

1. $L = 0,3m$
2. Tres codos a 90°
3. Nueve Niples
4. Cuatro Uniones Universales
5. Dos T's
6. Una Unión Simple
7. Una Válvula de cierre rápido

Observar planos

Para Tuberías rectas se tiene:

$$K = \frac{f \cdot L}{D_{int}} = \frac{0,01758(3)}{0,018034} = 2,92$$

Para codos de 90°

$$\frac{r}{d} = 1,5 \quad K = 14f = 14(0,01758) = 0,24612$$
$$K_T = 3K = 0,73836$$

Para las T's

$$K = 20f_T = 20(0,01758) = 0,3516$$
$$K_T = 2K = 0,7032$$

Para Válvulas de Cierre Rápido

$$K_T = 3f_T = 3(0,01758) = 0,05274$$

Para Niples

$$K = 4f_T = 4(0,01758) = 0,0732$$
$$K_T = 9K = 0,63648$$

Para Unión Universal

$$K_T = 2(0,01758) = 0,03516$$

$$K_T = 2K = 0,14064$$

Para Unión Simple

$$K = 2f_T = 2(0,01758) = 0,03516$$

$$K_{TOT} = \sum K_T 's$$

$$K_{TOT} = 2,92 + 0,738 + 0,7032 + 0,05274 + 0,63648 + 0,14064 + 0,03516 = 5,52$$

Donde:

$$\Delta P = \frac{0,0025(5,52)(989,8)(31,26)^2}{(18,034)^4}$$

$$\Delta P = 0,126$$

7.6.4. En La Tubería De Realimentación

Propiedades

a. $Q = 0,487 \text{ Lt/seg} = 29,22 \text{ Lt/min}$

b. $f = 0,01762$

$$c. r = 989,8 \frac{Kg}{m^3}$$

$$d. D_{int} = 0,018034m$$

Accesorios

1. $L = 3m$
2. Dos codos a 90°
3. Tres Niples
4. Dos Uniones Universales
5. Una T's
6. Una Unión Universal Simple

Observar planos

Para Tuberías rectas se tiene:

$$K = \frac{f \cdot L}{D_{int}} = \frac{0,01762(3)}{0,018034} = 2,93$$

Para codos de 90°

$$\frac{r}{d} = 1,5 \quad K = 14f = 14(0,01762) = 0,24668$$
$$K_T = 2K = 0,49336$$

Para las T's

$$K = 20K_T = 20(0,01762) = 0,3524$$

Para Niples

$$K = 4f_T = 4(0,01762) = 0,07048$$

$$K_T = 4K = 0,28192$$

Para Unión Universal

$$K_T = 2(0,01762) = 0,03548$$

$$K_T = 2K = 0,07048$$

Para Unión Simple

$$K = 2f_T = 2(0,01762) = 0,03548$$

$$K_{TOT} = \sum K_T 's$$

$$K_{TOT} = 2,93 + 0,49336 + 0,3524 + 0,28192 + 0,07048 + 0,03548 = 4,0932$$

Donde:

$$\Delta P = \frac{0,0025(4,09)(989,8)(29,22)^2}{(18,034)^4}$$

$$\Delta P = 13,2848$$

7.7. POTENCIA NECESARIA PARA BOMBEAR EL FLUIDO.

$$Pot = \frac{Q \cdot \Delta P}{600 \cdot h} \quad (137)$$

En Colectores

$$Pot = \frac{30,6(1,89 \times 10^{-3})}{0,6(600)} = 1,6065 \times 10^{-5} hp$$

En Las Tuberías de Suministro

$$Pot = \frac{32,52(2,24 \times 10^{-3})}{0,6(600)} = 2,02 \times 10^{-4} hp$$

En la Tubería de Descarga

$$Pot = \frac{31,26(0,126)}{0,6(600)} = 0,109 hp$$

En la Tubería de Realimentación

$$Pot = \frac{29,22(13,2848)}{0,6(600)} = 1,0782hp$$

Potencia Total

$$P_T = \sum Pot = 1,187 \text{ HP.}$$

7.8. SELECCIÓN DE LA BOMBA.

Según los cálculos anteriores que nos dan como resultado una potencia de bombeo de 1,18 HP seleccionamos una Bomba de 2 *hp* y los cálculos del balance de energía del Colector nos dan 8 *gpm* de caudal necesarios para el Colector y con un $D = 1/2''$ con 3600 *rpm* (Ver Anexo M).

Debido a que el Área de Recursos Humanos de la Universidad Tecnológica de Bolívar nos dio para uso una Bomba Siemens de 20 *gpm* de caudal, con $D = 1/2$ y 3600 *rpm*; la cual fue desmantelada del Colector Plano existente en la Universidad Tecnológica de Bolívar y acoplada a nuestro proyecto, pero con el problema de tener 20 *gpm*. Como se necesitan 8 *gpm* se le hizo un *by-pass* por medio de una

válvula de cierre rápido para ajustarla al caudal requerido por el Colector Cilíndrico Parabólico. (Ver Planos)

7.9. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.

Las pruebas realizadas al prototipo son las presentadas en la Tabla 8.

Según las pruebas de funcionamiento, se analizó que para un tiempo de prueba de 1 hora, y dependiendo de variables como en este caso las que se tuvieron en cuenta como lo fueron el Clima, la época del año (meses) y algunos Materiales, el Colector Solar obtuvo buenas temperaturas del calentamiento del fluido.

<i>MESES</i>	CLIMA	<i>TIEMPO</i>	<i>MATERIALES</i>	(VARIABLES)	TEMPERATURA
				Con Tubo	
ABRIL	SOLEADO		Tubería	Vidrio	
			Aislada	Envolvente	20 – 25 °C
				Sin Tubo	
			Tubería sin	De Vidrio	
		1 HORA	Aislante	Envolvente	15 – 20 °C
				Con Tubo	
			Tubería	Vidrio	
MAYO	PARCIALMENTE		Aislada	Envolvente	10 – 15 °C
				Sin Tubo	
			Tubería sin	De Vidrio	
	NUBLADO		Aislante	Envolvente	5 – 10 °C

Tabla 8. Pruebas de Funcionamiento del Colector Solar.

Con estas pruebas y manejando otras variables se pueden llegar a obtener otros resultados que ayudarían en la investigación de la Energía Solar con otros Materiales u otras variables.

Esperamos que este prototipo sea del agrado de la Tecnológica del Bolívar y ayude en el campo de la investigación o cualquier otra necesidad que se presente y también para los compañeros de la Facultad de Ingeniería Mecánica en la asignatura de Transferencia de Calor.

8. FUNCIONAMIENTO Y PLAN DE MANTENIMIENTO

8.1. EQUIPOS.

El sistema de comparación de los colectores solares consta de los siguientes equipos:

- ✓ *Intercambiador de Calor*

Lo atraviesa la tubería de suministro y descarga, de cada Colector entre las cuales existe un intercambio de calor que nos ayuda a aumentar la temperatura de salida de los Colectores y así cada uno adquiere su temperatura de funcionamiento de una manera más rápida.

Es muy importante colocar Intercambiadores de Calor a los Colectores Cilíndrico Parabólicos (Colectores de Enfoque) ya que estos trabajan mucho más eficientemente con temperaturas mayores a la entrada.

✓ *Tuberías de Suministro y Descarga*

Estas tuberías son de Acero Estructurado de 5cm y aisladas con poliuretano, que evita que baje la temperatura del fluido.

✓ *Colector Plano*

Con una inclinación de 10° debido a la latitud de Cartagena y diseñado con anterioridad con una retroalimentación por Bomba para alcanzar la temperatura de 60°C.

✓ *Colector Cilíndrico Parabólico (Colector de Enfoque)*

También con una inclinación de 10° debido a la latitud de Cartagena y diseñado en esta monografía con un seguidor solar es también retroalimentado por una bomba igual para alcanzar su temperatura de 80 °C. Se mantuvieron algunos parámetros iguales con los del Colector Plano para poder de esta forma compararlos.

✓ *Tanque*

Al cual llega el fluido de cada Colector y por medio de cada Bomba realimenta dicho Colector.

✓ *Bombas*

Igual para cada Colector, ayudan a su realimentación.

✓ *Accesorios*

a. Celdas Fotovoltaicas

Están ubicadas en la parte lateral del Colector Cilíndrico Parabólico, se utilizan para medir:

- La radiación solar de una forma práctica

- La reflectancia de algunos materiales, para compararlos con el Acero 430 acabado 2B del cual está construido el sistema óptico del Colector.

b. Termómetros

Ubicadas a la entrada y salida de cada colector para medir sus temperaturas y así comprobar el funcionamiento de dichos Colectores.

c. Válvulas

Sirven para manejar el fluido a través de cada Colector.

8.2. FUNCIONAMIENTO.

El sistema funciona de dos maneras:

A. Cada Colector funcionando de manera independiente:

A.1. Poniendo en funcionamiento el Colector Plano manteniendo cerrada la válvula del Colector Cilíndrico Parabólico: En este caso el fluido circula a

través del Intercambiador de Calor, y llega al Colector Plano que por medio de Radiación Solar calienta el fluido a una temperatura más elevada, el cual llega a un Tanque y de este vuelve al Colector por medio de una Bomba realimentándolo hasta alcanzar la temperatura de funcionamiento del Colector Plano (temperatura en la cual se estabiliza el sistema).

A.2. Cerrando la válvula del Colector Plano y abriendo la del Colector de Enfoque: Funcionará de igual manera que el anterior caso sabiendo que la temperatura de funcionamiento es más alta.

B. Funcionamiento de los Colectores Simultáneamente.

El fluido circula a través del Intercambiador de Calor con las dos válvulas de alimentación de los Colectores abiertas, los cuales funcionarían como se describió anteriormente pero con una doble realimentación y simultáneamente, hasta alcanzar una temperatura de funcionamiento del sistema igual en los Colectores.

Estos funcionamientos serán complementados por medio de unas guías prácticas para ser desarrolladas por los alumnos de la asignatura Transferencia de Calor.

Estas guías están basadas en cálculos del diseño de ambos Colectores las cuales ayudarán a los alumnos a complementar el tema de una manera práctica.

Para colocar en funcionamiento el sistema se debe tener en cuenta los siguientes pasos:

- ✓ Verificar que el día no este muy nublado o lluvioso, ya que afecta notablemente el correcto funcionamiento delos Colectores.
- ✓ Las Bombas y el Motor deben estar conectados a sus fuentes de energía.
- ✓ Las válvulas, según la experiencia a realizar, deben estar correctamente abiertas o cerradas.
- ✓ Verificar cada hora el funcionamiento del seguidor solar instalado en el Colector de Enfoque.

- ✓ Se deben tener en cuenta las temperaturas indicadas en las Termocuplas hasta alcanzar la temperatura de funcionamiento del sistema según la experiencia a realizarse.

8.3. PLAN DE MANTENIMIENTO DEL SISTEMA.

Para asegurar el buen funcionamiento y una larga vida útil del sistema de comparación de los Colectores se debe seguir el siguiente Plan de Mantenimiento:

- ✓ Revisar diariamente las tuberías para detectar la presencia de fugas que puedan presentarse en las uniones, válvulas y demás accesorios.
- ✓ Limpiar la primera cubierta de cristal del Colector Plano y la superficie reflectora del Colector de Enfoque con un trapo húmedo diariamente.
- ✓ Verificar el nivel del agua del estanque sabiendo, que se debe manejar un volumen constante.
- ✓ Revisar diariamente la estructura donde están montados los Colectores, para detectar posibles fallas (corrosión en las uniones).
- ✓ Verificar el funcionamiento de las bombas diariamente.
- ✓ Hacer el mantenimiento a las bombas según recomendaciones del fabricante.

- ✓ Revisar posibles fallas en el aislante de las tuberías de suministro y descarga de los colectores.
- ✓ Limpiar las tuberías anualmente con un compresor y al realizarlo se debe desacoplar los Colectores.
- ✓ El acero 430 acabado 2B de la superficie reflectora del colector de enfoque tiene una vida útil de 3 a 5 años en los cuales se debe cambiar el acero.

9. PRESUPUESTO TOTAL DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO.

En este capítulo calculamos el costo total del Colector Cilíndrico Parabólico:

9.1. GASTOS ADMINISTRATIVOS:

Papelería:	\$300.000
Asesoría	\$800.000
Transporte	\$200.000
Documentación Técnica	\$150.000

9.2. GASTOS DE CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y MANTENIMIENTO.

✓ Gastos de Materiales:

Lámina de Acero 430 (5x8)	\$250.000
Tubo de Vidrio Envlovente (Duran)	\$150.000
Tubo de Cobre	\$100.000
Superficie Cilíndrico-Parabólica	\$ 50000
Soporte del Colector	\$ 20.000

Tubería de Suministro, Descarga y realimentación	
accesorios con aislante	\$200.000
Elaboración del Tanque con Aislante	\$200000
Mecanismo de Seguimiento	
Moto-Reductor	\$250.000
Seguidor Solar	\$200.000
Mano de Obra	\$150000
Accesorios	\$150000
Montaje	\$100000
COSTO TOTAL DEL COLECTOR	\$3'982.000

10. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DEL PROYECTO.

Debido a que el Colector de Enfoque tiene como objetivo primordial ser un prototipo didáctico comparado con el Colector Plano ya existente en la universidad, esté por lo tanto no tiene un fin comercial.

Algunas aplicaciones que se le pueden dar a este calentamiento de agua en la universidad pueden ser:

- ✓ Sirve de aplicación en la cafetería, más específicamente en los Samovares los cuales sirven para conservar la comida caliente y poderla servir en cualquier momento, estos funcionan por un Baño de María que es calentado por un Quemador alimentado por gas, que es el que mantiene el agua caliente y así poder mantener caliente la comida. Por medio del agua calentada del Colector de Enfoque se haría un Sistema Alternativo que permitiría obtener el agua caliente sin utilizar el Quemador, de esta forma se ahorraría en el consumo de combustible y por lo tanto un ahorro de energía.

- ✓ Se podría usar en los Laboratorios de Máquinas Hidráulicas y otros, en cualquier aplicación que sea necesaria.

Haciendo el análisis de rentabilidad del proyecto:

a.) Por medio de la cantidad necesaria del combustible que utiliza el quemador (Gas Propano), el cual utiliza un cilindro de 100 lbs. a con un valor de \$40.000.

Se hacen cálculos (diario, mensual y anual) del consumo del combustible trabajando el quemador a plena carga, esto representa gastos y costos de:

Gasto diario del combustible: $5 \frac{lbs}{día}$. \Rightarrow Un cilindro de 100lbs. dura 20 días

Gasto mensual del combustible: $\frac{100lbs. \times 30días}{20días} = 150lbs/mes$

Costo mensual del combustible: $\frac{\$40.000 \times (150lbs/mes)}{100lbs.} = \$60.000/mes$

Costo anual del combustible: $\frac{\$60.000}{mes} \left(\frac{12meses}{1año} \right) = \$720.000/año$

b.) Para el uso en los laboratorios de Máquinas Hidráulicas y otros, suponiendo que un cilindro de 100lbs. dura 3 meses, tenemos gastos y costos de:

Gasto diario del combustible: $1,11 \frac{\text{lbs.}}{\text{día}} \Rightarrow$ Un cilindro de 100lbs. dura 90 días

Gasto mensual del combustible: $1,11 \frac{\text{lbs.}}{\text{día}} \left(\frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \right) = 33,33 \frac{\text{lbs.}}{\text{mes}}$

Costo mensual del combustible: $\frac{\$40.000 \times \left(33,33 \frac{\text{lbs.}}{\text{mes}} \right)}{100 \text{ lbs.}} = \$13.333,33 / \text{mes}$

Costo anual del combustible: $\frac{\$13.333,33}{\text{mes}} \left(\frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \right) = \$160.000 / \text{año}$

Tenemos, entonces, que el costo total de combustible de los dos casos anteriores sería de:

Costo total anual del combustible: $\$720.000 + \$160.000 = \$880.000 / \text{año}$

Nuestro prototipo con un promedio de funcionamiento diario de 3 hrs. tiene gastos y costos de:

Gasto diario de energía:

✓ Para la Bomba: $200 \frac{\text{W}}{\text{hr}} \left(\frac{3 \text{ hrs}}{\text{día}} \right) = 600 \frac{\text{W}}{\text{día}} \left(\frac{1 \text{ KW}}{1.000 \text{ W}} \right) = 0,6 \frac{\text{KW}}{\text{día}}$

$$\checkmark \text{ Para el Motor: } 100 \frac{W}{hr} \left(\frac{3hrs}{día} \right) = 300 W/día \left(\frac{1KW}{1.000W} \right) = 0,3 KW/día$$

Gasto mensual de energía:

$$\checkmark \text{ Para la Bomba: } 0,6 \frac{KW}{día} \left(\frac{30días}{1mes} \right) = 18 KW/mes$$

$$\checkmark \text{ Para el Motor: } 0,3 \frac{KW}{día} \left(\frac{30días}{1mes} \right) = 9 KW/mes$$

Gasto anual de energía:

$$\checkmark \text{ Para la Bomba: } 18 \frac{KW}{mes} \left(\frac{12meses}{1año} \right) = 216 KW/año$$

$$\checkmark \text{ Para el Motor: } 9 \frac{KW}{mes} \left(\frac{12meses}{1año} \right) = 108 KW/año$$

Costo anual de energía:

$$\checkmark \text{ Para la Bomba: } 1 \frac{KW}{hr} \left(\frac{\$211}{1KW/hr} \right) \left(\frac{3hr}{día} \right) \left(\frac{30días}{1mes} \right) \left(\frac{12meses}{1año} \right) = \$227.880$$

$$\checkmark \text{ Para el Motor: } 500 \frac{W}{hr} \left(\frac{\$211}{1KW/hr} \right) \left(\frac{1.080hr}{año} \right) = \$113.940$$

Tenemos entonces que el costo total de energía para el prototipo (Motor y Bomba) es:

$$\text{Costo total anual de energía: } \$227.880 + \$113.940 = \$341.820/\text{año}$$

Y el ahorro total anual de energía usando la energía solar en lugar del combustible es:

$$\text{Ahorro total anual de energía: } \$880.000 - \$341.820 = \$538.180/\text{año}$$

Como ya sé cálculo, el costo del proyecto fue de \$3'674.000 incluyendo gastos administrativos, materiales, construcción y montaje, el cual será la inversión inicial para saber a cuantos años se recupera dicho proyecto.

Para este proyecto se tuvo en cuéntale ahorro de combustible. Se toma un incremento anual del 22%, y con eso se calculan los valores anuales al final de cada período por un lapso de 6 años, que son los años de vida útil del sistema, por lo tanto los flujos en efectivo son:

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Valor (\$)	-3674000	538180	656780	801127	977253	1192249	1454544	1774544	2164944	2641232	3222304	3931211

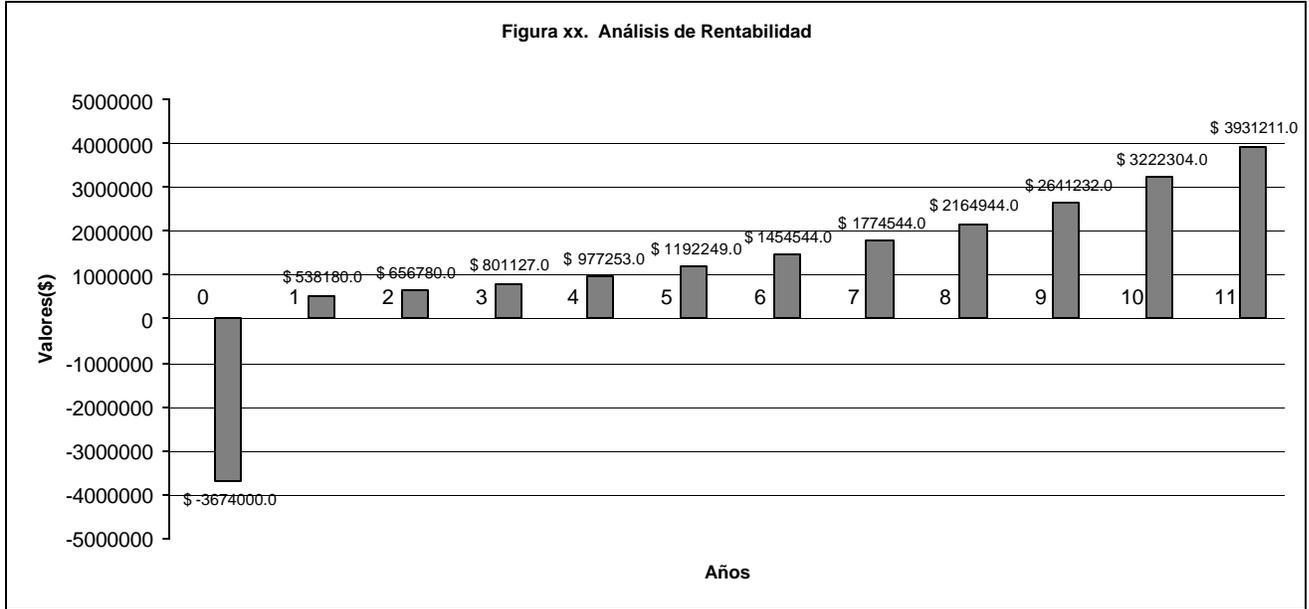


Figura 27. Análisis de Rentabilidad.

El valor presente para cada uno de los períodos mostrados se halla por la ecuación:

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (108)$$

Donde:

P: es el valor presente de cada periodo.

F: es el valor futuro de cada uno de los periodos.

i : es la tasa de interés anual.

n : es el número de periodos o años.

Donde:

P_R : es el valor presente de la sumatoria de los ahorros de cada periodo anual.

$$P_R = \frac{538.180}{(1+0,22)^1} + \frac{656.780}{(1+0,22)^2} + \dots + \frac{1'454.544}{(1+0,22)^6} + \dots + \frac{3'222.304}{(1+0,22)^{10}} =$$

$$P_R = \$4'411.214$$

Como podemos observar el Valor Presente Neto de cada uno de los periodos de ahorro, comparado con el Valor Presente de la Inversión nos da como resultado:

$$P_R - P = \$4'411.214 - \$3'670.000 = \$737.214$$

Este resultado nos indica que la inversión para los costos totales del proyecto se recupera a lo largo de la vida útil del equipo. Pero no se tomaron en cuenta otros factores que pueden afectar el proyecto como podría ser el préstamo inicial del

dinero por parte de un banco, el cual exige el pago de su dinero en un plazo determinado con un interés establecido por el propio banco, aunque este interés puede ser bajo debido a que se prestarían solamente \$4'000.000 que es el costo del proyecto.

Para conocer el tiempo en que se recupera la inversión se hace uso de la siguiente formula y se despeja el valor de n (número de periodos o años).

$$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \quad (109)$$

Donde:

A: es el valor de la anualidad del primer año = \$538.180

Reemplazando en la ecuación anterior los respectivos datos y despejando el valor de n, tenemos que:

$$n = 4,61 \text{ años}$$

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Observamos la creciente demanda del país para aprovechar otras formas de energía como los son: el Gas Natural, el GLP, y la Energía Solar debido principalmente a los altos costos de la Energía Eléctrica y que en nuestros días el gobierno ha seguido con su política de privatización de las empresas generadoras, lo cual a su vez eleva los costos.

Analizamos que los Colectores Solares alcanzan una mayor eficiencia (altísimas temperaturas) al utilizar precalentadores y sufre cambios notables en el diseño (primer Balance de Energía de la tesis) de los colectores que lo usan.

Al cubrir el Tubo Absorbedor con un Tubo de Vidrio y realizar vacío entre ellos, las pérdidas por conducción, convección y radiación disminuyen notablemente, por lo cual mejora el funcionamiento del Colector, debido a esto es aconsejable la inversión del Tubo de Vidrio en la realización del proyecto.

Estos Colectores Solares debido a sus variadas formas reciben numerosos nombres, de ahí su nombre de Cilíndrico Parabólico (Tubo Absorbedor Cilíndrico y la Superficie Reflectora Parabólica) que es 7na de las más usadas debido a su sencillas y fabricación.

Debido a las variadas geometrías presentes en los Receptores estas vienen íntimamente relacionadas con su Relación de Concentración alcanzada en el Colector.

El Ángulo Horario (w) es Cero a las 12:00 m. Debido a que es la altura máxima que alcanza el Sol.

El Sol se asume como un Cuerpo Negro con una temperatura de 5765°K para posibles estudios.

El Sol es visto desde la Tierra con un ángulo de $32'$

El porcentaje de Radiación Directa con la cual trabaja el Colector es más alta en la Costa principalmente en la Guajira comparada con otras regiones del país y hasta del mundo.

El Ángulo RIM de 115° es el mejor para soportar problemas de vientos fuertes.

Varios materiales apropiados para la construcción del Colector son muy costosos y otros no se encuentran en el país.

El Vidrio Pirex ya no se comercializa, ahora encontramos el Vidrio Duran.

El Prototipo no fue construido con fines comerciales (rentabilidad económica) sino con propósitos didácticos, de ahí que el tiempo de recuperación de la inversión no es muy viable.

El Mantenimiento del Sistema es muy sencillo y práctico.

Tener en cuenta al Colector para futuras aplicaciones en el futuro como las mencionadas (cafetería, laboratorios, etc.

Cuidar de las inclemencias del clima el prototipo.

Utilizar un Serpentín en el Tubo Absorbedor para futuras mejoras del sistema.

Por medio de este sistema didáctico se puede adaptar a un computador realizando otros estudios y analizar otras variables del funcionamiento y ser la base para un Laboratorio de Energía Solar.

BIBLIOGRAFÍA.

CONCHEIRO, Antonio Alfonso. Alternativas Energéticas. México. Mc Graw-Hill. 1989.p 125-150.

Análisis de la Situación Energética de la Costa Atlántica. Tomo XIV: Recomendaciones, Resumen y Conclusiones. Barranquilla-Colombia.1989.

SIBAJA, Eduardo Arias. PETERSON Donald. Colectores Solares. Primera Edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 1985. p 35-60.

CONSIDINE, M. Douglas. Enclipedía de Tecnología de la Energía Solar. Tomo V: Tecnología de la Energía. México. Publicaciones Marcombo S.A. 1989. p 41-53.

BRINWORTH, J.B. Energía Solar para el Hombre. Editorial Blumes.1981.p 1-11.

MANRIQUEZ, José A. Energía Solar, Fundamentos y Aplicación Fototermica. México. Editorial HaRa S.A. 1984. p 1-155.

RAU, Hans. Energía Solar: Aplicaciones Prácticas. Barcelona. Marcombo-Boixareau-Editores. 1991. p 60-130.

RODRÍGUEZ, Julio Mario. DÍAZ B, Consuelo. GONZÁLES, N. Julio. REY, R. Alvaro. Energías Alternativas. Segunda Edición. Bogotá. Entorna Ltda.. 1991. p 26-52.

KREIDER, J.R. Medium and High Temperature Solar Process. New York. Academic Press.1979. p 12-46.

MIJEEV, M.A. Fundamentos de Termotransferencia. Moscú. Editorial Mir. 1979. p 36-89.

RODRÍGUEZ, M. Humberto. GONZÁLES Fabio. Manual de Radiación Solar en Colombia. Universidad Nacional.1995. p 1-150.

LUMSDAINE AND J.C. On Heat Exchangers Used with Solar Concentrators, Solar Energy Editorial Cherng, 1976. p 23-67.

RODRÍGUEZ, . Humberto. GONZÁLES, Fabio. Presenca: Análisis de la Situación Energética de la Costa Atlántica. Tomo XII: Energía Solar. Tomo XIV: Recomendaciones, Resumen y Conclusiones. Barranquilla- Colombia. 1989. p:1-160.

Prociencia Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia. Volumen 5. Colombia. 1982 p 23-56.

KRIDER, Jan F. KREITH, Frank. Solar Energy Handbook. EE.UU. Mc Graw-Hill. 1981.p 34-78.

DIFFIE, John A. Solar Energy Thermal Process. EE.UU. A. Wiley- Interscience publication. 1974. p 13-46.

Solar Energy. Volumen 34. Pergamon Press Ltda.. Printed in the USA. 1985. P 34-89.

BURLEY, M. A. Susan. COLEMAN Martha. M. E. Arden. Solar World Congress. Volumen 2. EE.UU. editorial Pergamon Press. 1990. 12-45.

Solar Collectors Sharing the Sun Solar Technology in the Seventies. Volumen 2. Editor K.W. Boer. 1986.P 25-70.

Técnicas de la Energía y sus Recursos. Aplicaciones de la Energía Solar a Baja Temperatura. Tomo III. Editorial Index. Madrid – Barcelona. 1984.p 35-80.

Theoretical Concentration for Solar Furnaces, Solar Energy M.H. Cobble, 5 (2) 1961.

MILLS F, Anthony. Transferencia de Calor. EE.UU. Editorial Mc Graw – Hill . 1995.p 507-606.

KARLEKAR, B. V. DESMOND, M. R. Segunda Edición. México. Editorial Mc Graw – Hill. 1995.P319-398.

FARRINGTON Daniels. H. Blumes. Capítulo 4: Colectores de Radiación Solar. Capítulo 6: Calentamiento de Agua. Ediciones 1977.p 23-45; 65-96,

VI Congreso Latinoamericano y III Iberoamericano de Energía Solar. Editor Humberto Rodríguez y Enerconsult Ltda.. Cartagena Mayo 17 –19 de 1989.

Anexo A. Mapa de Radiación Solar en Colombia

**Anexo B. Resumen de los Grupos Adimensionales más importantes usados
para caracterizar la Transferencia de Momento y Transferencia de Calor
Convectiva.**

Anexo C. Datos para días recomendados.

Anexo D. Radiación Extraterrestre Diaria Promedio en el Mes.

**Anexo E. Características Detalladas de la Radiación y Brillo Solar para la
ciudad de Cartagena.**

Anexo F. Propiedades De Emitancia y Absortancia Solar para Materiales.

Anexo G. Propiedades Térmicas de Líquidos y Gases.

Anexo H Propiedades del Tubo de Cobre.

Anexo I. Propiedades de los Metales Sólidos.

Anexo J. Dimensiones de Tuberías Comerciales.

Anexo K. Propiedades de la Lámina de Ducto para Aire Acondicionado.

Anexo L. Propiedades de Aislantes Térmicos (Cañuela).

**Anexo M. Propiedades Físicas de algunos Fluidos y características de
Válvulas, Accesorios y Tuberías.**

