

20
20



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores "Cuautitlán"

Diseño de un Colector Solar Cilíndrico Parabólico con Sistema de Seguimiento Programado en Base a una Microcomputadora.

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N
LUZ MARIA ADELA ZARAGOZA LEMUS
JULIO OSCAR SALINAS RIVEROLL

DIRECTOR DE TESIS
ING. JAVIER MORENO ROMAN



V N A M

Cuautitlán Izcalli, Estado de México,

1989



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

PROLOGO

1.	INTRODUCCION	1
1.1	Naturaleza de la radiacion solar	3
1.2	Radiacion solar extraterrestre	7
1.3	La constante solar	8
1.4	Distribucion espectral de la radiacion extraterrestre	10
1.5	Variacion de la radiacion extraterrestre	11
1.6	Atenuacion atmosferica	11
1.7	Radiacion directa y difusa	12
1.8	Tipos de colectores	14
1.8.1	Colectores planos	14
1.8.2	Concentrador parabolico compuesto	17
1.8.3	Colectores de enfoque	19
1.9	Mecanismos de seguimiento	20
2.	CONSIDERACIONES GEOMETRICAS BASICAS	27
2.1	La declinacion solar	29
2.2	Localizacion del sol. Angulos basicos	32
2.3	Orientacion del colector	37
2.4	Coseno del angulo de incidencia	49
3.	CALCULO Y ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR	51
3.1	Calculo y estimacion de la radiacion directa	54
3.2	Estimacion de la radiacion solar directa a partir de mapas	62
4.	COLECTORES DE ENFOQUE	65
4.1	Colectores parabolicos	65
4.2	Relacion de concentracion	66
4.3	Diseño	68
4.4	Posicion del receptor	75
4.5	Enfoque	76
4.6	Dimensiones finales del concentrador y el receptor	77
5.	OPERACION TERMICA DEL COLECTOR	79
5.1	Transferencia de calor por conduccion	79
5.1.1	Paredes planas	81
5.1.2	Transferencia por conduccion en cilindros	83
5.2	Transferencia de calor por conveccion	83
5.2.1	Conveccion forzada en el interior de un tubo	85
5.2.2	Numero de Nusselt	86
5.2.3	Numero de Prandtl	86
5.2.4	Numero de Reynolds	87
5.2.5	Transferencia de calor por conveccion debida al viento	88
5.3	Transferencia de calor por radiacion	89

5.3.1	Cuerpo Negro	89
5.3.2	Coefficiente de transferencia de calor por radiacion entre dos superficies	90
5.3.3	Coefficiente de radiacion del colector al ambiente	91
5.4	Eficiencia optica	92
5.4.1	Reflectancia especular	92
5.4.2	Transmitancia de la cubierta del receptor	94
5.4.3	Reflexion de la radiacion en la cubierta	96
5.4.4	Absorcion de la radiacion en la cubierta	97
5.4.5	Transmitancia, reflectancia y absortancia de la cubierta	98
5.4.6	Absortancia del receptor y producto transmitancia- absortancia	99
5.4.7	Producto transmitancia-absortancia	100
5.4.8	Calculo de la eficiencia optica	101
5.5	Calculo del coeficiente de perdidas termicas totales	103
5.6	Ganancia de calor util	109
6.	LA MICROCOMPUTADORA	117
6.1	Caracteristicas generales	117
6.2	Lenguaje Basic 7.0 y puerto del usuario	118
6.3	Motor de pasos	120
6.4	Caracteristicas generales	121
6.4.1	Motor de pasos de iman permanente	123
6.4.2	Motor de pasos de reluctancia variable	124
6.4.3	Motor de pasos hibrido	124
6.5	Interfase Microcomputadora-Motor de pasos	125
7.	ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA	130
7.1	Rutina principal	130
7.2	Subrutinas	134

ANEXO I Sentencias Basic

ANEXO II Listado del programa

ANEXO III Tablas

GLOSARIO

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

PROLOGO

La producción de energía es sin duda una de las principales preocupaciones del mundo industrializado de nuestros días. El consumo de energía aumenta al menos en la misma proporción que la producción de bienes y satisfactores necesarios para cubrir las demandas de la sociedad. La dependencia que guarda esta con la energía es tal que quedaría paralizada si el abasto a transporte e industrias se suspendiera.

Los energéticos más utilizados actualmente son aquellos derivados del petróleo, aunque también se utilizan otros como el carbón, los materiales radiactivos, etc. La mayoría de estas fuentes de energía pertenecen a los llamados recursos no renovables y que en un futuro no muy lejano se agotarán, de ahí que surja la necesidad de reforzar el estudio acerca de las fuentes alternas que en el próximo siglo habrán de sustituir a dichas fuentes de energía no renovables.

Por los resultados obtenidos hasta la fecha no podemos hablar de una sola fuente que sustituya al petróleo ya sea por precio, disponibilidad, facilidad de manejo, seguridad, contaminación, etc. y hasta el momento no parece haber un buen sustituto, al parecer habrán de ser diversas las formas de obtener la energía que moverá al mundo futuro.

La energía solar será sin duda una de esas fuentes, principalmente en aquellas zonas donde la insolación es elevada, lo que garantizará un abasto continuo. Algunos investigadores critican y minimizan las posibilidades de la energía solar argumentando la irregularidad en la insolación y la alta dependencia que tiene esta con los factores atmosféricos. Nada de esto podemos negar aquellos que creemos en ella, sin embargo en países como México con altas tasas de insolación y grandes zonas desérticas, este recurso puede rendir grandes resultados. México es el tercer país en el mundo con mayor insolación solar.

El desarrollo de nuestro país ha estado condicionado a la obtención de tecnología transferida a altos costos desde las naciones industrializadas, en algunos campos nuestro rezago es de muchos años y no se vislumbra un importante surgimiento de tecnología propia.

Al iniciar este trabajo nos percatamos de la falta de material didáctico disponible relacionado con el aprovechamiento de Energía Solar escrito en Español y sobre todo enfocado hacia nuestro país. Los libros en nuestro idioma, muy escasos, son traducciones literales o adaptaciones de libros en Inglés principalmente. Como es obvio estos libros presentan estudios básicos interesantes pero no aclaran muchas interrogantes concernientes al diseño

de sistemas de captación solar, por supuesto que se reservan el secreto de su tecnología, el llamado "know how".

Se nota además una falta de información clara, estructurada y enfocada hacia el estudio de colectores solares de enfoque como el que es motivo de nuestro estudio. Aquí nos hemos esforzado en mantener orden y sencillez en la información presentada, los méritos principales de esta tesis creemos que se pueden observar en su estructuración, no dejando cabos sueltos y procurando que cada capítulo guarde cierta independencia, evitando hacer constantes referencias a otros capítulos y permitiendo al lector si así lo desea consultar solo el tema de su interés. Conserva no obstante una secuencia lógica en la presentación de la información capítulo a capítulo.

Procuramos también hacer un estudio teórico para el diseño de colectores solares sin caer en el exceso de la obtención abstracta de ecuaciones o conceptos, preferimos presentarlos explicando su utilidad, entorno y significado físico así como su aplicación en el diseño que sirve de ejemplo en la presentación de este trabajo.

Si bien mucho del material presentado ha sido recopilado de los libros existentes de Energía Solar, hemos intentado presentarlo en forma lo mas ordenada y sencilla posible, sin datos "supuestos" que en muchas ocasiones no se sabe de donde o como son obtenidos, ni tampoco calculos omitidos aparentemente "obvios" que restan claridad a la exposición.

Creemos importante también el haber desarrollado una ecuación, inexistente en los libros, que nos permite calcular la posición de nuestro colector solar para enfocar al Sol a lo largo del día en su trayectoria a través de la bóveda celeste. Este estudio puramente matemático no es tratado en forma similar para colectores de enfoque en los libros consultados, aunque pensamos deben existir. Este ejemplo puede servir para desarrollos similares de ecuaciones para colectores de enfoque de otros tipos o geometrías.

En la parte final se presenta un estudio de electrónica y programación de computadoras que da una idea de como pueden desarrollarse los sistemas de seguimiento del Sol programados para colectores de enfoque. Se hace un estudio de la programación en lenguaje BASIC, simulación del movimiento del colector en un monitor de televisión y la conexión al sistema electromecánico encargado de dar movimiento al colector cilíndrico-parabólico. Normalmente los libros de Energía Solar hacen referencia a ciertos sistemas de simulación o seguimiento del Sol programados en computadoras pero no presentan mayor información.

La tesis se estructura en siete capítulos que abarcan los aspectos elementales de radiación solar, el sistema óptico, la ecuación de seguimiento, la transferencia de calor y la programación y conexión al sistema de posicionamiento del colector. El enfoque y objetivos de cada capítulo se extraen en los siguientes párrafos:

Capítulo 1 - INTRODUCCION - El Sol es un reactor nuclear que produce grandes cantidades de energía en forma de radiación, del monto total de esta solo una pequeña fracción alcanza las altas capas de la atmósfera, esa cantidad llamada "constante solar" es atenuada en su camino a través de la atmósfera por diversos factores como la humedad, polvo, nubosidad, etc. de tal forma que la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra variará de una región a otra de acuerdo a la presencia de estos.

La radiación solar arriva a la superficie de la Tierra en dos componentes: una que llega en forma de rayo directamente del Sol y la otra que se recibe de la bóveda celeste en forma difusa. Esta energía radiante podrá ser aprovechada en forma sencilla para calentar algún fluido como aire, agua o aceite por ejemplo. Un colector solar es un aparato diseñado para captar la energía radiante del Sol. Los hay que captan principalmente la radiación directa o de rayo y se denominan de enfoque y los llamados colectores planos que aprovechan ambas componentes de la radiación. En este capítulo se describen brevemente los más conocidos.

Capítulo 2 - CONSIDERACIONES GEOMETRICAS BASICAS - La Tierra y el Sol se mueven en el espacio conservando ciertas relaciones geométricas o de posición. Visto desde la Tierra el Sol parece girar alrededor de la Tierra diariamente de Este a Oeste y cambiar esta trayectoria a lo largo del año viajando hacia el Norte o hacia el Sur. En realidad es la Tierra quien describe dos movimientos: el de rotación alrededor de su propio eje y el de traslación alrededor del Sol. Dichos movimientos han sido estudiados para permitir conocer la posición del Sol a lo largo del día y durante todo el año. Esta posición variará según el día del año, la hora y la localización del observador en la Tierra, para conocerla es preciso definir ciertos ángulos en algún sistema de referencia. Estos ángulos son estudiados a lo largo del capítulo 2 en un sistema de coordenadas esférico.

Como se define en el capítulo 1 los colectores de enfoque deben apuntar al Sol a lo largo del día para captar la radiación directa de éste. Para ello es preciso encontrar una ecuación que relacione el movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste con el movimiento propio que deberá tener el colector para enfocar correctamente hacia el Sol.

Un estudio de geometría en el espacio se plantea en este capítulo para encontrar la ecuación de seguimiento de la

trayectoria del Sol. Dicha ecuación será posteriormente programada en una computadora que calculará el movimiento del colector solar minuto a minuto durante todo el año. *

Capítulo 3 - CALCULO Y ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR - Una vez definida en el capítulo 1 que es la radiación solar, cuánta llega a las altas capas de la atmósfera, con qué características y cómo es atenuada, es preciso definir métodos que nos permitan medir, calcular o estimar la cantidad de radiación aprovechable en la superficie de la Tierra y para los distintos climas, altitudes, latitudes, etc. Este capítulo estudia diversos métodos paso a paso para conocer su valor aproximado.

Capítulo 4 - COLECTORES DE ENFOQUE - De la amplia gama de colectores de enfoque nos avocamos en este capítulo al estudio de los colectores cilíndrico-parabólicos los cuales constan de un receptor y un concentrador en forma de parabola que conforman el llamado sistema óptico.

El concentrador es la parte que recibe y refleja la radiación sobre un blanco llamado receptor, el cual consta de un tubo absorbedor, las cubiertas asociadas y el aislamiento.

Analizaremos en este capítulo los factores de diseño que afectan principalmente el dimensionamiento del concentrador y el receptor.

Se pretende contestar el siguiente cuestionamiento: qué dimensiones y forma deberán tener el concentrador parabólico y el receptor para captar con óptima eficiencia la radiación solar directa?

Capítulo 5 - OPERACION TERMICA DEL COLECTOR - Llegando a este punto ya sabremos cuánta energía solar aprovechable llega al colector, como debe moverse éste para enfocar al Sol, la forma y dimensiones del mismo, pero ¿cuánta energía útil ganará el fluido calentado por el colector?

La pregunta se responde por pasos de la siguiente forma.

a) Se presenta una síntesis de los aspectos más importantes en la transferencia de calor y las ecuaciones más útiles para cálculos de pérdidas o ganancias por conducción, convección o radiación.

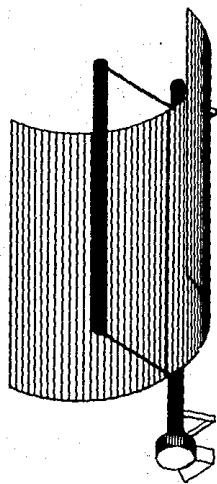
b) La energía solar para llegar al fluido que se va a calentar debe pasar por lo siguiente: llegar al concentrador y de ahí ser reflejada hacia el receptor con precisión, en el receptor deberá atravesar la cubierta aislante de vidrio para llegar al tubo absorbedor donde será "absorbida" y conducida hacia el interior donde finalmente por un proceso de convección calentará al fluido de trabajo. En esta trayectoria sufrirá importantes pérdidas las cuales son calculadas a lo largo del capítulo para permitirnos conocer la eficiencia óptica y el coeficiente de pérdidas térmicas

Totales.

c) Conociendo la cantidad de radiación que llega al colector por unidad de área menos las pérdidas ópticas y las pérdidas térmicas totales es posible calcular la ganancia de calor útil y la temperatura de salida del fluido suponiendo una cierta temperatura de entrada de este.

Capítulo 6 - LA MICROCOMPUTADORA - Aquí se definen las características generales de la microcomputadora utilizada y su conexión al motor que girará al colector para posicionarlo. El motor elegido es llamado de pasos y nos permite movimientos angulares muy precisos y de control relativamente sencillo a través del puerto de salida de la computadora.

Capítulo 7 - ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA - Se presenta aquí el diagrama de flujo del programa principal y las subrutinas usadas. Los cálculos para el posicionamiento del colector como se presentan en el capítulo 2 son estructurados y programados en lenguaje BASIC, se adicionan algunas subrutinas para la adquisición de datos y salida al motor de pasos así como la simulación en un monitor de televisión mediante gráficos que muestran al colector siguiendo al Sol.



COLECTOR SOLAR CILINDRICO PARABOLICO

INTRODUCCION

La mayor parte de los sistemas de conversión de energía usados por el ser humano operan con una fuente de energía muy manejable en el sentido de que la cantidad de energía que proviene de la fuente, consumida por el sistema, es relativamente fácil de controlar para producir un resultado deseado. Por ejemplo, la cantidad de gas usada por un calefactor casero es controlada por un termostato de manera que el resultado de la energía que entra, reducido por las pérdidas de sistema, es una temperatura confortable en el interior de la casa. El trabajo de asegurar que se obtenga suficiente gas en la entrada es una función de la compañía de gas. En sistemas de uso final de energía eléctrica, la cantidad de energía en la entrada es controlada mediante interruptores, la suficiencia en la alimentación es asegurada por la planta de generación eléctrica.

Los sistemas de conversión de energía solar difieren de otros sistemas de conversión en este punto importante: la cantidad de energía disponible para un sistema de energía solar no es tan fácilmente controlada debido a que esta es una fuente variable de energía. Por ejemplo, generalmente no es posible incrementar la cantidad de energía solar que llega a un colector solar cuando la energía que entrega a la carga que está tratando de servir es inadecuada.

Esta distinción de sistemas de conversión de energía de acuerdo al nivel de control sobre la energía de entrada al sistema es un punto muy importante para sistemas de energía solar. Obviamente, significa que el problema usual de diseño que consiste en especificar el sistema adecuado para la carga esperada es más complicado que para otros sistemas de energía comunes. Para sistemas solares, este problema de diseño tiene otra variable: la energía de entrada.

Existe una solución obvia a este problema de diseñar un sistema solar adecuado para alimentar una carga esperada y es simplemente sobredimensionar el sistema de manera que aún cuando la radiación solar en la entrada sea muy reducida, el sistema podrá servir adecuadamente a la carga. Desafortunadamente, esta solución es generalmente impráctica debido al costo tan elevado que esto acarrearía.

Estas consideraciones muestran que la comprensión de la energía solar como una fuente variable es esencial para el diseño apropiado de sistemas solares.

La energía radiante del sol puede ser transformada para su uso en energía eléctrica a través de fotoceldas solares o bien captada en colectores solares para calentar algún fluido.

La selección de uno u otro sistema dependerá del uso que se quiera dar, en el caso de los fotoceldas solares, estas se utilizan en combinación con bancos de baterías y fuentes inversoras que convierten la corriente directa en alterna, para ser utilizada en alumbrado, telefonía rural, motores pequeños, aparatos electrodomésticos, etc. Por otro lado, los colectores solares se utilizan en calefacción, refrigeración, calentamiento de agua, bombeo, procesos industriales de secado, destilación, etc.

Otro factor importante es la eficiencia y costo de uno y otro. Las fotoceldas solares trabajan con eficiencias del orden de 10 a 15% mientras que los colectores solares llegan a aprovechar un 40 a 50% de la energía que reciben del sol en promedio. El costo de los sistemas fotoeléctricos es comparativamente mayor que para los colectores solares.

El descubrimiento de mejores tecnologías abrirá en un futuro cercano un mercado mas amplio para la comercialización de ambos sistemas lo cual reportará grandes beneficios ecológicos y económicos para la humanidad.

En el presente trabajo de tesis nos hemos avocado al estudio de los colectores solares de enfoque del tipo cilíndrico-parabólicos los cuales pueden calentar fluidos en el rango de 100 a 500°C con una eficiencia aceptable.

Este rango permite una gran diversidad de aplicaciones, tanto en la industria como en el campo donde puede ser muy útil en el bombeo y riego de cultivos, así como en la destilación de agua. Por su construcción es posible conectar grupos de colectores en serie y en paralelo para incrementar el gasto, temperatura y/o presión del fluido.

Los colectores de enfoque constan de dos partes esencialmente: el concentrador y el receptor. El primero es el sistema óptico que dirige la radiación sobre un blanco llamado receptor, donde ocurre propiamente la transferencia de calor hacia el fluido. Los colectores de enfoque pueden tener distintas configuraciones, las mas conocidas son el colector parabólico circular y el cilíndrico-parabólico con concentrador de reflexión, aunque también los hay de refracción. Otras configuraciones son las lentes Fresnel, las torres de potencia con sistema de helióstatos y los concentradores parabólicos compuestos. El empleo de cada uno de ellos dependerá de la temperatura que se deseé alcanzar, así como de la disponibilidad de materiales y de una evaluación económica que justifique su utilización. Las temperaturas en que pueden operar eficientemente, varían desde los 100°C hasta varios miles de grados centígrados. Estos colectores son mas apropiados para la obtención de potencia y se usan en bombas de agua para riego, generación de vapor, generación de energía eléctrica, procesos industriales diversos, hornos industriales y de experimentación, etc.

Los colectores de enfoque deben ser orientados para rastrear al sol de manera que la radiación directa que proviene de él sea dirigida sobre la superficie del absorbedor.

Los colectores cilíndrico parabólicos requieren de un sistema de orientación que permita proveer de un ajuste continuo que compense el cambio de posición del sol durante el día. Para este tipo de colector es posible girar el sistema alrededor de un solo eje para cumplir con este requerimiento. Existen diversas formas de rastreo del sol ya sea que el colector se oriente en una línea Norte-Sur horizontal o inclinado para compensar el cambio de posición del sol debido al movimiento de traslación. Este-Oeste horizontal, vertical, etc.

En este trabajo hemos elegido la orientación Norte-Sur inclinado, esta inclinación hacia el sur tendrá dos posiciones, una para Primavera-Verano y otra para Otoño Invierno con lo que ganamos en eficiencia.

Los sistemas de orientación pueden ser manuales o mecanizados, su selección dependerá de las condiciones económicas y la precisión que se requiera dar en el enfoque. Dado que nuestro diseño de colector pretende obtener una máxima eficiencia se ha elegido el sistema de seguimiento mecanizado.

Los sistemas mecanizados de orientación pueden ser sistemas de búsqueda del sol o sistemas programados. Los primeros utilizan detectores para determinar el desalineamiento del sistema y a través de controles hacen las correcciones necesarias para realinear el colector.

Sus inconvenientes son que pueden apuntar hacia nubes brillantes en lugar de hacia el sol; perderse con el paso de estas en días medio nublados; no enfocar correctamente debido a descalibración en el sistema mecánico o en los fotosensores, etc.

Los sistemas de programación por el contrario, mueven el colector de una manera predeterminada. Comúnmente, el sistema se basa en un microprocesador, que trabaja en conjunción con un reloj bastante preciso, el cual se programa para calcular la posición del colector en función de la hora y el día del año, los datos referentes a la posición del colector alimentan a través de un puerto de salida el sistema electromecánico de seguimiento.

Una gran ventaja que ofrece el sistema programado es la capacidad que tiene para manejar muchos colectores desde una sola computadora, logrando con ello disminuir el costo por colector a un nivel inferior que el costo con sistemas de búsqueda del sol que contienen sensores individuales por colector.

La principal desventaja que presenta el sistema es que este nunca se entera si la posición del colector es realmente la que se requiere enfocar correctamente al sol debido a que no existe retroalimentación, por ello se requiere verificar si el alineamiento es el adecuado.

Otra posibilidad sería la combinación de ambos sistemas de rastreo, por ejemplo, superponiendo pequeñas correcciones provenientes de un sistema de búsqueda en base a fotosensores en un sistema programado, el cual seguiría al sol en una forma aproximada para permitir los pequeños ajustes. Un sistema como este incrementaría sustancialmente el costo del colector al tener que agregar sistemas de búsqueda por colector, así como conversores analógico-digitales principalmente.

Finalmente, es importante remarcar que el presente trabajo de tesis no solo intenta ser útil por su estudio de colectores cilíndrico parabólicos, sino que también pretende ayudar en el estudio de colectores de enfoque en general, como por ejemplo en colectores parabólicos del tipo paraboloide y aun en torres de potencia con sistemas de heliostatos.

En los primeros bastaría principalmente modificar los cálculos de las dimensiones del reflector y el absorbedor, el sistema electromecánico de seguimiento y algunos ajustes en la ecuación de control para obtener un nuevo trabajo de tesis.

En un sistema de heliostatos, es decir grupos de espejos que siguen al sol para enfocar sobre un blanco comunmente llamado torre de potencia, nuestro desarrollo del sistema programado permitiría con cierta facilidad el control, desde una sola computadora, de todo el grupo de heliostatos. La única información requerida sería la ecuación de seguimiento particular de cada heliostato.

A continuación iniciamos el estudio formal de la Energía Solar, presentando los aspectos mas importantes de la radiación desde que es generada en el Sol hasta su arribo a la superficie de la Tierra, así mismo se presentan los principales tipos de colectores usados para su captación y aprovechamiento. Al final del capítulo se hace una introducción a los sistemas de seguimiento del Sol para colectores de enfoque.

NATURALEZA DE LA RADIACION SOLAR

La estructura y características del sol determinan la naturaleza de la energía que radia en el espacio. El sol es una esfera cuya composición es básicamente de gases calientes con un radio estimado de 700 000 km y que se encuentra en promedio a 150 millones de km de la Tierra. Visto desde la Tierra el sol gira sobre su propio eje aproximadamente una vez cada cuatro semanas. Sin embargo, no gira como un cuerpo sólido; el ecuador tarda cerca de 27 días y las regiones polares cerca de 30 días para cada rotación.

El sol tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5762°K, es decir la temperatura de un cuerpo negro radiando la misma cantidad de energía que el sol. La temperatura en las regiones interiores es estimada en un rango de 8 a 10 millones de grados Kelvin a una presión aproximada de 100 000 millones de atmósferas y con una densidad de cerca de 100 veces la del agua.

El sol es, en efecto, un reactor de fusión continuo con sus gases constituyentes retenidos por fuerzas gravitacionales.

En la parte central, en una región de 1/4 del radio solar, se llevan a cabo reacciones termonucleares que transforman el Hidrógeno en Helio y en energía de alta frecuencia; de 564 millones de toneladas de Hidrógeno cada segundo se forman 560 de Helio y los 4 millones restantes se transforman en energía según la ley de Einstein:

$$E=mc^2 \dots (1.1)$$

$$c = \text{vel. de la luz} = 300\,000 \text{ km/s}$$

$$m = 4 \text{ millones de toneladas} = 4 \times 10^9 \text{ kg} / 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$m = 0.4077 \times 10^9 \text{ kg} \times \text{s}^2 / \text{m}$$

$$E = 0.4077 \times 10^9 \text{ kg} \times \text{s}^2 / \text{m} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E = 3.6695 \times 10^{25} \text{ kg} \times \text{m}$$

$$E = 3.6 \times 10^{33} \text{ erg} \times 1 \text{ cal} / 4.186 \times 10^7 \text{ erg}$$

$$E = 0.86 \times 10^{26} \text{ cal por segundo}$$

De esta energía en forma de radiación electromagnética la tierra recibe cerca de la mitad de una billonésima parte.

Una vez que esta energía ha sido producida en el interior de la esfera solar debe ser transferida hacia la superficie / después radiada hacia el espacio. Una sucesión de procesos de radiación y convección deben ocurrir. La figura 1.1 muestra la estructura del sol y los procesos que tienen lugar en cada una de sus capas.

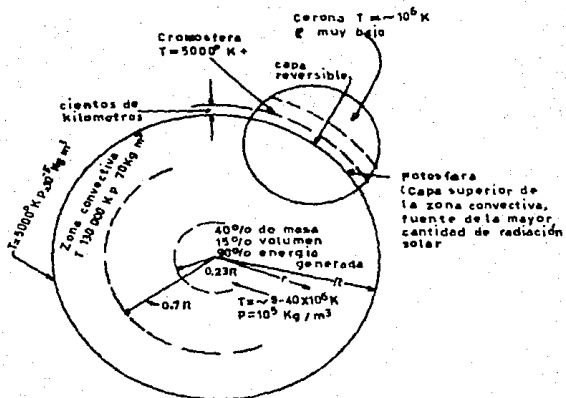


Fig.1 La estructura del Sol. Sus capas y características.

RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE

La energía radiante se define generalmente como un flujo de partículas, llamadas fotones, las cuales viajan en ondas transversales a la dirección de la luz. Cada fotón posee una longitud de onda λ , y una cantidad de energía E. estas se relacionan mediante la ecuación:

$$E=hc/\lambda$$

Donde: h = constante de Planck = 6.6×10^{-34} J x s
 c = vel. de la luz = 3×10^8 m/s

La frecuencia (ν) de radiación de una longitud de onda dada (λ) es igual al número de ondas que pasan por un punto en un intervalo fijo de tiempo y esta indicada por:

$$\nu = c/\lambda \quad \dots (1.3)$$

Así, la ecuación (1.2) para obtener la energía de un fotón de longitud de onda (λ) puede escribirse también como

$$E=h\nu \quad \dots (1.4)$$

La radiación se da en un amplio rango de longitudes de onda. Ciertas bandas de radiación tienen nombres particulares según su longitud de onda. La mas común de estas es la "luz" o "radiación visible" la cual tiene longitudes de onda entre aproximadamente 0.35 y 0.75 micras. La radiación que tiene longitudes desde 0.75 hasta aproximadamente 100 micras se llama "radiación infrarroja" y las ondas de radiación que exceden las 100 micras son llamadas "ondas de radio". La radiación con longitudes de onda menores que la luz visible son la luz ultravioleta, los rayos X y gama. La tabla 1.1 muestra estos tipos de radiación y sus correspondientes longitudes de onda y bandas de frecuencia.

TIPO DE RADIACION	INTERVALO APROX. DE LONGITUD DE ONDA (μ m)	BANDA APROX. DE FRECUENCIA CICLOS POR SEG
Rayos Gamma	10^{-4}	3×10^{18}
Rayos X	5×10^{-2} a 5×10^{-6}	6×10^{15} a 6×10^{19}
Ultravioleta	0.005 a 0.35	9×10^{14} a 6×10^{16}
Luz visible	0.35 a 0.75	4×10^{14} a 9×10^{14}
Infrarroja	0.75 a 300	10^{12} a 4×10^{14}
corta	1×10^2 a 1×10^8	3×10^6 a 3×10^{12}
Ondas de radio		
larga	1×10^8	3×10^6

Tabla 1.1 Tipos de radiación y sus longitudes de onda.

LA CONSTANTE SOLAR

La figura 1.2 muestra esquemáticamente la geometría de las relaciones Tierra-Sol. La excentricidad de la órbita de la Tierra es tal que la distancia entre el Sol y esta varía en un 1.7%. A la distancia de una unidad astronómica 1.495×10^8 EXP 11 metros, que es la distancia media Tierra-Sol, el Sol subtende un ángulo de $32'$. La radiación emitida por el Sol y su relación en el espacio con la Tierra resulta en una intensidad compuesta de la radiación solar en el exterior de la atmósfera de la Tierra. La constante solar I_{ext} , es la energía del Sol por unidad de tiempo, recibida en una unidad de área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a la distancia media de la Tierra al Sol, en el exterior de la atmósfera.

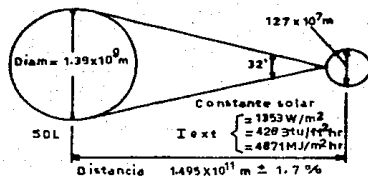


Figura 1.2. Las relaciones Tierra- Sol.

Hasta hace poco, las estimaciones de la constante solar tenían que hacerse en base a mediciones en tierra de la radiación solar, después que esta había sido transmitida a través de la atmósfera en donde era atenuada y absorbida en parte por componentes de la atmósfera.

Recientemente la disponibilidad de aviones de gran altitud, globos y naves espaciales han permitido mediciones directas de la radiación solar en las capas superiores de la atmósfera o completamente fuera de ella. Estas mediciones se hicieron con una variedad de instrumentos en nueve programas experimentales separados y dieron como resultado un valor de la constante solar Iext de 1353 W/m² (1.940 cal/cm² min, 428 btu/pie² hr, 4.871 MJ/m² hr). El error estimado fue de +/- 1.5 %. Este valor fue aceptado como un estándar por la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio - NASA- y la Sociedad Americana para la prueba de Materiales - ASTM-

DISTRIBUCION ESPECTRAL DE LA RADIACION EXTRATERRESTRE

Además de conocer el monto total de energía en el espectro solar, la constante solar, es útil conocer la distribución espectral de la radiación extraterrestre, esto es, la radiación que sería recibida en ausencia de la atmósfera.

Una curva estándar de la irradiación espectral ha sido compilada, basada en mediciones a grandes alturas y en el espacio. Esta curva con respecto a la longitud de onda se muestra en la figura 1.3. Se observa que aun cuando la radiación solar cubre una amplia banda de longitudes de onda, la intensidad pico ocurre en el intervalo de la luz visible.

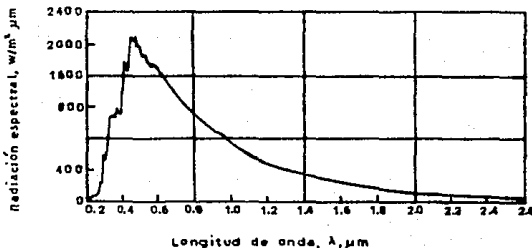


Figura 1.3 Distribución espectral de la radiación extraterrestre

VARIACION DE LA RADIACION EXTRATERRESTRE

Deben considerarse dos causas en la variación de la radiación extraterrestre, a saber: la variación en la radiación emitida por el sol debida a perturbaciones y la variación en la distancia Tierra-Sol.

Para propósitos de ingeniería, la variación en el valor de la constante solar puede ser calculado a través de la ecuación (1.5), el único dato que necesita es el día del año, aparte del valor estándar de la constante solar G_{sc} que ya conocemos.

$$I_{ext} = G_{sc}(1 + 0.033 \cos(360n/365)) \quad \dots (1.5)$$

Donde I_{ext} es la radiación extraterrestre medida en el plano normal a la radiación en el n -ésimo día del año.

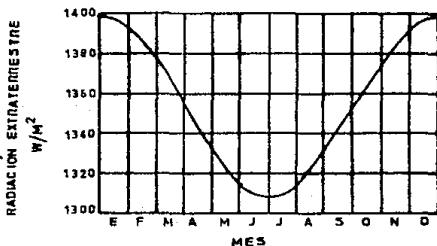


Figura 1.4. Variación de la radiación solar extraterrestre durante el año.

ATENUACION ATMOSFERICA

A través de investigaciones se ha demostrado que cuando la radiación pasa a través de la atmósfera, parte de ella puede ser interceptada por moléculas de aire, de agua y partículas de polvo causando dispersión de la radiación en prácticamente todas las direcciones. Se sabe además que parte de la radiación, particularmente la ultravioleta, es absorbida por el ozono presente en las capas superiores de la atmósfera. Otro absorbedor primario presente en la atmósfera es el vapor de agua, el cual absorbe radiación en bandas de longitud de onda muy específicas en la región infrarroja como puede observarse en la figura 1.5. Las nubes son también un factor importante, ya que en ocasiones pueden reducir la entrada de radiación en un 80 o 90 % debido a su capacidad reflejante por lo que una gran cantidad de radiación es regresada al espacio.

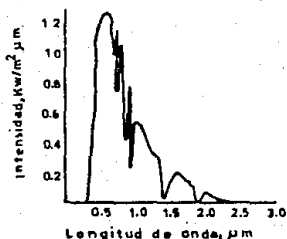


Figura 1.5. Distribución espectral aproximada de la radiación solar en la Tierra con una masa de aire de 2 atm.

RADIACION DIRECTA Y DIFUSA

El paso de la radiación solar a través de la atmósfera descompone esta en dos componentes: radiación solar directa y radiación difusa.

La radiación directa es aquella que llega en forma de rayo directamente del sol y la podemos distinguir porque causa sombras bien delineadas. La radiación difusa es la radiación solar atenuada y que proviene de toda la bóveda celeste.

Esta distinción es importante para aplicaciones de energía solar. Por ejemplo, los colectores solares de enfoque pueden utilizar solo la radiación directa, mientras que los colectores planos pueden capturar la radiación total.

La figura 1.6 especifica las condiciones para una superficie perpendicular a los rayos del sol bajo condiciones de cielo despejado en bajas y medianas latitudes con 4 hrs. de alta insolación antes y después del mediodía. Si estas condiciones prevalecieran durante 12 hrs. todos los días del año (4 383 hrs), la energía recibida sería de aproximadamente 4 200 a 5 200 kWh/m² año. Sin embargo, debido a que el número de horas de insolación aún en áreas en que esta es elevada, oscila en un rango del 78 al 89 % del máximo posible, existe una reducción de la energía radiada recibida como se muestra en la figura 1.6. Además dado que la absorción y atenuación atmosférica se incrementan fuertemente a bajas elevaciones solares, la radiación recibida en las áreas mas favorecidas por una superficie horizontal es de cerca de 2 550 kWh/m² año o 2.55 Terawatt-hora por kilómetro cuadrado por año (TWh/km² año). Para superficies que siguen al sol en su movimiento diario y de estación, el valor obtenido puede ser de 3 a 3.5 TWh/km² año.

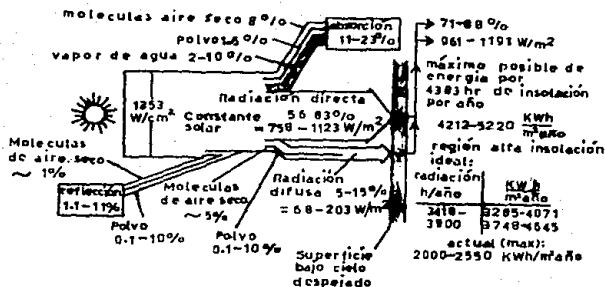


Figura 1.6. Penetración de la radiación solar en la atmósfera (cielo despejado)

En resumen, existen 7 factores principales que afectan la cantidad de radiación solar incidente sobre un colector.

1.- Localización geográfica.- Una mayor cantidad de radiación solar se encuentra disponible en regiones soleadas que en aquellas con climas nublados y lluviosos.

2.- Sitio de localización del colector.- Los colectores que son parcialmente sombreados por árboles o edificios no interceptan tanta radiación solar como aquellos con sol pleno.

3.- Orientación del colector.- Este factor es extremadamente importante. Los colectores que siguen al sol de manera que permanecen siempre perpendiculares a los rayos del sol interceptan mas radiación que los colectores estacionarios.

4.- Hora del día.- Existe generalmente menos radiación solar disponible para los colectores cerca de las horas del amanecer y atardecer que durante el mediodía.

5.- Estación del año.- En la mayoría de los lugares existe mas energía disponible para los colectores durante los meses del verano que durante los meses de invierno debido principalmente a que los días son mas largos en el verano. En algunas locaciones, los patrones del clima afectan significativamente la disponibilidad de energía solar de la estación.

6.- Condiciones atmosféricas.- La mas importante de las variables atmosféricas que afectan la radiación solar es la nubosidad. Las nubes reducen frecuentemente la cantidad de radiación incidente hasta en un 90 %. La energía solar disponible es afectada, como ya se dijo, por otros componentes atmosféricos como son el vapor de agua, las partículas de polvo, el ozono, los contaminantes, etc.

7.- Diseño del colector.- Una distinción básica en el

diseño de colectores es aquella entre colectores planos, los cuales pueden captar tanto la radiación directa como la difusa y los colectores de enfoque los cuales pueden utilizar solo la radiación solar directa.

TIPOS DE COLECTORES

Si bien hemos mencionado frecuentemente la palabra colector y se han dado algunas características de ellos, a continuación definiremos con mayor precisión los principales tipos de colectores que han sido estudiados.

Un colector solar es una forma especial de intercambiador de calor que transforma la energía solar radiante en calor. Un colector solar difiere en varios aspectos de la mayoría de los intercambiadores de calor convencionales. Estos últimos generalmente conllevan un intercambio de fluido a fluido con altas relaciones de transferencia de calor y siendo la radiación un factor poco importante. En un colector la energía solar se transfiere de una fuente distante de energía radiante a un fluido.

Entre los diferentes tipos de colectores que se conocen no podríamos apuntar cual de ellos es mejor, dado que existe una gran cantidad de variables a considerar como son la disponibilidad de materiales, temperatura de operación, costo, tamaño, etc. De estas variables quizá la más importante sea la temperatura de operación, ya que esta tendrá que cumplir con las necesidades que se tengan de acuerdo a la aplicación que se vaya a dar al colector.

COLECTORES PLANOS

Los colectores planos pueden ser diseñados para aplicaciones que requieran entregar energía a temperaturas moderadas de hasta 100°C arriba de la temperatura ambiente, no necesitan de un sistema de seguimiento del sol, utilizan tanto la radiación directa como la difusa, prácticamente no necesitan mantenimiento y pueden constituir parte integral del techo en algunas construcciones lo cual mejora los costos del sistema total.

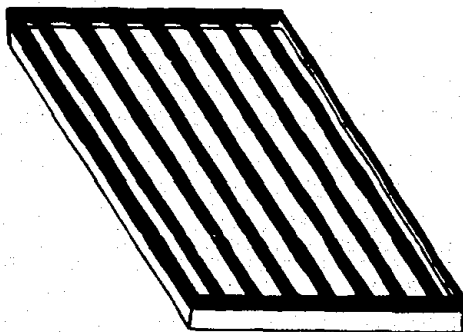
Las aplicaciones principales de los colectores planos se dan en el calentamiento de agua y calefacción de edificios, aún cuando sus usos potenciales también incluyan aire acondicionado de edificios (calefacción y refrigeración) y procesos industriales donde se requiera calentamiento.

Las partes más importantes de un colector plano típico se muestran en la figura 1.7. Como se observa la radiación solar tanto directa como difusa pasa a través de una o más cubiertas hasta llegar al absorbedor que comúnmente se ennegrece con pintura u otro acabado, para aumentar su absorción en el espectro solar. El calor se transfiere entonces por conducción hacia los tubos donde el fluido de trabajo colectará la energía.

La función de las cubiertas transparentes consiste en reducir las pérdidas por convección hacia la atmósfera, el aislamiento inferior y a los lados del colector tiene como función reducir las pérdidas por convección y conducción.



(a)



(b)

Fig 1.7 Colector plano. (a) Corte que muestra la estructura del colector. (b) Vista en isométrico.

Los colectores planos se colocan casi siempre en posición estacionaria con una orientación optimizada en función de la ubicación y la época del año en la cual su operación sea más crítica. Las figuras 1.8 y 1.9 muestran algunas de las configuraciones más comunes para sistemas de colectores planos.

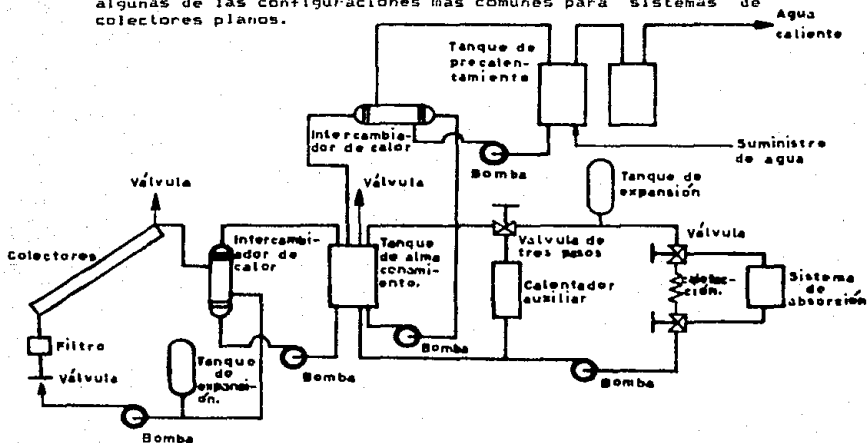


Figura 1.8. Sistema de enfriamiento, calefacción y aire caliente para la casa solar del ITESM en Monterrey.

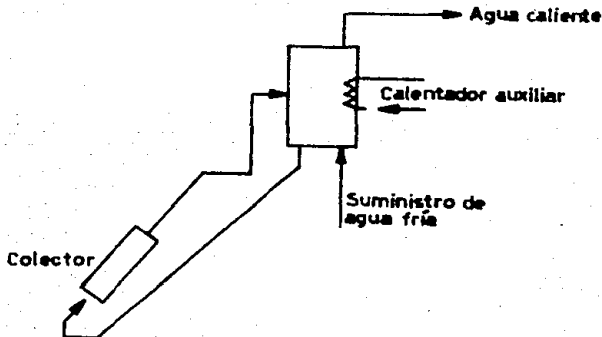


Figura 1.9 Configuración para colectores planos.

CONCENTRADOR PARABOLICO COMPUESTO

Los Concentradores Parabólicos Compuestos -CPC- son de particular importancia cuando las temperaturas requeridas son relativamente bajas pero superiores a las obtenidas en colectores planos.

El colector CPC optimiza el ángulo de aceptación (θ) en términos de la razón de concentración al máximo valor teórico permitido por la Termodinámica. Así, la relación entre la razón de concentración, es decir el cociente entre el área de apertura del colector y el área del absorbedor, y el ángulo de aceptación queda descrita por la expresión:

$$C = 1/\sin \theta_{\max} \quad \dots (1.6)$$

En donde C es la razón de concentración y θ_{\max} es el ángulo total de aceptación.

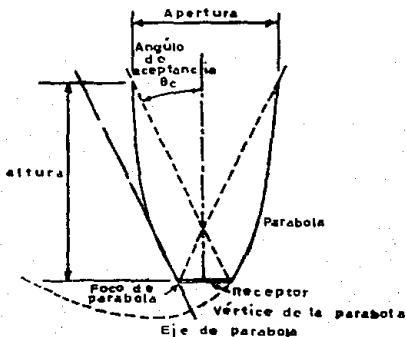


Figura 1.10 Concentrador Parabólico Compuesto.

La figura 1.10 muestra un CPC donde se observa cómo el colector capta la radiación a lo largo de la apertura de ancho d_1 y lo concentra en el receptor d_2 . Como podemos también observar, cada lado del CPC es una parábola. Cada parábola crece hasta que su superficie se hace paralela al eje del colector.

Como veremos en la siguiente sección, un colector de enfoque alcanza una relación de concentración máxima que se encuentra por debajo del valor máximo para un CPC por un factor de 2 a 4. Así, para una relación de concentración de 5, un concentrador de enfoque tendría un ángulo de aceptación de aprox. 7.3 grados mientras que un CPC tendría un ángulo de aceptación de aprox. 25 grados.

El ángulo de aceptación tan amplio en el CPC ofrece tres ventajas muy importantes:

- 1.- Permite la operación del concentrador por extensos períodos de tiempo sin necesidad de ajuste en su orientación.
- 2.- Permite el empleo de superficies reflejantes no muy precisas.
- 3.- Permite la captación y concentración de una porción de la radiación difusa.

Las primeras dos ventajas ayudan a reducir los costos de manufactura del concentrador. La tercera es importante especialmente donde la dispersión atmosférica reduce la fracción directa de la radiación solar.

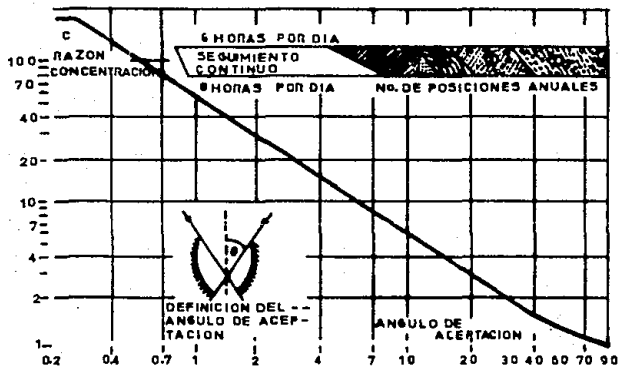


Figura 1.11. Razon de concentracion como función del ángulo de aceptación en un CPC.

Los extremos superiores del colector contribuyen ligeramente a la cantidad de radiación que alcanza el absorbedor, por lo que el CPC puede ser truncado para reducir su altura h teniendo como resultado un ahorro en el área del reflector con un pequeño sacrificio en la eficiencia.

COLECTORES DE ENFOQUE

Muchos tipos de concentradores se han propuesto para incrementar el flujo de radiación en los receptores. Pueden ser reflectores o refractores, pueden ser cilíndricos para enfocar en una línea o circulares para enfocar sobre un punto. Asimismo los receptores pueden tener diversas formas ya sea cóncavas, convexas o planas. La figura 1.13 muestra ejemplos de cuatro configuraciones.

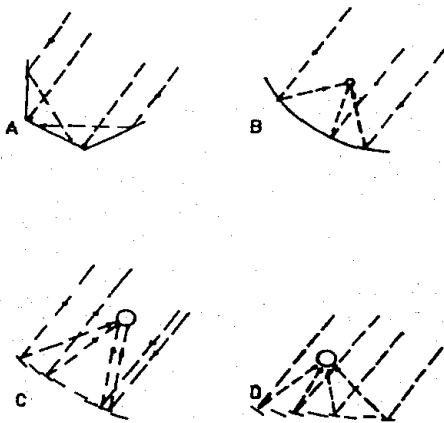


Figura 1.12 Configuraciones para colectores de enfoque:
(a) receptor plano con reflectores planos, (b) concentrador parabólico, (c) reflector Fresnel, (d) arreglo de heliostatos.

El primero es un receptor plano con reflectores planos en ambos extremos para reflejar radiación adicional sobre el receptor. La relación de concentración en este tipo es relativamente baja, con un valor máximo de menos de 4. Estos colectores pueden ser considerados colectores planos con radiación concentrada.

El segundo tipo es un reflector de sección parabólica, el cual podría ser de cuerpo cilíndrico con receptor tubular o una superficie de revolución con receptor esférico.

Los concentradores lineales o cilíndricos con sección parabólica se han propuesto para aplicaciones que requieren temperaturas en un rango de 100 a 500 grados Centígrados lo cual les confiere utilidad en la industria y en la obtención de potencia para mover motores y aun en centrales térmicas para generación de electricidad.

Los concentradores del tipo paraboloide alcanzan temperaturas superiores a los 1000 grados Centígrados por lo que han sido utilizados como hornos en el estudio de las propiedades de algunos materiales a esas temperaturas. Sus aplicaciones son similares a las de los colectores cilíndricos parabólicos.

Una alta relación de concentración puede lograrse por medio de los sistemas que emplean lentes Fresnel, las cuales combinan las ventanitas de un grupo de lentes en una sola unidad. Cada segmento de la lente Fresnel concentra la radiación incidente en un receptor posicionado centralmente.

Si cada segmento de la lente Fresnel se monta y ajusta individualmente para enfocar sobre un punto entonces tendremos un arreglo de heliostatos, el receptor se monta sobre una torre llamada "torre de potencia". Este tipo de colector es el cuarto tipo ilustrado en la figura 1.12.

En general, los concentradores con receptores mucho más pequeños que la apertura son efectivos solo para la radiación directa. Es evidente también que la orientación de la radiación directa en el concentrador es importante y que en estos colectores se requerirá seguir al sol. Se han diseñado una variedad de mecanismos de seguimiento para mover a los colectores de enfoque de manera que la radiación incidente sea reflejada en el receptor.

MECANISMOS DE SEGUIMIENTO

Parte importante del presente trabajo es el mecanismo o sistema de seguimiento del Sol. Para colectores de enfoque del tipo cilíndrico parabólico basta con efectuar el movimiento alrededor de un eje de giro, es decir con un grado de libertad, para apuntar correctamente al Sol. Dicho movimiento podrá efectuarse manualmente o con un motor

manejado por alguno de los sistemas de control que describiremos a continuación. La impulsión final podrá ser lograda con engranes, poleas y bandas o acoplo directo del motor al eje de giro.

1) Sistema de búsqueda.- La figura 1.13 muestra un rayo de luz incidente sobre una superficie, dicho rayo solar llega con una cierta inclinación, es claro notar que una mayor cantidad de radiación será percibida en A que en B.

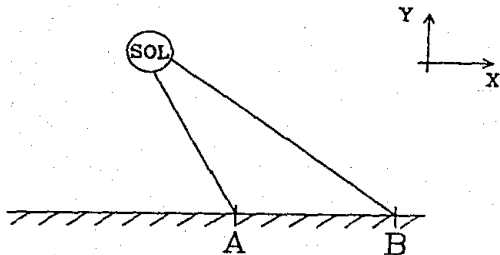


Figura 1.13.- La componente de radiación aprovechable se aloja en el eje Y verticalmente y es mayor en A que en B.

Si A y B son los extremos de la parábola en un colector como el que es objeto de nuestro estudio y en ellos colocamos fotosensores los cuales generan una señal de voltaje de acuerdo a la intensidad de radiación que reciben, podemos realizar una comparación de señales y obtener una diferencia o señal de error ya sea que haya más radiación en A que en B o viceversa.

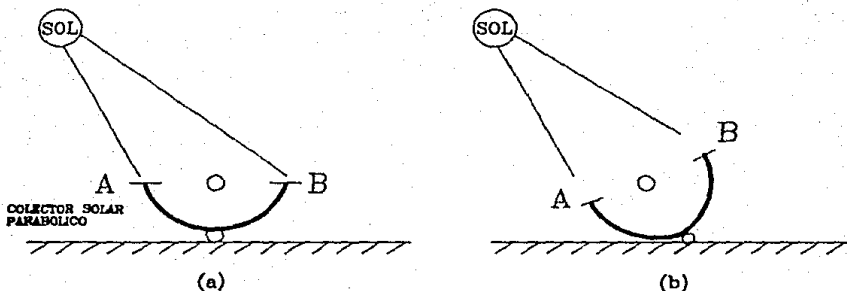


Figura 1.14 (a) La intensidad es mayor en A. (b) LA señal de error sera "cero" cuando el sol se alinee con el vértice y foco de la parábola, la intensidad es igual en A y B.

Como se ve de la figura 1.14 el objetivo del sistema de control por búsqueda será mover el colector hasta que la señal de error sea cero. En la figura 1.15 se muestra esquemáticamente como debería estructurarse un sistema como este.

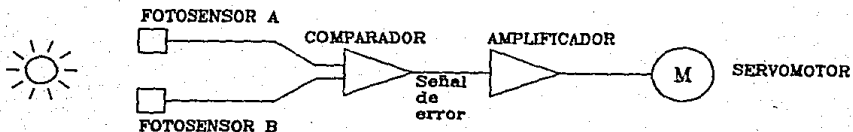


Figura 1.15 Las señales provenientes de los fotosensores A y B se comparan, la señal de error resultante es amplificada y girado el servomotor que posiciona al colector a fin de disminuir la señal de error a cero.

Este sistema es llamado de realimentación o lazo cerrado debido a que la posición del colector definida por el servomotor es realimentada por las señales de los fotosensores en A y B y comparada en todo momento.

Los inconvenientes de este sistema son:

a) Se requiere de un retardo en la respuesta ya que algún objeto brillante pudiera malposicionar al colector instantáneamente.

b) Cada colector requiere de su propio sistema de búsqueda.

c) Puede perderse con el paso de las nubes y

d) No enfocar por descalibración o suciedad en los fotosensores.

Sistemas como este no son útiles para lentes Fresnel o Torres de helióstatos los cuales se definieron en el apartado anterior.

2) Sistema programado. - Tal como se definió en la figura 1.14.b el colector cilíndrico parabólico estará enfocando al sol adecuadamente cuando el foco y vértice de la parábola se alineen con el Sol, por lo tanto un sistema programado deberá mover al colector a lo largo del día para cumplir con este requerimiento. Para ello el programa alimentado en la computadora deberá ser capaz de calcular la posición del Sol en la bóveda celeste durante todo el día y a lo largo del año, calcular la posición del colector girando alrededor de un eje y generar la señal de salida apropiada para mover al motor impulsor. La figura 1.16 muestra un diagrama de flujo simplificado del programa.

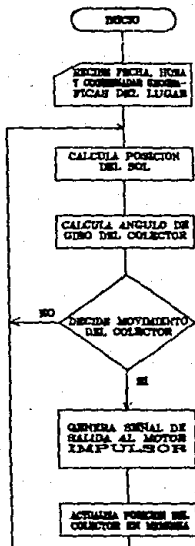


Figura 1.16 Diagrama de flujo del programa central para alinear al colector.

De la figura 1.16 vemos que como datos de entrada son suficientes la fecha, hora, coordenadas geograficas (latitud y longitud), meridiano central del huso horario que rige el tiempo civil para el lugar donde se ubica el colector y para colectores inclinados y enfrentados al sur, el ángulo de inclinación. Con estos datos el programa inicia sus calculos e iteraciones no necesitando mas información del exterior, por eso se dice que es un sistema de lazo abierto o no realimentado, esto a la larga puede convertirse en su principal defecto ya que la computadora hará sus calculos y movera al colector sin enterarse si en realidad lo hace correctamente pues no tiene manera de sensar la posición del Sol.

Si bien el diagrama de flujo parece no tener fin, existe en realidad una subrutina que al terminar el día detiene al colector y lo pone en posición de espera para el amanecer del día siguiente.

El motor impulsor se ha elegido de forma que las señales internas de la computadora, llamadas digitales, puedan servir para controlarlo sin necesidad de efectuar conversiones a otro tipo de señales (analógicas por ejemplo), este tipo de motores controlados por señales digitales reciben el nombre de motores de pasos, los cuales son muy precisos y no acumulan errores que pudieran generarse en cada vuelta.

Una de las ventajas principales de este sistema consiste en que desde una computadora se pueden controlar muchos colectores solares aun cuando sus posiciones sean distintas, ya que la rapidez de la computadora permite procesar una gran cantidad de datos y ecuaciones de seguimiento y generar las señales apropiadas para cada colector. Así el costo del sistema puede dividirse entre el número de colectores que controle, resultando en una disminución importante en su costo.

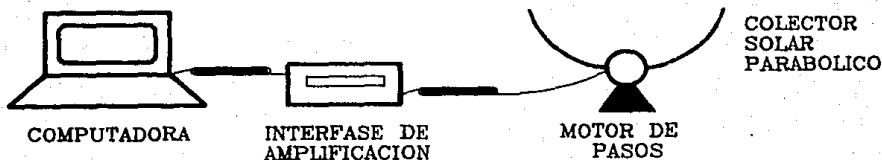


Figura 1.17 Estructura del sistema programado. La computadora genera la señal de control que llega al motor de pasos previamente amplificada. Es importante notar que parte de la precisión del sistema dependerá de la precisión del reloj-calendario interno de la computadora.

3) Sistema híbrido.- Se propone como una fusión de los sistemas programado y de búsqueda donde exista por así decirlo un posicionamiento aproximado y uno de ajuste fino. El primero estaría dado por el sistema programado, el cual permitiría pequeñas correcciones provenientes de un comparador y sus respectivas fotoceldas solares que darían el ajuste fino de la posición del colector. Para lograr esto sería preciso convertir las señales de salida del comparador que son analógicas en señales digitales que son las manejadas por la computadora para ser procesadas entonces. Si bien

mejoraría el sistema, el costo aumentaría considerablemente siendo esta su principal desventaja.

4) Otros sistemas de seguimiento.- No deben descartarse otras posibilidades que por costo o mantenimiento puedan cubrir las necesidades propias de cada aplicación, hay que pensar que en aplicaciones que requieran temperaturas moderadas y el presupuesto sea bajo pueden utilizarse sistemas menos sofisticados.

En sitios donde la mano de obra no sea muy cara un sistema manual donde una persona posicione el o los colectores constantemente puede dar muy buenos resultados.

Al efectuar la última revisión de esta tesis nos enteramos de la existencia de un sistema similar al de búsqueda, no electrónico, que en lugar de fotoceldas solares utiliza unas pequeñas cámaras con gas que al calentarse se expanden y presionan a un embolo por ambos extremos. Según exista mayor presión en uno u otro lado, el embolo se moverá para posicionar al colector.

Criterio de selección del sistema de seguimiento.

La selección del sistema de seguimiento estudiado en este trabajo, es decir el sistema de seguimiento programado en base a una microcomputadora, obedece a los siguientes criterios.

a) Es posible manejar grupos de colectores desde una computadora.

b) El costo de las computadoras tiende a abarataarse ante el surgimiento de nuevas tecnologías.

c) Otras variables de funcionamiento del colector pueden ser controladas desde la computadora como por ejemplo: la cantidad de flujo del fluido a calentar, la temperatura de salida, presión, etc.

d) El sistema puede ser mejorado constantemente a través de una reprogramación y conexión de equipos periféricos a la computadora.

e) El desarrollo del sistema puede servir de ejemplo a otros investigadores interesados en el posicionamiento de cualquier tipo de colector solar de enfoque.

f) El desarrollo de la electrónica y las computadoras esta en plena expansión revolucionando muchos campos de la ciencia.

CONSIDERACIONES GEOMETRICAS BASICAS

La Tierra realiza dos movimientos: el movimiento de traslación en una órbita alrededor del sol y el movimiento de rotación que efectúa sobre su propio eje. Estos son dos de los principales factores que determinan la cantidad de energía solar que puede obtenerse en un punto sobre la Tierra.

El movimiento que describe la Tierra alrededor del sol es una trayectoria sobre una órbita elíptica, con el sol en uno de los focos de la elipse, Figura 2.1. La forma de la órbita es exagerada en esta figura, en realidad la elipse tiende a ser prácticamente circular, con un eje mayor y un eje menor de 1.4968×10^8 km y 1.4966×10^8 km respectivamente, una excentricidad $e=0.0167$. El periodo de revolución es un año.

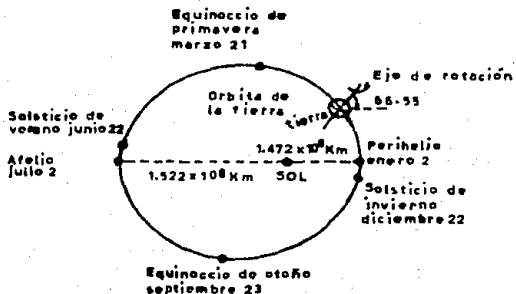


Figura 2.1 La Órbita de la Tierra

Dado que como ya se mencionó el sol no se encuentra en el centro de la órbita, existe un punto en el cual la Tierra está más cerca del sol llamado Perihelio, que ocurre aproximadamente el 2 de Enero, y un punto donde la distancia es máxima llamado Afelio y que se registra a fines de Junio. A una distancia media el sol es visto desde la Tierra según un ángulo de 32 min. Como se muestra en la figura 2.1 el movimiento de la Tierra en su órbita elíptica y su rotación son movimientos que se realizan en contra de las manecillas del reloj. El plano que contiene la órbita de la Tierra se denomina plano eclíptico, el cual forma un ángulo de 23.45 grados con el plano ecuatorial es decir, el plano que contiene el ecuador de la Tierra. Puede notarse también que siendo el eje terrestre perpendicular al plano ecuatorial el ángulo que forma con respecto al plano eclíptico es de 66.55 grados.

Las estaciones del año se deben a la inclinación del eje de la Tierra con respecto al plano eclíptico. Como podemos observar en la figura 2.1 los rayos solares caen perpendiculares en el hemisferio norte de la Tierra cerca del afelio, dando como resultado una estación calurosa, el verano en este hemisferio durante esta parte del año. Al mismo tiempo los rayos solares en el hemisferio sur caen más oblicuos dando como resultado una estación fría, el invierno.

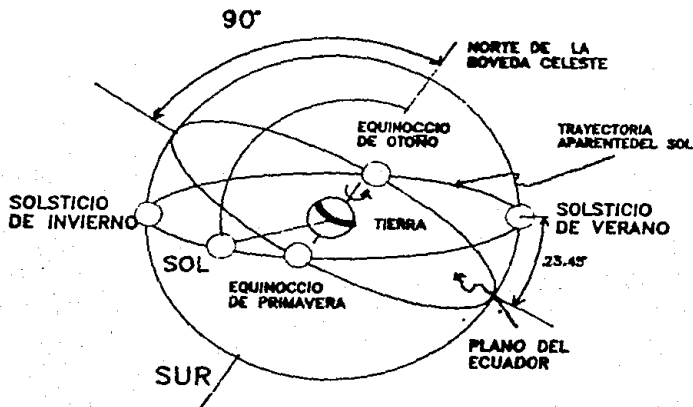


Figura 2.2 Las relaciones Tierra-Sol

A causa de la forma de la Tierra y las relaciones geométricas que guarda con respecto al sol, la superficie de la Tierra de ha dividido en tres zonas llamadas zonas generales de climas:

a) Zona Tórrida.- Incluye todos los lugares donde el sol está en el cenit al menos una vez al año. Queda delimitada al norte por el Trópico de Cáncer y al sur por el de Capricornio.

b) Zonas Templadas.- Incluye todos los lugares donde el sol aparece todos los días en el horizonte pero nunca en el cenit. Existen dos zonas templadas, una en el hemisferio norte y una en el sur, son delimitadas por sus respectivos Trópicos y Círculos Polares.

c) Zonas Frías.- Incluye todos los lugares donde el sol permanece por debajo del horizonte (o sobre de él) al menos un día completo cada año.

Los equinoccios son fechas en las cuales el vector Tierra-Sol descansa en el plano ecuatorial, por lo que el día y la noche tienen la misma duración en ambos hemisferios.

Los solsticios o "puntos donde el sol se detiene" marcan el avance máximo del sol durante el año en su viaje aparente norte-sur. Tanto solsticios como equinoccios marcan el fin de una estación y el inicio de otra. Así tenemos los equinoccios del 21 de marzo y 23 de septiembre y los solsticios del 22 de junio y 22 de diciembre.

LA DECLINACION SOLAR

La declinación solar describe la posición angular del sol en el mediodía solar con respecto al plano del ecuador. Esto es que como sabemos el vector Tierra-sol se mueve en el plano eclíptico durante el año de manera que el ángulo que forma este con el plano ecuatorial varía también, a este ángulo lo llamamos ángulo de declinación (δ). Por convención se considera positivo medido hacia el norte.

La declinación (δ) varía de -23.45 grados el 22 de diciembre, solsticio de invierno, hasta 23.45 grados el 22 de junio, solsticio de verano. La declinación solar puede ser calculada por la ecuación 2.1 de Cooper.

$$\delta = 23.45 \text{ sen}(360(284+N)/365) \dots (2.1)$$

Donde N es el día del año (numero progresivo contado a partir del 1 de enero).

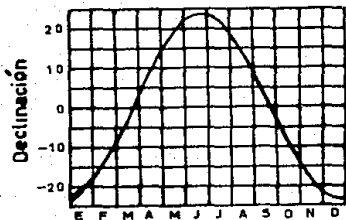


Figura 2.3 La declinación solar.

La rotación de la Tierra alrededor de su eje da como consecuencia el ciclo del día y la noche; en la Tierra da la impresión que el sol cruza el cielo cada día de Este a Oeste. El tiempo solar, es el tiempo basado en este movimiento aparente del sol, es un tiempo específico en las relaciones angulares del sol, no coincide con el tiempo civil o tiempo local estándar.

Para convertir el tiempo civil o local estándar a tiempo solar es necesario aplicar dos correcciones. La primera se debe a la diferencia en longitud entre la localización del meridiano del observador y el meridiano en el cual se basa el tiempo local estándar (huso horario); el sol tarda cuatro minutos en atravesar 1 grado de longitud. La segunda corrección es llamada ecuación del tiempo y puede considerarse como la diferencia en tiempo que existe entre la duración teórica de un día (24.00 hrs) y la duración real de cierto día en el año. Dicho de otra forma si midieramos con reloj la duración de un día solar, o sea el intervalo en tiempo que tarda el sol en cruzar dos veces el meridiano del

observador, variamos que a veces su duración sería de más de 24 hrs y a veces menos. Esto se debe a ciertas perturbaciones en la velocidad de rotación de la Tierra a través del año.

El tiempo solar se relaciona con el tiempo estándar por:

$$\text{Tiempo solar} = \text{Tiempo local std.} - \text{Ec. Tiempo} - \text{Ajuste por long.} \quad \dots (2.2)$$

El ajuste por longitud LA en horas esta dado por:

$$LA = [(\text{longitud local}) - (\text{long. del meridiano del tiempo local})] / 15 \quad \dots (2.3)$$

Las longitudes estan en grados. La conversión de grados a horas esta dada por 15 grados = 1 hora (o 360 grados = 24 hrs).

La ecuación del tiempo EoT es dada por:

$$EoT = (0.1236 \sin x - 0.0043 \cos x + 0.1538 \sin 2x + 0.0608 \cos 2x) \quad \dots (2.4)$$

Donde EoT esta dada en horas y el ángulo x es una función del día del año N.

$$x = 360(N-1)/365.242 \quad \dots (2.5)$$

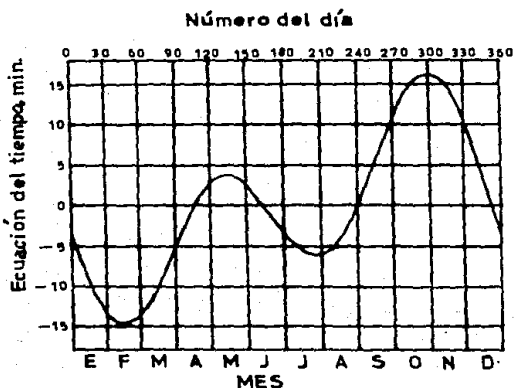


Figura 2.4. La ecuación del Tiempo.

El tiempo estándar local en el cual ocurre el mediodía solar puede determinarse usando la ecuación del tiempo y el ajuste por longitud. Es conveniente hacer notar que por definición el mediodía solar siempre ocurre a las 12.00 horas en tiempo solar.

Es frecuente en el estudio de las relaciones geométricas Tierra-Sol expresar el tiempo en grados, más que en horas. Esto es más conveniente para determinar las posiciones de los cuerpos en el espacio como funciones de tiempo. La unidad de las medidas angulares del tiempo es la hora angular. La conversión básica es que 24 hrs. equivalen a 360 grados angulares o bien por cada hora tendremos 15 grados. El ángulo-hora solar es medido desde el mediodía solar y es positivo antes del mediodía y negativo después del mediodía.

Ejemplo: ¿A cuánto equivalen en grados las siguientes horas en tiempo solar: 12.00 hrs., 14 hrs 30 min y las 8 hrs 15 min.?

Convertimos primero las horas y minutos a horas y fracciones de hora.

$$\begin{aligned}12.00 &= 12.00 \\14 \text{ hrs } 30 \text{ min} &= 14.50 \\8 \text{ hrs } 15 \text{ min} &= 8.25\end{aligned}$$

Ahora restamos este valor de 12.00, es decir del mediodía solar y el resultado lo multiplicamos por 15 grados.

$$\begin{aligned}\text{ángulo solar} &= (12.00-12.00) \times 15 = 0 \text{ grados} \\ \text{ángulo solar} &= (12.00-14.50) \times 15 = -37.5 \text{ grados} \\ \text{ángulo solar} &= (12.00-8.25) \times 15 = 56.25 \text{ grados}\end{aligned}$$

Las relaciones geométricas entre el plano de cualquier orientación relativa a la Tierra en cualquier tiempo y el vector de radiación, es decir, la posición relativa del sol y este plano puede describirse en términos de varios ángulos.

LOCALIZACION DEL SOL - ANGULOS BASICOS

Ángulos de altitud y azimut.- La posición del sol en la esfera celeste se especifica en términos del ángulo solar de azimut (α) y del ángulo solar de altitud (θ). Dichos ángulos se definen en base al sistema de coordenadas esféricas como se muestra en la figura 2.5.

El ángulo de altitud queda definido entonces como una medida de la distancia angular del vector Tierra-Sol y el plano del observador. El ángulo de azimut es el que se forma con la proyección del vector Tierra-Sol sobre el plano del observador y un vector o eje de coordenadas apuntando hacia el sur. El ángulo de azimut (α) se mide a partir del sur y es positivo al este del mismo.

El ángulo de cenit (θ) es la distancia angular del sol

hacia el cenit, el cual es el punto localizado directamente sobre la cabeza del observador y por lo tanto perpendicular al plano de la Tierra donde se encuentra localizado este. El ángulo de cenit es complementario al ángulo de altitud solar.

$$\alpha + \psi = 90^\circ \quad \dots (2.6)$$

El ángulo de altitud y el ángulo de azimut se calculan para cualquier fecha en cualquier instante de tiempo; para ello se utilizan las siguientes fórmulas:

Para el ángulo de altitud:

$$\text{sen } \alpha = \cos(L)\cos(\delta)\cos(w) + \text{sen}(L)\text{sen}(\delta) \quad \dots (2.7)$$

Y para el de azimut:

$$\cos(\delta) = \text{sec}(\alpha) [\cos(L)\text{sen}(\delta) - \cos(\delta)\text{sen}(L)\cos(w)] \quad \dots (2.8)$$

Para calcular el ángulo de altitud (α) es suficiente con aplicar la función inversa o arcoseno en la ecuación 2.7. Sin embargo para el azimut se requiere además de aplicar el arcocoseno al resultado de la ecuación 2.8, saber si el ángulo obtenido es positivo o negativo, es decir si ha sido medido hacia el este del sur, en cuyo caso será positivo, o bien si ha sido medido hacia el oeste del sur y por lo tanto es negativo. Esto ocurre debido a que la función arcocoseno tiene un rango restringido a ángulos de 0 a 180 grados positivos únicamente. La forma de saber si el ángulo de azimut es positivo o negativo consiste únicamente en saber si el valor de este se ha calculado para una hora previa o posterior al mediodía solar. Si aun no ha ocurrido el mediodía solar entonces el sol se encuentra localizado hacia el este del meridiano del observador y su ángulo de azimut es positivo. Si ya ocurrió el mediodía solar entonces el sol se haya en el lado oeste y el azimut es negativo.

A continuación se enlistan y definen brevemente los ángulos utilizados en las ecuaciones 2.7 y 2.8. Algunos de ellos ya se definieron con anterioridad. Véase también la figura 2.5.

Ángulo de latitud (L).- Es la localización angular de un punto sobre la Tierra medido hacia el norte o sur del ecuador. Es positivo hacia el norte y toma valores comprendidos entre +90 y -90 grados.

Ángulo de declinación solar (δ).- Es la posición angular del sol en el mediodía solar con respecto al plano del ecuador, positivo hacia el norte, valores máximos -23.45 y +23.45 grados.

Ángulo horario (w).- Es el desplazamiento angular del

sol de este a oeste del meridiano local o del observador, debido a la rotación de la Tierra sobre su propio eje, la equivalencia es 15 grados por hora, en la mañana positivo, en la tarde negativo.

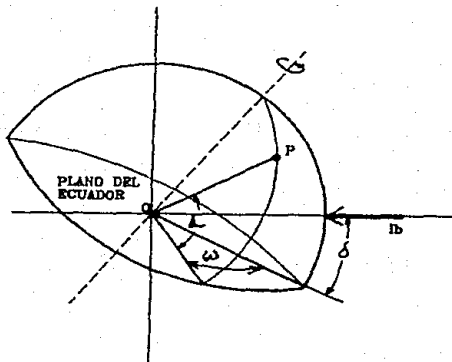


Figura 2.5 Definición del ángulo horario y los ángulos de declinación y latitud.

El amanecer y el ocaso del sol ocurren cuando el ángulo de altitud es cero. Sustituyendo esta condición en la ecuación 2.7 obtenemos.

$$W_{sr} = \arccos(-\tan(L)\tan(\delta)) \quad \dots (2.9)$$

Que es el ángulo para el amanecer, por simetría el ángulo horario para el atardecer será el mismo pero negativo.

$$W_{ss} = -W_{sr} \quad \dots (2.10)$$

Ángulo de incidencia.- La intensidad de la radiación sobre una superficie depende del ángulo con el cual lleguen los rayos solares a esta. La intensidad es proporcional al coseno del ángulo entre los rayos solares y una normal a la superficie. Dicho ángulo es llamado ángulo de incidencia solar (θ).

La optimización en la orientación del colector nos permitirá reducir el ángulo de incidencia solar durante las horas de insolación y con ello captar el máximo de radiación solar disponible. Como va se vio en el capítulo previo sabemos que existen colectores fijos y colectores de enfoque. Los primeros se orientan para operar con un valor promedio de captación durante todo el año, se orientan en el hemisferio norte apuntando hacia el sur para mejorar la captación en los meses de invierno en que los rayos solares llegan más inclinados. El valor óptimo de inclinación suele ser igual al valor del ángulo de latitud (L) del lugar donde se encuentre localizado el colector más 10 grados. Notese que por ejemplo un colector plano orientado hacia el sur tendrá sus valores máximos de captación de radiación en las horas cercanas al mediodía y en los meses en que la posición del sol permita que los rayos solares lleguen normales al plano del colector.

En el segundo caso los colectores de enfoque tratan de minimizar en lo posible el ángulo de incidencia procurando que los rayos solares arriben perpendiculares a ellos. Existen diversas formas de trayectorias de enfoque. Estas trayectorias consisten generalmente de la rotación del colector sobre uno o dos ejes.

El ángulo de inclinación al cual hemos estado haciendo referencia lo denotaremos con la letra griega (β) y lo definiremos como el ángulo de inclinación de la superficie con respecto a la horizontal. En colectores que giran sobre un eje el ángulo de inclinación es medido entre éste y la horizontal. Normalmente la inclinación de los colectores en el hemisferio norte es hacia el sur y decimos que es positiva. Para colectores enfrentados hacia el norte el ángulo de inclinación se considera negativo.

La figura 2.6 muestra las principales trayectorias de seguimiento del sol en uno y dos ejes así como sus ángulos de incidencia.

Notemos que las dos primeras trayectorias reciben la radiación solar en forma completamente normal, siendo el ángulo de incidencia igual a 0 grados y su coseno igual a 1 por lo tanto. Para este tipo de seguimiento se requiere que el colector se mueva con dos grados de libertad (gira en dos ejes).

Las otras formas de seguimiento tienen solo un grado de libertad, giran comúnmente alrededor de ejes orientados norte-sur, este-oeste o bien norte-sur e inclinados de acuerdo a la estación del año para compensar la variación en la declinación solar.

DESCRIPCION	EJES	COSENO DEL ANGULO DE INCIDENCIA
Movimientos en altitud y azimut	Eje horizontal y eje vertical	1
Rotación alrededor de un eje polar y ajuste en la declinación	Eje polar y eje de declinación	1
Rotación uniforme alrededor de un eje polar	Eje polar	$\cos \delta$
Este-Oeste horizontal	Horizontal, eje Este-Oeste	$\sqrt{1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \gamma}$
Norte-Sur horizontal	Horizontal, eje Norte-Sur	$\sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cos^2 \gamma}$
Rotación alrededor de un eje vertical de una superficie inclinada hacia el Sur L grados (L = latitud)	Eje vertical	$\sin(\alpha + L)$
Rotación alrededor de un eje vertical de una superficie inclinada L + 15 grados.	Eje vertical	$\sin(\alpha + L + 15)$
Rotación de un colector horizontal alrededor de un eje vertical	Eje vertical	$\sin \alpha$
Rotación de una sup. vertical alrededor de un eje vertical	Eje vertical	$\cos \alpha$

Figura 2.6 Formas de seguimiento y sus ángulos de incidencia.

ORIENTACION DEL COLECTOR

Para colectores solares lineales o cilíndrico parabólicos sabemos que el sistema óptico enfocará la radiación directa en el receptor si el sol se encuentra en el plano central del concentrador, esto es, el plano que incluye el eje focal y la línea de vértice del reflector o eje de giro.

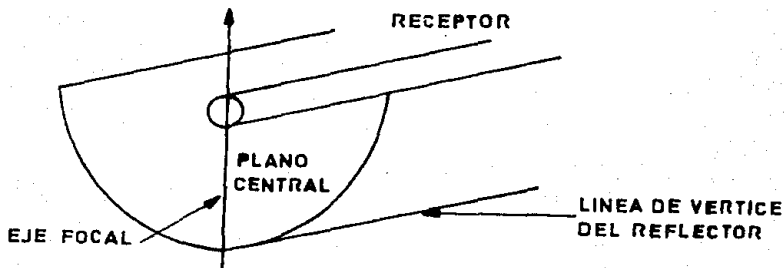


Figura 2.7 Plano central del concentrador.

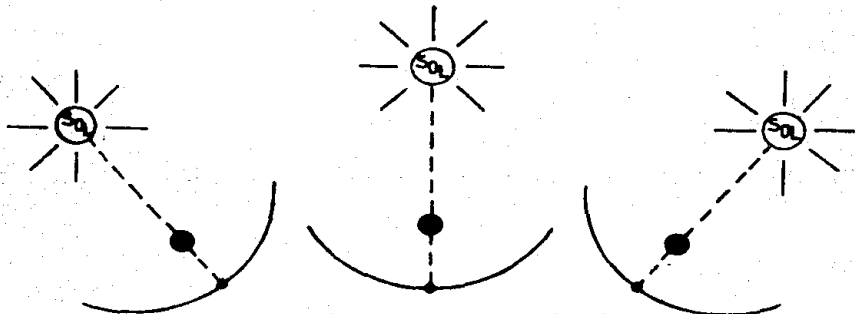


Figura 2.8 Alineamiento entre el plano central del concentrador y el sol.

Para este tipo de sistema es posible girar el colector alrededor de un solo eje de manera que compense el cambio horario de posición del sol.

Definiremos el plano central del colector mediante dos vectores, uno alojado en la línea de vértice del reflector o eje de giro al cual llamaremos \vec{a} y el otro en el eje focal es decir normal al plano superior del colector llamado $\vec{I_M}$. Definiremos además la posición del sol mediante un vector $\vec{I_B}$ alojado a lo largo de una visual del centro del sol al colector.

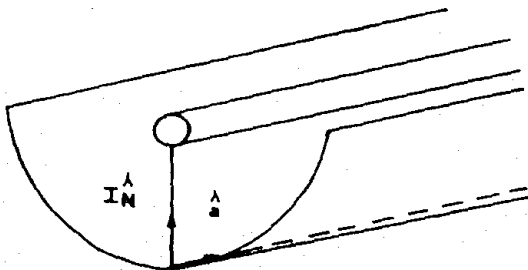


Figura 2.9 Vectores que definen el plano central del colector

Sabemos además que para mejorar la eficiencia es recomendable, en el hemisferio norte, enfrenar el colector hacia el sur con un ángulo de inclinación (β) , de manera que los rayos solares lleguen siempre al plano del colector lo más perpendicularmente posible.

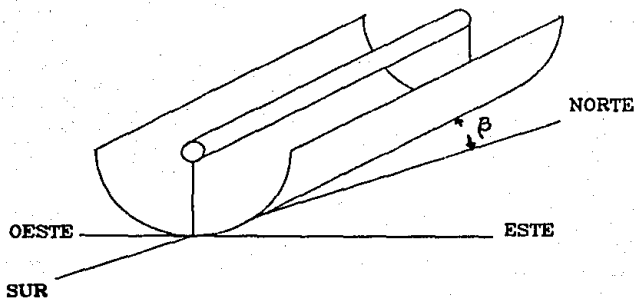


Figura 3.10 Ángulo de inclinación del colector (β).

El movimiento angular del colector solar alrededor del eje de giro α para compensar el cambio horario de posición del sol quedará definido por el ángulo Ω generado por el vector \vec{I}_N en movimiento y el semieje positivo de las X que apuntará siempre hacia el Este del punto de localización del colector, de manera que en el amanecer Ω valdrá cero, en el mediodía 90° y en el atardecer Ω tomará el valor extremo de 180 grados para colectores horizontales orientados Norte-Sur.

Este ángulo Ω quedará alojado siempre en el plano de seguimiento generado por el vector \vec{I}_N . Nuestra ecuación de seguimiento, que vamos a describir a continuación, tiene como objetivo final el cálculo del ángulo Ω .

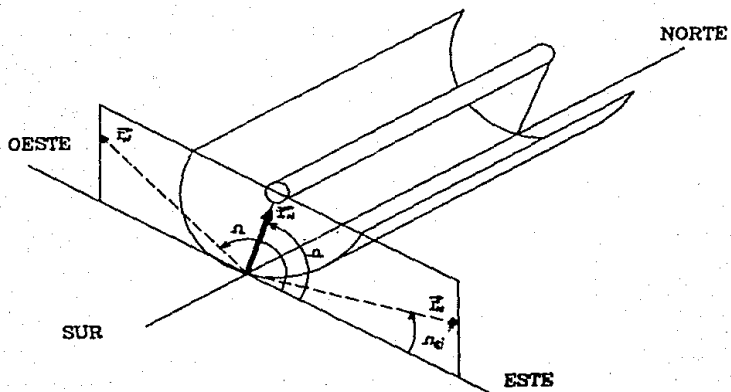


Figura 2.11 Ángulo de posición del colector Ω .

En la figura 2.12 se muestran todos los vectores importantes descritos anteriormente así como los ángulos que definen su posición en el espacio. Como se observa la figura (b) es un modelo geométrico de la figura (a).

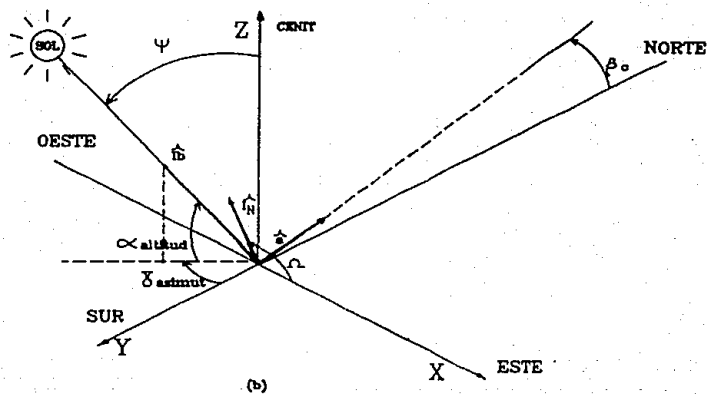
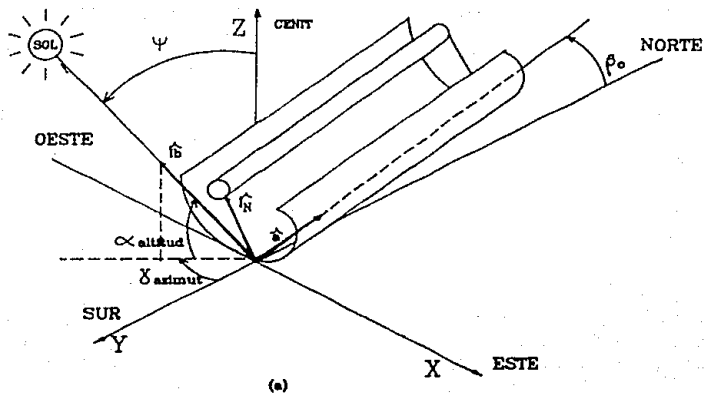


Figura 2.12 Colector solar enfrentado al sur y los tres vectores que definen el plano de seguimiento del sol.(a) isometrico, (b) representacion geometrica.

Para hallar la ecuación de seguimiento partiremos del siguiente teorema matemático:

"Tres vectores en el espacio son coplanares si y solo si su producto $A \cdot B \times C = 0$ "

Y dado que nosotros requerimos alinear el plano central del concentrador con el vector de radiación solar 'IB', podemos utilizar este teorema mediante la selección apropiada de tres vectores. Estos tres vectores serán los siguientes: el vector 'a' alojado en el eje de giro, el vector 'IN' normal al plano imaginario superior del colector, los cuales pertenecen y definen al plano central del concentrador, y el vector 'IB' de radiación solar directa. Siempre que estos vectores sean coplanares, el concentrador enfocará correctamente la radiación en el receptor.

Los tres vectores tendrán que ser definidos primeramente en el espacio para posteriormente efectuar el producto mixto de acuerdo al teorema. Esta definición de vectores se hará utilizando el sistema de coordenadas esféricas y quedará referido a los ángulos básicos ya definidos previamente. La figura 2.13 muestra el vector de radiación 'IB' definido por los ángulos directores (α), (β) y (γ) y simultáneamente por los ángulos de azimut (χ) y el de cenit (ψ) (el ángulo de cenit es el complementario del de altitud α , es decir $\psi = 90 - \alpha$).

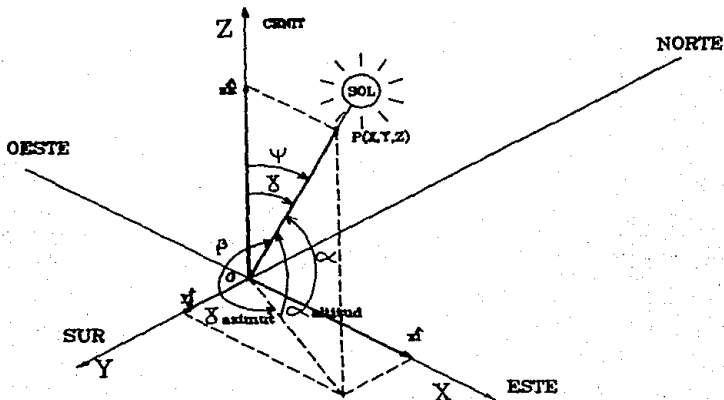


Figura 2.13 Definición del vector de radiación 'IB' en el espacio.

Sea el vector $\vec{OB} = \vec{OP}$ un vector dirigido del origen O hacia el sol y P un punto dentro de la trayectoria de O al sol de manera que OP es unitario.

$$\vec{OP} = (x-0)\hat{i} + (y-0)\hat{j} + (z-0)\hat{k}$$

$$\vec{OP} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad \dots 2.11$$

Y sabemos que para cualquier vector \vec{V} con (α) , (β) y (γ) como ángulos directores,

$$\vec{V} = |\vec{V}|\cos\alpha\hat{i} + |\vec{V}|\cos\beta\hat{j} + |\vec{V}|\cos\gamma\hat{k}$$

y si \vec{V} es unitario

$$\vec{V} = \cos\alpha\hat{i} + \cos\beta\hat{j} + \cos\gamma\hat{k}$$

Para \vec{OP} queda:

$$\vec{OP} = \cos\alpha\hat{i} + \cos\beta\hat{j} + \cos\gamma\hat{k} \quad \dots 2.12$$

de 2.11 y 2.12 vemos que:

$$x = \cos\alpha, \quad y = \cos\beta, \quad z = \cos\gamma$$

A continuación definiremos el sistema de coordenadas esféricas:

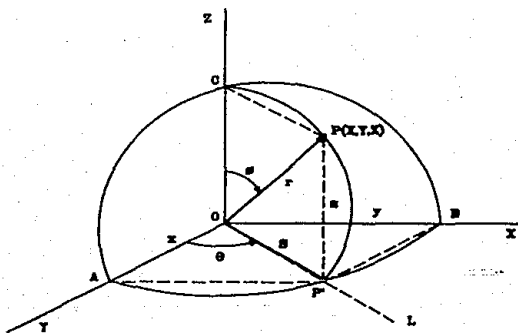


Figura 2.14 Sistema de Coordenadas Esféricas.

$$x = (s) \sin \theta = (r) \sin \phi \sin \theta \quad \dots (2.12)$$

$$y = (s) \cos \theta = (r) \sin \phi \cos \theta \quad \dots (2.14)$$

$$z = \overline{P \cdot P} = (r) \sin(90 - \phi) = (r) \cos \phi \quad \dots (2.15)$$

Utilizando ahora este sistema de coordenadas y definiendo x , y , z en función de los ángulos de cenit y de azimut que determinan la posición del sol en el espacio. Es importante recordar la convención de signos para el ángulo de azimut el cual es positivo medido hacia el este del sur.

$$x = \sin \psi \cos (\alpha + \delta) \quad \dots (2.16)$$

$$y = \sin \psi \sin \delta \quad \dots (2.17)$$

$$z = \cos \psi \quad \dots (2.18)$$

Recordando que $r = \sqrt{OP} = 1$

Como mencionamos anteriormente, para obtener una mayor eficiencia, el colector habrá de inclinarse hacia el sur principalmente en los meses de invierno un ángulo (β_c) para compensar la declinación solar. Para no confundirlo con el ángulo director (β) en esta sección lo llamaremos (β_c) indicando (β) del colector.

Lo que haremos ahora será referir las componentes x , y , z a un nuevo sistema de coordenadas girado, este giro se hará alrededor del eje X ESTE-DESTE de manera que el colector quede enfrentado hacia el sur un ángulo (β_c).

La siguiente tabla muestra los ángulos directores de los ejes X' , Y' , Z' referidos a los ejes originales.

EJE	X	Y	Z
X'	$\alpha_1 = 0^\circ$	$\beta_1 = 90^\circ$	$\delta_1 = 90^\circ$
Y'	$\alpha_2 = 90^\circ$	$\beta_2 = \beta_c$	$\delta_2 = 90^\circ + \beta_c$
Z'	$\alpha_3 = 90^\circ$	$\beta_3 = 270^\circ + \beta_c$	$\delta_3 = \beta_c$

Tabla 2.1 Angulos directores del sistema $X'Y'Z'$

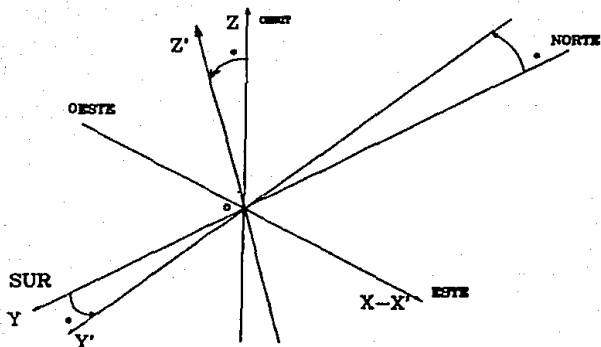


Fig 2.15 Relación entre los sistemas coordenados XYZ y X'Y'Z'

Aplicando las ecuaciones de transformación inversa de las coordenadas nuevas a las originales:

$$x' = x \cos \alpha_1 + y \cos \beta_1 + z \cos \delta_1 \quad \dots (2.19)$$

$$y' = x \cos \alpha_2 + y \cos \beta_2 + z \cos \delta_2 \quad \dots (2.20)$$

$$z' = x \cos \alpha_3 + y \cos \beta_3 + z \cos \delta_3 \quad \dots (2.21)$$

De las ecuaciones 2.16 a la 2.21 y aplicando los valores de la tabla 2.1 tenemos

$$x' = \text{sen} \psi \cos(270 + \delta) \cos(\psi) + \text{sen} \psi \cos \delta \cos(90) + \cos \psi \cos(90)$$

$$y' = \text{sen} \psi \cos(270 + \delta) \cos(90) + \text{sen} \psi \cos \delta \cos \beta_c + \cos \psi \cos(90 + \beta_c)$$

$$z' = \text{sen} \psi \cos(270 + \delta) \cos(90) + \text{sen} \psi \cos \delta \cos(270 + \beta_c) + \cos \psi \cos \beta_c$$

Simplificando.

$$x' = \text{sen} \psi \cos(270 + \delta) \quad \dots (2.22)$$

$$y' = \text{sen} \psi \cos \delta \cos \beta_c + \cos \psi \cos(90 + \beta_c) \quad \dots (2.23)$$

$$z' = \text{sen} \psi \cos \delta \cos(270 + \beta_c) + \cos \psi \cos \beta_c \quad \dots (2.24)$$

Pasamos ahora a definir la posición del vector \vec{T}_N en el plano $X'Z'$ en función del ángulo Ω medido como ya se dijo, a partir del semieje positivo de las X' .

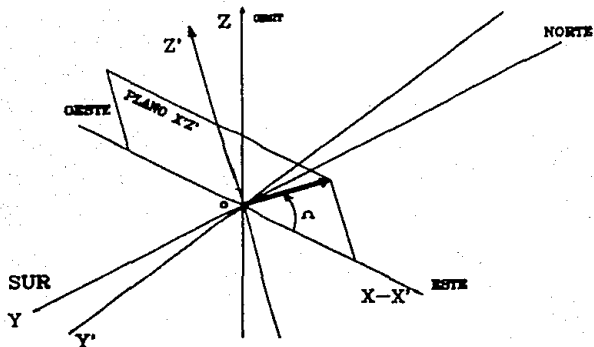


Figura 2.16 Plano descrito por el vector \vec{T}_N en movimiento. El ángulo Ω se mide positivo en la dirección mostrada.

De la figura 2.16 es claro ver que en el plano $X'Z'$

$$x' = \cos \Omega \quad \dots (2.25)$$

$$y' = 0 \quad \dots (2.26)$$

$$z' = \sin \Omega \quad \dots (2.27)$$

El último de los tres vectores que vamos a utilizar para la definición de la ecuación de seguimiento es el vector \vec{a} alojado en el eje de giro del colector. En este caso es obvio ver que el vector solo tiene componente en el eje Y' y dado que es unitario:

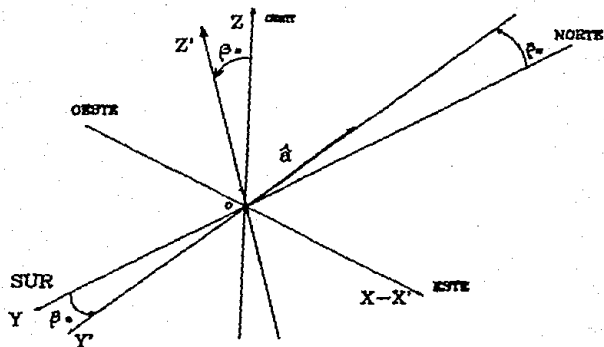


Figura 2.17. Posición del vector \vec{a} en el eje de giro del colector.

Los cosenos directores de \vec{a} son:

$$x' = 0 \quad \dots (2.28)$$

$$y' = -1 \quad \dots (2.29)$$

$$z' = 0 \quad \dots (2.30)$$

Aplicando la condición para que tres vectores sean coplanares y con los valores de los cosenos directores descritos por las ecuaciones 2.22 a la 2.30:

$$\vec{I}_b \cdot \vec{a} \times \vec{I}_N = 0$$

Por Álgebra Lineada se obtiene al resolver el siguiente determinante:

$\text{sen } \gamma \cos (270 + \gamma)$	$\text{sen } \gamma \cos \gamma \cos \beta_c + \cos \gamma \cos (90 + \beta_c)$	$\text{sen } \gamma \cos \delta \cos (270 + \beta) + \cos \gamma \cos \beta_c$
0	-1	0
$\cos \Omega$	0	$\text{sen } \Omega$

- 47 -

Utilizando el metodo de diagonales e igualando a cero el resultado se tiene:

$$\sin\psi \cos(270+\delta) (-1 \sin\Omega - \cos\Omega (-1)) (\sin\psi \cos\delta \cos(270+\beta_c) + \cos\psi \cos\beta_c) = 0$$

$$-\sin\psi \cos(270+\delta) \sin\Omega + \cos\Omega (\sin\psi \cos\delta \cos(270+\beta_c) + \cos\psi \cos\beta_c) = 0$$

Dividiendo entre $\cos\Omega$:

$$-\sin\psi \cos(270+\delta) \tan\Omega + \sin\psi \cos\delta \cos(270+\beta_c) + \cos\psi \cos\beta_c = 0$$

Despejando $\tan\Omega$

$$\tan\Omega = \frac{\sin\psi \cos\delta \cos(270+\beta_c) + \cos\psi \cos\beta_c}{\sin\psi \cos(270+\delta)}$$

Simplificando.

$$\tan\Omega = \frac{\sin\psi \cos\delta (\cos(270)\cos\beta_c - \sin(270)\sin\beta_c) + \cos\psi \cos\beta_c}{\sin\psi (\cos(270)\cos\delta - \sin(270)\sin\delta)}$$

Y con $\sin(270) = -1$ finalmente llegamos a la ecuación que definirá el movimiento angular que habremos de dar al colector a través de su eje de giro.

```

*****
**                                     **
**       $\tan\Omega = \frac{\sin\psi \cos\delta \sin\beta_c + \cos\psi \cos\beta_c}{\sin\psi \sin\delta}$       **
**                                     **
**                                     **
**                                     **
*****

```

... (2.31)

COSENO DEL ANGULO DE INCIENCIA.

El ángulo de incidencia será utilizado posteriormente para el cálculo de la radiación solar incidente, se define como aquel formado por los vectores normal de colector ' \vec{I}_N ' y el vector de radiación ' \vec{I}_B '.

Sabemos que el coseno del ángulo formado por dos vectores esta dado por:

$$\cos \theta_i = \frac{A_1 B_1 + A_2 B_2 + A_3 B_3}{[\overset{2}{A_1} + \overset{2}{A_2} + \overset{2}{A_3}]^{1/2} [\overset{2}{B_1} + \overset{2}{B_2} + \overset{2}{B_3}]^{1/2}} \dots (2.32)$$

Donde: A_1, A_2, A_3 son los cosenos directores del vector ' \vec{A} ' y B_1, B_2, B_3 los cosenos directores de ' \vec{B} '.

Con anterioridad definimos los vectores ' \vec{I}_B ' e ' \vec{I}_N ' con respecto al sistema de coordenadas X'Y'Z' de la siguiente manera:

\vec{I}_B :

$$A_1 = \text{sen } \psi \cos(270 + \delta)$$

$$A_2 = \text{sen } \psi \cos \delta \cos \beta_c + \cos \psi \cos(90 + \beta_c)$$

$$A_3 = \text{sen } \psi \cos \delta \cos(270 + \beta_c) + \cos \psi \cos \beta_c$$

Aplicando la identidad $\cos(x+y) = \cos x \cos y - \text{sen } x \text{sen } y$

$$A_1 = \text{sen } \psi (\cos(270) \cos \delta - \text{sen}(270) \text{sen } \delta)$$

$$A_2 = \text{sen } \psi \cos \delta \cos \beta_c + \cos \psi (\cos(90) \cos \beta_c - \text{sen}(90) \text{sen } \beta_c)$$

$$A_3 = \text{sen } \psi \cos \delta (\cos(270) \cos \beta_c - \text{sen}(270) \text{sen } \beta_c) + \cos \psi \cos \beta_c$$

Simplificando:

$$A_1 = \text{sen } \psi \text{sen } \delta$$

$$A_2 = \text{sen } \psi \cos \delta \cos \beta_c - \cos \psi \text{sen } \beta_c$$

$$A_3 = \text{sen } \psi \cos \delta \text{sen } \beta_c + \cos \psi \cos \beta_c$$

\vec{I}_N :

$$\begin{aligned} B_1 &= \cos \Omega \\ B_2 &= 0 \\ B_3 &= \sin \Omega \end{aligned}$$

Sustituyendo ' \vec{I}_B ' e ' \vec{I}_N ' en la ecuación 2.32

$$\cos \theta_c = \frac{\sin \psi \sin \Omega \cos \varphi + (\sin \psi \cos \Omega \cos \beta_c - \cos \psi \sin \beta_c) \cos \varphi}{[A_1^2 + A_2^2 + A_3^2]^{1/2} [B_1^2 + B_2^2 + B_3^2]^{1/2}} + \frac{(\sin \psi \cos \Omega \sin \beta_c + \cos \psi \cos \beta_c) \sin \Omega}{[A_1^2 + A_2^2 + A_3^2]^{1/2} [B_1^2 + B_2^2 + B_3^2]^{1/2}}$$

Recordando que las expresiones del denominador son iguales a la magnitud o módulo del vector y dado que tanto ' \vec{I}_B ' como ' \vec{I}_N ' son unitarios.

$$|\vec{I}_B| = [A_1^2 + A_2^2 + A_3^2]^{1/2} = 1$$

$$|\vec{I}_N| = [B_1^2 + B_2^2 + B_3^2]^{1/2} = 1$$

De donde queda.

$$\cos \theta_c = \frac{\sin \psi \sin \Omega \cos \varphi + (\sin \psi \cos \Omega \sin \beta_c + \cos \psi \cos \beta_c) \sin \Omega}{(1)(1)}$$

Finalmente la ecuación que define el coseno del ángulo de incidencia solar es:

$$\cos \theta_c = \sin \psi \sin \Omega \cos \varphi + \sin \Omega (\sin \psi \cos \Omega \sin \beta_c + \cos \psi \cos \beta_c) \quad \dots (2.34)$$

La cual va no se simplifica mucho y preferimos dejar así en función de senos y cosenos.

CALCULO Y ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR.

Como señalamos en el primer capítulo, el sol es una fuente variable de energía, esta característica añade a los sistemas de conversión de energía solar una variable de diseño: la energía de entrada. El conocimiento de esta nos permitirá predecir el funcionamiento del sistema para saber si bajo ciertas condiciones de radiación puede servir a la carga adecuadamente.

Siempre que sea posible el uso de datos acerca de la radiación solar basados en mediciones experimentales deberá preferirse a aquellos obtenidos de cálculos o estimaciones indirectas. En algunos países donde la investigación sobre energía solar esta avanzada existe información histórica experimental horaria, diaria y mensual de la magnitud de la radiación solar en distintos sitios. La forma más común de presentar esta información es a través de cartas o tablas que muestran mediciones de la radiación total, directa y difusa, en superficies horizontales sobre la tierra.

Existen distintos instrumentos para medir la radiación solar de acuerdo a la componente que se mide, ya sea la intensidad de la componente directa, la difusa o la radiación total.

Cuando se desea medir la radiación total, el instrumento que debe utilizarse es el piranómetro. La figura 3.1 muestra un piranómetro típico. El aparato generalmente se coloca sobre una superficie horizontal y registra, en consecuencia, la radiación global en un sitio dado. Todo instrumento usado para medir la radiación solar debe responder en cualquier longitud de onda para todo el espectro de energía solar.

El principio utilizado por algunos piranómetros consiste en usar un detector que consta de dos anillos concéntricos, uno con alta reflectancia y otro con alta absorbancia. La diferencia de temperatura entre anillos es una medida de la radiación solar absorbida y es detectada por medio de termopares. El detector se cubre con una cubierta hemisférica de vidrio de alta transmitancia para protegerlo del viento y otros agentes.

El piranómetro puede modificarse para que indique únicamente la radiación difusa empleando una banda metálica que obstruya la radiación directa del sensor.

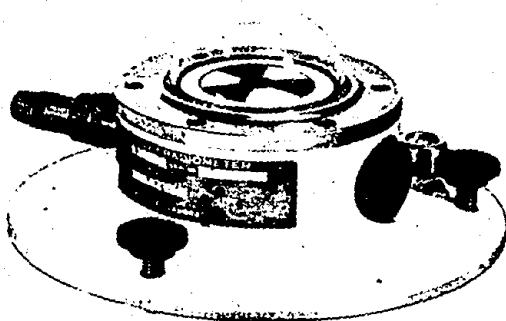
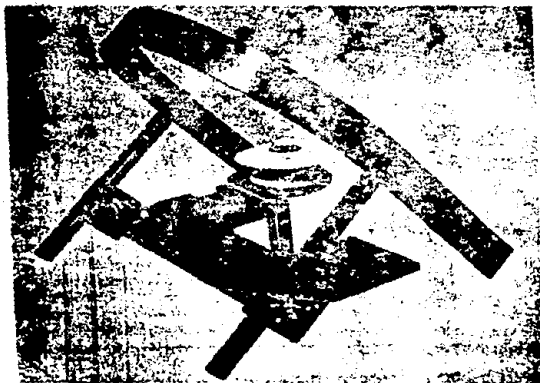


Figura 3.1 Piranómetro que registra la radiación global en una superficie horizontal.



3.2 Piranómetro modificado para sensar únicamente la componente difusa de la radiación global.

Si lo que deseamos medir es la radiación directa normal entonces el instrumento que debemos usar es el piroheliómetro o pirheliómetro. La estructura principal consta de un tubo o cañón y un detector situado en el extremo opuesto a la abertura por donde entra la radiación. El piroheliómetro cuenta generalmente con un dispositivo electrónico que le permite seguir al sol en forma continua, por lo que puede llevar a cabo un registro de la radiación directa normal a lo largo del día.



Figura 3.3 Piroheliómetro para medir la radiación directa normal.

Los datos piroheliométricos deben interpretarse cuidadosamente en el diseño de colectores de enfoque que permiten alcanzar altas temperaturas de operación. La mayoría de estos concentradores enfocan únicamente al disco solar, el cual subtende un ángulo de 32' y no a la zona de 5 grados del disco y su aureola que ve un piroheliómetro. En el caso de cielo completamente despejado esta diferencia no representa ningún problema serio, dado que fuera de la zona del disco solar la densidad de flujo de energía disminuye hasta una milésima parte. Sin embargo, para cielo brumoso la diferencia puede conducir a una sobreestimación del funcionamiento térmico de los colectores.

Las unidades métricas más usadas para la medición de la radiación por unidad de área son:

Langley ($1 \text{ l} = 1 \text{ cal/cm}^2 = 0.001163 \text{ Wh/cm}^2 = 4.186 \text{ J/cm}^2$)
 Caloría ($1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min} = 0.0697 \text{ W/cm}^2 = 1 \text{ l/min} = 0.00418 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{min}$)
 Kilowatt-hora ($1 \text{ kWh/m}^2 = 860000 \text{ cal/m}^2 = 86.2 \text{ l} = 3.6 \times 10^6 \text{ J/m}^2$)
 Joule ($1 \text{ J} = 0.239 \text{ cal} = 2.78 \times 10^{-4} \text{ Wh} = 0.239 \text{ l-cm}^2$)
 Terawatt-año ($1 \text{ TW-año} = 10^9 \text{ kW-año} = 8.766 \times 10^{12} \text{ kWh}$)

Cálculo y estimación de la radiación directa

Debido a que nuestro estudio se centra en los colectores de enfoque, los cuales utilizan solo la componente directa de la radiación solar, los métodos para el cálculo y estimación que a continuación se describen se enfocarán a la obtención de ésta.

Antes de mostrar la manera en la que puede calcularse la radiación incidente es bueno recordar que, como apuntamos anteriormente, el uso de datos basados en mediciones experimentales en este caso piroheliométricas, deben preferirse a aquellos obtenidos de cálculos.

Cálculo de la radiación directa.- Sabemos que la radiación solar extraterrestre puede considerarse casi fija y que son algunos parámetros atmosféricos los que la modifican como son el contenido de vapor de agua o la turbiedad atmosférica. La fórmula descrita a continuación toma en cuenta algunos de estos parámetros para cielo despejado.

La intensidad de la componente directa-normal de la radiación esta dada aproximadamente por:

$$I_b = I_{ext} \times \exp [-0.1457 (p m_0 / 1000) - 0.1417 (W m_0)] \dots (3.1)$$

Donde: p es la presión local atmosférica en milibars, m_0 es la masa de aire al nivel del mar, W es el contenido de agua precipitable en el vapor atmosférico en centímetros, I_{ext} es la radiación extraterrestre.

La masa de aire m es una medida de la trayectoria atmosférica a través de la cual debe viajar la radiación solar. Se asigna un valor de masa de aire unitario $m = 1$ (adimensional) para una trayectoria atmosférica directamente sobre la cabeza al nivel del mar. La trayectoria queda definida simplemente por el ángulo de cenit, es decir el ángulo entre la visual a la trayectoria y la posición del cenit.

$$m_0 = \sec \psi \dots (3.2)$$

Además es preciso hacer un ajuste para la altitud local en términos de la presión local atmosférica.

$$m = (p/p_0) m_0 \dots (3.3)$$

Donde p es la presión media local y p_0 y m_0 la masa de aire y presión al nivel del mar respectivamente.

Como apuntamos en el capítulo I, un problema inherente a los sistemas solares consiste en diseñar estos de manera que puedan alimentar adecuadamente la carga esperada aun en las condiciones más críticas. comentamos entonces que sobredimensionar el sistema sería inadecuado, sin embargo podemos diseñar éste tomando como base condiciones promedio de radiación reducida, las cuales se presentan en invierno. Sabemos a través de información histórica que existen días característicos donde la radiación particular de ese día es prácticamente igual al promedio mensual o de estación. Nosotros escogeremos como día característico para el invierno el 17 de Enero, los cálculos se harán con base en tiempo solar.

Declinación:

$$\delta = 23.45 \text{ sen } [360(284 + N)/365]$$

Para $H = 17$.

$$\delta = -20.92$$

Altitud:

$$\text{sen}\alpha = \cos L \cos \delta \cos \omega + \text{sen} L \text{sen} \delta$$

Para las 7:00 hrs. A.M. tiempo solar $\omega = 75.0$, latitud $L = 19.65$ para FES-Cuautitlán.

$$\text{sen}\alpha = \cos(19.65) \cos(-20.92) \cos(75) + \text{sen}(19.65) \text{sen}(-20.92)$$

$$\alpha = 6.18$$

Azmut:

$$\cos \gamma = \frac{\cos L \text{sen} \delta - \cos \delta \text{sen} L \cos \omega}{\cos \alpha}$$

$$\cos \gamma = \frac{\cos(19.65) \text{sen}(-20.92) - \cos(-20.92) \text{sen}(19.65) \cos(75)}{\cos(6.18)}$$

$$\cos \gamma = 0.42$$

$$\gamma = 65.16$$

Presión en milibars para FES-C = 781.1, masa de aire corregida.

$$m_0 = \sec \psi = \sec(90 - \alpha)$$

$$m_0 = \sec(90 - 6.18) = \sec(83.82)$$

$$m_0 = 9.29$$

$$m = (\rho/\mu_0) m_0$$

$$m = (781.1/1013) m_0 = 0.771 m_0$$

$$m = (0.771)(9.29)$$

$$m = 7.16$$

Y para $W = 1.2$ cm. Aplicando la ecuación 3.1

$$I_b = (I_{ext}) \exp[-0.1457(m) - 0.1617(W m_0)^{0.25}]$$

Para el mes de Enero:

$$I_{ext} = 1.42 \text{ kW/m}^2$$

Para $T_{solar} = 7:00$ hrs.

$$I_b = 1.42 \exp[-0.1457(7.16) - 0.1617[(1.2)(9.29)]^{0.25}]$$

$$I_b = 0.37 \text{ kW/m}^2$$

La radiación directa en la superficie del colector, el cual se mueve para enfocar al sol esta dada por:

$$I_{bt} = I_b \cos \theta_c \quad \dots (3.4)$$

Donde (θ_c) es el ángulo formado por el vector de radiación directa y la normal del colector para el instante t , y esta dada por:

$$\cos \theta_c = \sin \psi \sin \gamma \cos \Omega + \sin \Omega (\sin \psi \cos \gamma \sin \beta_c + \cos \psi \cos \beta_c)$$

y con:

$$\tan \Omega = \frac{\sin \psi \cos \gamma \sin \beta_c + \cos \psi \cos \beta_c}{\sin \psi \sin \gamma}$$

$$\tan \Omega = \frac{\sin(83.82) \cos(65.16) \sin(30) + \cos(83.82) \cos(30)}{\sin(83.82) \sin(65.16)}$$

$$\tan \Omega = 0.4868$$

$$\Omega = 18.50$$

$$\cos \theta_i = \sin(83.82) \sin(25.16) \cos(18.50) + \sin(18.50) [\sin(83.82) \times \cos(25.16) \sin(30) + \cos(83.82) \cos(30)]$$

$$\cos \theta_i = 0.9514$$

$$\theta_i = 17.925$$

$$I_{bt} = I_b \cos \theta_i$$

$$I_{bt} = (0.37) (0.9514)$$

$$I_{bt} = 0.352 \text{ kW/m}^2$$

Completando la tabla y notando que el amanecer y atardecer ocurren a las 6:31 A.M. y 5:28 P.M. tiempo solar, respectivamente.

Tiempo solar	ω	α	γ	ψ	Ω	I_b	θ_i	I_{bt}
7:00	75	6.1	65.1	83.8	18.5	0.373	17.92	0.355
8:00	60	18.6	58.6	71.3	32.9	0.796	15.50	0.767
9:00	45	30.1	49.7	59.8	47.2	0.924	13.45	0.899
10:00	30	39.9	37.5	50.0	61.4	0.981	11.88	0.960
11:00	15	46.8	20.7	43.1	75.7	1.008	10.90	0.990
12:00	0	49.4	0	40.5	90.0	1.016	10.56	0.999
13:00	-15	46.8	-20.7	43.1	104.2	1.008	10.90	0.990
14:00	-30	39.9	-37.5	50.0	118.5	0.981	11.88	0.960
15:00	-45	30.1	-49.7	59.8	132.7	0.924	13.45	0.899
16:00	-60	18.6	-58.6	71.3	147.0	0.796	15.50	0.767
17:00	-75	6.1	-65.1	83.8	161.5	0.373	17.92	0.355

Tabla 3.1

Integrando la radiación solar directa sobre la superficie del colector se obtiene que $\Sigma I_{bt} = 8.941 \text{ kWh/m}^2$. Nótese que este valor ha sido calculado tomando el punto medio del intervalo de 1 hora y tratándolo como el valor promedio y sumando para todos los intervalos desde las 6:30 A.M. hasta las 17:30 P.M.

Otro método conveniente para estimar la radiación directa transmitida a través de atmósferas despejadas es el presentado por Hottel, el cual toma en cuenta el ángulo de cenit y la altitud para una atmósfera estándar y para cuatro tipos de climas.

La transmitancia de la atmósfera para radiación directa τ_b , es I_{bn}/I_0 o sea el cociente de la radiación directa normal a una superficie entre la constante solar, y esta dada en la forma:

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{-k/\cos \theta} \quad \dots (3.5)$$

Las constantes a_0 , a_1 , y k para atmósfera estándar con 23 km de visibilidad se encuentran a partir de a_0^* , a_1^* y k^* los cuales se dan para altitudes menores de 2.5 km, dado que la altitud en Cuautitlán-Izcalli FES-C es de aprox. 2200 m sí podemos aplicar estas fórmulas.

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6-A)^2 \quad \dots (3.6)$$

$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595(6.5-A)^2 \quad \dots (3.7)$$

$$k^* = 0.2711 + 0.01858(2.5-A)^2 \quad \dots (3.8)$$

Donde A es la altitud del observador en km.

Una vez calculadas las constantes, se aplican factores de corrección a a_0^* , a_1^* y k^* en función del clima. Los factores de corrección:

$$r_0 = a_0 / a_0^*$$

$$r_1 = a_1 / a_1^*$$

$$r_k = k / k^*$$

Los cuales se dan en la tabla 3.2.

TIPO DE CLIMA	r_0	r_1	r_k
TROPICAL	0.95	0.98	1.02
VERANO, LATITUD MEDIA	0.97	0.99	1.02
VERANO, SUBARTICO	0.99	0.99	1.01
INVIERNO, LATITUD MEDIA	1.05	1.01	1.00

Tabla 3.2. Factores de corrección para los diferentes tipos de climas.

Aplicando las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8.

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6-A)^2$$

$$a_0^{**} = 0.4237 - 0.00821(6-2.2)^2$$

$$a_0^{***} = 0.3051$$

$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595(6.5-A)^2$$

$$a_1^{**} = 0.5055 + 0.00595(6.5-2.2)^2$$

$$a_1^{***} = 0.6155$$

$$k^* = 0.2711 + 0.01858(2.5-A)^2$$

$$k^{**} = 0.2711 + 0.01858(2.5-2.2)^2$$

$$k^{***} = 0.2728$$

Para un clima invernal, latitud media y de la tabla 3.2.

$$\begin{array}{lll}
 r_o = 1.03 & r_1 = 1.03 & r_K = 1.00 \\
 r = a_o / a_o^* & a_o = a_o^* r_o & a_o = 0.3051(1.03) \\
 a_o = 0.3143 & & \\
 r_1 = a_1 / a_1^* & a_1 = a_1^* r_1 & a_1 = 0.6155(1.01) \\
 a_1 = 0.6217 & & \\
 r_K = k / k^* & k = k^* r_K & k = 0.2728(1.00) \\
 k = 0.2728 & &
 \end{array}$$

Sustituyendo en la ecuación 3.5 y para tiempo solar 7:00 A.M. con $\mu = 83.82$ de la tabla 3.1

$$\begin{aligned}
 \tau_b &= 0.3143 + 0.6217 e^{-0.2728/0.1077} \\
 \tau_b &= 0.3637
 \end{aligned}$$

Así, la transmitancia de esta atmósfera estándar para radiación directa puede determinarse para cualquier ángulo de cenit y para cualquier altitud de hasta 2.5 km.

Para periodos de una hora, la radiación directa normal para condición de cielo despejado es:

$$I_b = I_{ext} \tau_b \quad \dots (3.9)$$

Donde $I_{ext} = 1.42 \text{ kW/m}^2$ para Enero. La radiación directa para una superficie o colector está dada por,

$$I_b = I_{ext} \tau_b \cos \theta_z \quad \dots (3.10)$$

Sustituyendo valores,

$$\begin{aligned}
 I_{ext} &= 1.42 \text{ kW/m}^2 \\
 \tau_b &= 0.3637 \\
 \theta_z &= 17.92 \quad (\text{de la tabla 3.1 para } 7:00 \text{ A.M. tiempo solar})
 \end{aligned}$$

$$I_b = I_{ext} \cos \zeta_b$$

$$I_b = (1.42)(0.3637)$$

$$I_b = 0.5164$$

$$I_{bt} = I_b \cos \theta_i$$

$$I_{bt} = (0.5164)(\cos 17.92)$$

$$I_{bt} = 0.491$$

Completando la tabla.

Tiempo solar	ψ	ζ_b	I_b	θ_i	I_{bt}
7:00	83.82	0.363	0.516	17.92	0.491
8:00	71.35	0.579	0.822	15.50	0.792
9:00	59.87	0.675	0.959	13.45	0.933
10:00	50.07	0.720	1.023	11.88	1.001
11:00	43.14	0.742	1.054	10.90	1.035
12:00	40.57	0.748	1.063	10.56	1.045
13:00	43.14	0.742	1.054	10.90	1.035
14:00	50.07	0.720	1.023	11.88	1.001
15:00	59.87	0.675	0.959	13.45	0.933
16:00	71.35	0.579	0.822	15.50	0.792
17:00	83.82	0.363	0.516	17.92	0.491

Tabla 3.3

Nuevamente integrando, como en el ejemplo anterior, la radiación solar directa sobre la superficie del colector obtenemos $\sum I_{bt} = 9.549 \text{ kW/m}^2$. Este valor es un 6.8% superior al obtenido mediante el procedimiento anterior lo cual es bastante aceptable.

ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR DIRECTA A PARTIR DE MAPAS

En algunas regiones del mundo existen mapas que muestran la distribución de la radiación normal directa la cual es útil para el cálculo de la radiación que interceptan los colectores de enfoque. Desafortunadamente no existen mapas de este tipo para la región que nos interesa, sin embargo por estimaciones que se han hecho, se sabe por ejemplo que para otoño e invierno la radiación solar normal directa excede a la radiación total horizontal en un 50%.

De la figura 3.4 se observa que para el mes de Enero la radiación total horizontal en la Ciudad de México (Cuautitlan-Izcalli) es del orden de 400 langley, haciendo la conversión a kWh/m².

$$400 \text{ langley} \times \frac{0.01163 \text{ kWh/m}^2}{1 \text{ langley}} = 4.652 \text{ kWh/m}^2$$

Y sabiendo que la radiación directa excede en un 50% a la horizontal.

$$I_b = 4.652 \times 1.5 = 6.978 \text{ kWh/m}^2$$

Para hallar la radiación directa en el colector consideraremos un ángulo de incidencia promedio igual a 12 grados ya que como se observa en las dos tablas anteriores el valor de θ_i para las horas de máxima insolación oscila en 10 grados y 17 grados para las de menor, por lo tanto.

$$\Sigma I_{bt} = I_b \cos \theta_i \text{prom}$$

$$\Sigma I_{bt} = (6.978) (\cos 12)$$

$$\Sigma I_{bt} = 6.825 \text{ kWh/m}^2$$

Este valor difiere en un 30% del primer valor calculado que fue de 8.941 kWh/m². Dada la variación en los datos obtenidos utilizando tres métodos distintos para hallar la radiación en el colector, haremos un promedio de ellos el cual será usado en los cálculos de los siguientes capítulos.

$$I_{bt\text{prom}} = \frac{8.941 + 9.549 + 6.825}{3}$$

$$I_{bt} = 8.438$$



Figura 3.4 Radiación global diaria promedio en el mes de enero (cal/cm² día)

COLECTORES DE ENFOQUE

El propósito de todos los colectores solares es interceptar la energía radiante del sol y transformar tanta de esta energía como sea posible en calor útil. Para muchas aplicaciones es deseable entregar esta energía a temperaturas más altas que aquellas obtenidas con colectores planos. La temperatura puede ser incrementada decreciendo el área en donde ocurren las pérdidas de calor. Esto se logra interponiendo un aparato óptico entre la fuente de radiación y la superficie que absorbe la energía incrementando así la densidad de la radiación que incide en el relativamente pequeño absorbedor. Esta reducción en pérdidas hace entonces posible para el colector calentar fluido a más altas temperaturas con una eficiencia razonable. Por lo tanto debemos asociar a los colectores de enfoque con altas temperaturas, pero debe entenderse que la razón para este comportamiento no es la concentración en sí misma, sino las pérdidas reducidas que la concentración hace posible.

Para evitar confusión en la terminología, la palabra colector será aplicada al sistema total incluyendo el receptor y el concentrador. El receptor es aquel elemento del sistema donde la radiación es absorbida y convertida a otra forma de energía e incluye el absorbedor, las cubiertas asociadas y el aislamiento. El concentrador o sistema óptico es la parte del colector que dirige la radiación al receptor.

Han sido expuestos muchos diseños de colectores de enfoque. Se han propuesto concentradores del tipo reflector o refractor, concentradores cilíndricos o superficies de revolución ya sea continuos o segmentados. También las formas de receptor han sido variadas, existen receptores convexos, planos o cóncavos y pueden estar cubiertos o al descubierto. Así mismo tenemos diferentes formas de seguimiento para dos y tres dimensiones. Las relaciones de concentración pueden variar desde valores pequeños de 1.5 o 2 hasta valores del orden de 10 000. Con este amplio rango de diseños es difícil desarrollar análisis generales aplicables a los colectores.

COLECTORES PARABOLICOS

En todos los colectores de enfoque es de suma importancia que el disco solar sea enfocado por el sistema óptico sobre el absorbedor. Los colectores de enfoque son sistemas ópticos de imagen, ya que la fuente de la imagen se produce en el foco, aun cuando puede ser distorsionada. La fuente es el sol, pero debido a que el sol no es un punto, sino un disco que subtende un ángulo de 0.5 de arco visto desde la Tierra, su imagen no puede enfocarse en un punto para un concentrador tridimensional o una línea para un

concentrador bidimensional, sino que debe ser un disco para el primer caso o un rectángulo muy alargado para el segundo.

El primer elemento activo que alcanza la radiación solar en un colector puede ser una lente transparente llamada refractor o un espejo denominado reflector.

Uno de los mejores concentradores es el reflector parabólico, debido a que la radiación directa que intercepta y que es paralela a su eje es concentrada en el foco de la parábola. Se puede construir lineal es decir en una geometría de dos dimensiones, foco lineal y un eje de seguimiento o como un paraboloides (cuerpo generado por la rotación de una parábola) con una geometría de tres dimensiones, foco puntual y dos ejes de seguimiento.

El absorbedor debe ser capaz de interceptar la mayor cantidad posible de la radiación reflejada por el concentrador. Existen diversas formas de absorbedor pero las más comunes por la facilidad de construcción y obtención en el mercado son las de tipo plano y redondo.

RELACION DE CONCENTRACION

La relación de concentración (máxima) es una medida teórica de la concentración óptica de energía que puede obtenerse en el concentrador, este es un número definido que puede obtenerse de las dimensiones físicas del reflector y la geometría del receptor. La definición más común de la relación de concentración y que usaremos aquí, se refiere a una relación de concentración de área y es igual al cociente del área efectiva de apertura "Aa", es decir el área proyectada no sombreada del sistema óptico, entre el área del absorbedor de energía solar Ar.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \dots (4.1)$$

La mayor relación de concentración C que puede obtenerse debe ser con un absorbedor del tamaño mínimo que pueda contener la imagen del disco solar.

La relación de concentración no es infinita, sino que esta limitada por la segunda ley de la Termodinámica la cual aplica el intercambio de calor en forma de radiación entre el sol y el receptor(*).

(*). El desarrollo de la ecuación puede obtenerse de la ref. Duffie & Beckman.

La máxima relación de concentración para concentradores circulares parabólicos es según Rabl:

$$\frac{A_a}{A_r} \text{ max, circ} = \frac{R}{r} \frac{1}{\sin \theta_s} \quad \dots (4.2)$$

Todos los parámetros quedan definidos como en la figura 4.1. Un desarrollo similar lo obtienen Kreith y Kreider para concentradores lineales:

$$\frac{A_a}{A_r} \text{ max, lin} = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad \dots (4.3)$$

De esta manera con concentradores circulares $\theta_s = 0.27$ grados, la máxima relación de concentración posible es 45 000 y la máxima para concentradores lineales es de 212.

Estos valores son ideales y no se obtienen a partir de la geometría del reflector y absorbedor, sino a partir de consideraciones Termodinámicas, tampoco incluyen las pérdidas inherentes al sistema óptico por dispersión, sombreado, suciedad, ni las pérdidas térmicas.

Las máximas relaciones de concentración para colectores parabólicos son del orden de 110 y 13 000 para colectores de dos y tres dimensiones, estos valores son bastante superiores a los comúnmente usados para aplicaciones térmicas-solares.

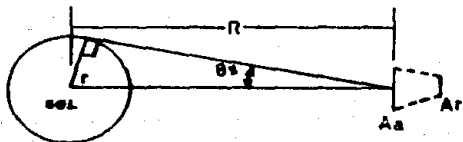


Figura 4.1. Esquemático del sol a temperatura T_s , a una distancia R del concentrador con área de apertura A_a y área del receptor A_r .

DISEÑO

Para un concentrador dado, existen muchos puntos que el diseñador debe tomar en cuenta, a fin de considerar la sensibilidad del sistema. A continuación se discuten aquellos que consideramos más importantes.

Forma y dimensionamiento del receptor.

Un receptor colocado en el plano focal no interceptará toda la radiación si es muy pequeño o bien tendrá pérdidas térmicas innecesarias si es muy grande. Por lo tanto una de las claves para optimizar la eficiencia del colector es optimizar el receptor.

Cobble estudió las formas ópticas de receptores que interceptarían toda la radiación reflejada en concentradores parabólicos de reflexión. Encontró que el receptor de forma parabólica era el mejor teóricamente. Su sección transversal consiste de una región formada por dos parábolas idénticas, giradas 180 grados una con respecto de la otra. Lunsdaine y Cherng mostraron que los receptores con forma elíptica en su sección transversal ofrecían algunas ventajas para ciertas aperturas relativas (cociente de la apertura a y la longitud focal f), de cerca de 5. La figura 4.2 muestra sus resultados.

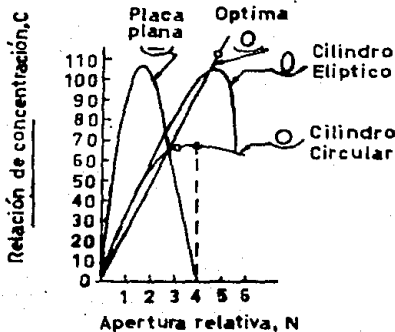


Figura 4.2 Relaciones de concentración para diversas geometrías de receptor.

El largo focal es un factor determinante en el tamaño de la imagen y la apertura a es el factor determinante en la energía total; así la brillantez de la imagen o concentración del flujo de energía en el receptor de un sistema de enfoque será una función del cociente a/f .

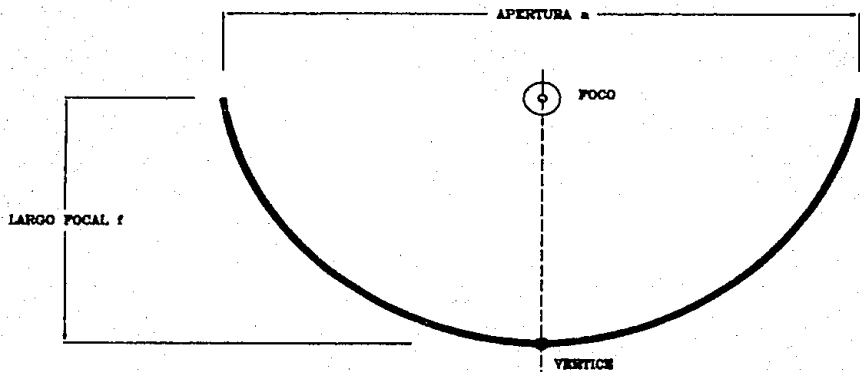


Figura 4.3 Parábola que muestra sus partes constituyentes

Por métodos de computación se ha demostrado que la eficiencia en colectores cilíndrico-parabólicos, afortunadamente puede no ser una función fuertemente dependiente del tamaño del receptor. Por ejemplo un +/- 25% de cambio en el diámetro del receptor produciría aproximadamente de un 2 a 3% de cambio en la eficiencia. Este estudio sugiere que el esfuerzo adicional en la fabricación de receptores no circulares pudiera no estar justificado. En esencia las pérdidas por factor de forma serán parcialmente balanceadas al mejorar el comportamiento térmico con un buen diseño.

En base a estos resultados a continuación se exponen los elementos necesarios para el cálculo del receptor considerando únicamente receptores tubulares y planos.

Secciones transversales de un concentrador lineal parabólico se muestran en la figura 4.4. Algunos factores clave son ilustrados en los diagramas, el rayo incidente de radiación solar tiene una amplitud angular total de 0.53 grados y es incidente en el concentrador en una dirección paralela al plano central de la parábola. El rayo en el diagrama se muestra como normal a la apertura, la radiación se muestra en la figura 4.5 incidente en el reflector en B; en el borde del concentrador donde el "radio de espejo" es máximo en (ϕ_v). El ángulo (ϕ_v) es el ángulo de borde, el cual es una medida conveniente de la magnitud de la apertura y está descrito por AFB. La aceptación actual es 20, el ángulo a través del cual una fuente puntual puede ser movida y aun enfocar en el receptor. La relación de concentración de un colector dado, está limitado por la condición de que la aceptación actual sea suficientemente amplia para admitir el disco solar completo. Para reflectores parabólicos de forma y alineamiento perfectos, el tamaño del receptor que intercepta toda la imagen solar se ilustra en las figuras.

Para un receptor cilíndrico el diámetro D es igual a:

$$D = 2r \sin 16' \quad \dots (4.4)$$

Para un receptor que es plano y normal al eje de la parábola el ancho W es.

$$W = \frac{2r_v \sin 16'}{\cos(\phi_v + 16')} \quad \dots (4.5)$$

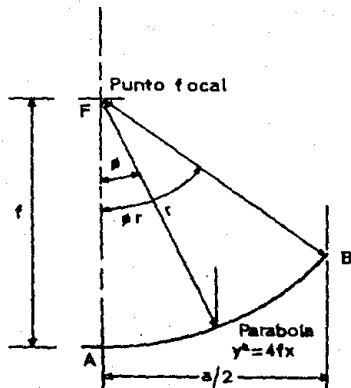


Figura 4.4. Sección de un concentrador lineal parabólico

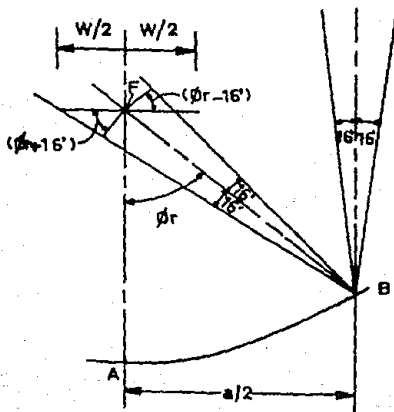


Figura 4.5. Dimensiones de la imagen.

La distancia 'r' de un punto en el reflector al foco puede ser obtenida de la forma particular del reflector, para un reflector parabólico, el largo focal f es una constante en la ecuación de la superficie:

$$r^2 = 4fx \quad \dots(4.6)$$

y 'r' esta dada por :

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \phi} \quad \dots(4.7)$$

ϕ es el ángulo entre el eje y un rayo reflejado sobre el foco como se muestra en la figura 4.4. Mientras ϕ varía desde 0 hasta $\pi/2$ y el tamaño de la imagen teórica se incrementa desde $W'/r_2 = f$ hasta $W'/r_2 = r_2$.

Así existe un tamaño de imagen finito y difusión de la imagen aun para sistemas geoméricamente perfectos.

De la definición de relación de concentración siendo 'Ac' el área de la apertura y 'Ar' el área del receptor, la máxima relación de concentración que nos lleva a la intercepción de la imagen total para un receptor tubular esta dado por:

$$C_{max} = \frac{\sin \phi_r}{\pi \sin \theta_c} \quad \dots(4.8)$$

Y para receptores planos despreciando también el efecto de sombreado del receptor sobre el concentrador:

$$C_{max} = \frac{\sin \phi_r \cos(\phi_r + \theta_c)}{\sin \theta_c} - 1 \quad \dots(4.9)$$

El ángulo θ_c para un alineamiento perfecto de manera que intercepte toda la energía del sol será de

$$\theta_c = 16^\circ$$

El ángulo (ϕ_r) óptimo para absorbedores tubulares esta dado por

$$\phi_{r_{op}} = \pi/2$$

Y para absorbedores planos por

$$\phi_{rop} = 1/2(\pi/2 - \theta_c) \quad \dots (4.10)$$

Lo anterior puede explicarse analizando la proporción de aumento del área efectiva del concentrador y del receptor con respecto al aumento del ángulo (ϕ).

Sabemos que la relación de concentración real, es decir sin despreciar el efecto de sombreado del receptor sobre el concentrador (en concentradores cóncavos) esta dado por:

$$C = \frac{\text{Apertura} - \text{Área sombreada del receptor}}{\text{Área del receptor}} \quad \dots (4.11)$$

De donde se aprecia que para que la relación de concentración aumente es preciso que la expresión del numerador tenga un crecimiento proporcionalmente mayor a la expresión del denominador, lo cual ocurre para ángulos de borde (ϕ_r) menores que el ángulo (ϕ_{rop}) anteriormente definido. Arriba de este valor la expresión del numerador crece proporcionalmente menos que la del denominador debido a que el tamaño del receptor dado por las ecuaciones 4.4 ó 4.5 aumenta proporcionalmente más que la apertura; así mismo el sombreado ocasionado por el receptor crece. Este comportamiento puede observarse en la figura 4.2, donde el valor de (ϕ) esta dado en función de la apertura relativa.

Para un absorbedor tubular tenemos:

$$C = \frac{\text{sen } \phi_r}{\pi \text{ sen } \theta_c}$$

$$\text{donde: } \phi_{rop} = \pi/2 \quad ; \quad C_{max} = 1/\pi \text{ sen } \theta_c \quad ; \quad \theta_c = 16' = 0.2667$$

$$C_{max} = \frac{1}{\pi \text{ sen } 0.2667}$$

$$C_{max} = 68.38 \approx 68$$

Para un absorbedor plano tenemos:

$$C = \frac{\text{sen } \phi_r \cos(\phi_r + \theta_c)}{\text{sen } \theta_c} - 1$$

donde: $\phi_{rop} = \frac{1}{2} \left(-\frac{\pi}{2} - \theta_c \right)$; $\theta_c = 16' = 0.2667$ grados

$$\phi_{rop} = 1/2(90 - 0.2667) = 44.8667$$

sustituyendo

$$C_{max} = \frac{\text{sen}(44.8667) \cos(44.8667 + 0.2667)}{\text{sen}(0.2667)} - 1$$

$$C_{max} = 105.916 \approx 106$$

4.2 Nota: Estos resultados pueden verificarse en la figura

Para un receptor cilíndrico/absorbedor tubular:

$$D = 2r_v \text{sen } 16'$$

$$D = 2r_v \text{sen}(0.2667)$$

$$D = (0.0093)r_v$$

Para una apertura deseada de 2.5 m.

$$a = 2r_v = 2.5\text{m} \quad | \quad r_v = 1.25 \text{ m.}$$

$$D = (0.0093)r$$

$$D = (0.0093)1.25 \text{ m}$$

$$D = 0.01162 \text{ m}$$

$$D = 11.62 \text{ mm}$$

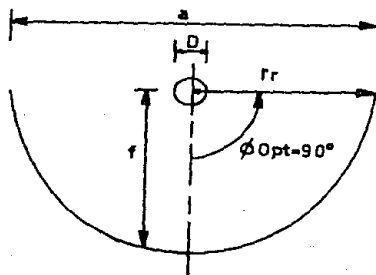


Figura 4.6

Con un receptor como este se obtendria la maxima relacion de concentracion posible para absorbedor tubular, la cual como calculamos anteriormente seria del orden de 69, comprobando con los valores arriba citados.

$$C_{max} = \frac{A_d}{A_r} = \frac{2r}{\pi \times D} = \frac{2(1.25)}{(3.1416)(0.01162)}$$

$$C_{max} = 68.48$$

Notese que A_r es el area del receptor tomando en cuenta todo el perimetro de la circunferencia de dicho receptor.

POSICION DEL RECEPTOR

La posicion del receptor en el area focal puede ser mucho mas critico que el tamaño del receptor para concentradores en una rango de concentracion superior a 20.

Al igual que con el dimensionamiento del receptor, para el efecto de la posicion del absorbedor en la eficiencia

técnica, esta depende de la magnitud de las pérdidas térmicas y del tamaño de la imagen producida por el concentrador.

El factor más importante es la distancia entre el absorbedor y la línea central del colector. Estudios de computadora han demostrado que si un receptor tubular empleado en colectores cilíndrico-parabólicos fuera movido +/- 3% de su largo focal (0.605 del diámetro del receptor) hacia afuera del plano focal, la eficiencia sería reducida a la mitad. Así, la flexibilidad del receptor entre los soportes pudiera ser muy importante.

Estos resultados, junto con los resultados de los estudios del tamaño del receptor, sugieren que los receptores deben ser sobredimensionados para compensar variaciones en el largo focal. Para concentradores parabólicos es también importante que el absorbedor sea paralelo al eje longitudinal. Si existe paralelismo, cualquier desplazamiento lateral, asumiendo que sea pequeño, pudiera posiblemente ser compensado mediante ajuste en el enfoque. Sin embargo, el funcionamiento fuera de eje puede degradarse rápidamente, especialmente a altas temperaturas.

ENFOQUE

El propósito primario del sistema de enfoque es, por supuesto, mantener la apertura del colector apuntando en la dirección óptima para minimizar el ángulo de incidencia y mantener la imagen solar centrada en el absorbedor mientras el sol se mueve a través del cielo.

El sistema óptico lineal para un colector cilíndrico debe enfocar la radiación directa sobre el receptor si el sol se encuentra en el plano central del concentrador, esto es el plano que incluye el eje focal y la línea de vértice del reflector. Para este tipo de sistema es posible guiar el concentrador alrededor de un eje simple para cumplir con este requerimiento. Este eje de rotación puede ser Norte-Sur horizontal o inclinado. Este-Oeste o inclinado y paralelo al eje de la Tierra (en cuyo caso la velocidad de rotación es constante e igual a 15 grados/hora). Existen diferencias significativas tanto en la cantidad de radiación directa incidente como en la calidad de la imagen obtenida con estas formas de orientación.

El incremento en las relaciones de concentración implica incrementos en las temperaturas a las cuales la energía puede ser entregada, así mismo requiere de mayor precisión en la calidad óptica de los materiales reflejantes y medios transparentes (cubiertas protectoras) y en el posicionamiento del sistema óptico. La precisión con la cual el seguidor hace esta tarea puede ser medida por el error de enfoque establecido en términos de grados o radianes que la apertura normal actual permite desviarse de su óptimo.

Estudios hechos con sistemas ópticos de alta calidad para cilindros parabólicos y lentes Fresnel lineales (ambos con absorbedores planos) muestran que la concentración pico cae mientras el error de enfoque se incrementa.

Pruebas de sensibilidad desarrolladas en un prototipo con relación de concentración igual a 20 mostraron que errores de alrededor de +/- 1 grado disminuían la eficiencia térmica en cerca de 20%. En otro prototipo con una relación de concentración igual a 5, un error de +/- 1.5 grados podía ser tolerado antes de que decrementos similares fueran notorios. La necesidad de obtener errores más pequeños y equipo más preciso fue demostrado en un paraboloide de buena calidad con relación de concentración 10 800 y 1.56 m de diámetro donde se encontró que la salida térmica era reducida en un 20% de su óptimo por un error de enfoque de solo 20 minutos y que la salida térmica se iba a cero cuando el error era de 1 grado.

DIMENSIONES FINALES DEL CONCENTRADOR Y EL RECEPTOR

Tomando en cuenta las consideraciones enumeradas en el presente capítulo para optimizar el funcionamiento del colector, sobredimensionaremos el absorbedor a un diámetro de 1 pulgada los valores finales son:

Diámetro del receptor	$D_r = 0.0254 \text{ m}$
Apertura del concentrador	$a = 2.5 \text{ m}$
Angulo de borde optimo	$\phi_{\text{prop}} = 90^\circ$
Largo focal ($a = 4f$)	$f = 0.625 \text{ m}$
Diámetro de la cubierta de vidrio del receptor	$D_{cr} = 0.0508 \text{ m}$
Largo del concentrador	$L = 5 \text{ m}$

Relacion de concentracion real.

$$C = \frac{\text{Apertura - Area sombreada por el receptor}}{\text{Area del receptor}}$$

$$C = \frac{a - D_r}{\pi \times D_r}$$

$$C = \frac{2.5 - 0.0254 \text{ m}}{3.1416 \times 0.0254 \text{ m}}$$

$$C = 31.01$$

OPERACION TERMICA DEL COLECTOR

El diseño y análisis de todos los sistemas térmicos solares requieren de familiaridad con los fundamentos de la Termodinámica y la Transferencia de Calor. En este capítulo se hará una breve introducción al tema que nos permita poder desarrollar los cálculos necesarios para conocer el funcionamiento del colector solar desde el punto de vista térmico.

Siempre que exista una diferencia de temperatura, la energía puede ser transferida de una región de alta temperatura a otra más baja. De acuerdo a los conceptos termodinámicos, la energía que se transfiere como resultado de una diferencia de temperatura es llamada "calor". Aún cuando la Termodinámica clásica trate con energía y transferencia de calor, sus leyes pueden definir solo sistemas que se encuentran en equilibrio. Las leyes de la Termodinámica pueden por lo tanto, predecir la cantidad de energía requerida para cambiar un sistema de un estado de equilibrio a otro, pero no pueden predecir con que rapidez ocurrirá el cambio. La ciencia de la Transferencia de Calor suplementa a la primera y segunda leyes de la Termodinámica Clásica proporcionando métodos de análisis que pueden utilizarse para predecir tasas de transferencia de energía y distribuciones de temperatura.

Para ilustrar la diferencia en el tipo de información que puede obtenerse de un análisis termodinámico y uno de transferencia de calor, consideremos el calentamiento de un cilindro metálico colocado en un tanque de agua caliente. La Termodinámica nos podrá decir la temperatura final después de que los dos sistemas alcancen el equilibrio. Por otra parte, un análisis de transferencia de calor puede predecir la tasa de transferencia de calor del agua al cilindro y de esta información calcular la temperatura del cilindro así como la del agua como una función del tiempo.

A continuación se analizan las tres principales formas de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION

El fenómeno de transferencia de calor por conducción es un 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 estos. El fenómeno de conducción es el único modo de transferencia de calor en cuerpos sólidos opacos.

Al presentarse un gradiente de temperatura en un cuerpo, el calor, de acuerdo a la segunda ley de la Termodinámica, será transferido de la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. En estas circunstancias se dice que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura en el área A a través de la cual es transferido.

$$q \approx A \left(- \frac{dT}{dx} \right) \quad \dots (5.1)$$

Donde $T(x)$ es la temperatura y x es la distancia en la dirección del flujo de calor. La tasa de flujo de calor dependerá de la capacidad que tenga el material de conducir, esta propiedad física recibe el nombre de conductividad térmica "k", por lo tanto, para un medio homogéneo, la ecuación para transferencia de calor por conducción puede ser cuantitativamente expresada como

$$q_k = - kA \frac{dT}{dx} \quad \dots (5.2)$$

El signo negativo es una consecuencia de la segunda ley de la Termodinámica, la cual establece que el calor debe fluir en la dirección de la región de temperatura más baja. Esta ecuación es llamada Ley de Fourier de la conducción de calor y sirve para definir la conductividad térmica.

La conductividad térmica es una propiedad física que depende del material y comúnmente varía en forma lineal en función de la temperatura. Su valor se obtiene generalmente en forma empírica y se pueden consultar tablas en libros de Transferencia de calor. Si el área en la ecuación que define a la Ley de Fourier esta dada en metros cuadrados [m^2], la temperatura en grados Kelvin [$^{\circ}K$], x en metros [m] y la tasa de flujo de calor en Watts [W], k tiene como unidad el Watt entre metro por grado Kelvin [$W/m^{\circ}K$]. En el sistema inglés k esta dada por [$Btu/h \cdot pie^{\circ}F$].

Paredes Planas

Una aplicación importante de la Ley de Fourier es el caso de la transferencia de calor a través de una pared, como se muestra en la figura 5.1.

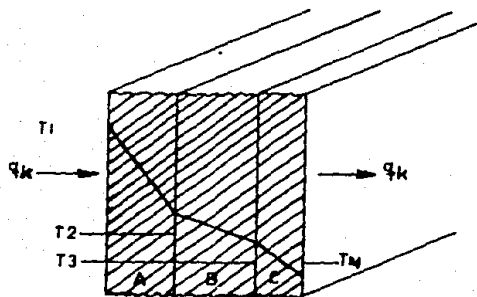


Figura 5.1 Conducción de calor en una dimensión a través de una pared compuesta.

Cuando ambas superficies de la pared poseen una distribución de temperaturas uniforme, el flujo de calor ocurrirá en una sola dirección perpendicular a las superficies de la pared. Si la conductividad de calor es uniforme, la ecuación de Fourier toma la forma:

$$q_k = - \frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_1) \quad \dots (5.3)$$

donde: Δx es el grosor de la pared

T_1 la temperatura en la superficie donde $x = 0$

T_2 la temperatura en la superficie donde $x = \Delta x$

Ejemplo:

Consideremos una pared de 2 m de alto por 4 de largo construida de ladrillo con un espesor de 20 cm. Las temperaturas en una y otra superficie son 60°C y 30°C respectivamente. La conductividad térmica del ladrillo es igual a 0.5 W/m°C. Calcule la transferencia de calor a través de la pared.

Solución:

En la figura 5.2 podemos ver la representación física del problema con sus valores respectivos.

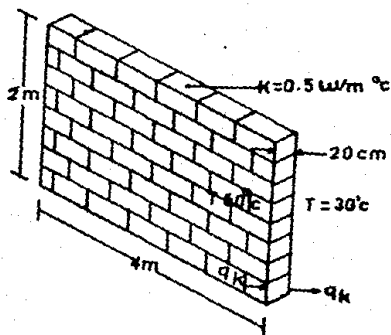


Fig. 5.2

Sustituyendo valores en la ecuación:

$$q_k = - \frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_1)$$

$$q_k = - \frac{0.5(4)(2)}{0.2} (60 - 30)$$

$$q_k = - 600 \text{ Watts}$$

Transferencia por conducción en cilindros.

La conducción de calor a través de tubos es de gran importancia en muchas de las aplicaciones de la ingeniería solar. Consideremos un cilindro hueco largo con radio interior " r_i ", radio exterior " r_o " y largo L . La temperatura en la superficie interna es T_i y la externa T_o .

Si el cilindro es suficientemente largo para despreciar los efectos de orilla, el calor fluye solo en la dirección radial. Entonces a una distancia radial r el área a través de la cual se conduce el calor en el sistema de coordenadas cilíndricas es $A_r = 2\pi r L$ y de la ley de Fourier tenemos que:

$$q_k = \frac{2\pi k L (T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} \quad \dots (5.4)$$

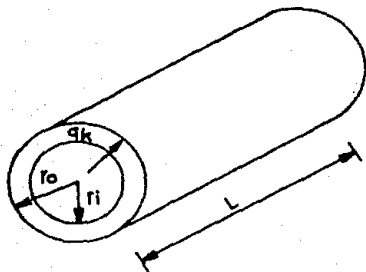
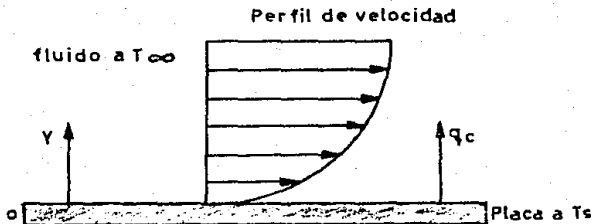


Figura 5.3

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION

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. Consideremos una placa superficial que mantiene a una temperatura T_s , como se muestra en la figura 5.4, la cual disipa calor hacia un fluido cuya temperatura es T_o .



5.4 Transferencia de calor por convección.

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 simplemente, 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 aire. De aquí que las propiedades del fluido tienen 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 ($v=0$), el calor se transfiere por conducción solamente en este plano del fluido. Sin embargo, aun cuando el calor disipado por la placa puede evaluarse mediante la ecuación de la conducción, el gradiente de temperatura en el fluido depende de las características a menudo complejas del flujo de este. Por consiguiente, es más conveniente calcular el flujo de calor disipado por el sistema en términos de la diferencia total de temperaturas entre la superficie de aquel y el fluido. Es decir:

$$q_c = h_c (T_s - T_{\infty}) \quad \dots (5.5)$$

Donde h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección. Sus unidades en el SI son $W/m^2 \cdot ^\circ K$. La ecuación anterior se conoce como la ley de Newton del enfriamiento.

El fenómeno de transferencia de calor por convección usualmente se clasifica como convección forzada o como convección libre o natural. En el primer caso el fluido se hace pasar sobre el sistema mediante la acción de un agente externo como un ventilador o una bomba. Por otra parte, el movimiento del fluido resulta en el segundo caso como una consecuencia de los gradientes en densidad que experimenta este, al estar en contacto con una superficie a mayor temperatura y en presencia de un campo gravitacional. 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 de termosifón.

De lo anterior se desprende que aun cuando la apariencia de la ecuación de Newton para la convección es muy sencilla, el proceso de transferencia de calor por convección es muy complejo, haciendo que el coeficiente h_c dependa de muchos factores. Entre otros, cabe mencionar que este depende de la geometría del sistema, además de las propiedades físicas y características del movimiento de un fluido. En la práctica se determina el coeficiente de calor mediante el uso de correlaciones empíricas o recurriendo a la experimentación.

Convección forzada en el interior de un tubo.

Los coeficientes de transferencia de calor por convección para flujo interno en tubos con secciones geométricas comunes han sido ampliamente estudiados y se pueden encontrar sus ecuaciones fácilmente en libros de transferencia de calor. En este caso nos interesa la convección forzada en el interior de un tubo redondo. Para flujo turbulento ($Re > 2200$) se sugiere:

$$Nu = \frac{(f/8) Re Pr}{1.07 + 12.7 \sqrt{f/8} (Pr^{1/4} - 1)} \quad \dots (5.6)$$

donde: Nu = número de Nusselt
 Re = número de Reynolds
 Pr = Número de Prandtl
 f = factor de fricción para tubos

El factor de fricción f para tubos lisos o semilisos está dado por

$$f = [0.79 \ln Re - 1.64]^{-2} \dots (5.7)$$

El significado físico y su ecuación asociada para Nu , Re y Pr son los siguientes.

Número de Nusselt

De la descripción del mecanismo de transporte de energía por convección, se recuerda que tanto la conducción como el transporte de masa juegan un papel importante. Puesto que la conductividad térmica de los fluidos es relativamente pequeña, excepto para los metales líquidos, la rapidez de la transferencia de energía depende principalmente del movimiento de mezcla de las partículas del fluido. Se entiende que para transferir calor por convección a través de un fluido a una rapidez dada, se necesita un gradiente de temperatura mayor en una región de baja velocidad que en una región de alta velocidad.

El número de Nusselt resulta de la combinación del coeficiente de transferencia de calor por convección hc , la longitud significativa L y la conductividad térmica del fluido k_f .

$$Nu = hc \frac{L}{k_f} \dots (5.8)$$

El número de Nusselt puede interpretarse físicamente como la razón del gradiente de temperatura del fluido en contacto inmediato con la superficie al gradiente de temperatura de referencia $(T_s - T_o)/L$. En la práctica el número de Nusselt es una medida conveniente del coeficiente de transferencia de calor por convección debido a que, una vez conocido su valor, el coeficiente de transferencia de calor por convección puede calcularse de la relación.

$$hc = Nu \frac{k_f}{L} \dots (5.9)$$

Número de Prandtl

El número de Prandtl es una función de las propiedades del fluido solamente y se define como la razón de la viscosidad cinemática del fluido a la difusividad térmica del mismo. esto es:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k_f} \quad \dots (5.10)$$

Para flujo dentro de un tubo, así como sobre una placa plana, los perfiles de velocidad y temperatura son similares para fluidos que tienen un número de Prandtl igual a la unidad. Cuando el número de Prandtl es más pequeño, el gradiente de temperatura cerca de la superficie tiene menor pendiente que el gradiente de velocidad y para fluidos cuyos números de Prandtl son mayores que uno, el gradiente de temperatura tiene mayor pendiente que el gradiente de velocidad.

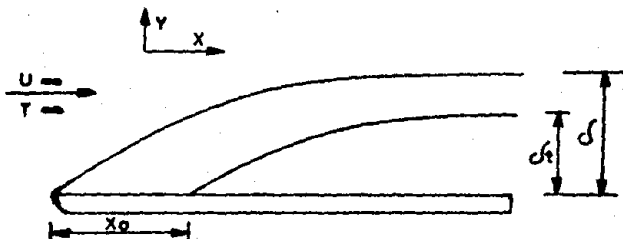


Figura 5.5 Capas límite hidrodinámica y térmica en una placa plana. El calentamiento inicia en $x = 0$.

Número de Reynolds

Un flujo laminar se define como aquel en que el fluido se mueve en capas o láminas, deslizándose suavemente unas sobre otras y existiendo solo, intercambio de cantidad de movimiento molecular entre ellas. Cualquier tendencia hacia la inestabilidad y la turbulencia se amortigua por la acción de las fuerzas cortantes viscosas que se oponen al movimiento relativo de capas de fluido adyacentes entre sí. Por otro lado, en un flujo turbulento, el movimiento de las partículas es muy errático y se tiene un intercambio transversal de cantidad de movimiento muy intenso.

El número de REYNOLDS permite caracterizar la naturaleza del escurrimiento, es decir, si se trata de un flujo laminar o de un flujo turbulento.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Donde:

ρ = densidad del fluido
 v = velocidad promedio del fluido
 D = diámetro del tubo
 μ = viscosidad del fluido

Para tuberías convencionales, el flujo cambiará de laminar a turbulento cuando el número de Reynolds se encuentre en el rango de 2000 a 4000.

Transferencia de calor por convección debida al viento

En general todos los colectores solares están expuestos al viento y con ello a pérdidas importantes por convección. Para flujo de aire sobre un tubo sencillo se recomienda.

$$Nu = 0.32 + 0.43 (Re)^{0.52} \quad \dots (5.11)$$

para $0.1 < Re < 1000$ y

$$Nu = 0.24 (Re)^{0.6} \quad \dots (5.12)$$

para $1000 < Re < 50000$

Los valores calculados a partir de estas dos ecuaciones deben ser incrementados en aproximadamente un 25 % para colectores expuestos plenamente al viento.

El coeficiente de transferencia de calor por convección hacia el ambiente h_w se encontrará entonces con la ecuación.

$$h_w = Nu \frac{k \text{ (aire)}}{D \text{ (cubierta)}} \quad \dots (5.13)$$

Donde k es el coeficiente de conductividad térmica y D el diámetro.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION

Abundando un poco más acerca de los aspectos de la radiación solar presentados en el capítulo I, haremos una síntesis de los fenómenos de transmisión, reflexión y absorción de energía que se llevan a cabo en un colector de energía solar.

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 a si esta es transportada por ondas electromagnéticas o por fotones, sí se sabe, sin embargo, que la radiación viaja en el espacio a la velocidad de la luz.

Para la mayor parte de las aplicaciones de energía solar solo la radiación térmica es importante, ésta es emitida por cuerpos en virtud de su temperatura; los átomos, moléculas o electrones son elevados a estados de excitación que al regresar espontáneamente a estados de energía menores, emiten energía en forma de radiación electromagnética distribuida en un rango de longitudes de onda. La radiación térmica está comprendida entre 0.2 y 100 micras dentro del espectro de radiación electromagnética. La energía solar que recibe la superficie de la Tierra se encuentra en el intervalo de 0.3 a 25 micras aproximadamente.

El cuerpo negro.

Un cuerpo negro es el que emite y absorbe a cualquier temperatura y en cualquier longitud de onda la máxima cantidad posible de radiación. Es decir, el cuerpo negro es un estándar con el que pueden compararse las características de radiación de otros cuerpos. Puesto que un cuerpo negro es un absorbedor perfecto por definición, toda la radiación que incide sobre éste es absorbida sin importar la longitud de onda. En consecuencia, ninguna fracción de esta radiación es reflejada o transmitida a través del cuerpo negro. Es precisamente esta ausencia de reflexión la que da origen a su denominación de "cuerpo negro".

Añadiendo acerca de las propiedades del cuerpo negro, puede demostrarse a partir de la segunda ley de la Termodinámica que existe un máximo de energía radiante capaz de ser emitida a una temperatura y a una longitud de onda dadas. Así, la potencia emisiva espectral o monocromática que emite un cuerpo negro puede evaluarse mediante la ley de Planck. Para el vacío, en el que el índice de refracción es igual a 1 la ley de Planck toma la forma,

$$E_{\lambda b} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \dots (5.14)$$

donde

$E_{\lambda b}$ = potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro a una temperatura y a una longitud de onda dadas, W/m² m.

λ = longitud de onda en m.

T = temperatura absoluta del cuerpo negro, K.

$$C_1 = 3.7405 \times 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$C_2 = 0.0143879 \text{ km.}$$

La potencia emisiva total de un cuerpo negro a lo largo de todo el espectro de longitudes de onda puede calcularse integrando la ley de Planck. Es decir,

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda b} d\lambda = \sigma T^4 \dots (5.15)$$

donde (σ) es la constante de Stefan-Boltzmann y es igual a

$$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre dos superficies.

Una vez establecidos los principales parámetros de radiación conviene ahora analizar el intercambio de energía radiante entre dos o más cuerpos a distintas temperaturas. Básicamente el problema consiste en determinar la cantidad de radiación que sale de uno de ellos y es interceptada por el otro. Para mantener la simplicidad de las ecuaciones lineales es conveniente definir un coeficiente de transferencia de calor por radiación. Si definimos este coeficiente de manera que la radiación entre dos superficies este dada por.

$$Q = A_r h_r (T_2 - T_1) \dots (5.16)$$

Entonces el coeficiente de radiación hr:

$$hr = \frac{\sigma (T_2^2 + T_1^2) (T_2 + T_1)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \epsilon_2) A_1}{\epsilon_2 A_2}} \quad \dots (5.17)$$

donde:

σ = constante de Stefan-Boltzmann

ϵ = emitancia del material

T_1 y T_2 = temperaturas absolutas de ambas superficies

A_1 y A_2 = áreas de ambas superficies

F_{12} = factor de forma que define la fracción de energía radiante que sale de la superficie 1 y es interceptada por la 2. Si A_1 y A_2 son iguales entonces $F_{12} = 1$.

Es importante notar que si las áreas A_1 y A_2 no son iguales, entonces el valor numérico de hr depende de si se va a usar con A_1 o con A_2 .

Cuando los valores de T_1 y T_2 son bastante cercanos, no es difícil estimar \bar{T} promedio aun sin conocer el valor actual tanto de T_1 y T_2 . Una vez que \bar{T} es estimada, las ecuaciones de transferencia de calor por radiación son reducidas a ecuaciones lineales que pueden ser fácilmente resueltas simultáneamente con las ecuaciones lineales de conducción y convección. Si se requiere mayor precisión, se puede seguir iterando.

Coeficiente de radiación del colector al ambiente.

Otra variable importante para conocer el funcionamiento del colector es el intercambio de radiación entre la superficie del receptor y el ambiente. El firmamento puede ser considerado como un cuerpo negro a una cierta temperatura equivalente. La temperatura del cielo puede ser relacionada a la temperatura local del aire mediante una simple ecuación:

$$T_{\text{cielo}} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad \dots (5.18)$$

Para ciertas condiciones de cielo despejado ambas temperaturas pueden considerarse equivalentes.

El coeficiente de transferencia de calor por radiación de la cubierta del colector al ambiente $h_{r,c-a}$ es entonces igual a

$$h_{r,c-a} = \epsilon_c \sigma (T_c^2 + T_s^2)(T_c + T_s) = \epsilon_c \sigma 4\bar{T}^3 \quad \dots (5.19)$$

donde:

ϵ_c = emitancia de la cubierta

σ = constante de Stefan-Boltzmann

T_c = temperatura absoluta de la cubierta

T_s = temperatura del cielo o del ambiente

\bar{T} = temperatura absoluta promedio igual a $(T_c + T_s)/2$

Eficiencia óptica

Antes de calcular la eficiencia total del colector solar, haremos un análisis de los principales aspectos referentes a la reflexión, transmisión y absorción de la radiación. Estos inciden fuertemente en la eficiencia total y se deben principalmente a las propiedades inherentes a cada material así como a la calidad del diseño y fabricación del colector.

Los cuatro puntos más importantes son la reflectancia especular (ρ) del reflector o concentrador, la transmitancia (τ) de la cubierta del receptor, la absorptancia (α) de radiación solar incidente en el receptor y el factor de intercepción (η) de radiación solar en el receptor.

Reflectancia especular

Los colectores de enfoque requieren del uso de materiales reflejantes para dirigir la componente directa de la radiación solar en el blanco del receptor. Esto requiere de superficies con alta reflectancia especular de la radiación en el espectro solar.

Podemos definir a la radiación especular como aquella que se presenta en un espejo, esto es, el ángulo polar incidente es igual al ángulo polar reflejado y los ángulos azimutales difieren por 180 grados.

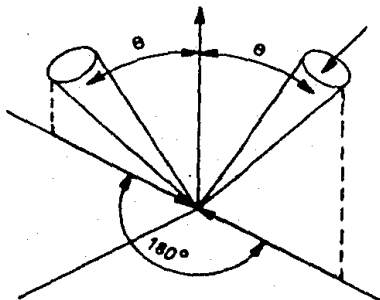


Figura 5.6 Radiación especular.

Las superficies especulares son generalmente metales o revestimientos metálicos sobre sustratos suaves. Por ejemplo para nuestro diseño consideraremos un colector de fibra de vidrio con estructura de hierro y revestido con Nylar. En este caso la naturaleza del sustrato, excepto su uniformidad y firmeza, son irrelevantes; por otro lado la calidad del revestimiento es de gran importancia en la eficiencia óptica del colector así como por los problemas de mantenimiento, entre ellos la degradación por oxidación, abrasión, polvo, etc, a los que pueda ser en mayor o menor medida sensible. Algunos reflectores pueden ser cubiertos con capas delgadas de materiales protectores para incrementar su durabilidad.

La tabla 5.1 muestra algunos valores típicos de reflectancias especulares de superficies.

SUPERFICIE	REFLECTANCIA
Plata electrodepositada, nueva	0.96
Aluminio alta pureza, nueva limpia	0.91
Aluminio procesado Brytal, alta pureza	0.89
Vidrio blanco plateado (espejo)	0.88
Aluminio cubierto de SiO ₂ , limpio	0.87
Acrílico 3M, aluminizado posterior, nuevo	0.86
Acrílico 3M, aluminizado posterior	0.85
Aluminio comercial procesado tipo Alzac	0.85
Mylar tipo C aluminizado	0.76

Tabla 5.1

Transmitancia de la cubierta del receptor

En el caso de superficies opacas la suma de la absorptancia y la reflectancia debe ser igual a la unidad. Sin embargo, si la superficie es transparente a la radiación incidente, la suma de la absorptancia, la reflectancia y la transmitancia debe ser igual a la unidad.

La teoría electromagnética permite predecir la reflectancia monocromática en la dirección especular de superficies pulidas que se encuentran física y químicamente limpias. La energía radiante que incide o emana de una superficie especular puede descomponerse en dos componentes de polarización: una paralela y otra perpendicular al plano de incidencia. Así, la reflectancia especular correspondiente a cada componente se define como el cociente de la intensidad monocromática reflejada a la incidente. La figura 5.7 define los ángulos que se emplearán en el análisis de la reflexión y la transmisión de la radiación especular.

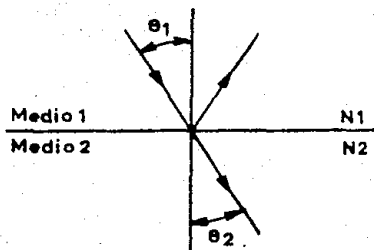


Figura 5.7 Angulos de incidencia y refracción en medios con índice de refracción n_1 y n_2 .

El ángulo θ_i se conoce como el ángulo de incidencia, mientras que el ángulo θ_r corresponde al ángulo de refracción. Ambos están relacionados entre sí con los índices de refracción de los dos medios por la ley de Snell. Esto es,

$$\frac{\text{sen } \theta_r}{\text{sen } \theta_i} = \frac{n_1}{n_2} = n \quad \dots (5.20)$$

En donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de cada una de las dos sustancias que forman la interfase y n es el cociente de ellos.

Las componentes de polarización perpendicular (\perp) y paralela (\parallel) de la reflectancia especular pueden calcularse, respectivamente, por las expresiones.

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2 (\theta_r - \theta_i)}{\text{sen}^2 (\theta_r + \theta_i)} \quad \dots (5.21)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2 (\theta_r - \theta_i)}{\tan^2 (\theta_r + \theta_i)} \quad \dots (5.22)$$

y para la reflectancia total el promedio se obtiene de,

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2} [r_{\perp} + r_{\parallel}] \quad \dots (5.23)$$

Para radiación con incidencia normal, tanto θ_i como θ_t son cero y las ecuaciones 5.20 y 5.23 se combinan dando como resultado.

$$r(0) = \frac{I_r}{I_i} = \left[\frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \right] \quad \dots (5.24)$$

Si un medio es aire, con índice de refracción cercano a la unidad, la ecuación se convierte en

$$r(0) = \frac{I_r}{I_i} = \left[\frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \right] \quad \dots (5.25)$$

Reflexión de la radiación en la cubierta

Para analizar la transmitancia a través de la cubierta consideremos que ésta se encuentra entre dos interfaces de aire y que la absorción es despreciable, $(1-r)$ del haz de radiación incidente a la cubierta llega a la segunda interfase, de esta cantidad una pasa a través de la segunda interfase y una fracción se refleja de regreso hacia la primera. El proceso continúa para cada componente de polarización.

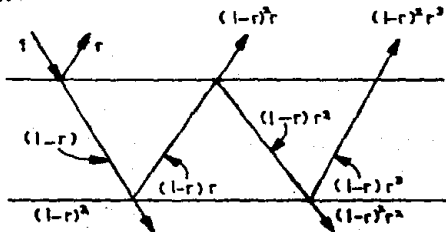


Figura 5.8 Transmisión a través de una cubierta.

Sumando los flujos de radiación y para H cubiertas todas del mismo material se tiene que:

$$\tau_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \frac{1 - r_L}{1 + (2N - 1)r_L} + \frac{1 - r_H}{1 + (2N - 1)r_H} \quad \dots (5.26)$$

Donde el subíndice r nos indica que solo las pérdidas por reflexión han sido consideradas.

Absorción de la radiación en la cubierta.

La absorción de la radiación en un medio parcialmente transparente está descrita por la ley de Bouguer, la cual asume que la radiación absorbida es proporcional a la intensidad local en el medio y la distancia x que la radiación viaja en éste.

$$dI = -I K dx \quad \dots (5.27)$$

Donde K es una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de extinción y se considera constante en todo el espectro solar. Integrando a través de la trayectoria actual en el medio, de 0 a L/cos θ_z , se obtiene

$$\tau_a = \frac{I}{I_0} = e^{-KL/\cos \theta_z} \quad \dots (5.28)$$

Donde el subíndice a nos indica que solo se han considerado las pérdidas por absorción. Para vidrio el valor de K varía desde:

$$K = 4 \text{ m}^{-1} \quad \text{hasta aproximadamente}$$

$$K = 32 \text{ m}^{-1}$$

Transmitancia, reflectancia y absorptancia de la cubierta.

La transmitancia, reflectancia y absorptancia de una cubierta sencilla, tomando en cuenta tanto las pérdidas por reflexión como por absorción, pueden ser determinadas por técnicas de trazado similares a las utilizadas en la figura 5.8.

Las propiedades ópticas transmitancia (τ), absorptancia (α) y reflectancia (ρ) se encuentran promediando las componentes paralela y perpendicular.

$$\tau = \frac{\tau_a}{2} \left[\left(\frac{1 - r_H}{1 + r_H} \right) \left(\frac{1 - r_H^2}{1 - (r_H \tau_a)^2} \right) + \left(\frac{1 - r_V}{1 + r_V} \right) \left(\frac{1 - r_V^2}{1 - (r_V \tau_a)^2} \right) \right] \dots (5.29)$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left[r_H (1 + \tau_a \tau_H) + r_V (1 + \tau_a \tau_V) \right] \dots (5.30)$$

$$\alpha = \frac{(1 - \tau_a)}{2} \left[\left(\frac{1 - r_H}{1 - r_H \tau_a} \right) + \left(\frac{1 - r_V}{1 - r_V \tau_a} \right) \right] \dots (5.31)$$

La ecuación de la transmitancia de la cubierta de un colector puede simplificarse considerando que a menudo (τ_a) es mayor a 0.9 y que r es del orden de 0.1, simplificando se tiene que para una sola cubierta

$$\tau = \tau_a \tau_r \dots (5.32)$$

Similarmente es posible reducir a expresiones más sencillas la absorptancia y reflectancia de la cubierta.

$$\alpha = 1 - \tau_a \dots (5.33)$$

$$\rho = \tau_a (1 - \tau_r) = \tau_a - \tau \dots (5.34)$$

Absortancia del receptor y producto transmitancia-absortancia

La absorptancia es una propiedad de los cuerpos y se define como la fracción de la radiación incidente que es retenida y absorbida por la superficie.

Los colectores solares deben tener alta absorptancia para radiación en el espectro solar. Al mismo tiempo, estos pierden energía a través de una combinación de mecanismos incluyendo radiación térmica de la superficie absorbidora hacia el medio y es deseable que la emitancia de onda larga de la superficie sea tan baja como sea posible. Una superficie con estas características es llamada superficie selectiva.

A continuación se enlistan algunos de los materiales más usados y sus respectivos valores de emitancia y absorptancia.

SUPERFICIE	ABSORPTANCIA	EMITANCIA
"Negro de Nickel" sobre hierro galvanizado	0.81	0.16 - 0.18
"Negro de Cobre" sobre cobre, tratando al Cu con una solución de NaOH y NaClO ₂	0.89	0.17
Ebanol C sobre Cobre	0.90	0.16
Cromo negro electrodepositado sobre acero	0.95	0.09
CuO sobre Aluminio	0.93	0.11
CuO electrodepositado sobre Níquel	0.81	0.17
"Negro de Níquel", dos capas de Níquel electrodepositado sobre acero dulce.	0.94	0.07

Tabla 5.2 Valores de emitancia y absorptancia

Un parámetro sumamente importante en el diseño y evaluación de los colectores solares es el producto $(\tau\alpha)$ del conjunto cubierta-tubo de absorción. Como se muestra en la figura 5.9, una fracción $(\tau\alpha)$ de la radiación incidente sobre la cubierta del colector se absorbe en el tubo absorbedor, mientras que una fracción $\tau(1-\alpha)$ regresa de nuevo por reflexión, probablemente difusa, hacia la cubierta. Una cantidad $\tau(1-\alpha)\rho_d$ se refleja de nuevo en la cubierta hacia la placa de absorción. En esta última se absorbe una fracción $\tau(1-\alpha)\rho_d$ y el proceso continúa, así la energía finalmente absorbida es

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha)\rho_d} \quad \dots (5.35)$$

A través de la aplicación de esta ecuación se ha notado que el valor de $(\tau\alpha)$ es muy cercano a 1.01 veces el producto de (τ) por (α) . Esta es una aproximación razonable en la práctica para la mayoría de los colectores solares.

$$(\tau\alpha) = 1.01 \tau\alpha \quad \dots (5.36)$$

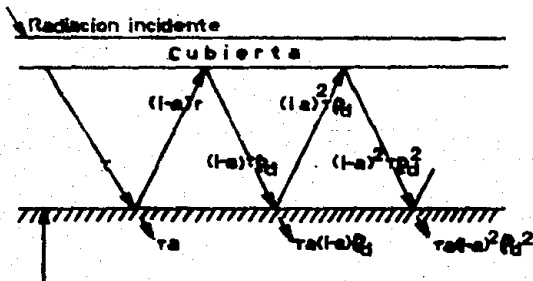


Figura 5.9

Cálculo de la eficiencia óptica

Sabemos que η óptica es igual al producto de $\rho \tau \alpha$.
 a continuación se efectúa el desarrollo y obtención de los valores:

ρ es la reflectancia especular del concentrador y se obtiene de la tabla 5.1 para un concentrador recubierto con Mylar.

$$\rho = 0.76$$

$(\tau \alpha)$ es el producto transmitancia-absortancia, primero calcularemos la transmitancia de la cubierta del receptor.

La reflectancia de la cubierta para radiación con incidencia normal, siendo uno de los medios aire y el otro la cubierta de vidrio con índice de refracción $n = 1.526$ para radiación en el espectro solar.

$$r(0) = \left[\frac{1.526 - 1}{1.526 + 1} \right]^2 = 0.0434$$

La transmitancia para la cubierta tomando en cuenta solo las pérdidas por reflexión y con una sola cubierta.

$$\tau_{rN} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - r}{1 + (2N-1)r_{\perp}} + \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + (2N-1)r_{\parallel}} \right]$$

Dado que la radiación es normal $r_{\perp} = r_{\parallel} = r(0)$

$$\tau_{r1} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - 0.0434}{1 + (2(1)-1)(0.0434)} + \frac{1 - 0.0434}{1 + (2(1)-1)(0.0434)} \right]$$

$$\tau_{r1} = \frac{1}{2} \left[\frac{0.9566}{1.0434} + \frac{0.9566}{1.0434} \right]$$

$$\tau_{r1} = 0.9168$$

La transmitancia de la cubierta tomando en cuenta las pérdidas por absorción, con un coeficiente de extinción K (igual a 32 m^{-1}) (vidrio blanco) y un grosor de 2.3 mm , el ángulo de incidencia es 0 grados (radiación normal).

$$\tau_a = e^{-KL/\cos \theta_z}$$

$$\tau_a = e^{-(32)(0.0023)/\cos(0)}$$

$$\tau_a = e^{-0.0736/1}$$

$$\tau_a = 0.929$$

La transmitancia total se encuentra de la ecuación.

$$\tau = \tau_r \tau_a$$

$$\tau = (0.9168)(0.929)$$

$$\tau = 0.852$$

La absorptancia del receptor se obtiene de la Tabla 5.2 para tubo recubierto de "cobre negro" (tratamiento de cobre con una solución de NaOH y NaClO_2). El valor de la absorptancia es bueno y su precio no es muy elevado.

$$\alpha = 0.89$$

El producto transmitancia-absorptancia se obtiene de la ecuación:

$$(\tau\alpha) = 1.01 \tau\alpha$$

sustituyendo valores

$$(\tau\alpha) = 1.01(0.852)(0.89)$$

$$(\tau\alpha) = 0.766$$

El factor de intercepción de la radiación es $\mathcal{D} = 1$ si el 100 % de la radiación que llega al concentrador es reflejado sobre el blanco del receptor. Suponiendo un acabado liso de

la superficie del concentrador, correcto funcionamiento del sistema de seguimiento y que el sobredimensionamiento del receptor sea efectivo entonces.

$$\delta = 1.0$$

La eficiencia óptica será entonces igual a ,

$$\eta_{\text{óptica}} = \rho \tau \alpha \quad \dots (5.37)$$

$$\eta_{\text{óptica}} = (0.76)(1.0)(0.766)$$

$$\eta_{\text{óptica}} = 0.582$$

La radiación absorbida por unidad de apertura para el día 17 de Enero.

$$S_{\text{día}} = \sum I_{\text{bt}} \rho \tau \alpha$$

$$S_{\text{día}} = (8.438)(0.582) \text{ kWh/m}^2$$

$$S_{\text{día}} = 4.911 \text{ kWh/m}^2$$

Cálculo del coeficiente de pérdidas térmicas totales U_L

Basados en lo expuesto en el presente capítulo con respecto a la transferencia de calor calcularemos el coeficiente de pérdidas térmicas totales (U_L) a partir de los siguientes datos.

Temperatura en la superficie del tubo receptor	= 150 °C
Diámetro del tubo receptor	= 0.0254 m
Diámetro de la cubierta de vidrio	= 0.0508 m
Emitancia de la superficie del receptor	= 0.17
Emitancia de la cubierta de vidrio	= 0.89
Velocidad del viento	= 5 m/s
Temperaturas del aire y del cielo	= 20 °C

El espacio entre el tubo absorbedor y la cubierta se encuentra vacío.

Para éstas condiciones el procedimiento para hallar el coeficiente U se hará como se muestra en la figura 5.10.

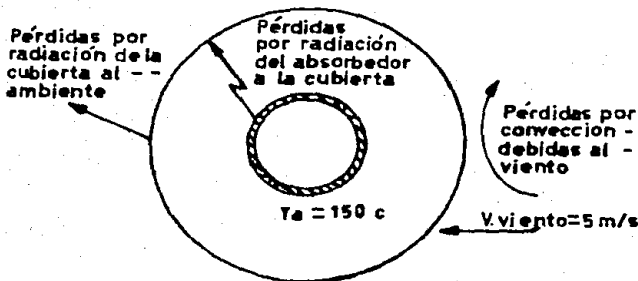


Figura 5.10

Primero calculemos el coeficiente de pérdidas por convección debidas al viento, para ello es necesario encontrar el número de Reynolds en las inmediaciones de la cubierta del receptor. Supongamos para iniciar las iteraciones una temperatura de la cubierta de 50°C y por lo tanto una temperatura promedio del aire en la zona inmediata al receptor de 35°C.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{(1.16)(5)(0.0508)}{1.86 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 15840$$

El número de Nusselt para $Re > 1000$ como ya vimos está dado por la ecuación

$$Nu = 0.24 (Re)^{0.6}$$

$$Nu = 0.34 (15840)^{0.5}$$

$$Nu = 79.45$$

Incrementando un 25 % para colectores expuestos plenamente al viento.

$$Nu = 1.25 (79.45)$$

$$Nu = 99.32$$

$$hw = Nu \frac{k \text{ aire}}{D \text{ cubierta}}$$

$$hw = 99.32 \frac{0.0265}{0.0508}$$

$$hw = 51.81 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

El coeficiente de radiación de la cubierta al ambiente es

$$hr, c-a = \epsilon_c (T_c^2 + T_s^2)(T_c + T_s) = \epsilon_c \bar{T}^3$$

en donde

$$\epsilon_c = 0.88$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$$

$$T_c = 50 \text{ C} + 273 = 323 \text{ Kelvin}$$

$$T_s = 20 \text{ C} + 273 = 293 \text{ Kelvin}$$

$$\bar{T} = \frac{323 + 293}{2} = 308 \text{ Kelvin}$$

por lo tanto

$$hr, c-a = (0.88) (5.67 \times 10^{-8}) (4) (308)^3$$

$$hr, c-a = 5.83 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

El coeficiente de radiación entre el tubo receptor y el tubo de vidrio de la cubierta será como se analizó previamente.

$$hr_{r-c} = \frac{\sigma (T_x^2 + T_l^2) (T_x + T_l)}{\frac{1 - \epsilon_l}{\epsilon_l} + \frac{1}{F_{lx}} + \frac{(1 - \epsilon_x) A_l}{\epsilon_x A_x}}$$

siendo

$$T_l = 150^\circ\text{C} + 273 = 423^\circ\text{K}$$

$$T_x = 50^\circ\text{C} + 273 = 323^\circ\text{K}$$

$$\epsilon_l = 0.17$$

$$\epsilon_x = 0.88$$

$$A_l = 0.0254$$

Dado que A_l y A_x poseen la misma geometría, se consideran solo los diámetros respectivos.

$$A_x = 0.0508$$

$$F_{lx} = 1$$

Ya que toda la energía emitida por el área 1 es interceptada por la 2

$$hr_{r-c} = \frac{5.67 \times 10^{-8} (323^2 + 423^2) (323 + 423)}{\frac{1 - 0.17}{0.17} + \frac{1}{1} + \frac{1 - 0.88}{0.88} \times \frac{0.0254}{0.0508}}$$

$$hr_{r-c} = \frac{11.98}{5.95}$$

$$hr_{r-c} = 2.013 \quad \text{W/m}^2 \text{C}$$

Dado que el espacio entre el tubo receptor y la cubierta se encuentra evacuado, no existe transferencia de calor por convección, de modo que el coeficiente de pérdidas U , basado en el área del absorbedor.

$$U = \left[\frac{A_r}{(h_w + hr_{c-a}) A_c} + \frac{1}{hr_{r-c}} \right]^{-1} \quad \dots (5.58)$$

$$U = \left[\frac{0.0254}{(51.81 + 5.83)0.0508} + \frac{1}{2.013} \right]^{-1}$$

$$U = 1.978 \quad \text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con esta primera estimación de UL, es necesario verificar si la temperatura asumida de 50°C en la cubierta es correcta. La transferencia de calor del absorbedor a la cubierta debe ser igual a la transferencia de calor de la cubierta al ambiente.

$$Ac(hr, c-a + hw)(T_c - T_a) = Ar(hr, r-c)(T_r - T_c) \quad \dots (5.39)$$

Despejando la temperatura de la cubierta.

$$T_c = \frac{Ar(hr, r-c)T_r + Ac(hr, c-a + hw)T_a}{Ar(hr, r-c) + Ac(hr, c-a + hw)} \quad \dots (5.40)$$

sustituyendo valores

$$T_c = \frac{(0.0254)(2.013)(150) + (0.0508)(5.83 + 51.81)(20)}{(0.0254)(2.013) + (0.0508)(5.83 + 51.81)}$$

$$T_c = 22.23 \quad ^\circ\text{C}$$

Iteramos nuevamente, ahora con $T_c = 22.23 \text{ } ^\circ\text{C}$ en lugar de 50 °C.

Calculamos Re con una temperatura promedio de 21 grados C.

$$Re = \frac{(1.204)(5)(0.0508)}{1.81 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 16895$$

$$Nu = (1.25)(0.24)(16895)^{0.6}$$

$$Nu = 103.22$$

$$hw = 103.22 \frac{0.0257}{0.0508}$$

$$hw = 52.22 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

El coeficiente de radiación de la cubierta al ambiente con $T_c = 22.23 + 273 = 295.23$ Kelvin

$$hr, c-a = (0.88)(5.67 \times 10^{-8})(4)\left(\frac{295.23 + 293}{2}\right)^3$$

$$hr, c-a = 5.08 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

El coeficiente de radiación $hr, r-c$ es

$$hr, r-c = \frac{5.67 \times 10^{-8} (295.23^2 + 423^2)(295.23 + 423)}{\frac{1 - 0.17}{0.17} + 1 + \frac{1 - 0.88}{0.88} \times \frac{0.0254}{0.0508}}$$

$$hr, r-c = 1.82 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

El coeficiente de pérdidas U_L

$$U_L = \left[\frac{Ar}{(hw + hr, c-a)Ac} + \frac{1}{hr, r-c} \right]^{-1}$$

$$U_L = \left[\frac{0.0254}{(52.22 + 5.08)(0.0508)} + \frac{1}{1.82} \right]^{-1}$$

$$U = 1.79 \frac{W}{m^2 C}$$

La temperatura de la cubierta T_c .

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

$$T_c = \frac{(0.254)(1.82)(150) + (0.0508)(5.08) + 52.22)(20)}{(0.0254)(1.82) + (0.0508)(5.08 + 52.22)}$$

$$T_c = 22.033 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ganancia de calor útil

Una vez conocida la cantidad de radiación que llega a la superficie del tubo absorbedor y las pérdidas que se presentan en éste, podemos calcular la ganancia de calor útil en el colector y la temperatura de salida del fluido, para ello presentaremos todos los datos requeridos ya sea previamente calculados en este capítulo o dados por condiciones de diseño o de tablas. Las ecuaciones y conceptos utilizados ya han sido tratados en las diferentes secciones del presente capítulo y solo algunas serán introducidas en las siguientes líneas.

DATOS

Ancho del concentrador	$A_c = 2.5 \text{ m}$
Largo del concentrador	$L_c = 5.0 \text{ m}$
Radiación absorbida por unidad de área de apertura (para las horas cercanas al mediodía del 17 de enero)	$S = 533 \frac{W}{m^2}$
Diámetro del absorbedor	$D_a = 0.0254 \text{ m}$
Diámetro de la cubierta	$D_c = 0.0508 \text{ m}$
Temperatura de entrada del fluido (agua) (dato de diseño)	$T_1 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$

Flujo másico	$\dot{m} = 0.100 \text{ kg/s}$
Cp del fluido (agua) a 125 °C prom.	$C_p = 4.25 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$
Coefficiente de pérdidas térmicas totales	$U = 1.978 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
Coefficiente de conductividad térmica del tubo absorbedor (cobre)	$k = 385 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
Grosor del tubo absorbedor	$= 3.2 \text{ mm}$
Temperatura ambiente	$T_a = 20^\circ\text{C}$

Calculamos primero el coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del tubo.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad v = \frac{\dot{m}}{C \cdot A} \quad A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

sustituyendo

$$Re = \frac{4 \dot{m}}{\pi \mu D}$$

$$Re = \frac{4 (0.100 \text{ kg/s})}{\pi (2.19 \times 10^{-4} \text{ kg/m s}) (0.0254 \text{ m})} = 22889$$

de donde notamos que el flujo es turbulento.

El factor de fricción f de la ecuación (3.7)

$$f = [0.79 \ln Re - 1.64]^{-2}$$

$$f = [0.79 \ln(22889) - 1.64]^{-2}$$

$$f = 0.025$$

y de tablas Pr = 1.36 a 125 °C, sustituyendo en la ec. (3.6)

$$Nu = \frac{(0.25/8)(22889)(1.36)}{1.07 + 12.7 \sqrt{0.25/8} (1.36)^{2/3} - 1}$$

$$Nu = 615.38$$

el coeficiente de transferencia de calor por convección h_c es

$$h_c = Nu \frac{k_f}{L} \quad k_f = 0.685 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

$$h_c = 615.38 \times \frac{0.685 \text{ W/m } ^\circ\text{C}}{5 \text{ m}}$$

$$h_c = 84.3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El cálculo de la ganancia de calor útil Q_u se obtiene a partir de la ecuación:

$$Q_u = A_a F \frac{R}{R} \left[S - \frac{A_r U}{A_a} (T_i - T_a) \right] \dots (5.41)$$

Donde:

- F = Factor de remoción de calor
- T_i = Temperatura de entrada del fluido
- T_a = Temperatura ambiente

y el resto de las variables como va se definieron.

Esta ecuación nos permite conocer la ganancia de energía útil como una función de la temperatura de entrada del fluido la cual generalmente es conocida. El efecto del factor F es reducir el valor de ganancia del que se obtendría si todo el absorbedor se encontrara a la temperatura de entrada del fluido a lo que realmente ocurre. Esto puede ser entendido de la siguiente manera: en un colector al incrementar la cantidad de flujo másico del fluido a calentar (agua) la elevación de temperatura a través del colector disminuye. Esto causará menores pérdidas dado que la temperatura promedio del colector será menor y con ello obtendremos una mayor ganancia Q_u . A medida que el flujo másico se incrementa el factor de remoción de calor hace lo propio, esto nos hace pensar que en un caso hipotético el máximo posible de energía útil (calor transferido) en un

colector solar ocurriría cuando todo el colector se encontrara a la temperatura de entrada del fluido dado que en ese punto las pérdidas de calor hacia los alrededores serían mínimas.

El cálculo de F_R se obtiene a partir de la ecuación 5.42

$$F^* = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L F'} \left[1 - e^{-A_r U_L F' / \dot{m} C_p} \right] \quad \dots (5.42)$$

Donde:

- F^* = Factor de flujo del colector
- F_R = Factor de renovación de flujo
- F' = Factor de eficiencia del colector

El factor de eficiencia del colector se obtiene de la ecuación 5.43.

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k}} \quad \dots (5.43)$$

Donde: D_i y D_o son los diámetros interior y exterior del tubo, h_i es el coeficiente de transferencia de calor por convección (hc) dentro del tubo, U_L el coeficiente de pérdidas térmicas totales y k el coeficiente de conductividad térmica del tubo.

Físicamente el denominador en la ecuación 5.43 constituye la resistencia térmica entre el fluido y el ambiente mientras que el numerador corresponde a la resistencia térmica entre la superficie del absorbedor y el aire ambiente. En un punto particular, F' representa el cociente entre la ganancia actual de energía útil a aquella que resultaría si la superficie del absorbedor se encontrara a la temperatura local del fluido.

Área del receptor:

$$A_r = \pi D_L = (3.1416)(0.0254)(5) = 0.399 \text{ m}^2$$

La apertura tomando en cuenta el sombreado de la parte central debido al receptor.

$$A_a = (2.5 - 0.0508)(5) = 12.246 \text{ m}^2$$

Para calcular F^* , primero calcularemos F^*

$$F^* = \frac{1/U}{L} \left[\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} \right] \quad \dots (5.41)$$

$$F^* = \frac{1}{1.978} \left[\frac{0.0318}{(84.3)(0.0254)} + \frac{(0.0318) \ln(0.0318/0.0254)}{(2)(385)} \right]$$

$$F^* = 0.971$$

y

$$F^* = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U F^* L} \left[1 - e^{-A_r U F^* / \dot{m} C_p} \right] \quad \dots (5.42)$$

$$\frac{\dot{m} C_p}{A_r U F^* L} = \frac{(0.100)(4250)}{(0.399)(1.978)(0.971)} = 554.588$$

$$F^* = 554.588 \left(1 - e^{-1/554.588} \right)$$

$$F^* = 1.00$$

$$F = F' \times F'' = 1.00 \times 0.97$$

$$F = 0.97$$

La ganancia de calor útil.

$$Q_u = A_a F \left[S - \frac{A_r U}{A_a} (T_1 - T_a) \right] \quad \dots (5.43)$$

$$Q_u = 12.246(0.97) \left[535 - \frac{(0.399)(1.978)}{12.246} (100 - 20) \right]$$

$$Q_u = 6293 \text{ W}$$

La temperatura de salida del fluido.

$$t_o = t_i + \frac{Q_u}{m C_p} = 100 + \frac{6293}{(0.1)(4250)}$$

$$t_o = 114.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

EFICIENCIA TOTAL

La eficiencia total del colector esta dada por el cociente de la energía radiante que llega al colector entre la energía aprovechable:

$$\eta_T = \frac{\text{Energía aprovechable de salida}}{\text{Energía de entrada, valor instantáneo}} = \frac{Q_u}{S} \times 100$$

$$\eta_T = \frac{6275 \text{ W}}{920 \text{ U/m}^2 \times 100} \times 100$$

$$\eta_T = \frac{12.5 \text{ m}^2}{920 \text{ U/m}^2} \times 100$$

$$\eta_T = 54\%$$

Finalmente expliquemos como quedaría configurado el sistema de colector solar cilíndrico parabólico para una aplicación típica.

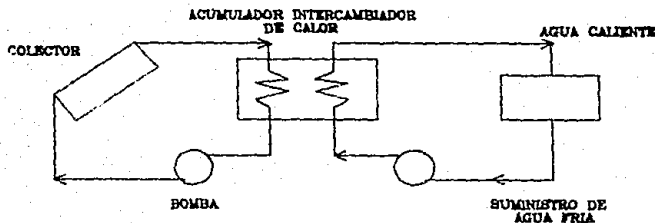


Fig. 5-11

Figura 5.11 Configuración simple para colector solar cilíndrico parabólico.

Para hacer funcionar el sistema de conversión, que pueda servir con eficiencia a la carga se deberá diseñar y conectar un sistema de control que regule algunas variables como flujo de agua y temperatura por ejemplo. El control pudiera hacerse de la siguiente forma.

a) En las primeras horas de inspección el colector recibe el fluido a calentar (agua) a una tasa de flujo que le permita incrementar la temperatura de este efectivamente por sobre el valor que tiene al estar en el tanque de almacenamiento o acumulador. Es decir, evitar que en lugar de calentar el fluido lo enfriemos al estar el colector mas frío que el agua que deseamos calentar.

b) Supongamos que en el tanque de almacenamiento hemos logrado una temperatura homogénea del fluido de 100°C en ese punto queremos empezar a entregar calor a la carga de acuerdo a la aplicación que vayamos a dar. Iniciaremos el suministro de agua fría a través de una bomba como se muestra en la figura 5.11, esta agua fría habrá de salir calentada del tanque de almacenamiento que opera como intercambiador de calor a digamos 80°C , para ello habremos de regular la cantidad de agua alimentada, ya que el intercambio de calor en el tanque de almacenamiento dependerá fuertemente de esto.

c) Como calculamos previamente si el agua entra al colector a 100°C saldrá calentada a 114.8°C para un flujo másico de 0.100 kg/s con una ganancia de calor útil de 6293 Watts . Esta ganancia tenderá a elevar la temperatura del acumulador, para que esto no suceda y la temperatura siga equilibrada a 100°C tendremos que extraer calor de este aumentando el suministro de agua que sirve directamente a la carga, manteniendo controlada la temperatura de salida a 80°C como habíamos asentado.

d) En cuanto el colector empiece a recibir nuevamente poca radiación, la reposición de calor de este habrá de ser menor a fin de mantener la temperatura en el acumulador a 100°C hasta que por la noche deje de fluir el agua ya que el proceso podría revertirse y en lugar de absorber calor, este se disiparía al medio ambiente. Así mismo la carga deberá demandar menos energía.

LA MICROCOMPUTADORA

La Microcomputadora en tiempos actuales es un soporte para cualquier tipo de actividad, esto se puede observar en el gran número de aplicaciones que se ha utilizado de entre una gama que va desde la diversión hasta la investigación. El mercado proporciona una variedad de Microcomputadores, con características diferentes, por lo cual satisfacen una diversidad de requerimientos.

Para el desarrollo de este diseño se requirió de una Microcomputadora que cumpliera principalmente con los siguientes puntos:

- a) Accesibilidad en el mercado
 - b) Capacidad de Memoria
 - c) Facilidad de programación
 - d) Facilidad de interfase
- a) Esto quiere decir que la Microcomputadora escogida sea realmente accesible o adquirible en forma práctica, pensando en que el diseño este apeado a la realidad, lo cual podría representar una idea para futuros desarrollos.
- b) Para la aplicación en diseños es necesario contar con un margen de memoria para la etapa de desarrollo, siendo que la programación terminada pudiera no consumir la totalidad de memoria.
- c) Al referirse a este punto se pensó en poder contar con un conjunto de instrucciones que pudieran facilitar el desarrollo del diseño, además brindando un máximo de operaciones.
- d) Capacidad para conectarse con otros dispositivos.

Características Generales

De acuerdo a lo expuesto anteriormente se optó por realizar el diseño en base a una Microcomputadora Commodore 128, la cual se encuentra constituida por:

- Una Unidad CPU-Teclado
- Unidad de disco
- Monitor (T.V.)

Con las siguientes características:

- Lenguaje Basic Commodore 7.0
- 128 K de RAM expandible a 256 K o 512 K con un módulo opcional
- Video de 40 / 80 Líneas

- Operación de 2 MHz
- Teclado tipo profesional
- Monitor de lenguaje de máquina interconstruido

Lenguaje Basic 7.0 y puerto del usuario

Habrá que destacar la importancia de contar con el lenguaje Basic Commodore 7.0, ya que este permite contar con una amplia variedad de instrucciones, las cuales facilitan cualquier programaci3n incluyendo comandos a periféricos.

Tipos de variables. Las variables que maneja el Basic de Commodore 128 pueden ser:

- Variables Numéricas
- Variables de Cadena

Las Variables Numéricas pueden ser de punto flotante o enteras. Las variables de punto flotante se utilizan con más frecuencia en el Basic de la Commodore 128, son números que tienen fracci3n o punto decimal, pueden ser positivos o negativos. Ejemplos de nombres de variables de punto flotante son:

SA, SB, XI, RE, YI, L, R, AP, AZ, RD

Las variables enteras son números que no tienen fracci3n ni punto decimal, pueden ser positivos o negativos. Ejemplos de nombres de variables enteras son:

CP%, R%, C%, A%, M%, PM%, D%, AP%

Las Variables de cadena se utilizan para describir datos formados por caracteres. Ejemplos de variables de cadena:

H\$, MI\$, S\$, TI\$, HO\$

Por otra parte se debe considerar la disponibilidad que se tiene en esta Microcomputadora de contar con un puerto de expansi3n el cual incluye todas las señales manejada por el Microprocesador 8502 e independientemente de este, un puerto de usuario el cual es programable y contiene las siguientes señales:

Num. pin	Tipo	Notas
1	TIERRA	
2	+ 5V	
3	RESET	
4	CONTROL 1	
5	SP 1	
6	CONTROL 2	
7	SP 2	

Num. pin	Tipo	
8	PC 2	
9	SER. ATN. 211	
10	+ 9V a.c.	100 mA max.
11	+ 9V a.c.	100 mA max.
12	TIERRA	
A	TIERRA	
B	BANDERA 2	
C	PB0	
D	PB1	
E	PB2	
F	PB3	
H	PB4	
J	PB5	
K	PB6	
L	PB7	
M	PA2	
N	TIERRA	

Este puerto nos permite manejar una serie de señales en paralelo como controladoras del motor de pasos.

El puerto del usuario se enlaza con la Interfase Adaptadora Compleja CIA 2 para conectar dispositivos externos.



Figura 6.0. Conector del puerto de usuario.

El conector del puerto de usuario tiene 24 terminales. parte de este conector se utiliza para la CIA 2.

Un grupo de terminales está numeradas del 1 al 12 y otro grupo con letras de la A-N excluyendo la G y la I, como se muestra en la figura 6.0.

Las terminales numeradas se conectan a diferentes tipos de señales, las terminales con letras se utilizan para el puerto B de la CIA.

Las terminales 1, 12, A y N son señales de tierra.

La terminal 2 tiene +5 V. de alimentación. La terminal

3 se conecta al RESET del circuito, el RESET es puesto a nivel alto.

Las terminales 10 y 11 vienen de la fuente de alimentación de la Commodore 128 y contienen +9 V. #1.

La terminal 9 es una conexión para atender un servicio, en el bus serie.

La terminal 8 es una salida PC de la CIA necesaria para el protocolo en la transferencia de datos.

Las terminales 5 y 7 son dos puertos serie E/S que tiene la Commodore 128; la terminal 5 es el puerto serie de la CIA 2. Los dos puertos series en el puerto del usuario son necesarios para diferentes aplicaciones.

Las terminales designadas con letras, tienen un puerto E/S para el lado B de la CIA 2, los ocho bits del puerto B se conectan a las terminales de la C hasta la L. La señal BANDERA en la terminal B y el bit 2 del puerto A se usan para el protocolo en la transferencia de datos. Con sus propios programas el puerto puede manejar diferentes dispositivos.

MOTOR DE PASOS

Introducción

Los actuadores son dispositivos encargados de convertir impulsos eléctricos en movimientos mecánicos. Entre ellos se encuentran los motores de pasos, elegidos por ser dispositivos de movimiento discreto y de fácil adaptación a un sistema digital. Un motor de pasos es un actuador electromecánico incremental, que convierte los pulsos digitales en movimientos de flecha del motor, la cual rotará a incrementos iguales conforme a un tren de pulsos de entrada, por lo que cada incremento denominado paso, corresponde a un pulso de entrada.

El uso de motores de pasos como actuadores ofrece dos ventajas considerables: el error posicional no es acumulativo y no requiere de elementos de realimentación para lograr un posicionamiento preciso.

La rotación de un motor de pasos se logra al anexasle un patrón de estados que proporciona energía a sus fases y cuya definición específica establece un control. Dicho patrón se genera mediante un circuito, en respuesta a la frecuencia que constituye la velocidad rotacional del motor, y la forma en que se van generando los estados del patrón indica el sentido en el que rotará el motor, ya sea en contra o a favor de las manecillas del reloj.

El motor puede rotar en pasos o medios pasos con lo que se logra mayor exactitud, pues en un motor de 200 pasos (como es nuestro caso) el ángulo entre cada paso es de 1.8 grados y entre medios pasos 0.9 grados.

Los motores de pasos tienen más potencia y técnicas de manera más sofisticadas lo cual proporciona un rango de aplicaciones muy amplio en las áreas de potencia y velocidad. Los motores de pasos se utilizan en electrónica en sistemas de posicionamiento electromecánico. El rango de aplicaciones es muy variado, se usa en impresoras para manejar cintas, manecillas, discos flexibles, como controlador numérico, como sistema de posicionamiento controlado digitalmente, entre otros.

El objetivo del motor de pasos es manejar la rotación generando un flujo de corriente secuencial en el campo de los devanados del motor.

Tipos de motores de pasos

Hay tres clases de motores de pasos:

- De imán permanente
- De reluctancia variable
- Híbridos

Características Generales.

Es conveniente entender la estructura básica del motor de pasos. Un imán permanente del motor de pasos consta de una serie de imanes permanentes distribuidos radialmente en la flecha del rotor, rodeados por electroimanes sujetos a la armazón.

Energizando los electroimanes por características propias de polarización se genera un campo magnético definido con el cual los imanes del motor intentan alinearse produciendo un torque. Una representación simplificada de un motor de pasos se muestra en la figura siguiente 6.1. Inicialmente, los polos A y B están energizados con el Norte hacia arriba y el polo Sur del rotor hacia arriba. Inviertiendo la polaridad del polo A, se dibuja el rotor a 90 grados en sentido de las manecillas del reloj; lo que se conoce como paso completo.

Si el polo A vuelve a girar instantáneamente en sentido contrario, el rotor gira solamente 45 grados en sentido de las manecillas del reloj para alinearse con el campo creado por el polo B; lo que se conoce como medio paso. Los motores de paso tienen un ángulo pequeño, el cual se incrementa utilizando un número considerable de polos.

El polo contrario del estator se establece invirtiendo la dirección del flujo de corriente en los devanados o utilizando alternadamente devanados de tap-central.

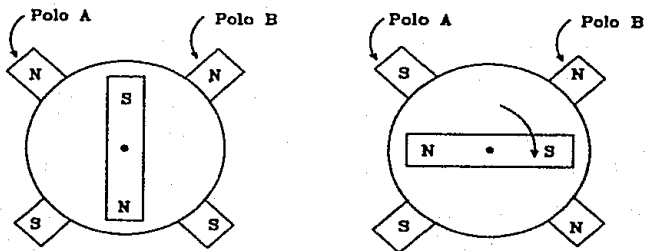


Figura 6.1. Representación simplificada de un motor de pasos.

La figura 6.2. nos muestra el diagrama a bloques de un motor de pasos de tap-central, con control de interruptores, inductancias sujetas a diodos, resistencias limitadoras de corriente y fuentes de alimentación. Por un instante, se energiza el polo A, se cierra el interruptor 1 y se abre el interruptor 2; la polaridad opuesta se genera cerrando el interruptor 2 y abriendo el interruptor 1.

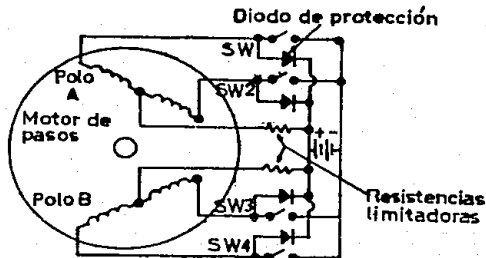


Figura 6.2. Diagrama a bloques de un motor de pasos de tap-central.

De acuerdo a las características de polaridad de los imanes, se obtiene una secuencia para los pasos, la cual se genera por el control de los interruptores.

Los diodos previenen un sobrevoltaje, los requisitos para la secuencia de operación de los interruptores para medio paso y para paso completo se muestran en la figura 6.3. Inviertiendo la secuencia de la figura 6.3. se invierte la dirección de rotación del motor. La rapidez de los pasos requiere una mayor di/dt en los devanados del motor. Entonces di/dt es función del voltaje de alimentación, es conveniente

una fuente de alimentación alta.

Secuencia de paso completo

PASO	SW1	SW2	SW3	SW4
1	OFF	ON	OFF	ON
2	OFF	ON	ON	OFF
3	ON	OFF	ON	OFF
4	ON	OFF	OFF	ON
1	OFF	ON	OFF	ON

Secuencia de medio paso

PASO	SW1	SW2	SW3	SW4
1	OFF	ON	OFF	ON
2	OFF	ON	OFF	OFF
3	OFF	ON	ON	OFF
4	OFF	OFF	ON	OFF
5	ON	OFF	ON	OFF
6	ON	OFF	OFF	OFF
7	ON	OFF	OFF	ON
8	OFF	OFF	OFF	ON
1	OFF	ON	OFF	ON

Figura 6.3. Secuencia de operación de los interruptores para medio paso y paso completo.

Motor de pasos de imán permanente.

El motor de pasos de imán permanente (PM) tiene un

estator, el cual tiene un número determinado de polos. Cada polo tiene un número específico de dientes, el rotor es cilíndrico y dentado.

La característica, distintiva del motor de pasos, PM es la incorporación de un imán permanente en el circuito magnético. El imán puede cargarse axialmente o radialmente. El motor de pasos de imán permanente opera por medio de interacciones entre el flujo del imán del rotor y la fuerza magnetomotriz generada por la corriente aplicada en los devanados del estator.

Si el modelo de energización se fija, hay una serie de puntos de equilibrio que se generan alrededor del motor. Si se excitan los devanados en secuencia, el rotor cambiará su punto de equilibrio y rotará como respuesta al cambio. En virtud del imán permanente, hay un torque que se desarrolla en el motor cuando los devanados del estator están excitados.

Motores de paso de reluctancia variable

Los motores de reluctancia variable (VR) tienen un estator, el cual tiene un número determinado de polos. El rotor está constituido por un miembro cilíndrico dentado cuyos dientes tienen una relación con los polos del estator, dicha relación está determinada por los requisitos del ángulo de paso.

Cuando pasa una corriente a través de los devanados se desarrolla un torque semejante al del encendido del rotor en la posición de mínima reluctancia. En un motor de reluctancia variable VR, los dientes del rotor tienen un pequeño residuo magnético como se observó en el motor de imán permanente, no hay una fuerza en el rotor cuando el estator no está energizado. El motor VR opera con el mismo principio que un electroimán en ac (corriente alterna) en el cual la atracción magnética ocurre sin hacer caso de la dirección del flujo magnético.

Motores de paso híbridos

Hay un gran número de dispositivos que convierten trenes de pulsos eléctricos o modelos de energización a movimiento. Existen dispositivos como motores de imán permanente o motores de reluctancia variable. En tal caso la operación es aproximadamente igual excepto que las trayectorias magnéticas se encuentran en una dimensión lineal.

Para amplificación de potencia, se puede utilizar un motor de pasos relativamente pequeño o en conjunción con un amplificador hidráulico. Aquí el motor de pasos se utiliza

para manejar el dispositivo de control de comandos en el motor hidráulico. Donde el costo del sistema y el suministro hidráulico asociado se justifican debido a que la ganancia de potencia es muy considerable. Los motores híbridos de este tipo se obtienen en un rango variado de caballos de fuerza.

En general los motores de paso de imán permanente (PM) comparados con los motores de paso de reluctancia variable, son más eficientes, tienen mejores características de amortiguamiento y tienen potencia alta.

La construcción de los motores de reluctancia variable (VR) es muy simple tienen baja inercia de rotor cuando están ligeramente cargados, tienen capacidad para velocidades altas.

El cuadro siguiente puede no ser muy preciso en detalles, pero representa una buena aproximación de la situación. El motor es, en un sentido, un dispositivo de transferencia entre la información eléctrica presentada por el manejador y el movimiento mecánico de la carga.

	PM	VR	HIBRIDOS
Características-	-	-	T.A. - P.A.
Eficiencia	Alta	Baja	Baja - Med-alta
Inercia rotor	Alta	Baja	Baja - Baja
Velocidad	Muy alta	Alta	Muy baja - Alta
Amortiguamiento-	Bueno	Malo	Malo - Bueno
Poten. Sal	Alta	Baja	Baja - Muy alta
Paso ángulo en grados	1.8	7.5	0.18 - 1.5
	2.5	15	0.45 - 2.25
	15	30	

Sumario

Interfase Microcomputadora-Motor de pasos

Propiamente no se trata del diseño de la interfase sino

de conocer la ya existente en la Microcomputadora, sus características de manejo y la interconexión con el motor de pasos.

La interfase 6526 CIA, Interfase Adaptadora Compleja, la cual proporciona señales manejables en el puerto del usuario.

En la Commodore 128 existen dos CIA's que proporcionan señales de entrada o salida hacia o desde dispositivos periféricos, como son joy-sticks, puerto del usuario, unidad de casete e impresora.

La CIA 1 maneja el teclado, se utiliza para enlazar las columnas y los renglones del teclado con el Microprocesador.

La CIA 2 conecta el puerto del usuario, la cual es capaz de enlazar una impresora, un modem o una segunda computadora al sistema.

De esta forma comenzaremos por conocer las características de la Interfase Adaptadora Compleja:

- Es un integrado de 40 terminales, como se muestra en la figura 6.3.
- Tiene 24 terminales para manejar datos.
- 8 Terminales de datos que se conectan internamente al Microprocesador.
- 16 Terminales de datos que conectan el puerto del usuario.
- 16 Terminales externas de dos puertos diferentes de E/S
- 5 Líneas de direccionamiento.
- 1 Registro de corrimiento serie E/S de 8 bits.

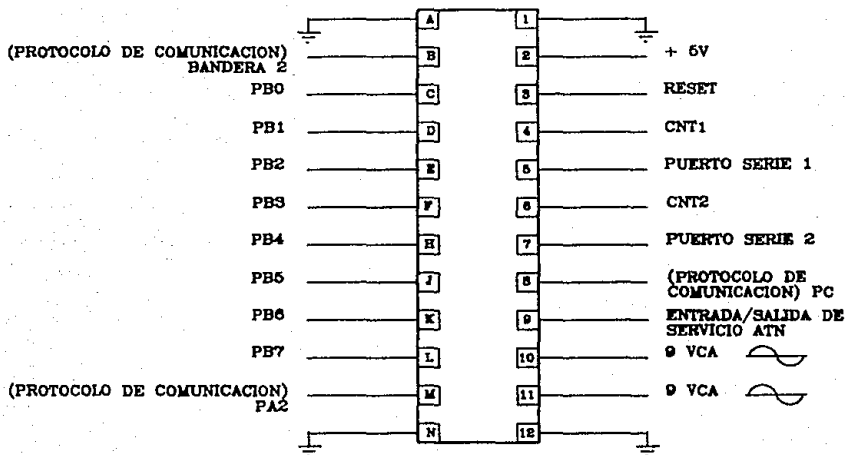
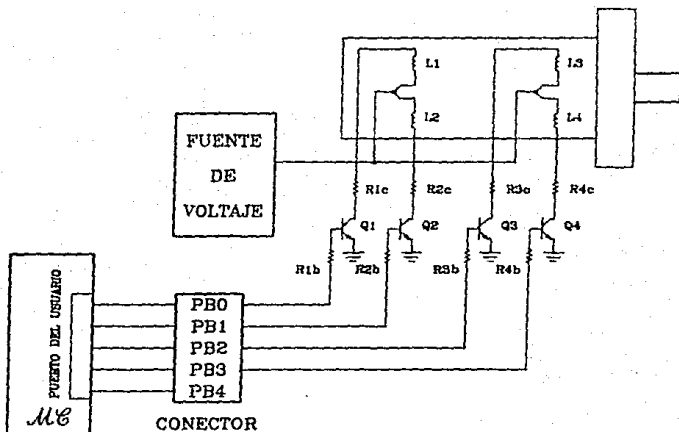


Figura 6.3. Las CIA tienen conexiones al bus de datos y al bus de direcciones. Tienen líneas de control y puertos A y B.

En la figura 6.4 se muestra la conexión de la Commodore 128 y el Motor de pasos. El valor de las resistencias y de los transistores de la interfase dependen de las características del Motor de pasos.

Se utilizan cinco bits del puerto B del puerto de usuario, los cuatro primeros nos sirven para energizar el Motor de pasos y el bit restante para controlar el "Fijador" (Seguro de freno).



Commodore 128

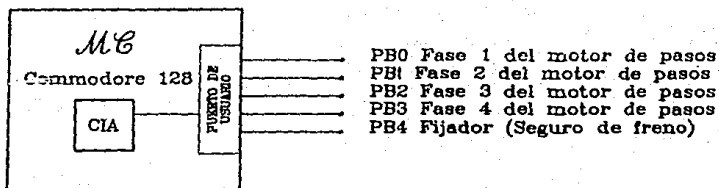


Figura 6.4 Conexión de la microcomputadora Commodore 128 con el motor de pasos

Para manejar el puerto de usuario, se tiene un registro de dirección de datos, en la dirección decimal 56 579.

Si un bit de dicha dirección se define con un "0", ausencia de voltaje lo estamos especificando como una entrada de datos del puerto B del puerto de usuario. Si se define con un "1", presencia de voltaje lo estamos especificando como una salida de datos del puerto B del puerto de usuario.

Para el diseño se definen todos los bits del puerto B del puerto de usuario como salidas.

También se cuenta con un registro de datos periféricos, en la dirección decimal 56 577, en esta dirección se tiene el valor de los bits del puerto B del puerto de usuario, que irán cambiando de acuerdo a un tren de impulsos para mover cuando sea necesario el motor de pasos.

El tren de impulsos que permite energizar cada una de las fases del motor de pasos para moverlo en sentido de las manecillas del reloj, es el que se muestra en la figura 6.5.

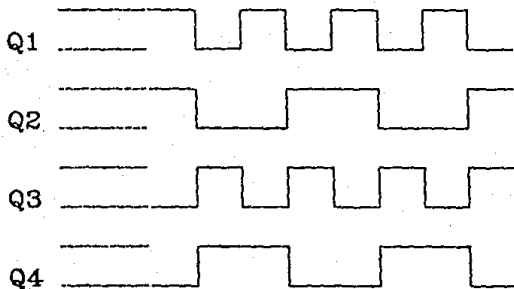


Figura 6.5 Secuencia de rotación de paso completo

ESTRUCTURA GENERAL

En este capítulo se presenta la programación diseñada para el manejo de un concentrador cilíndrico parabólico a través de la Microcomputadora Commodore 128. Así como las rutinas necesarias para dicha programación. Cabe mencionar que el programa está formado por una serie de rutinas, cada rutina tiene un espaciamiento de 1000 líneas, y al final se presentan las subrutinas de utilidad, lo cual se hace con el objeto de darle una consistencia modular al programa y realizar modificaciones fácilmente.

Rutina principal

Primeramente presentamos el diagrama de flujo de la rutina principal, como se muestra en la figura 7.1, y la descripción de cada una de las secuencias que lo forman.

a) Inicialización del sistema.

La inicialización del sistema consiste en establecer las condiciones iniciales en las variables y en la programación de interfaces.

Las variables que se inicializan son las siguientes:

PM%=0	Posición del Motor
SA=150 SB=110	Coordenadas del eje del Sprite
SX=171 SY=180	Coordenadas de la posición del Sprite
RE=23.5/15	Relación en pantalla Verticales/Horizontales
XI=20	Radio horizontal inicial de la parábola
XF=XI*RE	Radio horizontal final de la parábola
YI=15	Radio vertical inicial de la parábola
YF=YI/RE	Radio vertical final de la parábola

En la figura 7.2 se muestra la posición inicial de una elipse la cual nos genera la posición inicial de la trayectoria de la parábola que nos representa el colector cilíndrico parabólico de nuestro sistema.

En la figura 7.3 se muestran los dos Sprites, la posición inicial del segundo Sprite, así como su trayectoria a seguir y los ejes para el cálculo posterior de los parámetros gráficos.

ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA

En este capítulo se presenta la programación diseñada para el manejo de un concentrador cilíndrico parabólico a través de la Microcomputadora Commodore 128. Así como las rutinas necesarias para dicha programación. Cabe mencionar que el programa está formado por una serie de rutinas. Cada rutina tiene un espaciamiento de 1000 líneas, y al final se presentan las subrutinas de utilidad, lo cual se hace con el objeto de darle una consistencia modular al programa y realizar modificaciones fácilmente.

Rutina principal

Primeramente presentamos el diagrama de flujo de la rutina principal. Como se muestra en la figura 7.1, y la descripción de cada una de las secuencias que lo forman.

a) Inicialización del sistema.

La inicialización del sistema consiste en establecer las condiciones iniciales en las variables y en la programación de interfaces.

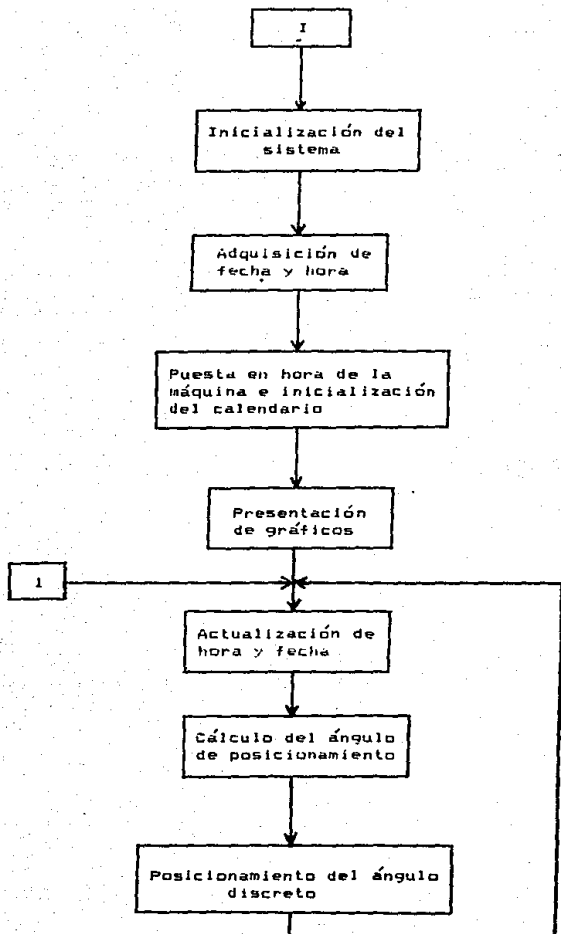
Las variables que se inicializan son las siguientes:

PMX=0	Posición del Motor
SA=150 SB=116	Coordenadas del eje del Sprite
SX=171 SY=180	Coordenadas de la posición del Sprite
RE=23.5/15	Relación en pantalla Verticales/Horizontales
XI=20	Radio horizontal inicial de la parábola
XF=XI*RE	Radio horizontal final de la parábola
YI=15	Radio vertical inicial de la parábola
YF=YI/RE	Radio vertical final de la parábola

En la figura 7.2 se muestra la posición inicial de una elipse la cual nos genera la posición inicial de la trayectoria de la parábola que nos representa el colector cilíndrico parabólico de nuestro sistema.

Para la simulación en el monitor de la trayectoria del sol, se utiliza un Sprite para el sol, y otro para el motor de pasos. Un Sprite es un dibujo en un formato de pantalla ya establecido de 24 x 21 puntos, completamente independiente del resto de la visualización de pantalla.

En la figura 7.3 se muestran los dos Sprites, la posición inicial del segundo Sprite, así como su trayectoria a seguir y los ejes para el cálculo posterior de los parámetros gráficos.



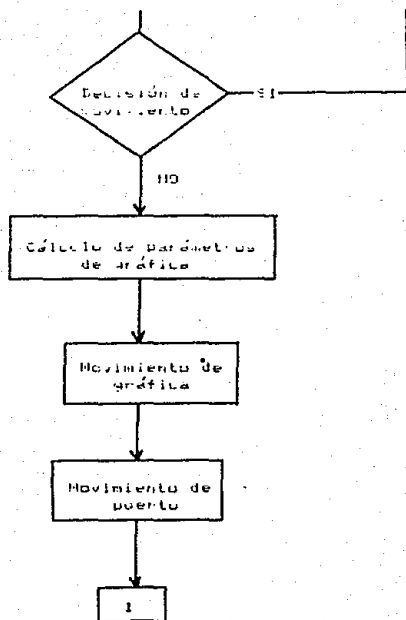
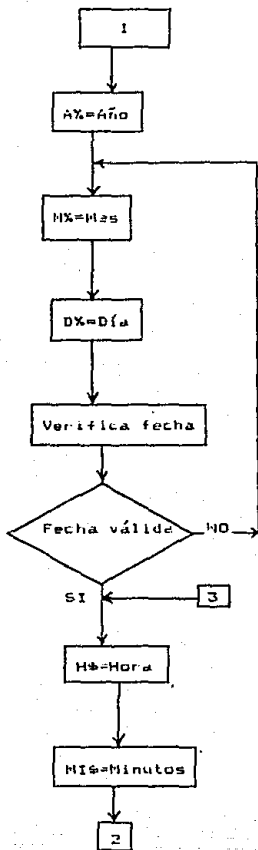
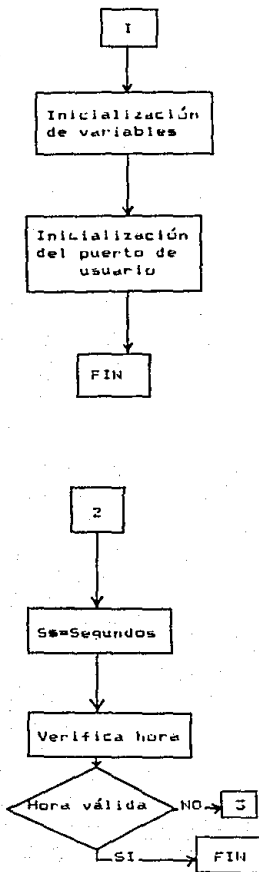


Figura 7.1. Rutina Principal.

Subrutinas

Inicialización del sistema.

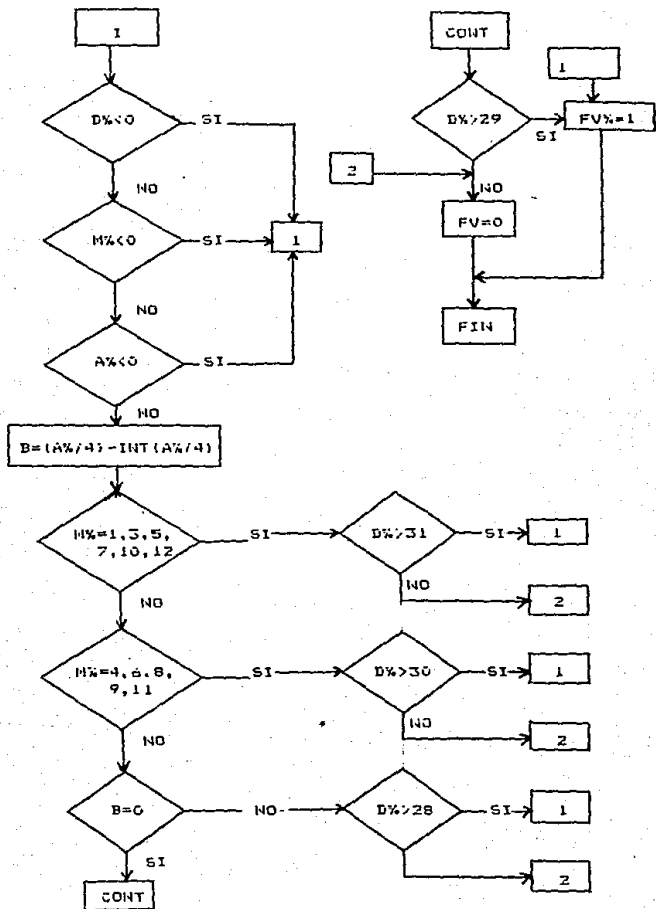
Adquisición de fecha y hora.



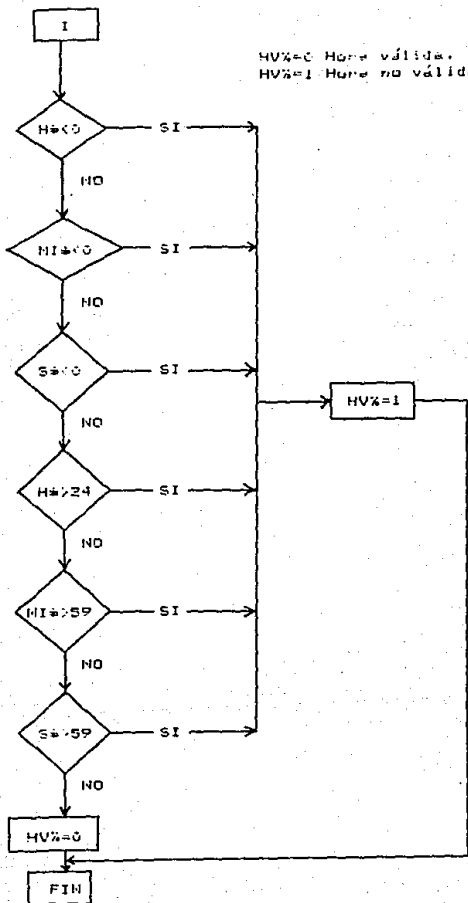
Verifica fecha válida

FV=0 Fecha válida

FV=1 Fecha no válida

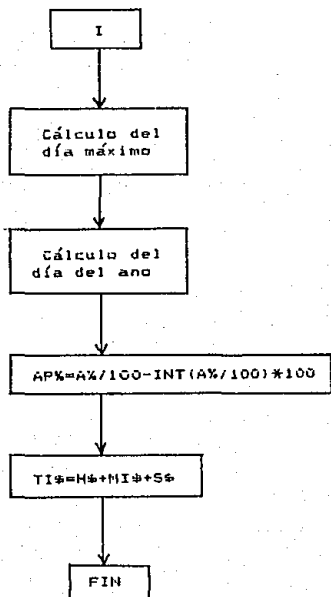


*Verifica hora.

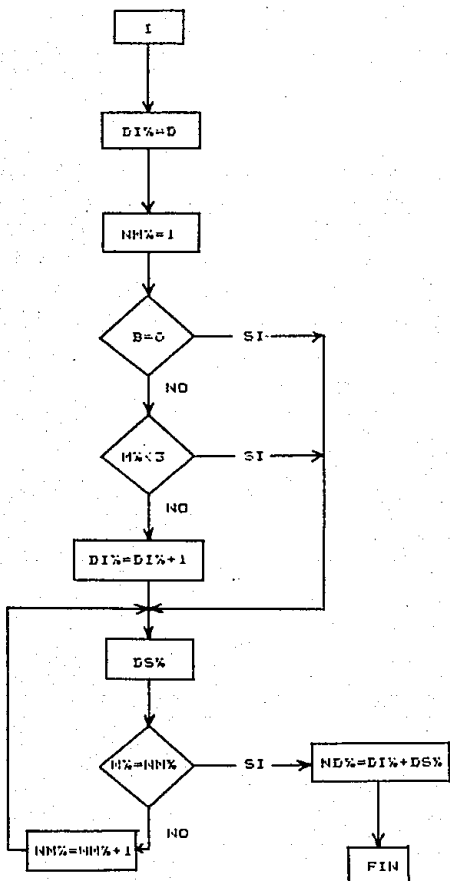


HV%=0 Hora válida.
HV%=1 Hora no válida.

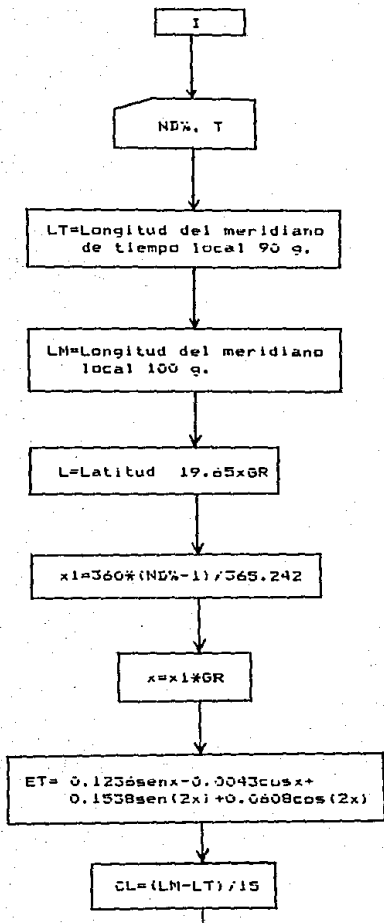
Puesta en hora e inicialización del calendario

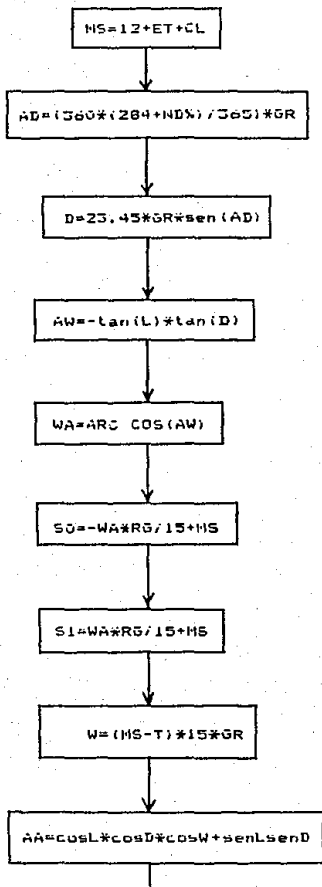


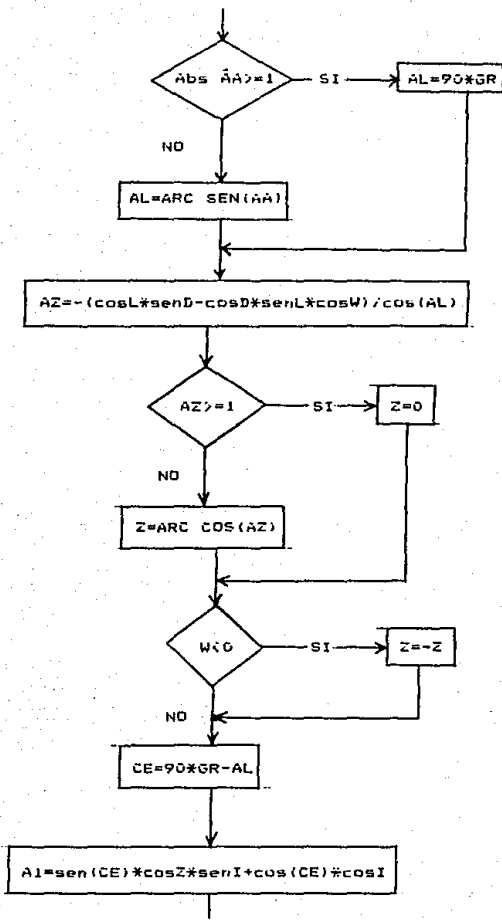
*CÁLCULO DEL DÍA DEL AÑO.

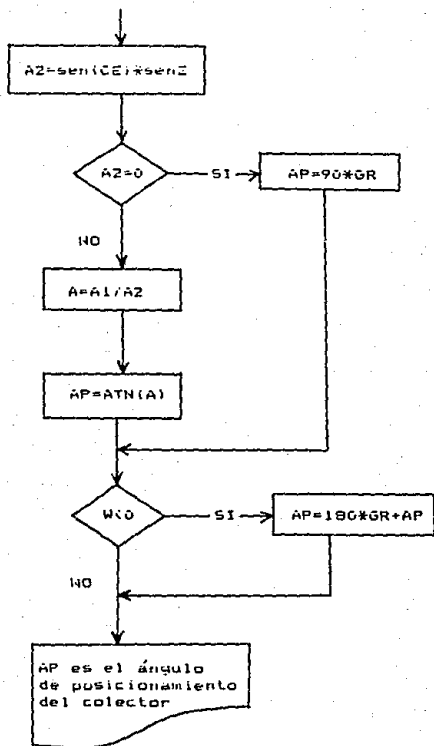


Cálculo del ángulo de posicionamiento.









b) Adquisición de fecha y hora.

El usuario proporciona la fecha y la hora para empezar la operación, la cual se actualiza posteriormente en forma automática.

Esta rutina recibe la fecha y la hora y verifica que sean correctas. Las variables que se utilizan en esta rutina son las siguientes:

AX - Año	H@ - Hora
MX - Mes	MI@ - Minutos
DX - Día	SO - Segundos

B - Indicador de año bisiesto

c) Puesta en hora e inicialización del calendario.

Prepara la hora para presentarla en pantalla gráfica y establece las condiciones iniciales de las variables asociadas con el calendario.

Las variables que se utilizan en esta rutina son las siguientes:

DIX - Día del mes
NMX - Número de mes (1-12)
APX - Año que se presenta en pantalla gráfica
TI@ - Cadena de la hora del día
DSX - Días del año
TI - Valor de los jiffies
H - Captura de jiffies
HX - Hora entera
MDX - Indicador de mediodía

d) Presentación de pantalla gráfica.

Prepara las gráficas que se van a utilizar en la pantalla gráfica, así como los dos Sprites, sus características de color y velocidad.

La pantalla de la Commodore 128 está dividida en dos zonas, el margen y la base o fondo. El margen encuadra a la base, la base es la "zona de trabajo" de la pantalla. Los textos y gráficos creados por el programa se visualizan en esta zona. La base consta de 25 filas de 40 caracteres cada una.

Existen seis modos gráficos en la Commodore 128. Las opciones son:

- 0 = texto de 40 columnas
- 1 = gráficos mediante un mapa de bits
- 2 = pantalla dividida en gráficos/texto
- 3 = gráficos multicolor
- 4 = división multicolor
- 5 = texto de 80 columnas

```

01234567891011121314151617 ... 30013233343536373839
-----
0 1 1
1 1 1
2 1 1
3 1 1
4 1 1
5 1 1
6 1 1
7 1 1
8 1 1
9 1 1
A 1 1
B 1 1
C 1 1
D 1 1
E 1 1
F 1 1
G 1 1
H 1 1
I 1 1
J 1 1
K 1 1
L 1 1
M 1 1
N 1 1
O 1 1
P 1 1
Q 1 1
R 1 1
S 1 1
T 1 1
U 1 1
V 1 1
W 1 1
X 1 1
Y 1 1
Z 1 1
[ 1 1
\ 1 1
] 1 1
^ 1 1
_ 1 1
` 1 1
{ 1 1
| 1 1
} 1 1
~ 1 1
17 1 1
18 -----
19 1AA:MM/DD HH:MM:SS 1
20 1 1
21 1 INCLINACION DEL COLECTOR: I 1
22 1 ANGULO DE POSICIONAMIENTO: AP 1
23 1 1
-----

```

Figura 7.4 Presentación de pantalla de la C-128

Para el diseño se utilizó el modo 4, se dividió la zona de trabajo como se muestra en la figura 7.4 lo que permite poner texto en una parte, gráficos en otra parte y utilizar cuatro colores.

La forma más sencilla de diseñar un Sprite es utilizar la nueva utilidad SPRDEF (Definición de sprites). Con ello se visualiza un gran rectángulo que ocupa más de media pantalla. Esta es el área para la edición de sprites habrá un pequeño signo (+), es el cursor de edición de sprites. El movimiento del cursor en la ventana de edición de sprites es similar al movimiento del cursor en la pantalla de texto normal.

e) Cálculo del ángulo de posicionamiento.

Con la ecuación de la trayectoria, las correcciones por longitud y las condiciones geográficas del punto de referencia se calcula el ángulo de posicionamiento.

En el capítulo 2 "Consideraciones geométricas", se definen los ángulos necesarios para orientar el colector, así también como el ajuste por longitud, la ecuación del tiempo, y se hace un análisis de vectores en el espacio para poder encontrar el ángulo de posicionamiento.

En esta rutina se organizan las ecuaciones del capítulo 2, de tal manera que utilizando el Basic 7.0 de la Commodore

128 se puedan realizar todos los cálculos necesarios para obtener el ángulo de posicionamiento del colector, para una fecha determinada.

Variables que intervienen en la rutina:

ND - Número de día del año
T - Hora HH:MM:SS
LT - Longitud del meridiano de tiempo local $LT=90$ grados
LM - Longitud del meridiano local $LM=100$ grados
L - Latitud
GR - Factor de conversión grados a radianes
RS - Factor de conversión radianes a grados
X1 - Función del día del año
ET - Ecuación del tiempo
CL - Corrección por longitud
MS - Mediodía solar
AD - Argumento del ángulo de declinación
D - Declinación
AW - Argumento del ángulo horario
W - Ángulo horario
S0 - Ángulo horario para el atardecer
S1 - Ángulo horario para el amanecer
AA - Argumento del ángulo de altitud
AL - Ángulo de altitud
AZ - Argumento del ángulo de azimut.
Z - Ángulo de azimut
I - Ángulo de inclinación del colector
CE - Ángulo de cenit
A1, A2 - Ecuaciones para calcular el argumento del ángulo de posicionamiento
AP - Ángulo de posicionamiento

f) Cálculo del ángulo discreto.

Esta rutina calcula el paso del motor de acuerdo al ángulo de posicionamiento entregado, para el diseño se utiliza un motor de 200 pasos.

En las figuras 7.5a y 7.5b se muestra la trayectoria que debe seguir el motor de pasos de 0 a 180 grados y se define el rango que tiene cada paso, a cada ángulo de posicionamiento le corresponde un paso determinado, que es lo que definimos como ángulo discreto.

Se utilizan las siguientes variables:

CP% - Contador de pasos
RD - Ángulo discreto, rango de un paso determinado.
RP - Ángulo de posicionamiento
- $\pi/200$ Límite inferior del primer paso

En la rutina se pregunta si el ángulo de posicionamiento que fue calculado en la rutina "Cálculo del ángulo de posicionamiento" está dentro del rango del primer paso; si no

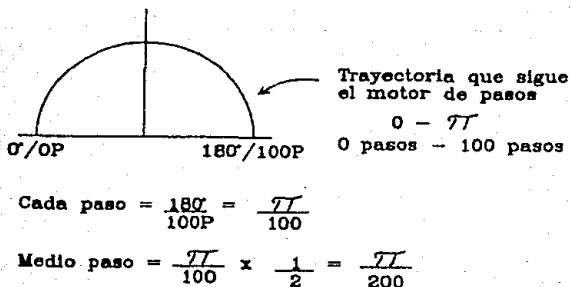


Figura 7.5.a

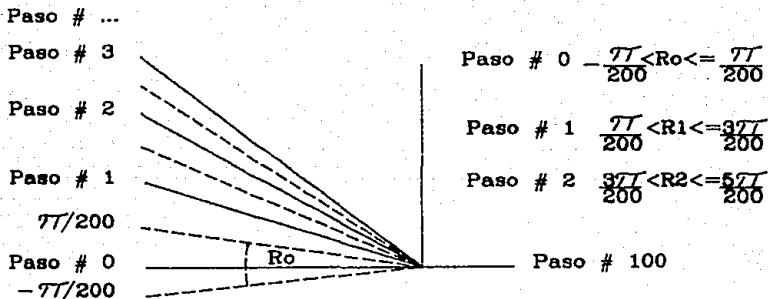


Figura 7.5.b Definición del ángulo discreto

está dentro del rango del primer paso, investigamos a qué paso corresponde, aumentando el contador de pasos, hasta que el ángulo de posicionamiento caiga dentro del rango de un paso determinado.

Cuando el contador de pasos es mayor de 100, es decir ya recorrida toda su trayectoria de 0 a 180 grados entonces el colector vuelve a su posición inicial por programación.

g) Cálculo de parámetros gráficos.

Calcula las coordenadas de los puntos en la trayectoria para presentarlos en la pantalla gráfica.

Las figuras 7.6 y 7.7 nos muestran la trayectoria que recorre la parábola durante un día, y nos muestra los parámetros que se están utilizando para generar dicha parábola en un instante determinado. La figura 7.8 nos muestra la posición de la parábola a los 90 grados, con las variables necesarias para generar dicha parábola.

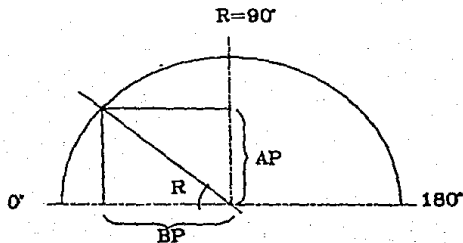


Figura 7.6 Trayectoria que recorre la parábola de $0^\circ - 180^\circ$

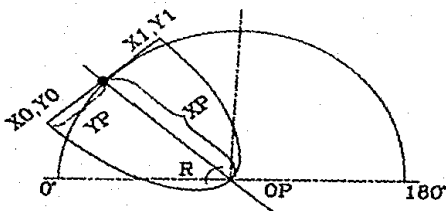


Figura 7.7 Posición P de la trayectoria de la parábola.

La figura 7.9 nos muestra las variables necesarias para calcular la trayectoria del Sprite 2 el cual nos representa al sol, le hemos definido una trayectoria, como lo vería un observador estando en la tierra. El Sprite tiene un centro el cual siempre se encuentra en la trayectoria que tiene que recorrer pero para definir un Sprite y editarlo el origen se encuentra en la esquina inferior derecha por lo que se tienen que realizar ajustes al calcular los parámetros gráficos.

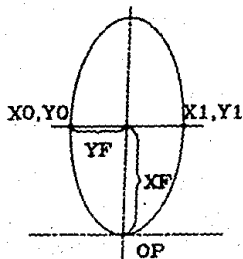


Figura 7.8 Posición final de la trayectoria de la parábola.

h) Movimiento de puerto.

Esta rutina determina si se debe mover el motor de pasos de acuerdo al contador de pasos.

En la rutina de "Cálculo del ángulo de posicionamiento", se tiene el ángulo al que debe orientarse el colector para una fecha y hora determinada, en la rutina de "Cálculo del ángulo discreto" se define el paso que le corresponde al ángulo de posicionamiento encontrado; en ésta rutina investigamos si la posición del motor de pasos está en el paso que le corresponde.

Si la posición del motor es menor que el contador de pasos, entonces el motor girará en sentido de las manecillas del reloj, los pasos necesarios hasta que la posición del motor PM sea igual al contador de pasos CP.

Si la posición del motor es mayor que el contador de pasos, entonces el motor girará en sentido de las manecillas del reloj los pasos necesarios hasta que la posición del motor PM sea igual al contador de pasos CP.

En la dirección decimal 56 377 correspondiente al Registro de datos periféricos del puerto de usuario se almacena cada uno de los valores que permiten la energización de las bobinas del motor de pasos, para definir la secuencia de rotación.

Es conveniente un "Fijador" (Seguro de freno) para soportar el torque del colector, el control del Fijador es a través del bit 4 del puerto de usuario. La secuencia a seguir para que el Fijador actúe en nuestro sistema es la siguiente:

- 1) Energizar el motor de pasos.
- 2) Quitar el "Fijador" (Seguro-freno).
- 3) Poner el siguiente dígito de la secuencia.
- 4) Poner el "Fijador" (Seguro-freno).
- 5) Desenergizar el motor de pasos.

1) Actualización de hora y fecha.

Actualiza la hora y la fecha para presentarlas en la pantalla gráfica, calcula el número de día el cual es utilizado para el cálculo del ángulo de posicionamiento.

La Commodore sigue la pista de la hora en jiffies. Un jiffy es 1/60 de segundo. TIME o TI es una variable numérica reservada que se incrementa automáticamente cada 1/60 de segundo. TIME# es una variable de cadena que se genera a partir de TIME. Cuando se llama a TIME#, la microcomputadora visualiza el tiempo en horas, minutos y segundos, es decir convierte la hora en jiffies a horas reales. La conversión se realiza de la siguiente forma: cada segundo se divide en 60 jiffies. Un minuto se compone de 60 segundos; y una hora consta de 60 minutos. Por tanto un segundo son 60 jiffies, un minuto 3600 y una hora 216 000.

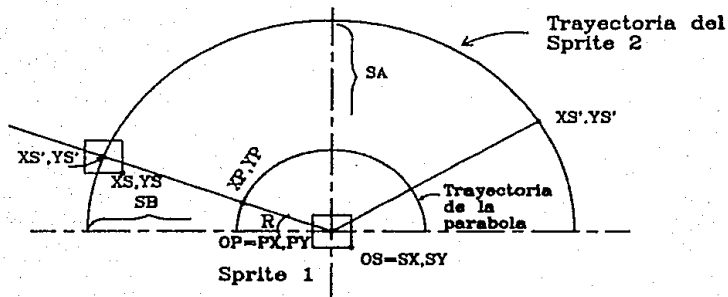


Figura 7.9 Trayectorias utilizadas para calcular los parametros graficos.

ANEXO I
SENTENCIAS BASIC

CIRCLE

Dibuja un círculo en la posición y tamaño seleccionados.
Formato:

CIRCLE C,X,Y,XR,YR,B,E,L

Donde C es el color del círculo, X e Y localizan el centro del círculo XR e YR especifican el radio x e y. B es el arco del ángulo inicial, E es el arco del ángulo final, R es la rotación del círculo, L es la longitud de los lados. Si se especifica una longitud del lado (L) entonces el círculo se convierte en un polígono.

COLOR

Le permite especificar el color de diferentes objetos de la pantalla.

Formato:

COLOR O,C

donde O es el objeto y C es el color. Sus opciones para O son:

- O=0: Color del fondo en 40 columnas
- O=1: Color del primer plano en 40 columnas
- O=2: Multicolor número 1
- O=3: Multicolor número 2
- O=4: Color del margen en 40 columnas
- O=4: Color de los caracteres
- O=5: Color del fondo en 80 columnas

Las opciones del color en el modo de 40 columnas son:

- 1=Negro
- 2=Blanco
- 3=Rojo
- 4=Claro
- 5=Púrpura
- 6=Verde
- 7=Azul
- 8=Amarillo
- 9=Naranja
- 10=Marrón
- 11=Rojo claro
- 12=Gris oscuro
- 13=Gris medio
- 14=Azul claro
- 15=Gris claro

DATA

La sentencia DATA define constantes que son asignadas a

variables mediante sentencias READ.

Formato:

DATA Constante(,Constante, Constante,...,Constante);

Las sentencias DATA especifican constantes numéricas o de cadena.

DRAW

Dibuja una línea en la pantalla gráfica.

Formato:

DRAW C,XA,YA TO XB,YB

donde C es el color de la línea, XA e YA especifican un extremo de la línea, y XB e YB especifican el otro extremo.

GOSUB

La sentencia GOSUB bifurca la ejecución del programa a una línea especificada y permite el retorno a la sentencia que va a continuación del GOSUB. La línea especificada es un punto de entrada a la subrutina.

Formato:

GOSUB In

La sentencia GOSUB llama a una subrutina. El punto de entrada de la subrutina tiene que estar en la línea In.

GOTO

La sentencia GOTO bifurca incondicionalmente a una línea especificada.

Formato:

IC GO TO ICG

GRAPHIC

Selecciona uno de los modos gráficos del C-128. Las opciones son:

- 0=texto de 40 columnas
- 1=gráficos mediante un mapa de bits
- 2=pantalla dividida en gráficos/texto
- 3=división multicolor
- 4=texto de 80 columnas

IF-THEN

La sentencia IF-THEN proporciona la ejecución condicional de sentencias basándose en una expresión de relación.

Formato:

IF Condición THEN sentencia (:sentencias)

Ejecuta sentencias condicionalmente.

POKE

La sentencia POKE almacena un byte de dato en una posición de memoria determinada.

Formato:

POKE dir de memoria, byte

SLEEP

Retiene un programa un determinado tiempo.

Formato:

SLEEP S

S es el número de segundos de espera (0-65535).

SPRDEF

Inicia el editor de sprite.

SPRITE

Define parámetros del sprite.

Formato:

SPRITE N,O,F,P,X,Y,M

donde N es el número del sprite, O activa ON(), o desactiva OFF() el sprite, F es el color del fondo y P la prioridad del sprite. X e Y son las funciones de expansión y M es el multicolor (ON/OFF).

F U N C I O N E S B A S I C

ATN

ATN proporciona el arcotangente del argumento.

Formato:

ATN (datos n)

COS

COS proporciona el coseno del argumento.

Formato:

COS (datos n)

INT

INT proporciona la parte entera de un número, redondeado al siguiente más pequeño con signo.

Formato:

INT (arc n)

MID\$

MID\$ proporciona cualquier parte especificada de una cadena.

Formato:

MID\$(datos\$,byte1,byte2)

Proporciona un número de caracteres de la parte central de la cadena identificada por datos. Los dos parámetros numéricos byte1 y byte2 determinan la parte de la cadena que se proporciona. Los caracteres de la cadena se enumeran desde la izquierda, siendo el carácter de más a la izquierda la posición 1. El valor de byte1 determina el primer carácter a extraer de la cadena. Empezando con este carácter, byte2 determina el número de caracteres que se extraen.

PEEK

PEEK proporciona el contenido de una posición de memoria especificada. PEEK es el opuesto a la sentencia POKE.

Formato:

PEEK (dir mem)

RSPRITE

Variable del sistema que contiene el dato del sprite seleccionado asignado mediante una sentencia SPRITE.

Las opciones son:

- 0=sprite activo/no activo
- 1=color del sprite
- 2=prioridad
- 3=X expandida
- 4=Y expandida
- 5=modo multicolor

SIN

SIN proporciona el seno del argumento.

Formato:

SIN(ang n)

TAN

TAN proporciona la tangente del argumento.

Formato:

TAN(ang n)

TI, TI*

TI y TI* representan a dos variables de la hora del sistema.

Formato:

TI Número de jiffies desde el arranque actual
TI* Cadena de la hora del día

VAL

VAL proporciona el equivalente numérico de la cadena

```

4080 REM PRESENTACION DE PANTALLA GRAFICA.
4090 REM
4100 REM PREPARA LAS GRAFICAS QUE SE
4110 REM VAN A UTILIZAR EN LA PANTALLA
4120 REM ASI COMO LOS DOS SPRITES SUS
4130 REM CARACTERISTICAS DE COLOR Y
4140 REM VELOCIDAD
4150 REM
4160 REM
4170 GRAPHIC 4.1 :REM SELECCIONA EL MODO GRAFICO
4180 BLOAD "SPRITE" :REM CARGA EL FICHERO "SPRITE"
4190 DRAW 3.0.150 TO 150.150 :REM DIBUJA UNA LINEA
4200 COLOR 0.4:COLOR 4.1:COLOR 3.1:COLORS.1 :REM ESPECIFICA EL COLOR D OBJETOS
4210 MOVSPR 1.00.00+3 :REM CARACTERISTICAS DE DIREC. Y VEL.
4220 SPRITE 1.1.0.0.0.1 :REM DEFINE PARAMETROS DEL SPRITE
4230 MOVSPR 2.0.0
4240 SPRITE 2.1.0.0.0.0.0
4250 GOSUB10640:R2=21:CR=2:GOSUB10530
4260 PRINT"INCLINACION DE COLECTOR":GOSUB10640
4270 R2=22:GOSUB10530
4280 PRINT"ANGULO DE POSICIONAMIENTO":GOSUB10640
4290 RETURN
5000 REM
5010 REM
5020 REM CALCULO DEL ANGULO DE POSICIONAMIENTO.
5030 REM
5040 REM SE DEFINEN LOS ANGULOS NECESA-
5050 REM PIOS PARA ORIENTAR AL COLECTOR
5060 REM
5070 REM
5080 X1=360*(NDX-1)/365.242 :REM FUNCION DEL DIA DEL AÑO
5090 X=X1+GR
5100 ET=0.1236*SIN(X)+0.0043+COS(X)+0.1538*SIN(2*X)+0.0608+COS(2*X)
5110 CL=(LM-LT)/15 :REM CORRECCION POR LONGITUD
5120 MS=(2+ET+CL :REM MEDIODIA SOLAR
5130 AD=360*(284+NDX/365)+GP
5140 D=23.45+GR*SIN(AD) :REM ANGULO DE DECLINACION
5150 AN=-TANCL)*TAN(D)
5160 WA=-ATN(CM/SOR(-AN*AN+1))+PI/2 :REM ANGULO HORARIO
5170 SD=-WA+GR/15+MS :REM ANGULO HORARIO PARA EL ATARDECER
5180 SI=WA+GR/15+MS :REM ANGULO HORARIO PARA EL AMANECEER
5190 W=(MS-T)*15+GR
5200 AR=COS(L)*COS(D)+COS(W)*SIN(L)*SIN(D) :REM ARG. DEL ANG. DE ALTITUD
5210 IF ABS(AR)=1 THEN AL=90+GR GOTO 5230
5220 AL=ATN(AR/SOR(-AR*AR+1))
5230 AZ=(COS(L)*SIN(D)-COS(W)*SIN(L)*COS(D))/COS(AL) :REM ARG. ANG. AZIMUT
5240 IF AZ=1 THEN Z=0 GOTO 5260
5250 Z=ATN(AZ/SOR(-AZ*AZ+1))+PI/2 :REM ANGULO DE AZIMUT
5260 IF W<0 THEN Z=-Z
5270 CE=90+GP-AL :REM ANGULO DE CENIT
5280 I=IP+GP
5290 AI=(SIN(CE)+COS(Z)*SIN(I)+COS(CE)*COS(I))
5300 AZ=(SIN(CE)*SIN(Z))

```

```

5370 IF A2=0 THEN AP=90+GP GOTO 5400
5380 A=R1/A2
5390 AP=ATN(A)
5400 IF H<0 THEN AP=180+GP+AP
5410 RZ=20:CZ=5:GOSUB 10530
5420 PRINT MDZ:GOSUB 10640
5430 RP=AP
5440 AG=PP+RG
5450 RZ=21:CZ=25:GOSUB 10530
5460 PRINT USING"####.##":IP:GOSUB 10640
5470 RZ=22:CZ=27:GOSUB 10530
5480 PRINT USING"####.##":AG:GOSUB 10640
5490 RETURN
6000 REM
6010 REM
6020 REM CALCULO DEL ANGULO DISCRETO.
6030 REM
6040 REM ESTA SUBROUTINA CALCULA EL PASO
6050 REM DEL MOTOR DE ACUERDO AL ANGULO
6060 REM DE POSICIONAMIENTO ENTREGADO
6070 REM
6080 REM
6090 CPX=0:PD=-pi/200:R=0
6100 RD=RD+pi/100
6110 IF RD>P THEN 6170
6120 CPX=CPX+1
6130 IF CPX>100 THEN 6160
6140 R=R+pi/100
6150 GOTO 6100
6160 R=0:CPX=0
6170 RETURN
7000 REM
7010 REM
7020 REM CALCULO DE PARAMETROS GRAFICOS.
7030 REM
7040 REM CALCULA LAS COORDENADAS DE LOS
7050 REM PUNTOS EN LA TRAYECTORIA PARA
7060 REM PRESENTARLOS EN PANTALLA
7070 REM
7080 REM
7090 XS=SX-(COS(R)*SH)
7100 YS=SY-(SIN(R)*SH)
7110 MOVSPR 2,XS,YS
7120 CO=0:GOSUB 7310
7130 XP=PX-(COS(R)*XI)
7140 YP=PY-(SIN(R)*XF)
7150 XC=PX-(COS(R)*(XI-5))
7160 YC=PY-(SIN(R)*(XF-5))
7170 XR=XI+(SIN(R)*ND)
7180 YR=YI+(SIN(R)*ND)
7190 GX=(SIN(R)*XF)/XR
7200 GG=ATN(GX/SQR(-GX*GX+1))
7210 G=GG*RG
7220 IF R>pi/2 THEN G=180-G

```

:REM ANGULO DE POSICIONAMIENTO

:REM LLAMA A SUB. POSICIONA EL CURSOR
:REM LLAMA A SUB. REGRESA EL CURSOR
:REM PARA PRESENTAR EN PANTALLA DIA DEL
:REM A&O, ANG. DE POSICIONAMIENTO

:REM ANGULO DISCRETO, RANGO DE UN PASO
:REM SE COMPARA EL ANG. DISCRETO Y EL ANG
:REM DE POSICIONAMIENTO

:REM CALCULA LAS COORDENADAS DEL SPRITE
:REM SOL
:REM SE INTRODUCE EL SPRITE EN PANTALLA

:REM CALCULA LAS COORDENADAS DE LA
:REM PARABOLA

:REM RADIO HORIZONTAL DE LA PARABOLA
:REM RADIO VERTICAL DE LA PARABOLA

argumento.

Formato:

VAL(datos#)

El número proporcionado por VAL puede utilizarse en cálculos aritméticos. VAL convierte la cadena argumento descartando primero cualquier espacio en blanco que la preceda. Si el primer carácter distinto del espacio en blanco es un dígito, la función VAL empieza a convertir la cadena en un formato de número real.

ANEXO I I

LISTADO DEL PROGRAMA

RUTINA PRINCIPAL

FUNCION :

- INICIALIZACION DEL SISTEMA
- ADQUISICION DE FECHA Y HORA
- PUESTA EN HORA E INICIALIZACION DEL CALENDARIO
- PRESENTACION DE PANTALLA GRAFICA
- CALCULO DEL ANGULO DE POSICIONAMIENTO
- CALCULO DEL ANGULO DISCRETO
- CALCULO DE PARAMETROS GRAFICOS
- MOVIMIENTO DE PUERTO
- ACTUALIZACION DE HORA Y FECHA

PARAMETROS :

- FECHA Y HORA PARA ORIENTAR EL SISTEMA
- ANGULO PARA POSICIONAR EL COLECTOR Y VARIABLES PARA LA SIMULACION DEL SISTEMA EN LA PANTALLA

ELABORO :

LUZ MARIA A. ZARAGOZA LEMUS
JULIO OSCAR SALINAS RIVEROLL

HEAD.

```
10 REM
20 REM SUBRUTINA PRINCIPAL.
30 REM
40 GOSUB 1000
50 GOSUB 2000
60 GOSUB 3000
70 GOSUB 4000
80 GOSUB 10000
90 GOSUB 5000
100 GOSUB 6000
110 IF CPM=PM THEN GO
120 GOSUB 7000
130 GOSUB 9000
140 GOTO 50
150 END
1600 REM
1610 REM
1620 REM INICIALIZACION DEL SISTEMA
1630 REM
1640 REM ESTABLECE LAS CONDICIONES INI
1650 REM CIALES EN LAS VARIABLES Y EN
1660 REM LA PROGRAMACION DE INTERFASES
1670 REM
1680 REM
1690 SC=CLK
1700 PM=0
1710 SA=150 SB=116
1720 SX=171 SY=180
1730 FE=23.5715
1740 XI=20 XI=XI+RE XD=XE-XI
1750 YI=15 YE=YI+RE YD=YE-YI
1760 PX=79 PY=140
1770 PG=180 PG=PG+7184
1780 LT=90 LM=100 L=19.65+OP
1790 POK=66579.255+SLEEP 1
1200 G1=0 C=5
1210 FOR E=56577.0 TO SLEEP 1 POK=66577.0 SLEEP 1 POK=66577.0 C1=C
1220 RETURN
2000 REM
2010 REM
2020 REM ADQUISICION DE FECHA Y HORA.
2030 REM
2040 REM ESTA SUBRUTINA RECIBE LA FECHA
2050 REM Y LA HORA Y VERIFICA QUE SEAN
2060 REM CORRECTAS.
2070 REM
2080 REM
2090 PRINT PRINT " INSTRUCCIONES"
2100 PRINT PRINT " DE LA FECHA Y LA HORA."
2110 PRINT PRINT " PARA EL DIA DE JULIO DE 1985"
2120 PRINT PRINT " A LAS 09:09:08"
2130 PRINT PRINT " DEL 7 1985"
2140 PRINT PRINT " MES * 7"
```

```

2210 PRINT"      DIA ? 11":PRINT
2220 PRINT"      HORA ? 00"
2230 PRINT"      MIN. ? 05"
2240 PRINT"      SEG. ? 06":PRINT
2250 INPUT"      AÑO "A# :REM OBTIENE AÑO
2260 INPUT"      MES "M# :REM OBTIENE MES
2270 INPUT"      DIA "D# :REM OBTIENE DIA
2280 IF A#<=0 THEN 2250 :REM CHECK AÑO CORRECTO
2290 IF M#<=0 OR M#>12 THEN 2250 :REM CHECK MES CORRECTO
2300 IF D#<=0 THEN 2250 :REM CHECK DIA POSITIVO
2310 B=(A#*4)-INT(A#*4) :REM SI B=0, EL AÑO ES BICIESTO
2320 IF M#<=10RM#<=30FM#<=50FM#<=70FM#<=80FM#<=100FM#<=12 THEN 2390 :REM CHECK DIA
      DEL MES CORRECTO
2330 IF M#<=40RM#<=60FM#<=90FM#<=11 THEN 2370
2340 IF B=0 THEN 2360
2350 IF D#>28 THEN 2250:GOTO 2390
2360 IF D#>29 THEN 2250:GOTO 2390
2370 IF D#>30 THEN 2250:GOTO 2390
2380 IF D#>31 THEN 2250
2390 INPUT"      HORA "H# :REM OBTIENE HORA
2400 INPUT"      MIN. "MI# :REM OBTIENE MINUTOS
2410 INPUT"      SEG. "S# :REM OBTIENE SEGUNDOS
2420 INPUT"      LA INCLINACION DEL COLECTOR. "I# :REM
2430 IF VAL(I#)>0 OR VAL(I#)>23 THEN 2390 :REM CHECK HORA CORRECTA
2440 IF VAL(MI#)>0 OR VAL(MI#)>59 THEN 2390 :REM CHECK MINUTOS CORRECTOS
2450 IF VAL(S#)>0 OR VAL(S#)>59 THEN 2390 :REM CHECK SEGUNDOS CORRECTOS
2460 RETURN
3000 REM
3010 REM
3020 REM      FUESTA EN HORA E INICIALIZACION DEL CALENDARIO.
3030 REM
3040 REM      PREPARA LA HORA PARA PRESENTAR
3050 REM      LA EN PANTALLA Y ESTABLECE LAS
3060 REM      CONDICIONES INICIALES EN LAS
3070 REM      VARIABLES ASOCIADAS CON EL CA-
3080 REM      LENDARIO
3090 REM
3100 REM
3110 GOSUB 12000 :REM CALCULA DIA MAXIMO
3120 DIX=D#-M#*1
3130 IF B<>0 THEN 3160 :REM INDICADOR DE AÑO BICIESTO
3140 IF M#<3 THEN 3160
3150 DIX=DIX+1 :REM SE SUMA FEBRERO 29
3160 READ DS# :REM DIAS DE CADA MES
3170 IF M#<M# THEN 3190
3180 M#<M#*1:GOTO 3160
3190 H#<DIX+DS# :REM CALCULO NUMERO DE DIA EN EL AÑO
3200 A#<A#-(INT(A#/100)*100) :REM AÑO A PRESENTAR
3210 TI#<H#+MI#+S# :REM CADENA DE LA HORA DEL DIA
3220 H=TI :REM NUMERO DE JIFFIES
3230 M#<H/216000
3240 IF M#<=0 THEN MD#<=1
3250 RETURN

```

```

7290 CO=1:GOSUB 7310
7300 RETURN
7310 DRAW CO,XP,YP
7320 DRAW CO,XC,YC
7330 DRAW CO,XP,YP TO PX,PY
7340 CIRCLE CO,XP,YP,XR,YP,W,180,G
7350 RETURN
9000 REM
9010 REM
9020 REM      MOVIMIENTO DE PUERTO.
9030 REM
9040 REM      ESTA SUBROUTINA INVESTIGA SI
9050 REM      LA POSICION DEL MOTOR ESTA EN
9060 REM      EL PASO QUE LE CORRESPONDE
9070 REM
9080 REM
9090 IF PM2&CP2 THEN 9120
9100 IF PM2&CP2 THEN 9230
9110 GOTO 9340
9120 IF C=5 THEN 9170
9130 IF C=9 THEN 9180
9140 IF C=10 THEN 9190
9150 IF C=6 THEN 9200
9160 GOTO 9340
9170 C=C+4:D=C1+16:E=C+16:GOTO 9210
9180 C=C+1:D=C1+16:E=C+16:GOTO 9210
9190 C=C-4:D=C1+16:E=C+16:GOTO 9210
9200 C=C-1:D=C1+16:E=C+16
9210 POKE 56 577,C1:SLEEP 1:POKE 56 577,D:SLEEP 1:POKE 56 577,E:SLEEP 1:POKE 56 577,C:SLEEP 1:POKE 56 577,D:SLEEP 1:POKE 56 577,E:SLEEP 1:POKE 56 577,C1=0
9220 PM2=PM2+1:GOTO 9090
9230 IF C=9 THEN 9280
9240 IF C=6 THEN 9290
9250 IF C=10 THEN 9300
9260 IF C=3 THEN 9310
9270 GOTO 9340
9280 C=C+1:D=C1+16:E=C+16:GOTO 9320
9290 C=C+4:D=C1+16:E=C+16:GOTO 9320
9300 C=C-1:D=C1+16:E=C+16:GOTO 9320
9310 C=C-4:D=C1+16:E=C+16
9320 POKE 56 577,C1:SLEEP 1:POKE 56 577,D:SLEEP 1:POKE 56 577,E:SLEEP 1:POKE 56 577,C:SLEEP 1:POKE 56 577,D:SLEEP 1:POKE 56 577,E:SLEEP 1:POKE 56 577,C1=0
9330 PM2=PM2-1:GOTO 9090
9340 RETURN
10000 REM
10010 REM
10020 REM      ACTUALIZACION DE HORA Y FECHA.
10030 REM
10040 REM      ACTUALIZA LA HORA Y LA FECHA
10050 REM      PARA PRESENTARLOS EN PANTALLA
10060 REM
10070 REM
10080 H=TI
10090 T=T+1:
:REM VARIABLE RESERVADA PARA EL RELOJ
:REM DE TIEMPO REAL

```

```

10160 HX=H/216000
10170 IF HX>0 THEN H=H-HX+216000
10180 MI%=H/3600
10190 IF MI%>0 THEN H=H-MI%*3600
10200 S%=H/60
10210 IF HX<0 THEN 10330
10220 IF MI%>0 THEN 10340
10230 IX=IX+1:NDX=NDX+1:MI%=1
10240 IF IX<=MI% THEN 10340
10250 IX=1:MI%=MI%+1
10260 IF MI%>12 THEN 10280
10270 GOTO 10310
10280 AX=AX+1:MI%=1:NDX=1
10290 F=(AX/4)-INT(AX/4)
10300 APX=AX-(INT(AX/100)+100)
10310 GOSUB 10640
10320 GOTO 10340
10330 NDX=0
10340 H#=#MID$(CF,1,2)
10350 MI#=#MID$(CF,3,2)
10360 S#=#MID$(CF,5)
10370 HOF=H#+""+MI#+""+S#
10380 GOSUB 10640
10390 RX=19:CX=7:GOSUB 10530
10400 PRINT USING "###:APX:GOSUB 10640
10410 CX=6:GOSUB 10530
10420 PRINT"/":GOSUB 10640
10430 CX=4:GOSUB 10530
10440 PRINT USING "##":MI%:GOSUB 10640
10450 CX=3:GOSUB 10530
10460 PRINT"/":GOSUB 10640
10470 CX=1:GOSUB 10530
10480 PRINT USING"##":IX:GOSUB 10640
10490 CX=31:GOSUB 10530
10500 PRINT HOF:GOSUB 10640
10510 GOTO 10790
10520 REM
10530 REM POSICIONA EL CURSOR
10540 REM
10550 REM SUBROUTINA QUE PERMITE MOVER
10560 REM EL CURSOR A UNA POSICION DE-
10570 REM TERMINADA POR RX Y CX
10580 REM
10590 R#=""
10600 C#=""
10610 PRINT LEFT$(R#,RX);LEFT$(C#,CX);
10620 RETURN
10630 REM
10640 REM REGRESA CURSOR
10650 REM
10660 REM SUBROUTINA QUE REGRESA EL
10670 REM CURSOR A SU POSICION INICIAL
10680 REM
10690 R#=""

```


ANEXO III

TABLA PROPIEDADES
DEL AGUA

Table A-9 Properties of Water (Saturated Liquid)†

°F	°C	$c_{p,s}$ kJ/kg·°C	ρ_s kg/m ³	μ_s kg/m·s	k_s W/m·°C	Pr	$\frac{\gamma_s \rho_s}{\mu_s}$ 1/m ² ·°C
32	0	4.225	999.8	$1.79 \cdot 10^{-4}$	0.566	13.25	
40	4.44	4.208	999.8	1.55	0.575	11.35	$1.91 \cdot 10^8$
50	10	4.195	999.2	1.31	0.585	9.40	$6.54 \cdot 10^8$
60	15.56	4.186	998.6	1.12	0.595	7.78	$3.08 \cdot 10^8$
70	21.11	4.179	997.4	$9.8 \cdot 10^{-4}$	0.604	6.78	$1.86 \cdot 10^8$
80	26.67	4.179	995.8	8.6	0.614	5.95	$1.91 \cdot 10^8$
90	32.22	4.174	994.9	7.65	0.623	5.12	$2.48 \cdot 10^8$
100	37.78	4.174	993.0	6.82	0.630	4.51	$3.3 \cdot 10^8$
110	43.33	4.174	990.6	6.16	0.637	4.01	$4.19 \cdot 10^8$
120	49.89	4.174	988.8	5.62	0.644	3.64	$4.19 \cdot 10^8$
130	54.44	4.179	985.7	5.13	0.649	3.30	$5.66 \cdot 10^8$
140	60	4.179	981.3	4.71	0.654	3.01	$6.54 \cdot 10^8$
150	65.55	4.183	980.3	4.3	0.659	2.73	$7.62 \cdot 10^8$
160	71.11	4.186	977.3	4.01	0.665	2.53	$8.84 \cdot 10^8$
170	76.67	4.191	973.7	3.72	0.668	2.33	$9.83 \cdot 10^8$
180	82.22	4.195	970.2	3.47	0.675	2.16	$1.09 \cdot 10^9$
190	87.78	4.199	966.7	3.27	0.678	1.99	
200	93.33	4.204	963.2	3.06	0.684	1.86	
220	104.4	4.216	955.1	2.67	0.685	1.51	
240	115.6	4.229	946.7	2.44	0.685	1.36	
260	126.7	4.250	937.2	2.19	0.685	1.24	
280	137.8	4.271	928.1	1.98	0.684	1.17	
300	148.9	4.296	918.0	1.86	0.677	1.02	
350	176.7	4.371	890.4	1.57	0.665	1.00	
400	204.4	4.467	859.4	1.36	0.646	0.85	
450	232.2	4.585	825.7	1.20	0.616	0.83	
500	260	4.731	785.2	1.07			
550	287.7	5.024	735.5	$9.51 \cdot 10^{-3}$			
600	315.6	5.703	678.7	8.68			

† Adapted from A. I. Brown and S. M. Marco, "Introduction to Heat Transfer," 3d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1958.

GLOSARIO

- Energía.** - Capacidad para producir un trabajo.
- Espectro.** - Resultado de la separación de las componentes de distinta frecuencia de un fenómeno ondulato cualquiera.
- Excentricidad.** - Término aplicado en Geometría a las figuras cónicas (parábola, elipse, circunferencia) como una medida de la distancia de un punto cualquiera de la figura a un foco y su distancia a la directriz correspondiente a dicho foco. En una elipse el valor de la excentricidad nos dice que tan circular o que tan alargada es ésta.
- Handshaking.** - Una secuencia de operaciones entre dos componentes (por ejemplo dos procesos que se comunican a través de una red de computadoras) en la que cada una se va turnando con la otra en la transmisión de datos. Se trata de una técnica fundamental en la sincronización de las comunicaciones o transmisiones de datos.
- Huso horario.** - Cada una de las partes ideales de la superficie terrestre imaginada para la definición y la unificación del tiempo legal en el interior de los diversos estados. Cada huso horario resulta de la división del círculo ecuatorial en 24 partes iguales, cada una con una amplitud de 15 grados. El meridiano de origen se considera pasando por Greenwich en Inglaterra. Al este de dicho meridiano se considera que es más tarde y hacia el oeste más temprano.
- Interfase.** - Dispositivos utilizados para realizar el acoplamiento entre dos unidades de una computadora. En sentido más restringido se aplica a los dispositivos necesarios para conectar una unidad central de proceso a un periférico.
- Jiffy (jiffies).** - Término usado en la computadora C-128 Commodore. La C-128 sigue la pista de la hora en jiffies. Un Jiffy es 1/60 de segundo.
- Joy-sticks.** - Palanca de mando. Dispositivo constituido por un eje articulado que al accionarse, transmite señales al computador y de este modo controla el desplazamiento de un objeto en la pantalla.
- Monocromático.** - Luz o radiación constituida por radiaciones de una sola longitud de onda.
- Parábola.** - Línea curva cuyos puntos son todos equidistantes de un punto fijo llamado foco y de una recta fija llamada directriz.

Potencia.- Toda fuerza que aplicada a un cuerpo produce un efecto cualquiera.

Potencia emisiva.- Capacidad de un cuerpo en estado de excitación de emitir radiación en ciertas longitudes de onda.

Puerto.- Canal de acceso. Receptáculo en un computador al que se conectan los dispositivos de Entrada/Salida y que se direcciona por el procesador central mediante un número lógico. Es un elemento encargado de realizar las transacciones de información entre la unidad de control y los periféricos.

RAM.- Random Acces Memory. Memoria de acceso aleatorio. se suele denominar también memoria de lectura/escritura (R/W; Read/Write) ya que en ella se puede leer o escribir información indistintamente. Además podemos escoger cualquier registro de memoria al azar, para leer o escribir una palabra.

ROM.- Read Only Memory. Es una memoria de solo lectura en la que no podemos escribir una vez que se le ha grabado cierta información permanente.

Sprite.- Un sprite es un dibujo en un formato de pantalla ya establecido de 24 por 21 puntos, independiente del resto de la visualización de la pantalla.

TIME#.- Es una variable de cadena que se genera a partir de TIME, TIME es una variable numérica reservada que se incrementa automáticamente cada 1/60 seg. Cuando se llama a TIME#, la C-128 visualiza el tiempo en horas, minutos y segundos (hhmmss), es decir convierte la hora en jiffies a horas reales.

CONCLUSIONES

- 1.-Punto de vista académico.
- 2.-Conocimientos adquiridos.
- 3.-Deficiencias.
- 4.-Utilidad en la investigación.
- 5.-Utilidad para el país y la industria.

1.-Punto de vista académico.

Quizá la mayor parte de las carreras universitarias a nivel licenciatura enseñan al estudiante una gran cantidad de conocimientos en diferentes áreas, lo ejercitan mentalmente y le permiten desarrollar un criterio e inteligencia que le permitan afrontar los problemas de la vida real. Sin embargo la cohesión de dichos conocimientos no se logra sino hasta que el estudiante inicia una vida profesional llena de problemas que presentan diferentes aristas. Cada una de ellas requiere de la aplicación de una disciplina distinta de la ciencia, a lo cual no fue acostumbrado el estudiante pues en la escuela cada materia presentaba sus propios problemas, en muchos casos demasiado idealizados y que no conjuntaban aspectos reales.

Aún más crítico puede ser que algunos cursos académicos en sí mismos no mantengan continuidad y cohesión presentando temas y ejercicios en forma aislada en donde el alumno no vislumbra la utilidad práctica que tendrá en el futuro y ni siquiera podrá resolver un problema integral de la misma materia.

Al terminar este trabajo estamos seguros que el lector podrá encontrar una secuencia lógica de teoría y problemas que se plantean a fin de resolver una cuestión central: el diseño de un colector solar de enfoque.

Si alguien desea modificar o mejorar el diseño aquí presentado puede seguir la misma estructura y aún más, cambiar los datos alimentados y usando la misma secuencia y ecuaciones obtener otro diseño completamente nuevo.

Como texto para cursos de energía solar presenta teoría y problemas resueltos hasta llegar a una solución final. En México solo hemos encontrado un libro escrito en español por un Ingeniero y profesor mexicano, pero que no dedica sino un par de páginas a los colectores solares cilíndrico parabólicos.

Con seguridad deben existir artículos y publicaciones también nacionales pero no muy accesibles para usarse como textos académicos. Esperamos que el grupo de entusiastas

profesores de nuestra facultad que promueven este tipo de investigaciones encuentren en este material un apoyo a sus cursos.

Por otro lado la mayor parte de sistemas de colectores de enfoques de cualquier geometría requerirán del desarrollo de ecuaciones de seguimiento del sol, si es que es elegido el sistema electrónico programado, ninguno de los textos consultados por nosotros incluye un desarrollo matemático típico como el que efectuamos en el capítulo 2 en el tema "Orientación del Colector" para hallar la ecuación de seguimiento.

2.-Conocimientos adquiridos.

La ciencia para progresar requiere del avance paralelo de las distintas disciplinas que la conforman. De no ocurrir esto las nuevas generaciones de científicos podrían llegar a un callejón sin salida al no encontrar las herramientas proporcionadas por áreas afines que le permitan la obtención de los resultados esperados.

Así han existido grandes científicos que no han podido materializar sus ideas al encontrar que la ciencia no estaba preparada para apoyar sus estudios.

Nosotros dentro de nuestro modesto trabajo sentimos esta angustia e inquietud de saber que ante cada nueva dificultad que se nos anteponia, teníamos que estudiar y recurrir a otras fuentes de información que apoyaran y nos permitieran continuar con el avance de nuestro diseño. Así tuvimos que recurrir y estudiar de materias como: Álgebra y Geometría Analítica, Transferencia de Calor, Trigonometría, Óptica, Computación, Electrónica, Termodinámica, Energía Solar, Mecánica de Fluidos, etc.

Por la parte de Computación y Electrónica el esfuerzo y conocimientos adquiridos son muy superiores a lo que se pudiera observar en esta tesis, ya que originalmente el proyecto era mas ambicioso y se pretendía que la programación de la ecuación de seguimiento del sol se hiciera en lenguaje de máquina Z-80. Para ello desarrollamos programas de utilidad que efectúan operaciones matemáticas básicas con números llamados de doble precisión con punto fijo, es decir 16 dígitos binarios (bits) enteros y 16 dígitos fraccionarios ya sea positivos o negativos.

En estudios previos realizados en la escuela y algunos libros de nivel maestría solo hallamos algoritmos y programas para operar hasta con 16 bits signados enteros, teniendo que desarrollar entonces nuestros propios programas e incluso algoritmos para operar con números de 32 bits en doble precisión:

Para programar en lenguaje Z-80 tuvimos que aprender el uso del Macroensamblador Z-80, sistema operativo DOS, Debug (rastreador), instrucciones tipo MACROS (paquetes de

instrucciones Z-80), etc.

Esta parte fue suprimida a pesar de haber logrado un avance significativo ya que aun faltaba mucho material por desarrollar.

Así mismo la programación en lenguaje BASIC nos obligó a adentrarnos en sus instrucciones, manejo de puertos de salida, funcionamiento de la microcomputadora, motor de pasos, uso de gráficos en monitor de televisión, uso de reloj interno, etc.

Finalmente aún para mecanografiar la tesis tuvimos que aprender el uso de un Procesador de Palabras para editar el texto en la computadora. Los dibujos fueron hechos a mano en su mayoría, pero algunos fueron dibujados en computadora a través del programa AUTOCAD.

3.-Deficiencias.

Como apuntamos en el prólogo, creemos que los libros se reservan mucha información tecnológica y presentan los principios básicos muy cuidadosamente sin revelar secretos.

Esto se aprecia cuando uno intenta diseñar algo y recurre a los libros, encontrando en la mayoría de los casos mucha falta de vinculación entre la teoría y la práctica. Quizá nuestra carrera debería ser complementada con más horas de práctica, laboratorios, proyectos, visitas a la industria, conferencias, etc.

Creemos que el trabajo pudo haber sido enriquecido con una mayor y mejor bibliografía, sentimos que tuvimos que interpretar cuidadosamente y redescubrir muchos conceptos que quizá en otras publicaciones científicas o libros estén explicados con mayor profundidad y claridad que en la bibliografía consultada. Sin embargo en nuestra Facultad los recursos no son muy vastos.

No es objetivo de esta tesis abundar en los aspectos de construcción y proceso de manufactura del colector, lo cual pudiera sentirse como una deficiencia. Sin embargo un pequeño prototipo se ha construido para comprobar los resultados teóricos sobre todo en el aspecto de enfoque y computación.

4.-Utilidad en la investigación.

Las aportaciones de esta tesis para posteriores investigaciones o uso como material de apoyo académico se sintetizan en las siguientes líneas:

a) Describe los principales aspectos de la radiación solar y los tipos mas comunes de colectores solares.

b) Estudia un desarrollo matemático típico para

seguimiento del sol en colectores de enfoque.

c) Define los ángulos básicos que permiten la localización del sol en la bóveda celeste.

d) Presenta tres métodos distintos para el cálculo de la radiación solar directa.

e) Estudia los parámetros fundamentales para el dimensionamiento de colectores de enfoque lineales.

f) Describe los mecanismos de la transferencia de calor en forma sintética.

g) Presenta un estudio y cálculo de la operación térmica del colector.

h) Define las características elementales de una microcomputadora, el motor de pasos y su interconexión.

i) Desarrolla un programa de seguimiento y control del movimiento para un colector cilíndrico parabólico.

5.- Utilidad para el país y la industria.

El avance tecnológico de los países en vías de desarrollo como México no debe seguir las líneas de los países industrializados que nos aventajan ampliamente. Intentar por ejemplo desarrollar una industria de fabricación de semiconductores nacional con un mercado interno pequeño como el nuestro o bien competir en los mercados internacionales sería casi imposible en las condiciones actuales.

Sin embargo desarrollar una industria electrónica que pudiera abastecer el mercado nacional con productos diseñados y fabricados en el país para sustituir aquellos que actualmente son importados a altos precios, como por ejemplo los instrumentos de protección, medición y control utilizados en las instalaciones eléctricas de CFE, PEMEX y la industria privada que representan conjuntamente un mercado importante, parece mas viable y a partir de la cual quizá pudieran despedar otras industrias como ahora sí, la fabricación de semiconductores.

En forma análoga querer producir energía eléctrica con plantas nucleares como lo hacen los países industrializados de Europa y Norte América teniendo otros recursos de los que aquellos carecen resulta una mala imitación. México podría generar electricidad en sus mares, zonas de fuertes vientos, zonas geotérmicas y zonas de alta insolación.

El aprovechamiento de la energía solar en el país que ocupa el tercer lugar con mayor insolación a nivel mundial,

tan solo después de dos países árabes, resulta imperativo.

México debe apoyar la investigación y desarrollo de una industria que permita el aprovechamiento cabal de este recurso natural, gratuito y no contaminante.

De lo expuesto en el presente trabajo de tesis podemos observar que la fabricación de colectores solares no requiere una gran inversión ni tecnología, el costo del colector puede además ser rápidamente amortizado, recordemos que un colector como el diseñado aquí con una eficiencia total del orden de un 50% puede aprovechar unos 5 kilowatts-hora por cada metro cuadrado de superficie expuesta al sol durante un día que aprecios de Enero de 1989 significaría unos \$400.00 (\$60.00 kWh de energía eléctrica a precio subsidiado por el gobierno).

En un colector como el nuestro de 12.5 metros cuadrados de apertura se obtendrían unos 60 kWh diarios que significarían alrededor de \$4,800.00.

El costo del colector en forma aproximada sería el siguiente:

Estructura metálica	\$ 100,000
Tubo absorbedor de cobre	\$ 50,000
Cubierta de vidrio	\$ 90,000
Fibra de vidrio	\$ 40,000
Mylar	\$ 35,000
Motor de pasos	\$ 300,000
Solenoides y freno	\$ 50,000
Circuito de interfase y fuente	\$ 80,000
Computadora Commodore 128 (suponiendo tiempo compartido con 9 colectores mas manejados por la misma computadora.)	\$ 150,000
Mano de obra	\$ 300,000
Diversos	\$ 200,000
Total	\$1,195,000

Sin considerar lo que esta inversión inicial produciría a tasas bancarias ni el incremento en el precio del kilowatt-hora la inversión se pagaría en 249 días. La vida útil del colector sería de al menos 10 años.

Como se ve el proyecto es viable y la inversión recuperable a poco tiempo. Es bueno reflexionar entonces acerca de los altos costos en la producción de energía eléctrica y su transmisión y distribución; la contaminación producida por las centrales termoeléctricas y sobre todo el desperdicio de un recurso natural no renovable como lo es el petróleo y que podría ser utilizado en la fabricación de

fertilizantes, fibras sintéticas, pavimentación de carreteras, fabricación de productos químicos, plásticos, etc.

El petróleo no durará al ritmo actual más de 40 o 50 años. es el momento actual propicio para la utilización de otros recursos como la energía solar.

BIBLIOGRAFIA

HWEI P. Hsu, Análisis Vectorial, 1901, editorial Interamericana

HANRIQUE, A. José, Energía Solar, fundamentos y aplicaciones fototérmicas, Mexico, D.F. Harla Harper, 1984, 255 pp.

PEATMAN, John B. Microcomputer-based design, International student, Mc Graw Hill International book company

DUFFIE, John A. BECKMAN, William A. Solar Engineering of Thermal processes, John Wiley & Sons, Inc. 1980, 762 pp.

KREIDER, Jan F. and KREITH Frank, Solar energy- handbooks, manuals Mc Graw Hill series in modern structures 1980 29-56 pp.

Enciclopedia of energy, Mc Graw Hill segunda edición

Lehmann, Charles, Geometría Analítica, Mexico, UTEHA, 1953 494 pp.

AIRPAX, Control Components short form catalog, Form No. 18001-A/2-88, Printed U.S.A. Airpax Company Cheshire Division

AIRPAX, Stepper Motors, Form No. 40008-A/1-88, Printed U.S.A. Airpax Company International Division

CURTIS D. Moyer, Using power MOSFETS in stepping motor control, Motorola Semiconductor, Products Inc. AN-876, Application Note, 1982, 1-6 pp.

HEILBORN, John, Commodore 128, Guía del usuario, primera edición, Espana, La Colina, 1986, 584 pp.

COMMODORE, C-128 System Guide, tercera edición, U.S.A. Commodore Electronics, noviembre 1986, 400 pp.

COMMODORE, Introducing the Commodore 128 personal computer, U.S.A. 1985, 35 pp.

COMMODORE, 1581 Disk drive user's guide. U.S.A. Commodore Electronics, 1987, 127 pp.

COMMODORE, MPS-801 Dot Matrix Printer User's Manual, U.S.A. 1983, 41 pp.

ENERGY TECHNOLOGY HANDBOOK, Douglas W. Considine, Mc Graw Hill, U.S.A. 1977.