



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**

**División de Ciencias e Ingeniería**

**Dimensionamiento por Computadora de un  
Sistema de Colectores Solares Planos para el  
Calentamiento de Agua Doméstica.**

**TESIS RECEPCIONAL**

Para obtener el Grado de

*Ingeniero en Sistemas de Energía*

**PRESENTA**

**EFRAIN SOTO APOLINAR**

**DIRECTOR DE TESIS**

**M.C. FERNANDO FLORES MURRIETA**

Chetumal, Quintana Roo, Enero 2006

Ø49772



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**División de Ciencias e Ingeniería**

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**COMITÉ**

**Director: M. C. Fernando Enrique Flores Murrieta**

**Asesor: M.E.S. Roberto Acosta Olea**

**Asesor: M.C. Jaime Cuevas Dominguez**



Chetumal, Quintana Roo, Enero de 2006

## Índice

Resumen	7
Simbología	9
Lista de figuras	11
Lista de tablas	11
<b>1. Capítulo I Panorama General</b>	
1.1. Introducción	13
1.2. Antecedentes	14
1.3. Estado del Arte	16
1.4. Hipótesis	23
1.5. Objetivo General	23
1.6. Objetivos Particulares	23
1.7. Metas	23
1.8. Alcance	23
1.9. Justificación	24
<b>2. Capítulo II Metodología</b>	
2.1. <u>Dimensionamiento del sistema de colectores solares planos</u>	25
2.2. Metodología	25
2.2.1. Consideraciones técnicas	30
2.2.2. Modelo matemático	31
2.3. Diseño del diagrama de flujo	33
2.4. <u>Cálculo de la eficiencia de un colector solar plano</u>	35
2.4.1. Consideraciones técnicas	36
2.4.2. Modelo matemático	37
2.5. Diseño del diagrama de flujo	43
<b>3. Capítulo IV Evaluación del Software CSP</b>	
3.1. Evaluación del software CSP Dim	45
3.2. Evaluación del software CSP Ef.	46
<b>4. Capítulo V Análisis de los Resultados</b>	
4.1. Análisis de resultados CSP Dim	52
4.2. Análisis de resultados CSP Eficiencia	55
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b>	
5.1. Conclusiones particulares	67
5.2. Conclusiones generales y recomendaciones	68
<b>Referencias Bibliográficas</b>	70
Ap. I: Algoritmo del software	71
Ap. II: Guía del software CSP	74
Ap. III: Código del Software	79
Glosario	97

## Resumen

En este trabajo se presenta la metodología para los distintos cálculos básicos que ordinariamente se realizan para sistemas de colectores solares planos para calentamiento de agua través de un software. Particularmente (a) el dimensionamiento de un sistema de colectores solares planos y (b) el cálculo de la eficiencia de un colector solar plano.

Con la ayuda de un software de computadora se hace un análisis de la sensibilidad de la eficiencia de un colector solar plano ante los cambios de distintos parámetros del mismo (inclinación del colector, coeficientes de pérdidas térmicas, temperatura media de placa, conductancia tubo - aleta, espesor de la pared inferior, etc.)

## Simbología

Simbolo	Software	Significado
	a	Ancho del colector
$\alpha_s$	alpha_s	Ángulo de altura solar
	ap	Coefficiente de pérdidas por área
	atot	Área total de colección del sistema solar
	b	Largo del colector
$\beta$	beta	Inclinación de los colectores respecto a la horizontal
	C	Coefficiente auxiliar en el cálculo de las pérdidas convectivas
	cacc	Costo de los accesorios
	cselect	Costo del consumo de electricidad usada para acondicionar el agua
	ccol	Costo de los colectores solares planos
	ccgas	Costo del gas L. P. Requerido para acondicionar el agua
	celect	Consumo de energía eléctrica requerida para acondicionar el agua
	cgas	Consumo de gas L. P. Requerido para acondicionar el agua
	cinst	Costo de la instalación del sistema
	Cp	Calor específico del agua (4180 J/Kg°C)
	ctot	Costo total del sistema requerido
	ctt	Costo del termo-tanque
	d	Diámetro externo de los tubos
	Db	Conductancia de contacto tubo-aleta
$\delta$	delta	Declinación solar
$\delta_p$	deltap	Grosor de la aleta
	Di	Diámetro interno de los tubos
	dia	Número del día del año con irradiación mínima local anual (1... 365)
	e	Coefficiente auxiliar en el cálculo de las pérdidas convectivas
	E	Cantidad de energía requerido para acondicionar el agua demandada
	ef	Eficiencia de los colectores solares planos
$\epsilon_g$	epsilong	Emitancia del vidrio de la cubierta del colector
$\epsilon_p$	epsilonp	Emitancia de la placa
	etot	Energía total captada por el sistema solar
	f	Eficiencia de la aleta
	fmin	Coefficiente auxiliar en el cálculo de las pérdidas convectivas
	fp	Factor de eficiencia del colector
	fr	Factor de remoción de calor
$\gamma$	gamma	Ángulo acimut de la superficie
$\gamma_z$	gamma_z	Ángulo del acimut solar
	Hcpc	Coefficiente de convección entre la cubierta y la placa
	Hfi	Coefficiente de transferencia de calor por convección fluido-tubo
	Hrpc	Coefficiente de radiación entre la cubierta y la placa
$\omega$	hs	Ángulo horario (hora solar)
	hw	Coefficiente de transferencia de calor al ambiente
	i	Radiación solar local calculada para el día de irradiación mínima

		local
	lo	Constante solar (1353 w/m <sup>2</sup> )
	jpelect	Joules de energía proporcionados al agua por cada peso de electricidad
	jpgas	Joules de energía proporcionados al agua por cada peso de gas L. P.
	k	Conductividad térmica del material de la aleta
	Ka	Conductividad térmica del aislante
	L	Espesor de la pared inferior
	mass	Flujo másico
	N	Número de cubiertas
	nc	Número de colectores solares planos requeridos
	np	Número de personas
	pelect1	Precio del kilowatt – hora de energía eléctrica
	Pend	Pendiente de la recta que da el comportamiento de la eficiencia del colector con las variaciones de temperatura
	pgas1	Precio del kilogramo de gas L. P.
φ	phi	Latitud local
π	pi	3.141592654
	Qu	Calor útil
	S	Área del colector
σ	sigma	Constante de Stephan Boltzmann (5.66x10 <sup>-8</sup> w/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup> )
	t	Hora solar local
	ta	Temperatura ambiente local
τ	tau	Transmitancia de la cubierta
	Tc	Temperatura de cubierta
	te	Temperatura de entrada del agua a acondicionar
	temp	Temperatura ambiente promedio anual local
	Tfi	Temperatura final del agua acondicionada
θ	theta	Ángulo de incidencia
θ <sub>z</sub>	theta_z	Ángulo cenit solar
	ti	Tasa de interés compuesto anual
	tpm	Temperatura media de placa
	tr1	Tiempo de recuperación de la inversión en base a gas L. P.
	tr2	Tiempo de recuperación de la inversión en base a energía eléctrica
	Ts	Temperatura de cielo
	tsal	Temperatura de salida del agua acondicionada
	Ut	Coefficiente de pérdidas por placa conductora
	Ut1, Ut2, Ut3	Términos auxiliares en el cálculo de las pérdidas por placa
	Ub	Pérdidas por conducción en las paredes (aislante)
	UI	Coefficiente global de pérdidas de calor
	voltt	Volumen total del termo-tanque
	vol	Volumen de agua acondicionada requerido
	w	Distancia entre los tubos

## Lista de figuras

Fig.	Nombre	Pag.
1	Colectores conectados en serie (a) y en paralelo (b)	16
2	Partes de un colector solar plano	18
3	Sistema de colectores solares planos para uso doméstico	21
4	Pantalla principal del software CSP Dim	76
5	Pantalla principal del software CSP Eficiencia	79

## Lista de tablas

No.	Nombre	Pag.
1	Datos usados en la evaluación del software CSP Dim	44
2	Resultados de la evaluación del software CSP Dim	45
3	Datos usados en la evaluación del software CSP Eficiencia.	49
3.1	Variación de la eficiencia debido al parámetro $\beta$	49
3.2	Variación de la eficiencia debido al parámetro $h_w$	49
3.3	Variación de la eficiencia debido al parámetro $h_{ji}$	49
3.4	Variación de la eficiencia debido al parámetro $T_{pm}$	50
3.5	Variación de la eficiencia debido al parámetro $C_b$	50
3.6	Variación de la eficiencia debido al parámetro $L$	50
3.7	Variación de la eficiencia debido al parámetro $n$	51
3.8	Variación de la eficiencia debido al parámetro $k$	51
3.9	Variación de la eficiencia debido al parámetro $k_a$	51

## Capítulo I. Panorama General

### Introducción

El propósito de este trabajo es la presentación de la metodología del cálculo de la eficiencia de un sistema de colectores solares planos para calentamiento de agua doméstica a través de un software de computadora, y que pueda dimensionar un sistema de colectores solares planos, primero, que sea útil a un fabricante, quien preferentemente buscará los cálculos técnicos relativos a la eficiencia de un colector solar plano, basándose en las características del colector y de acuerdo a las metodologías ya establecidas; segundo, que pueda servir como una herramienta didáctica en la Universidad de Quintana Roo para la carrera Ingeniería en Sistemas de Energía, y por otra parte que esté escrito en español, para facilitar el trabajo a aquellas personas que no tienen dominio del idioma inglés.

En el capítulo 1 se incluyen la introducción, los antecedentes y el estado del arte referente a este trabajo. También se incluyen la hipótesis, los objetivos general y particulares de este trabajo, las metas y su alcance, así como su justificación.

En el capítulo 2 se describe la metodología y los criterios tomados en cuenta para hacer los softwares (a) CSP Dim, que permiten dimensionar sistemas de colectores solares planos y (b) CSP Eficiencia, el software que permite calcular la eficiencia de un colector solar plano.

En el capítulo 3 se realiza la evaluación del software propuesto. Finalmente, en el capítulo 4 se hace un análisis de los resultados obtenidos con el software, para terminar con las conclusiones y recomendaciones en el capítulo 5.

Adjunto se muestran los apéndices que incluyen los algoritmos detallados de los softwares (apéndice I). En el apéndice II pueden encontrarse las guías que describen el uso de los distintos softwares que se elaboraron en el desarrollo de este trabajo. En el apéndice III aparecen las gráficas de la predicción del comportamiento de la eficiencia de un colector solar plano generadas con el software CSP Eficiencia.

## Antecedentes

### Calentamiento de agua doméstica

La industria solar ha creado varios dispositivos que han encontrado un amplio mercado alrededor del mundo, pero de entre todos ellos, el de mayor divulgación es el calentamiento de agua doméstica. Esto se debe a que es la aplicación de la energía solar más barata que existe actualmente [1], además de que los demás productos de tecnología solar todavía presentan precios ligeramente más altos que sus contrapartes convencionales, excepto para aplicaciones muy remotas, tales como estaciones de telecomunicaciones, que además requieren conocimientos técnicos más avanzados. Por tanto, esta industria solar creciente necesita medios más eficaces de producción para generar artículos de alta calidad a un bajo costo.

### Softwares de auxilio en el dimensionamiento

Para aumentar la confiabilidad de los métodos de diseño, dimensionamiento y construcción de los sistemas de colectores solares planos para el calentamiento de agua doméstica se han creado una serie de herramientas. Entre ellas se encuentra la utilización de software que presenta las siguientes ventajas:

1. Se reduce el tiempo requerido para los cálculos básicos de este tipo de sistemas.
2. Aumenta la confiabilidad de los resultados, dado que el usuario oprime por mucho, menos teclas que si él mismo hiciera el cálculo.
3. Se pueden cambiar las condiciones del cálculo para considerar varios casos y, finalmente decidir por la opción más conveniente para el usuario.

Además, el software propuesto en este trabajo incluye las siguientes:

4. Tiene un lenguaje asequible, para que cualquier persona técnica en el área lo pueda usar, además de contar con ayuda todo el tiempo.
5. Está escrito en español completamente. La mayoría de los softwares que se han localizado por parte del autor de este trabajo, han sido escritos en el idioma inglés.
6. Permite modificar parámetros que muy pocos softwares permiten.
7. Indica (CSP Dim), en su caso, si el sistema propuesto no es factible, desde el punto de vista económico, cuál es el costo mínimo que debe tener la energía requerida para satisfacer la demanda energética y cuánto cuesta satisfacer esa demanda de energía en cada caso, bien se use gas o electricidad.
8. Genera gráficas del comportamiento de la eficiencia de un colector solar plano a lo largo del año.
9. Finalmente, permite la comparación del desempeño de dos colectores solares planos, no necesariamente iguales, que operan en condiciones distintas.

Para generar reportes y gráficas se han diseñado varios métodos y criterios. A continuación se menciona uno de ellos.

### Método F

Este método ayuda a hacer una rápida estimación del desempeño anual de un sistema solar térmico activo, donde la temperatura mínima de operación es cercana a los 20°C. Las configuraciones que pueden ser evaluadas por el método F son comunes en las aplicaciones residenciales. Este método puede ser usado para sistemas solares de calentamiento de agua doméstica. Los datos necesarios

son promedio de insolación mensual, temperatura, parámetros del sistema y estimación de las cargas energéticas.

El método F se diseñó para hacer estimaciones de la fracción de la carga total de energía que se requiere para un sistema en particular que será proporcionada por el Sol. Estos sistemas generalmente usan un líquido anticongelante que fluye a través del colector y el agua es un medio de almacenamiento de energía. Es decir, este método se usa en sistemas indirectos (i. e., con intercambiador de calor). Por tanto, este método no es aplicable para el software generado en este trabajo, pues éste considera sistemas que trabajan a régimen termosifónico, esto es, sin intercambiador de calor.

### **Ventajas y desventajas del método F**

Se hacen algunas suposiciones para trabajar con el método F [2]. Primero, se supone que todo el líquido dentro del termo-tanque tiene la misma temperatura. Esta suposición tiende a hacer estimaciones conservativas del desempeño a largo plazo por una sobre-estimación de la temperatura del agua de entrada. Segundo, por razones de economía en las simulaciones, todos los días se consideran simétricos respecto al mediodía solar. Esto también guía a una estimación conservativa de la salida del sistema. Particularmente, para el calentamiento de agua, se ha notado que la energía en el agua, arriba de la temperatura de operación, no se considera útil. Luego, los cálculos tienden a ser conservativos en sus predicciones. Por otra parte, se supone que los termo-tanques están bien aislados, y que no hay pérdidas en los sistemas, lo cual tenderá a degradar el desempeño de los sistemas, debajo de los niveles predichos por este método.

El método F tiene algunas incertezas que surgen de varias fuentes. Primero, los datos meteorológicos pueden contener errores entre 5 y 10%, en especial cuando los datos de radiación horizontal se convierten a la recibida por el plano del colector. Segundo, los promedios se usan en cálculos, y cualquier año en particular puede variar por mucho de los cálculos. Tercero, las cargas energéticas son difíciles de predecir, porque dependen de los hábitos de los usuarios del sistema. Cuarto, los sistemas pueden ser diseñados y construidos de manera cuidadosa, con el mínimo de pérdidas térmicas, pero tener algunos otros problemas mecánicos y térmicos. Por último, quinto, (y quizás con menor importancia) hay algunas diferencias entre la correlación dada por el método F y los puntos individuales de los datos.

## Estado del arte

### Sistemas de calentamiento solar

Los sistemas de calentamiento de agua doméstica por medio de la energía del Sol pueden conectarse en serie o en paralelo. La configuración de la conexión dependerá de la cantidad de agua que se requiere para cada caso, así como de la diferencia de temperatura que se necesite aumentar en el agua (con referencia a la temperatura ambiente promedio del lugar en cuestión). La figura 1 muestra ambas formas de conectar los colectores solares planos.

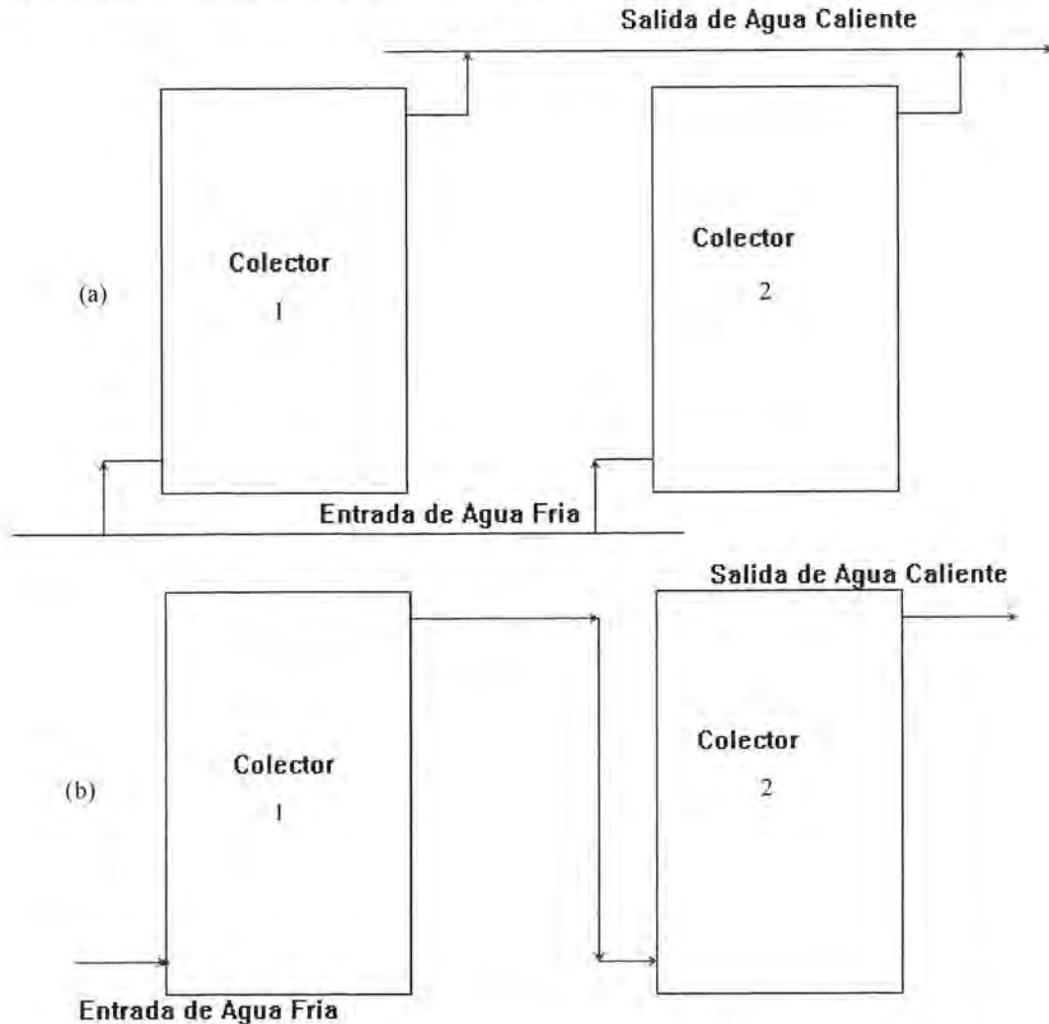


Figura 1. Distintas formas de conectar los colectores: (a) En paralelo. (b) En serie.

El sistema conectado en serie permite un aumento considerable de la temperatura del agua de salida, dado que se hace pasar repetidamente por varios colectores solares planos, uno tras otro, de manera que, a pesar de que ya se ha aumentado la temperatura del agua, vuelve a pasar por otro colector con el fin de dar una mayor temperatura de salida a la misma. Esto ocasiona pérdidas térmicas debido a un aumento en la diferencia de temperaturas entre el ambiente y la del agua acondicionada (que, en general depende de la temperatura media de la placa colectora). Estas pérdidas térmicas se pueden reducir al mínimo por medio de un buen aislamiento de las tuberías

como de la caja contenedora del colector. En estos casos se justifica el uso de doble vidrio para evitar las pérdidas por convección entre el aire atmosférico y el aire que se encuentra dentro de la caja contenedora del colector solar plano. Las pérdidas radiativas pueden reducirse con el uso de superficies selectivas [4].

El sistema conectado en paralelo permite un mayor flujo de agua a temperatura moderada. Generalmente este tipo de conexión se usa con mayor frecuencia en lugares donde las temperaturas a lo largo del año no son tan frías, y por tanto, no se requiere un aumento considerable de la temperatura del agua a acondicionar. En este caso los colectores solares están conectados de forma que el agua fría está siendo alimentada por un solo tubo distribuidor para todos los colectores solares; mientras que el agua, una vez que ha pasado por el colector correspondiente, pasa a una tubería de recolección de agua caliente (aislada térmicamente para evitar las pérdidas debido a la convección con el aire atmosférico) que conduce el agua acondicionada hasta el tanque aislado térmicamente donde ésta se almacena (Termo-tanque). Decidir cómo se conectarán los colectores solares planos depende de la temperatura anual promedio del lugar donde se pretende instalar el sistema de calentamiento de agua.

Actualmente se han visto eficiencias del 64 al 72 por ciento [4] de los colectores solares planos. Inclusive se sabe que se han fabricado colectores solares con eficiencias mayores al 80%. La eficiencia en general depende de la gama de temperaturas a las cuales se opera el sistema solar de calentamiento de agua.

En la figura 2 se muestran los componentes principales de un colector solar plano, los cuales se explican a continuación.

*Cubierta transparente (vidrio):* se dispone sobre la placa absorbidora con el fin de evitar pérdidas térmicas por convección y/o por radiación desde la placa colectora hacia la atmósfera. Generalmente son de vidrio o plástico transparente. Para el caso de los sistemas de colectores solares planos para el calentamiento de agua para piscinas, la cubierta transparente es innecesaria, debido a que generalmente se requiere aumentar la temperatura del agua unos cuantos grados arriba de la temperatura ambiente.

*Aislamiento (térmico):* impide las pérdidas térmicas por el resto de las paredes del colector solar, así como de las tuberías que llevan el agua acondicionada. Los materiales de aislamiento térmico se colocan en los lados y el fondo del colector, y como cubierta de la tubería que conduce el agua acondicionada, con el fin de evitar pérdidas térmicas. Comúnmente se usa fibra de vidrio como aislamiento.

*Placa colectora:* tiene la tarea de convertir la radiación solar en energía térmica y transferirla hasta el fluido de trabajo (agua). Generalmente está hecha de cobre, acero o plástico. La superficie está recubierta de una pintura negra de alta absorción. Si la placa colectora es de cobre o acero, es posible aplicar recubrimiento selectivo que maximiza la absorción de la energía solar y reduce la emisión desde la superficie [4].

*Tubos conductores (largueros):* están dispuestos generalmente con el fin de que el fluido atraviese el colector conforme absorbe energía térmica. Generalmente la placa colectora está soldada (o ensamblada) a estos tubos.

*Caja soporte (gabinete):* El colector se encierra en un cajón que mantiene a todos los componentes juntos, generalmente de aluminio, que los protege de la intemperie y facilita la instalación de este tipo de sistemas.

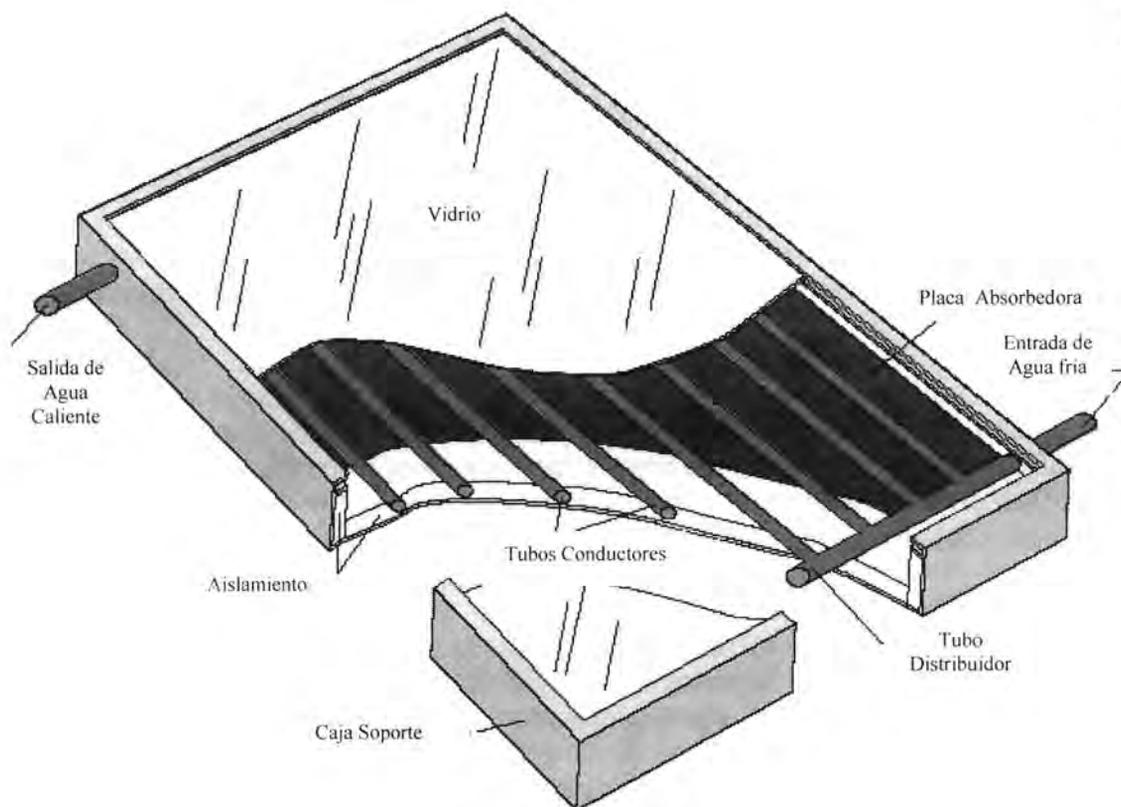


Figura 2. Componentes principales de un colector solar plano.

### Principio de funcionamiento de un colector solar plano a régimen termosifónico

El principio de funcionamiento del colector solar plano es como sigue:

1. La placa colectora aumenta su temperatura cuando absorbe la energía proveniente del Sol en forma de radiación.
2. Esta energía absorbida se transfiere (por medio de conducción) a los tubos por donde fluye el agua que se desea calentar.
3. El agua a acondicionar (fría) entra por la parte inferior del colector solar plano.
4. Conforme los tubos del colector transfieren la energía al agua, ésta (el agua) disminuye su densidad debido a un aumento de su volumen, correspondiente al aumento de temperatura.

5. Por el principio de Arquímedes, el agua fría "empuja" al agua caliente desplazándola<sup>1</sup>. A este fenómeno se le denomina Efecto Termosifón.
6. El agua caliente se almacena en el termo-tanque de agua en la parte alta. Conforme se necesite el agua por el usuario ésta será reemplazada por el agua fría que se suministra en la parte más baja del termo-tanque.

Debido a que el agua disminuye su densidad cuando aumenta su temperatura, y el agua que se ha calentado entra por la parte superior del termo-tanque no se logran mezclar el agua que se ha calentado previamente con el agua fría que entra por la parte inferior del mismo<sup>2</sup>, debido a que el agua caliente siempre tendrá una densidad menor que el agua fría.

La forma de conectar el sistema de colectores solares planos para el calentamiento de agua régimen termosifónico se muestra en la figura 3.

La única forma de transferencia de energía que se puede tener dentro del termo-tanque es por medio de la conducción. Esto implica que el agua caliente transferirá una cantidad de energía al agua fría debido a que están en contacto mutuo (sin mezclarse, claro está). Al cabo de algunas horas, la temperatura del agua que está en el termo-tanque se habrá homogeneizado, esto es, se comportará como una función de la forma  $T = mh + b$ , donde  $T$  es la temperatura del agua a cierta profundidad  $h$ , y  $m$  y  $b$  ciertos parámetros de cada caso en particular. Evidentemente, los parámetros estarán cambiando a lo largo del día y conforme se vaya utilizando el agua que se encuentra en el termo-tanque, dado que se habrán modificado los volúmenes de agua caliente y fría, así como los valores de las temperaturas de la parte alta y baja del termo-tanque.

Técnicamente hablando, el colector solar plano consiste de un elemento que actúa como absorbedor metálico, de forma rectangular y recubierto con un material que permite una máxima absorción de la radiación solar, el cual puede ser pintura negro (mate) o algún tipo de recubrimiento especial. Comercialmente, el colector solar plano más conocido es el que tiene dos tubos distribuidores, uno para el agua fría (de entrada) y otro para el agua caliente (de salida), unidos por tubos perpendiculares provistos de aletas, para aumentar la superficie expuesta al sol y en cuyo interior circula el agua para su calentamiento.

Los colectores solares planos generalmente no se diseñan con longitud de tubos mayor a dos metros. Esto se debe a que en estas longitudes las eficiencias de los colectores alcanzan sus valores máximos. Si se incrementa la longitud de los tubos, la temperatura del agua se elevará tanto que la diferencia de temperatura entre las paredes de los tubos y el agua será muy pequeña, teniendo el agua una mínima ganancia de energía<sup>3</sup>. Sin embargo, las placas, junto con los tubos elevarán su temperatura (en la parte más cercana a la salida del agua del colector), y dado que tendrán una diferencia de temperatura muy grande con el aire atmosférico, la energía que habían ganado se perderá en forma de radiación, una parte y otra parte por medio de convección con el aire que rodea al colector. Por tanto, construir colectores solares planos con dimensiones mayores a los dos metros implica un aumento innecesario en el costo de los materiales de construcción y, al mismo tiempo, una disminución en la eficiencia del dispositivo, lo cual, no es conveniente. Además, se

<sup>1</sup> El agua a menor temperatura es más densa que el agua a mayor temperatura, para temperaturas mayores a 4°C.

<sup>2</sup> Aquí se supone que el nivel de agua dentro del termo-tanque es superior a la altura a la cual entra el agua caliente, de tal forma que no haya caída de agua causando que se mezclen.

<sup>3</sup> la tasa de transferencia de energía es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre el tubo y el agua.

aumentan las dificultades en su transporte e instalación y de aumentar el riesgo de que el agua se evapore en los colectores, con posibles daños físicos al colector.

También existen colectores solares auto-contenidos, esto es, colectores solares donde el agua no circula. Éste consiste en una caja donde se calienta una cierta cantidad de agua diaria y el mismo colector sirve como tanque de almacenamiento del agua caliente. Este tipo de colectores resulta ser siempre el más económico y el que ocupa menor espacio, siendo posible su aplicación cuando el usuario requiere agua acondicionada por las tardes en general [6].

El plástico se ha convertido en el material más popular en la fabricación de colectores solares sin cubierta para el calentamiento de agua de piscinas y albercas, que operan a temperaturas apenas encima de la ambiente y a presiones cercanas a la atmosférica. Actualmente se venden colectores de este tipo muy confiables. Sin embargo, para llegar a este punto se requirieron muchos años de diseño e investigación de procesos y materiales para poder desarrollar modelos que fueran lo suficientemente durables para este tipo de aplicaciones. Debe recordarse que estos plásticos reciben constantemente radiaciones ultravioleta la mayor parte del año.

Se espera que un colector solar para el calentamiento de agua para albercas opere normalmente a temperaturas cercanas a los 30°C (EE.UU. y Canadá), mientras que los usados para el calentamiento de agua doméstica para casas habitación entreguen agua comúnmente a 60°C [4]. La diferencia de temperaturas es entonces, de 30°C. La velocidad de degradación de los plásticos aumenta con la temperatura. Basados en esto podemos decir que los colectores solares más baratos que se pueden construir son los usados en el calentamiento de agua para albercas. Es claro que en otros países donde los niveles de insolación son mayores a los considerados, incluido México, las condiciones a las cuales se someten los materiales son más severas.

Muchos de los plásticos apropiados para aplicaciones de altas temperaturas tienen enlaces atómicos e intermoleculares que pueden ser dañados por la radiación ultravioleta. Este proceso de degradación es extremadamente complejo, y prácticamente imposible de modelar con exactitud. Diferentes enlaces moleculares son dañados por diferentes partes del espectro solar. La radiación solar ultravioleta, que varía de lugar en lugar, puede ser mucho menor en un lugar donde hay alta humedad al nivel del mar que en un lugar alto con baja humedad. Las intensidades de radiaciones solares ultravioleta también varían con las estaciones, el clima y las condiciones locales de la capa de ozono. Los plásticos que son expuestos al Sol pueden protegerse por medio del uso de carbón negro u otros materiales que bloquean este tipo de radiaciones. Esto no es fácil ni barato de realizar. Los plásticos transparentes usados en como cubiertas son aún más difíciles de proteger.

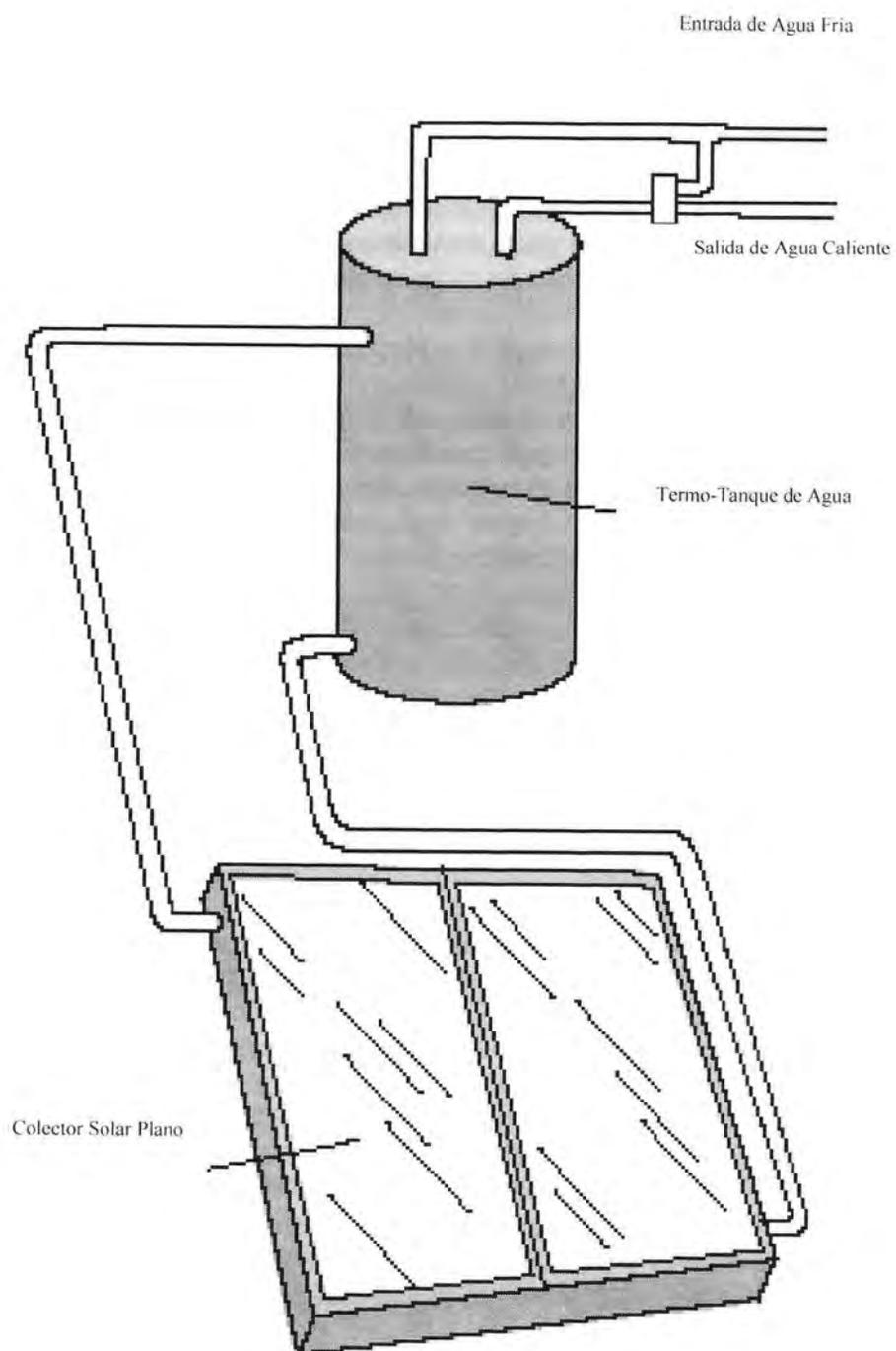


Figura 3. Sistema de colectores solares planos para uso doméstico conectados a régimen termosifónico.

### **Software de apoyo**

Por otra parte, y acercándonos un poco más a la materia principal de nuestro tema, se han diseñado algunos softwares y hojas de cálculo para el dimensionamiento y cálculo de eficiencias de los sistemas de calentamiento de colectores solares planos.

El uso de métodos de simulación en el estudio de sistemas solares es un desarrollo relativamente nuevo. Sheridan et al. (1967) usó una computadora análoga en estudios de simulación de la operación de sistemas solares de calentamiento de agua doméstica. Algunos otros investigadores que han trabajado en esta dirección son Gupta y Garg (1968), Close (1967), Gutpa (1971), Buchberg y Roulet (1968), Löf y Tybout (1973), Butz (1974) y Oonk (1975). A partir de la publicación de sus resultados, el uso de softwares de auxilio en el estudio de sistemas solares se ha empezado a usar ampliamente [2].

Algunos de los softwares han sido aplicados a procesos solares que han sido escritos específicamente para el estudio de sistemas solares. Otros fueron realizados para aplicaciones no solares pero han tenido modelos de componentes solares agregados a ellos para hacerlos útiles en los problemas de tecnología solar.

Por ejemplo, WATSUN (1989) es un software desarrollado por la universidad de Waterloo, que modela un gran número de sistemas activos, MINSUN es un software simplificado para la rápida evaluación de sistemas activos.

Los softwares de simulación han sido creados para el diseño de sistemas pasivos. Ejemplos son PASOLE y SERIRES. Una revisión del uso de las computadoras en el diseño de sistemas pasivos (Klein, 1983) indica muchos de los esfuerzos en esta dirección [2].

Más recientemente el departamento de recursos naturales de Canadá preparó hojas de cálculo para el dimensionamiento y análisis de sistemas de energías renovables. El modelo se denomina RETScreen Energy Model (<http://www.retscreen.net/ang/menu.php>) y actualmente se encuentra disponible en internet.

## Hipótesis

En la realización del presente trabajo se intenta responder la siguiente pregunta que fundamenta la hipótesis: "¿Puede un software para computadora predecir el comportamiento de un colector solar plano bajo distintas condiciones de operación?".

La respuesta a esta pregunta estará dada en las conclusiones.

## Objetivo General

El objetivo general de este trabajo consiste en "obtener una herramienta computacional (software) para poder (a) calcular la eficiencia de un colector solar plano y, (b) dimensionar un sistema de colectores solares planos para uso doméstico."

## Objetivos Particulares

De manera particular, se tienen también los siguientes objetivos:

- ✓ (a) "Realizar un software para dimensionar un sistema de colectores solares planos para el calentamiento de agua doméstica y evaluarlo";
- ✓ (b) "Realizar un software para calcular la eficiencia de un colector solar plano y evaluarlo de manera comparativa";
- ✓ (c) "Evaluar el desempeño de un colector solar plano con el apoyo del software, bajo distintas condiciones de operación";
- ✓ (d) "Elaborar una guía para la utilización del software"

## Metas

La meta principal consiste en la obtención del software para: (a) el dimensionamiento de un sistema de colectores solares planos para el calentamiento de agua doméstica (CSP Dim), y (b) el cálculo de la eficiencia a lo largo del año de un colector solar plano (CSP Eficiencia).

Otra meta paralela a la primera consiste en la obtención de una guía para el uso del software obtenido.

## Alcance

Para delimitar este trabajo se hace mención de su alcance:

- ✓ se desarrolla el software basado en la teoría y procedimientos extraídos de distintas fuentes bibliográficas,
- ✓ los cálculos se realizan de manera teórica,
- ✓ como evaluación, se realiza la comparación del software CSP Dim con otro software similar (RET Screen Energy Model)

## Justificación

### Software de apoyo

El diseño de software es una herramienta poderosa para el desarrollo de nuevos sistemas, para entender nuevos procesos, cómo funciona un sistema, y para mejorar los diseños nuevos como los ya existentes.

¿Porqué escribir un nuevo software si hay algunos que pueden dimensionar un sistema de colectores solares planos? Las razones son varias.

Primero, del software existente, la mayoría está escrito en inglés. El Software CSP está escrito completamente en español, lo que ayuda a divulgar la tecnología de la energía solar entre personas que, ni conocen otro idioma, ni tienen conocimiento técnico en esta área.

Segundo, el punto anterior implica que una persona que no tiene conocimientos técnicos en el área de la energía solar puede utilizar el software para poder dimensionar un sistema de colectores solares planos.

Tercero, el software CSP permite modificar parámetros que otros softwares no permiten. Esto hace que el cálculo esté más "a la medida" del usuario.

Cuarto, en caso de que el sistema solar propuesto para satisfacer la demanda energética sea más costoso (desde el punto de vista económico) que una fuente convencional, el software CSP Dim indica este hecho, así como el precio actual que debe tener el combustible necesario para acondicionar el agua que se requiere en un año para esas condiciones dadas por el usuario y el costo mínimo que debe tener este combustible para que sea factible (desde el punto de vista económico) instalar el sistema de calentamiento solar propuesto.

Finalmente, el software CSP Eficiencia puede calcular la eficiencia de un colector solar plano a lo largo del año en su fase de diseño o de evaluación. Esta parte del software requiere parámetros específicos que prácticamente solo conocen bien los técnicos en el área. La ventaja de este software consiste en que indica el día del año en que la eficiencia del colector es mínima y en la que es máxima.

## Capítulo II. Metodología

Para la elaboración del algoritmo que se usó en el cálculo de la eficiencia de un colector solar plano se consultaron las fuentes mencionadas en la bibliografía de este trabajo.

La elaboración del mismo se realizó de acuerdo a las especificaciones que más adelante se indican.

### Dimensionamiento de un sistema de colectores solares planos

Debido a que actualmente se han hecho común en muchos países el uso de los colectores solares planos, la metodología que se usa para el diseño y dimensionamiento de estos sistemas es generalmente el mismo.

Para esto, se pueden consultar muchas de las fuentes bibliográficas con que actualmente se cuenta en el mercado de la energía solar. Las fuentes bibliográficas que se consideraron para la elaboración del algoritmo del software están incluidas en la página 71.

### Teoría básica

En este apartado se mencionan los conceptos que nos permitirán justificar las decisiones tomadas para la elaboración de la metodología utilizada en el software *CSP Dim*.

### Clasificación

Los sistemas de calentamiento de agua por medio de la energía solar pueden clasificarse de acuerdo a las siguientes características<sup>4</sup>:

- a) si usan o no intercambiador de calor: directos e indirectos,
- b) si usan o no bomba: activos o pasivos (no activos),
- c) de acuerdo a su temperatura de operación: temperatura baja, media o alta,
- d) de acuerdo a su uso: residencial, comercial.

Un sistema de calentamiento de agua por medio de energía solar se denomina directo cuando el fluido de trabajo es el agua potable que se suministra para uso. En otras palabras, el agua que circula a través de los colectores solares planos es la misma que se envía para satisfacer la demanda de la misma. Generalmente este tipo de sistemas se usa en climas de temperaturas moderadas. Por otra parte, un sistema se denomina indirecto siempre que el fluido de trabajo no es agua potable, sino algún líquido térmico que a su vez transferirá la energía al agua potable a través de un intercambiador de calor, dispuesto en el termo-tanque. En general, este tipo de sistemas son necesarios en lugares donde los colectores solares planos requieren doble cubierta de cristal y un sistema de protección de anticongelamiento. Estos sistemas también se denominan sistemas de circulación cerrada. En el caso del software *CSP Dim* se considera siempre el caso de un sistema directo, es decir, sin el uso de intercambiador de calor.

Un sistema de calentamiento de agua por medio de energía solar se denomina activo siempre que usa una bomba para hacer circular el fluido de trabajo. Este tipo de sistemas generalmente incluye un controlador diferencial de temperatura que trabaja a base de paneles fotovoltaicos. Generalmente se usa en sistemas directos. El colector solar plano está combinado con el termo-tanque. Es notable

<sup>4</sup> Solar Energy Society of Canada Inc. (SESOCI) (<http://www.solarenergysociety.ca>)

de este tipo de sistemas que no tiene partes móviles, que es simple y confiable. Se he encontrado útil como un precalentador o con termo-tanque externo o con bomba de circulación. En algunos casos para este tipo de sistemas no se requiere sensores de temperatura o controladores. Los pequeños paneles fotovoltaicos solamente envían energía eléctrica a la bomba de circulación cuando hay suficiente radiación solar y el colector tiene una temperatura elevada.

En contraste, un sistema se considera pasivo (o no activo) cuando no se requiere bomba para el flujo del fluido de trabajo a través de los colectores solares planos, de tal forma que el fluido de trabajo circula gracias a la diferencia de densidades causado por los cambios de temperatura del fluido mismo en distintos puntos del colector (efecto termosifón) por medio de la gravedad. Por obvias razones estos sistemas también suelen denominarse como sistemas termosifónicos, los cuales se pueden aplicar a sistemas directos o indirectos. En ellos, generalmente el termo-tanque se localiza encima de los colectores solares planos. Es importante mencionar que se requiere en estos casos una válvula tipo "check" para prevenir el proceso inverso (enfriamiento) durante la noche. Una característica notable es que este tipo de sistemas se ha usado ampliamente y se considera bastante confiable. El software *CSP Dim* se considera siempre el caso de un sistema pasivo (no activo), es decir, no cuenta con una bomba, de forma que trabaja bajo el efecto termosifón.

Cuando los sistemas de calentamiento de agua por medio de energía solar trabajan a temperaturas entre 20 y 40 °C se denominan de temperatura baja. Este tipo de sistemas se encuentran generalmente para el calentamiento de agua para piscinas, de tal suerte que los colectores no requieren de cubierta transparente de cristal y generalmente están fabricados de polipropileno o plástico polietileno, u otros polímeros, como ABS (Acrilnitrilo-butadieno-estireno)

Cuando los sistemas de calentamiento de agua por medio de energía solar trabajan a temperaturas entre 40 y 93°C se denominan de temperatura media. En este caso los colectores solares planos requieren de una cubierta transparente de cristal. Se les encuentra comúnmente en sistemas activos y pasivos para el calentamiento de agua doméstica.

Finalmente, cuando los sistemas de calentamiento de agua por medio de energía solar trabajan a temperaturas entre 80 y 200°C se les denomina de alta temperatura. En este caso se refiere a sistemas con diseño a base de concentración solar (tubos evacuados, heliostatos, lentes, reflectores, etc.). También se puede tener casos especiales de colectores solares planos con doble o triple cubierta. Este tipo de sistemas se encuentra frecuentemente en sistemas de enfriamiento. El software *CSP Dim* considera siempre un sistema de temperatura media, es decir, para el calentamiento de agua doméstica.

Los sistemas de calentamiento de agua por medio de energía solar del tipo residencial encuentran su aplicación en fraccionamientos multifamiliares, en el calentamiento de agua potable de uso doméstico, de agua para piscinas y calefacción de espacios.

Los sistemas de calentamiento de agua por medio de energía solar del tipo comercial encuentran su aplicación en hoteles, hospitales, lavanderías, restaurantes, etc. También se han usado con bastante éxito en aplicaciones agrícolas y purificación y destilación de agua. Cualquiera de estos casos se puede dimensionar en el software *CSP Dim*.

### **Factores que afectan la eficiencia de los colectores**

El software, antes que nada busca la simplificación tanto en la metodología que se requiere para hacer un dimensionamiento que pueda satisfacer los requerimientos de un usuario con los conocimientos mínimos en el área. Por tanto, el software *CSP Dim* no considera los siguientes casos para evitar complicaciones técnicas que a un usuario neófito en el área le pueda crear.

#### **Temperatura del ambiente**

Los colectores solares trabajan mejor con temperaturas ambientales mayores. Conforme el aire se enfría, el colector pierde mayor cantidad de energía que cede al aire atmosférico y no puede transferir al agua.

#### **Velocidad del flujo**

El hecho de tener velocidades de flujo de agua mayores dentro del colector implica que el agua absorberá mayor cantidad de energía debido a que ésta no aumentará sensiblemente en su temperatura. Esto origina que las placas no aumenten tampoco en su temperatura, teniendo prácticamente la temperatura ambiente, lo que impide el intercambio de energía entre el colector y el aire atmosférico.

Para los colectores solares calentadores de agua de piscinas, muchos fabricantes recomiendan una velocidad de flujo de 10 a 15 litros por minuto por colector solar, lo cual puede lograrse con una bomba adecuada. Velocidades de flujo menores reducirán la eficiencia de los colectores.

#### **Viento sobre el colector**

Es claro que las pérdidas de energía debidas a la convección con el aire atmosférico aumenta con la velocidad de éste. Además debe tomarse en cuenta que las pérdidas no solo dependen de la velocidad del viento, sino también con la dirección, respecto de la cubierta del colector solar plano.

#### **Sombras sobre el colector**

Los colectores sombreados por árboles o edificios generalmente no transferirán calor útil al agua, a menos que el aire atmosférico sea mayor que la temperatura del agua.

### **Problemas que pueden aparecer en la operación de un sistema de calentamiento de agua doméstica por medio de colectores solares planos**

No hay una razón fundamental por la cual un colector no pueda operar una vez instalado tan bien como cuando se estaba siendo monitoreado en un laboratorio. Sin embargo hay algunas consideraciones prácticas que pueden influenciar la operación vista en las pruebas. Las diferencias entre las mediciones y las predicciones pueden surgir de varias fuentes.

- El flujo del fluido puede no ser uniforme por todas las partes del arreglo de colectores. Las partes del arreglo de colectores que reciben menor flujo tendrán menor factor de remoción de calor y eficiencia más baja, resultando en una reducción de la eficiencia global del sistema.
- Las velocidades de flujo del sistema instalado pueden ser distintas a las que se midieron en un laboratorio cuando el mismo sistema se estaba probando. El factor de remoción de calor es una función de la velocidad de flujo y los cambios en la magnitud del flujo pueden causar grandes diferencias en la eficiencia global del sistema.

- Las pérdidas térmicas pueden ser distintas en ambos sistemas. Los colectores solares planos no necesariamente tendrán el mismo valor de  $U_L$  en ambos casos<sup>5</sup>.
- Las pérdidas por las tuberías generalmente son más significativas en las aplicaciones debido a que éstas son más largas y en general no están tan bien aisladas como en un laboratorio.

Hay muchas otras consideraciones en el diseño, construcción, instalación, y uso a largo plazo de un sistema de colectores solares planos.

Son inevitables las variaciones de radiación recibidas durante el año y aún entre distintos años es poco probable que se reciba la misma cantidad de energía en cada colector. De aquí se desprende que el sistema en general tenderá a perder eficiencia debido al pobre mantenimiento de sus partes (principalmente las placas absorbedoras que están pintadas de negro y del aislamiento de la tubería del sistema).

En este caso, existe la posibilidad de que un extenso aumento de temperatura cause que se desolden algunas de las uniones del colector solar plano. De hecho, se tendrán expansiones térmicas de los tubos y de las placas. Esto puede ser dañino para el sistema porque puede causar un "falso contacto térmico" entre las placas y los tubos del colector solar plano, deformación en la caja contenedora y, en casos serios, fractura de la cubierta de vidrio.

El diseño mecánico afecta la eficiencia térmica del sistema de colectores solares planos. Es importante que la fortaleza de la estructura de los colectores sea adecuada a los manejos de instalación del sistema y a las condiciones a las cuales se someterá el sistema en conjunto.

Los gabinetes de los colectores deben contar con desagües para permitir la salida del agua que se haya podido acumular debido a las lluvias.

En el diseño de un colector solar plano para calentamiento de agua doméstica se debe tener en cuenta la posibilidad de la corrosión electrolytica entre los tubos de cobre y las placas de aluminio. Este caso puede ser usado para el calentamiento de aire.

Los colectores solares planos se instalan generalmente de manera estacionaria, es decir, no tienen seguimiento solar con una orientación geográfica que les permita captar el máximo de radiación solar durante todo el año. En particular se debe tener cuidado de asegurar una suficiente ganancia térmica los meses de menor promedio de insolación solar mensual.

Los costos de instalación pueden representar una parte importante del costo del sistema de colectores solares planos. Los tres puntos importantes aquí son: manejo, ensamble y cuidado del instalador.

La seguridad también debe tomarse en cuenta.

- Primero: es posible trasladar e instalar un sistema de colectores solares planos con un mínimo de riesgos.

---

<sup>5</sup> Véase la notación al inicio del trabajo.

- Segundo: los materiales usados en los colectores solares planos deben ser capaces de soportar las temperaturas máximas a las que estarán expuestas sin riesgos de incendiarse, producir gases tóxicos o deteriorarse de manera sustancial en un periodo de tiempo corto.

Todas estas consideraciones son importantes y deben tomarse en cuenta en vista de muchos años de bajo mantenimiento que debe esperarse de todo colector solar plano bien diseñado. Los colectores solares planos deben diseñarse para la mayoría de las aplicaciones con una vida útil de 10 a 30 años con un mínimo en la degradación en su desempeño térmico o sus propiedades mecánicas.

### Consideraciones Técnicas

En la realización del algoritmo se hicieron una serie de consideraciones que se mencionan en seguida.

1. Se usa agua caliente todos los días del año y cada persona utiliza diariamente 70 litros de agua caliente. Esto, evidentemente puede variar con la cultura de cada familia.
2. La temperatura del agua que entra al colector es igual a la temperatura ambiente. La temperatura del agua que sale del colector se entrega a  $75^{\circ}\text{C}$ .
3. La cantidad de radiación solar que llega a un lugar del planeta de alguna latitud es igual a otro sitio de la misma latitud, independientemente de las condiciones locales de clima y altitud.
4. Para todos los días del año las condiciones ambientales son las mismas, salvo la irradiancia.
5. El año no es bisiesto.
6. Temperatura ambiente promedio constante a lo largo del día.
7. Toda la superficie de los colectores recibe radiación solar, salvo en el caso de nublados, donde no recibe radiación.
8. Ángulo acimutal de la superficie igual a cero, esto es, la superficie está dirigida hacia el sur, sin desviaciones este u oeste.
9. Constante solar igual a  $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ .
10. Densidad del agua es constante para los cálculos termodinámicos.
11. Capacidad calorífica del agua constante e igual a  $4180 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{C}$ .
12. Precio del gas L. P. constante, e igual a  $\$8.40/\text{kg}$ . Este valor puede ser modificado por el usuario (referente al mes de junio de 2005)
13. Precio del kWh de electricidad constante, e igual a  $\$0.51$  (Precios actuales:  $\$0.51/\text{kWh}$  básico,  $\$0.802/\text{kWh}$  Intermedio y  $\$1.737/\text{kWh}$  excedente). Este valor puede ser modificado por el usuario (referente al mes de junio de 2005).
14. Poder calorífico (calor de combustión) del gas L. P. igual a  $94 \text{ MJ/m}^3$ , o bien,  $50 \text{ MJ/kg}$ ; esto es,  $8.89 \text{ cal/cm}^3 = 2.213 \text{ Joules/cm}^3$  [8].
15. Eficiencia del calentador de agua a base de gas igual a 0.55 (55%).
16. Eficiencia del calentador de agua eléctrico igual a 0.9 (90%).

### Modelo matemático

A continuación se enlistan el modelo matemático utilizado en el desarrollo del algoritmo de dimensionamiento de un sistema de colectores solares planos. Este modelo matemático se recomienda en la referencia [3] y [10].

La declinación  $\delta$  puede calcularse de la siguiente ecuación:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right). \quad (2.1)$$

donde  $n$  es el día del año ( $1 \leq n \leq 365$ ).

La altura solar  $\alpha$  se calcula con la siguiente fórmula:

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2.2)$$

El ángulo de Incidencia se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \cos \omega \end{aligned} \quad (2.2.a)$$

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos (\gamma_s - \gamma) \quad (2.2.b)$$

Para el caso de superficies fijas inclinadas hacia el norte o sur (ángulo acimut de  $0^\circ$  ó  $180^\circ$ ) se tiene:

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \quad (2.2.c)$$

Para superficies horizontales:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.3)$$

Ángulo de la Puesta del Sol:

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.4)$$

Ángulo del Cenit solar:

$$\theta_{z, \text{ mediodía}} = |\phi - \delta| \quad \text{Para el hemisferio norte.} \quad (2.5.a)$$

$$\theta_{z, \text{ mediodía}} = |-\phi + \delta| \quad \text{Para el hemisferio sur.} \quad (2.5.b)$$

Horas de Sol diarias:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta). \quad (2.6)$$

Cálculo del Ángulo Acimut Solar

$$\sin \gamma_s = \left( \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \right). \quad (2.7)$$

A continuación se presentará el modelo matemático correspondiente a la parte económica que ayuda en el cálculo del tiempo de recuperación de la inversión.

A partir de la siguiente ecuación<sup>6</sup> es posible encontrar el número de periodos que se requieren para amortizar el costo de la inversión realizada.

$$A = P \left( \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (2.8)$$

donde:

$A$  representa el costo anual del combustible que se dejó de usar, gracias al sistema de energía solar,

$P$  representa el costo inicial del sistema instalado,

$i$  es la tasa de interés a la que se compone el valor presente del costo del sistema, y

$n$  es el número de periodos requeridos para amortizar la inversión.

Para encontrar el número de periodos que se requieren para amortizar el costo de la inversión realizada, basta obtener, a partir de (2.8), una expresión para  $n$ :

$$n = \frac{\ln \left( \frac{A}{A - iP} \right)}{\ln(1+i)} \quad (2.9)$$

<sup>6</sup> Collier, Courtland, A.; Ledbetter, William B. *Engineering Cost Analysis* Ed. Harper & Row. U. S. A. 1982.

### Diseño del diagrama de flujo

Se considera una metodología que permite dimensionar un sistema solar para el calentamiento de agua para lo cual se solicita información básica acerca de las condiciones a las cuales será sometido el mismo.

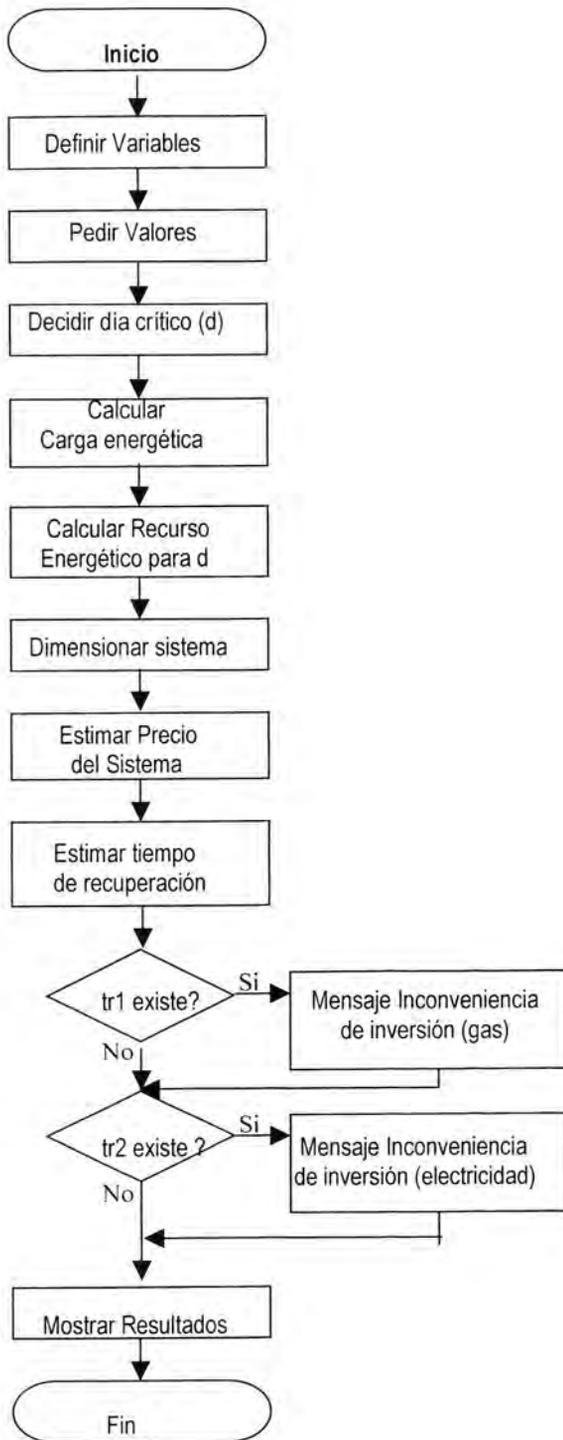
Los datos requeridos para el dimensionamiento del sistema de colectores solares planos para el calentamiento de agua son:

- Número de personas que usarán el sistema
- Temperatura ambiente promedio anual local (en grados centígrados)
- Dimensiones del colector solar plano que se instalará (largo y ancho solamente, en metros)
- Latitud local (en grados)
- Inclinação de los colectores solares respecto a la horizontal (en grados)
- Tasa de interés compuesto anual a considerar.
- Precio del colector solar plano.
- Precio del kilogramo del gas
- Precio del kilowatt – hora de energía eléctrica.

El software realiza los cálculos necesarios para dimensionar el sistema de colectores solares planos conectados en paralelo.

El algoritmo que se obtuvo de la metodología sugerida por la consulta de las fuentes mencionadas en la bibliografía de este trabajo se encuentra en el apéndice I, página 71.

Las variables que se usaron en el código del software y su significado correspondiente aparecen en la simbología, al inicio de este trabajo, página 9. Además, aparecen algunas nuevas variables que terminan invariablemente con 1. Éstas fueron usadas en pares con otras las cuales son idénticas en su nombre, a excepción de la terminación (el 1). Las variables que terminan en 1 corresponden a las usadas en el software para la realización de los cálculos, mientras las variables que carecen del 1 corresponden a los nombres de las cajas de texto de la forma de Visual Basic correspondiente (pantalla principal de CSP Dim). De acuerdo con esta metodología, se desarrolló el siguiente diagrama de flujo, que auxilió para la creación del software CSP Dim.



### **Cálculo de la eficiencia de un colector solar plano**

En este apartado se muestra la metodología que se consideró para el diseño y desarrollo del software CSP Eficiencia que ayuda a calcular la eficiencia de un colector solar plano, el cual se encuentra en evaluación en un laboratorio donde la mayoría de las variables pueden estar controladas.

Es claro que este software está enfocado a personas que han recibido entrenamiento técnico en el área de energía solar. Evidentemente, éste puede ser utilizado como herramienta didáctica para la preparación de futuros ingenieros en energía solar.

### Consideraciones técnicas

El análisis térmico detallado de un colector solar plano es difícil de realizar. Sin embargo, el poder tomar algunas simplificaciones en el estudio del mismo nos ayuda a obtener resultados muy útiles acerca del comportamiento del mismo.

De acuerdo con la teoría desarrollada hasta la fecha, acerca de la transferencia de calor, mecánica de fluidos y otras ramas de la ingeniería en las cuales se basan los ingenieros para presentar sus soluciones (que no son sino aproximaciones a las soluciones reales) respecto a los problemas presentados en los colectores solares, se desarrolló el algoritmo para el cálculo de la eficiencia de un colector solar plano.

Las consideraciones técnicas se recogieron del cuarto artículo de la tercera unidad que tiene por título "*Ecuaciones Básicas para el Diseño y el Dimensionamiento*" del cuaderno editado por la ANES (Martínez Strelvel, R., Flores Prieto J. J., *Notas del curso especializado Colectores Solares Planos*. ISES millennium Solar Forum 2000) para los cursos de colectores solares planos cada año, las cuales se enlistan íntegras en el siguiente artículo.

Las consideraciones técnicas que se llevaron al cabo en el modelo matemático mencionado se encuentran listadas en [3], que corresponden a las siguientes simplificaciones.

1. El sistema trabaja en estado estacionario.
2. El colector solar plano tiene tubos paralelos.
3. Los cabezales cubren un área muy pequeña que puede despreciarse.
4. Los cabezales proveen un flujo constante y uniforme a todos los tubos.
5. No hay absorción de radiación solar por una cubierta mientras se produzcan pérdidas del colector.
6. El flujo de energía en las cubiertas es unidimensional.
7. Hay una caída de temperatura despreciable en la cubierta.
8. La cubierta es opaca a las radiaciones infrarrojas.
9. Hay transferencia de calor en una dimensión a través del aislamiento.
10. El cielo puede considerarse como un cuerpo negro para radiaciones de longitudes de onda larga a una temperatura equivalente de cielo.
11. Los gradientes de temperatura alrededor de los tubos pueden despreciarse.
12. Los gradientes de temperatura en la dirección del flujo y entre los tubos puede tratarse independientemente.
13. Las propiedades de los materiales son independientes de la temperatura de los mismos.
14. Las pérdidas a través del frente y la parte trasera del colector ocurren a la misma temperatura ambiente
15. El polvo y la suciedad sobre la cubierta es despreciable.
16. El sombreado sobre el colector es directamente proporcional al promedio mensual de la precipitación pluvial local.
17. La radiación solar incidente sobre los colectores se calcula con una función de mejor ajuste a partir de los promedios mensuales locales por el método de mínimos cuadrados ordinarios donde las discrepancias se consideran verticales.

## Modelo matemático

### Ecuaciones básicas para el diseño y el dimensionamiento

La ecuación que gobierna el comportamiento de un colector solar plano [3] parte del balance de energía en el colector completo quedando:

Calor útil = calor ganado por radiación – calor que se pierde

$$Q_u = S\tau F_r A_c - U_l F_r A_c (T_c - T_a) \quad (3.1.a)$$

La cual puede escribirse como:

$$Q_u = F_r A_c (S\tau - U_l (T_c - T_a)) \quad (3.1.b)$$

donde  $Q_u$  es el calor útil,  $S\tau F_r A_c$  es el calor que se obtiene por radiación y  $U_l F_r A_c (T_c - T_a)$  es el calor total que se pierde,  $A_c$  es el área del colector,  $S$  es la radiación total que llega a la superficie del colector,  $\tau$  es la transmitancia de la cubierta,  $U_l$  es el coeficiente total de pérdidas,  $T_c$  es la temperatura de entrada del fluido al colector,  $T_a$  es la temperatura del ambiente y  $F_r$  es el factor de remoción y está dado por la ecuación:

$$F_r = \frac{mC_p}{A_c U_l} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_c U_l F'}{mC_p}\right) \right] \quad (3.2)$$

El factor de remoción es un parámetro que penaliza la energía solar que llega a la placa de área  $A_c$ . Este valor depende de qué tan eficientemente se extrae la energía útil. Esto depende a su vez del factor de eficiencia del colector  $F'$  de las propiedades de flujo que tiene el fluido de trabajo. El factor de eficiencia se obtiene a partir de la ecuación:

$$F' = \frac{1}{U_l w \left( \frac{1}{U_l [D + (w - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right)} \quad (3.3)$$

donde  $w$  es la distancia entre los tubos,  $D$  es el diámetro de los tubos,  $D_i$  es el diámetro interior de los tubos,  $h_{fi}$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección del tubo al fluido de trabajo,  $C_b$  es la conductancia de contacto aleta-tubo,  $F$  es la eficiencia de la aleta. La eficiencia de la aleta se calcula con la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\tan\left(m \frac{(w - D)}{2}\right)}{m \frac{(w - D)}{2}} \quad (3.4)$$

donde  $m = \sqrt{\frac{U_l}{k\delta}}$ , siendo  $k$  la conductividad térmica del material de la aleta, y  $\delta$  el grosor de la misma.

El coeficiente global de pérdidas de energía  $U_l$  es la suma de lo que se pierde por la placa colectora, por la parte inferior y por los lados, quedando la ecuación como:

$$U_l = U_i + U_b + U_c \quad (3.5)$$

Aquí,  $U_i$  está dado por la ecuación (empírica):

$$U_i = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[ \frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right]} \right\}^{-1} + \frac{\sigma (T_{pm} + T_a) (T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.0059 N h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 \varepsilon_p - N}{\varepsilon_g}} \quad (3.6.a)$$

donde

$N$  es el número de cubiertas de vidrio

$$f = (1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \varepsilon_p) (1 + 0.07866 N) \quad (3.6.1)$$

$$C = 520 (1 - 0.000051 \beta^2), \text{ para } 0^\circ < \beta < 70^\circ. \text{ Para } 70^\circ < \beta < 90^\circ \text{ use } \beta = 70^\circ. \quad (3.6.2)$$

$$e = 0.43 \left( 1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (3.6.3)$$

$\beta$  es la inclinación del colector (en grados)

$\varepsilon_g$  es la emitancia del vidrio (0.88)

$\varepsilon_p$  es la emitancia de la placa

$T_a$  es la temperatura ambiente (K)

$T_{pm}$  es la temperatura media de la placa (K)

$h_w$  es el coeficiente de transferencia del calor al ambiente (W/m<sup>2</sup>C)

El  $U_i$  antes visto tiene otra forma de ser calculado por medio de coeficientes convectivos mediante la ecuación:

$$U_i = \frac{1}{h_{epc} + h_{rpc} + h_w + h_{rca}} \quad (3.6.b)$$

Para evaluar  $U_i$  es necesario suponer una temperatura de cubierta  $T_c$  y recalculer  $T_c$  hasta que converja (método iterativo) usando la ecuación

$$T_c = \frac{T_{pm} - U_i (T_{pm} - T_a)}{h_{epc} + h_{rpc}} \quad (3.7)$$

donde:

$h_{cpc}$  es el coeficiente de convección entre placas y cubierta,

$h_{rpc}$  es el coeficiente de radiación entre placa y cubierta,

$h_{rca}$  es el coeficiente de radiación de la cubierta al aire,

$h_w$  es el coeficiente de transferencia de calor al ambiente.

Las fórmulas de los coeficientes se muestran a continuación:

$$h_{rpc} = \frac{\sigma (T_{pm}^2 + T_c^2)(T_{pm} + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (3.7.1)$$

$$h_{rca} = \varepsilon_c \sigma (T_c^2 + T_s^2)(T_c + T_s) \quad (3.7.2)$$

$$h_{cpc} = \frac{(Nu)k}{L} \quad (3.7.3)$$

donde

$\sigma = 5.66 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ,

$T_{pm}$  es la temperatura media de la placa,

$T_c$  es la temperatura de la cubierta,

$\varepsilon_p$  es la emitancia de la placa,

$\varepsilon_c$  es la emitancia de la cubierta,

$T_s$  es la temperatura del cielo,

$K$  es la conductividad térmica del material,

$L$  es el grosor de aislamiento de la parte inferior del colector y

$Nu$  es el número de Nusselt.

El número de Nusselt se obtiene con la siguiente fórmula:

$$Nu = 1 + 1.44 \left( 1 - \frac{1708 \sin^{1.6}(1.8\beta)}{(Ra) \cos \beta} \right) \left( \left| 1 - \frac{1708}{(Ra) \cos \beta} \right| \right) + \left( \left( \frac{(Ra) \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right) \quad (3.7.4)$$

Aquí,

$Ra$  es el número de Raleigh, el cual se obtiene con la siguiente fórmula:

$$Ra = \frac{g(T_p - T_c)L^3(\text{Pr})}{TV^2} \quad (3.7.5)$$

donde

$g$  es la aceleración debido a la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),

$T$  es la temperatura media  $T = \frac{T_p + T_c}{2}$ ,

$$(3.7.6)$$

$Pr$  es el número de Prandtl y

$V$  es un coeficiente característico de cada experimento. Los dos últimos se obtienen de las tablas de propiedades de los fluidos.

$U_b$  está dado por la ecuación:

$$U_b = \frac{k}{L} \quad (3.7.7)$$

$U_e$  está dado por la ecuación:

$$U_e = \frac{U_l A}{A_c} \quad (3.7.8)$$

donde

$U_l$  es el coeficiente global de transferencia de calor,

$A$  es el coeficiente de pérdida de área,

$A_c$  es el área del colector.

Los coeficientes  $U_b$  y  $U_e$  se utilizan cuando tratamos con colectores cubiertos.

$T_c$  está dada por la ecuación:

$$T_c = \frac{T_{pm} - U_l (T_{pm} - T_a)}{h_{cpc} + h_{rpc}} \quad (3.7.9)$$

Para obtener la eficiencia se divide el calor útil entre el calor de alimentación:

$$\eta = \frac{S\tau F_r A_c - U_l F_r A_c (T_c - T_a)}{S\tau F_r A_c} \quad (3.8.a)$$

lo cual se reduce a:

$$\eta = U_l F_r \frac{(T_{fi} - T_a)}{S\tau} + F_r. \quad (3.8.b)$$

La ecuación anterior es una ecuación lineal en donde la ordenada al origen es  $F_r$ , la pendiente es

$U_l F_r$ , la variable independiente es  $\frac{(T_{fi} - T_a)}{S\tau}$ , y la variable dependiente es la eficiencia  $\eta$ .

Con esto, se ve que al conocer la curva de eficiencia de un colector (ecuación de la recta) es posible conocer el comportamiento térmico del mismo.

Para todo colector solar plano, la eficiencia del mismo se reduce con el incremento de la temperatura de operación. [3] Esto se describe mediante la ecuación (3.9):

$$\eta = \eta_0 - \frac{U(T_{abs} - T_{amb})}{S} \quad (3.9)$$

Donde  $\eta_0$  es la eficiencia óptica,  $T_{abs}$  es la temperatura del absorbedor,  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente,  $U$  es el coeficiente de pérdidas del colector, (en  $W/m^2C$ ) y  $S$  es la irradiancia sobre el colector (en  $W/m^2$ ).

El coeficiente de pérdidas del colector  $U$ , depende de la temperatura, pero generalmente se usa un valor constante que da una muy buena aproximación. A mayores temperaturas  $U$  crece, pero si el rango de temperaturas de operación no es demasiado amplio, todavía sigue siendo válida la ecuación antes mencionada.

La ecuación linealizada de  $\eta$  nos permite graficar la eficiencia contra una variable única  $\Delta T/S$ , en lugar de dos variables separadas  $\Delta T$  y  $S$ . En la práctica, esta ecuación es útil porque generalmente el técnico lo que tiene a la mano es la temperatura del fluido y no la de la superficie del absorbedor del colector.

En la mayoría de los colectores, la resistencia térmica existente entre la superficie del absorbedor y el fluido de trabajo causa un pobre desempeño, porque el absorbedor debe estar más caliente que el fluido. Este efecto puede ser analizado más convenientemente en términos de un factor de la eficiencia del colector. Cuando se especifica la temperatura del colector como la temperatura del fluido de trabajo, la eficiencia está dada por:

$$\eta = F' \left[ \eta_0 - \frac{U(T_m - T_{amb})}{S} \right] \quad (3.10)$$

donde  $T_m$  es la temperatura media del fluido de trabajo.

El coeficiente  $F'$  es el factor de eficiencia de la aleta, y los valores numéricos varían entre 0.8 y 0.9 para los colectores que trabajan con aire y 0.9 a 0.95 para los que trabajan con agua. Los colectores evacuados tienen valores de  $F'$  entre 0.95 y 0.99.

Esto significa, por ejemplo, que un colector de aire entrega entre 10% y 20% menos de energía a una temperatura dada que si hubiera una transferencia de la energía entre el absorbedor y el aire.  $F'$  en la práctica no varía mucho con las condiciones de operación y, generalmente se trata como una constante. De hecho, no es medida separadamente en las pruebas de los colectores solares planos [3]. En su lugar, se miden las combinaciones  $F'\eta_0$  y  $F'U$ .

En la mayoría de las aplicaciones la temperatura de entrada  $T_m$  es dada, no la temperatura media del fluido  $T_m = \frac{T_w + T_{um}}{2}$ . Sin embargo, la forma básica de la ecuación de la eficiencia sigue siendo válida aún si la temperatura del colector se especifica como  $T_m$ , supuesto que se introduce un factor de corrección, el factor de remoción de calor  $F_r$ .

Respecto al método utilizado para calcular la irradiancia diaria, se consideró el método de mínimos cuadrados ordinarios. Se consideran  $n$  datos, en este caso 12 que corresponden a los promedios mensuales de irradiancia mensual local. Evidentemente, si se utiliza el promedio mensual, se consideraría que cada día de cada mes tendría una irradiancia igual al promedio mensual. Para evitar que esta variable cambie bruscamente al final de cada mes, se encuentra la curva polinomial de tercer grado de mejor ajuste a los 12 datos conocidos.

El método de mínimos cuadrados es muy conocido en ingeniería, por esto, solamente se escriben las ecuaciones que ayudan a encontrar los coeficientes de la función  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$  de mejor ajuste:

$$a_0 = \frac{\begin{vmatrix} \sum y_i & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i y_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 y_i & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 y_i & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{vmatrix}}$$

$$a_1 = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum y_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i y_i & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^3 y_i & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{vmatrix}}$$

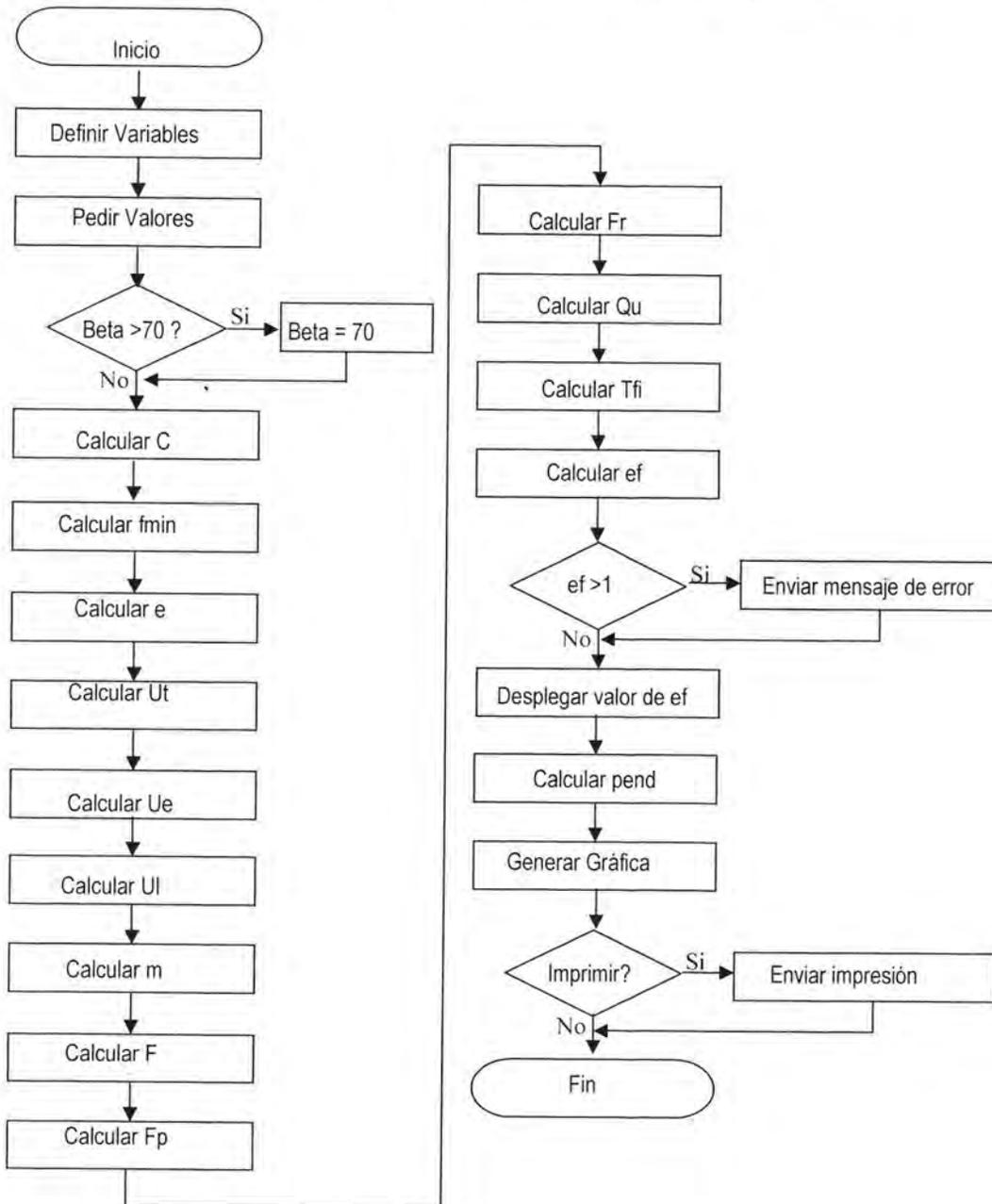
$$a_2 = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum x_i & \sum y_i & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^3 y_i & \sum x_i^6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{vmatrix}}$$

$$a_3 = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^3 y_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{vmatrix}}$$

donde, en el caso del modelo utilizado en el código del software CSP Eficiencia,  $x_i$  representa el día 15 del mes  $i$ -ésimo,  $y_i$  es el promedio de irradiancia local para el mes  $i$ -ésimo,  $n$  es el número de datos conocidos (en este caso 12, que es el número de meses)

## Diseño del diagrama de flujo

De acuerdo a las anteriores consideraciones se creó el siguiente diagrama de flujo.



La descripción de cada procedimiento se detalla en el apéndice I, página 71.

## Capítulo IV. Evaluación del software

### Evaluación del software CSP Dim

Para la evaluación del software CSP Dim, que nos ayuda a realizar el dimensionamiento de un sistema de colectores solares planos, se realizaron 21 dimensionamientos. Los datos usados para realizar éstos se muestran en la tabla 1. Todos estos dimensionamientos se realizaron de manera arbitraria, esto es, no se trata de datos reales.

No.	N. P.	Temp. (°C)	Ancho (m)	Largo (m)	Latitud (Grad)	Inclinación (Grad)	T. Interés (%)	Precio Col (Pesos)	Precio Gas (Pesos)	Precio Elect. (Pesos)
1	2	10	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
2	2	15	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
3	2	20	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
4	2	25	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
5	2	30	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
6	3	10	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
7	3	15	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
8	3	20	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
9	3	25	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
10	3	30	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
11	4	10	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
12	4	15	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
13	4	20	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
14	4	25	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
15	4	30	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
16	5	10	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
17	5	15	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
18	5	20	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
19	5	25	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
20	5	30	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50
21	6	10	1	2	18.5	0	9	2100.00	6.60	0.50

Tabla 1. Datos considerados para la evaluación del software CSP Dim

Es evidente de la tabla 1 que se consideraron valores de latitud similares a los de la ciudad de Chetumal, Q. R., cambiando los valores de temperatura promedio y del número de personas que usará el sistema. Se considera al sistema de colectores en posición horizontal. La eficiencia se considera igual a 0.45 (45%). La tasa de interés anual se considera del 9%, el precio de cada colector se consideró igual a \$2,100.00 pesos. El precio del kilogramo de gas y del kilowatt-hora de electricidad se consideraron constantes a lo largo de la vida útil del sistema, siendo estos valores \$6.60 y \$0.50 pesos respectivamente.

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos con el software.

	No. Col.	Vol. T.T. (L)	Costo (Pesos)	Tr. Gas (años)	Tr. Elect. (años)	Valor Critico (Pesos)	Consumo Gas (Pesos)	Consumo Elect. (Pesos)
1	1	225.00	11830.00	19	***	1064.70	***	707.55
2	1	225.00	11830.00	23	***	1064.70	***	653.13
3	1	225.00	11830.00	32	***	1064.70	***	598.70
4	1	225.00	11830.00	***	***	1064.70	1034.55	544.27
5	1	225.00	11830.00	***	***	1064.70	931.10	489.84
6	2	337.50	15340.00	14	***	1380.60	***	1061.33
7	1	337.50	12610.00	11	***	1134.90	***	979.69
8	1	337.50	12610.00	13	***	1134.90	***	898.05
9	1	337.50	12610.00	16	***	1134.90	***	816.41
10	1	337.50	12610.00	20	***	1134.90	***	734.77
11	2	450.00	15340.00	9	44	***	***	***
12	2	450.00	15340.00	10	***	1380.60	***	1306.25
13	2	450.00	15340.00	11	***	1380.60	***	1197.40
14	2	450.00	15340.00	13	***	1134.90	***	1088.54
15	1	450.00	12610.00	11	***	1134.90	***	979.69
16	3	562.50	18070.00	8	30	***	***	***
17	2	562.50	15340.00	7	22	***	***	***
18	2	562.50	15340.00	8	30	***	***	***
19	2	562.50	15340.00	9	***	1380.60	***	1360.68
20	2	562.50	15340.00	11	***	1380.60	***	1224.61
21	3	675.00	21385.00	8	28	***	***	***

Tabla 2. Resultados obtenidos en la evaluación del software CSP Dim

### Evaluación del software CSP Eficiencia

Para la evaluación del software CSP Eficiencia, que calcula la eficiencia de un colector solar plano, se realizaron 9 pruebas. Cada prueba consistió en la elaboración de varias gráficas. De cada una se registró la eficiencia promedio anual. Los datos usados para realizar estas pruebas y los resultados se adjuntan en las tablas 3.1 a 3.9.

Se considera, en todos los casos, datos promedio para Chetumal, Q. R. México, para poder ver los resultados que se tendrían cuando un colector funcione en esta localidad bajo distintas condiciones de operación. Evidentemente, el colector solar plano deberá tener un comportamiento similar en cualquier lugar del mundo, siempre que se someta a las mismas condiciones de operación.

Todas las pruebas se realizaron con el propósito de predecir cómo afecta a la eficiencia cada parámetro. Esto servirá de ayuda en la descripción del comportamiento térmico del colector solar plano.

Como medida de la afectación que cada parámetro ocasiona sobre la eficiencia se crearon las siguientes definiciones:

- ✓ Variación específica de la eficiencia debido al parámetro X: que es igual al promedio de las variaciones (en porcentaje) ocasionadas sobre la eficiencia del colector por cada unidad que varía el parámetro X. Se considera positiva cuando un aumento del parámetro X causa un incremento de la eficiencia del colector solar plano; se considera negativa cuando un aumento del parámetro X causa un decremento en la eficiencia del colector solar plano. Evidentemente, habrá algunos parámetros que darán una variación específica de la eficiencia positiva dentro de ciertos intervalos y negativa en otros intervalos.
- ✓ Punto de variación específica de la eficiencia debido al parámetro X nula. Se dice que en un punto (o valor), la variación específica de la eficiencia debido al parámetro X es nula si, para dos valores del parámetro X, cercanos e igualmente alejados del punto especificado (a lo más 5% del punto), la variación específica promedio de la eficiencia es igual a cero.
- ✓ Punto de variación específica de la eficiencia debido al parámetro X nula con máximo. Se dice que en un punto (o valor), la variación específica de la eficiencia debido al parámetro X es nula con máximo si, (a) es un punto de variación específica de la eficiencia debido al parámetro X nula, (b) para valores menores y cercanos a ese punto, la variación específica debido al parámetro X es negativa, y (c) para valores mayores y cercanos a ese punto, la variación específica debido al parámetro X es positiva.
- ✓ Punto de variación específica porcentual de la eficiencia debido al parámetro X nula con mínimo. Se dice que en un punto (o valor), la variación específica de la eficiencia debido al parámetro X es nula con mínimo si, (a) es un punto de variación específica de la eficiencia debido al parámetro X nula, (b) para valores menores y cercanos a ese punto, la variación específica debido al parámetro X es positiva, y (c) para valores mayores y cercanos a ese punto, la variación específica porcentual debido al parámetro X es negativa.

El punto de variación específica de la eficiencia debido al parámetro X nula con máximo indicaría el punto donde todo usuario desearía tener el colector solar plano: la eficiencia en ese punto, para el parámetro considerado, es donde menos afecta el desempeño térmico del colector solar plano, esto es, afectando lo mínimo la eficiencia del colector solar plano dentro del intervalo.

El punto de variación específica de la eficiencia debido al parámetro X nula con mínimo indica el punto de operación del colector solar plano donde, para el parámetro seleccionado, se tiene la mayor cantidad de pérdidas dentro del intervalo donde está operando.

Entonces, la variación específica de la eficiencia debido al parámetro X indica "la sensibilidad" de la eficiencia a los cambios del parámetro X. En otras palabras, es una medida de qué tanto afecta a la eficiencia del colector solar plano un cambio unitario en el parámetro X. Cuando la eficiencia aumenta debido a un incremento en el parámetro X (dentro de cierto intervalo), la variación específica de la eficiencia se considera positiva. Cuando ocurra lo contrario se considera negativa.

Para todos los casos en la evaluación del software se consideraron los siguientes valores para el resto de los parámetros, salvo el que se está evaluando, el cual toma distintos valores en cada prueba, de acuerdo a la tabla 3, página 49.

- ✓ Área: 2 m<sup>2</sup>
- ✓ Latitud: 18.5°
- ✓ Inclinación: 30°
- ✓ Distancia entre tubos largueros: 0.15 m
- ✓ Diámetro externo de los tubos: 0.024 m

- ✓ Diámetro interno de los tubos: 0.020 m
- ✓ Coeficiente global de transferencia de calor al ambiente:  $0.8 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- ✓ Coeficiente de transferencia de calor debido a la convección:  $0.4 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- ✓ Temperatura media de placa:  $100\text{°C}$
- ✓ Conductividad de la aleta:  $383 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  (cobre)
- ✓ Grosor de la aleta: 0.0054 m
- ✓ Emitancia de la placa colectora: 0.95
- ✓ Conductividad de la unión tubo – aleta:  $300 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$
- ✓ Espesor de la pared inferior: 0.05 m
- ✓ Emitancia del vidrio: 0.88
- ✓ Número de cubiertas: 1
- ✓ Transmitancia de la cubierta: 0.8
- ✓ Conductividad del material aislante:  $0.045 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  (fibra de vidrio)

Puede notarse que el largo y ancho del colector solar plano se consideraron de acuerdo al modelo ampliamente conocido de 2m x 1m respectivamente. La temperatura de cielo siempre se consideró superior a la temperatura ambiente, porque no hay promedios mensuales disponibles para Chetumal, Q. R. La conductividad de la aleta se consideró igual a  $383 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ , la cual corresponde al cobre. Para el caso de la conductividad de la unión tubo – aleta se consideró igual a  $300 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ , necesariamente inferior a la de la aleta (debido a la resistencia térmica que representa la unión del tubo con la aleta misma). Se considera un grosor de aleta ligeramente superior a medio centímetro ( $0.54 \text{ cm} = 0.0054 \text{ m}$ ). El espesor de la pared inferior se consideró igual a 5 cm., con una conductividad térmica igual a  $0.045 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ , que corresponde a la fibra de vidrio.

La mayoría de los valores utilizados en el software fueron extraídos de un ejemplo de cálculo realizado en la referencia [3].

NOTA: Algunos valores aparecen automáticamente en el software, sin embargo todos son modificables.

**Tabla 3.** Datos utilizados en la Evaluación del Software CSP Eficiencia

$X_i$	$X_f$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{f_{\min}}$	$\eta_{f_{\max}}$	$\Delta\eta_{\min}$	$\Delta\eta_{\max}$	$\frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X}$	$\frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X}$
0	10	0.57009	0.69442	0.56349	0.68973	-0.00660	-0.00469	-0.0007	-0.0005
10	20	0.56349	0.68973	0.54261	0.67492	-0.02088	-0.01481	-0.0021	-0.0015
20	30	0.54261	0.67492	0.50385	0.64742	-0.03876	-0.02750	-0.0039	-0.0028
35	40	0.50385	0.64742	0.43933	0.60163	-0.06452	-0.04579	-0.0065	-0.0046
40	50	0.43933	0.60163	0.33215	0.52557	-0.10718	-0.07606	-0.0107	-0.0076
50	60	0.33215	0.52557	0.14193	0.39059	-0.19022	-0.13498	-0.0190	-0.0135
60	70	0.14193	0.39059	0.00	0.10991	-0.14193	-0.28068	-0.0142	-0.0281

Tabla 3.1. Parámetro: Inclinación del colector ( $\beta$ )Intervalo: desde  $0^\circ$  hasta  $60^\circ$ 

$$\Delta X = 10^\circ$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X} = -0.0571$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X} = -0.0586$$

$X_i$	$X_f$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{f_{\min}}$	$\eta_{f_{\max}}$	$\Delta\eta_{\min}$	$\Delta\eta_{\max}$	$\frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X}$	$\frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X}$
0.60	0.65	0.51631	0.65625	0.51311	0.65399	-0.0032	-0.00226	-0.0640	-0.0452
0.65	0.7	0.51311	0.65399	0.50997	0.65176	-0.00314	-0.00223	-0.0628	-0.0446
0.70	0.75	0.50997	0.65176	0.50689	0.64957	-0.00308	-0.00219	-0.0616	-0.0438
0.75	0.8	0.50689	0.64957	0.50385	0.64742	-0.00304	-0.00215	-0.0608	-0.0430
0.80	0.85	0.50385	0.64742	0.50087	0.64530	-0.00298	-0.00212	-0.0596	-0.0424
0.85	0.9	0.50087	0.6453	0.49794	0.64322	-0.00293	-0.00208	-0.0586	-0.0416

Tabla 3.2. Parámetro: Coeficiente global de transferencia de calor al ambiente ( $h_w$ )

Intervalo: 0.6 a 0.9

$$\Delta X = 0.05 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X} = -0.3674$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X} = -0.2606$$

$X_i$	$X_f$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{f_{\min}}$	$\eta_{f_{\max}}$	$\Delta\eta_{\min}$	$\Delta\eta_{\max}$	$\frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X}$	$\frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X}$
0.35	0.40	0.52031	0.65915	0.50385	0.64742	-0.01646	-0.01173	-0.3292	-0.2346
0.40	0.45	0.50385	0.64742	0.48741	0.63569	-0.01644	-0.01173	-0.3288	-0.2346
0.45	0.50	0.48741	0.63569	0.47097	0.62397	-0.01644	-0.01172	-0.3288	-0.2344
0.50	0.55	0.47097	0.62397	0.45455	0.61226	-0.01642	-0.01171	-0.3284	-0.2342
0.55	0.60	0.45455	0.61226	0.43813	0.60055	-0.01642	-0.01171	-0.3284	-0.2342
0.60	0.65	0.43813	0.60055	0.42171	0.58885	-0.01642	-0.0117	-0.3284	-0.2340

Tabla 3.3. Parámetro: Coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_f$ )

Intervalo: 0.35 a 0.6

$$\Delta X = 0.05 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X} = -1.972$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X} = -1.406$$

$X_i$	$X_f$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{f_{\min}}$	$\eta_{f_{\max}}$	$\Delta\eta_{\min}$	$\Delta\eta_{\max}$	$\frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X}$	$\frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X}$
80	85	0.52742	0.66415	0.5217	0.66008	-0.00572	-0.00407	-0.0011	-0.0008
85	90	0.52170	0.66008	0.51586	0.65594	-0.00584	-0.00414	-0.0012	-0.0008
90	95	0.51586	0.65594	0.50992	0.65172	-0.00594	-0.00422	-0.0012	-0.0008
95	100	0.50992	0.65172	0.50385	0.64742	-0.00607	-0.00430	-0.0012	-0.0009
100	105	0.50385	0.64742	0.49768	0.64303	-0.00617	-0.00439	-0.0012	-0.0009
105	110	0.49768	0.64303	0.49138	0.63856	-0.00630	-0.00447	-0.0013	-0.0009
110	115	0.49138	0.63856	0.48497	0.63401	-0.00641	-0.00455	-0.0013	-0.0009

Tabla 3.4. Parámetro: Temperatura media de placa ( $T_{pm}$ )

Intervalo: 80°C a 115°C

$$\Delta X = 5^\circ\text{C}$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X} = -0.00849$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X} = -0.006028$$

$X_i$	$X_f$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{f_{\min}}$	$\eta_{f_{\max}}$	$\Delta\eta_{\min}$	$\Delta\eta_{\max}$	$\frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X}$	$\frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X}$
300	310	0.50385	0.64742	0.50385	0.64702	0	0	0	0
310	320	0.50385	0.64702	0.50385	0.64702	0	0	0	0
320	330	0.50385	0.64702	0.50385	0.64702	0	0	0	0
330	340	0.50385	0.64702	0.50385	0.64702	0	0	0	0
340	350	0.50385	0.64702	0.50385	0.64702	0	0	0	0
350	360	0.50385	0.64702	0.50385	0.64702	0	0	0	0
360	370	0.50385	0.64702	0.50385	0.64702	0	0	0	0

Tabla 3.5. Parámetro: Conductancia tubo – aleta ( $C_b$ )

Intervalo: 300 W/m°C a 370 W/m°C

$$\Delta X = 10 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$X_i$	$X_f$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{f_{\min}}$	$\eta_{f_{\max}}$	$\Delta\eta_{\min}$	$\Delta\eta_{\max}$	$\frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X}$	$\frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X}$
0.05	0.06	0.50385	0.64742	0.51553	0.65571	0.01168	0.00829	1.168	0.829
0.06	0.07	0.51553	0.65571	0.52388	0.66163	0.00835	0.00592	0.835	0.592
0.07	0.08	0.52388	0.66163	0.53013	0.66607	0.00625	0.00444	0.625	0.444
0.08	0.09	0.53013	0.66607	0.53500	0.66952	0.00487	0.00345	0.487	0.345
0.09	0.10	0.53500	0.66952	0.53889	0.67229	0.00389	0.00277	0.389	0.277
0.10	0.11	0.53889	0.67229	0.54208	0.67455	0.00319	0.00226	0.319	0.226

Tabla 3.6. Parámetro: Espesor de la pared inferior ( $L$ )

Intervalo: 0.05 m a 0.11 m

$$\Delta X = 0.01 \text{ m}$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X} = 3.823$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X} = 2.713$$

$X_i$	$X_f$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$	$\Delta\eta_{\min}$	$\Delta\eta_{\max}$	$\frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X}$	$\frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X}$
0	1	0.21799	0.44453	0.50385	0.64742	0.28586	0.20289	0.28586	0.20289
1	2	0.50385	0.64742	0.59601	0.71283	0.09216	0.06541	0.09216	0.06541

Tabla 3.7. Parámetro: Número de cubiertas ( $n$ )

Intervalo: 0, 1, 2

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X} = 0.37802$$

$$\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X} = 0.2683$$

$X_i$	Material	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$
383	Cobre	0.50385	0.64742
210.45	Aluminio	0.50385	0.64742
16.27	Acero Inoxidable	0.50385	0.64742

Tabla 3.8. Parámetro: Conductividad térmica de la placa ( $k$ ) Intervalo: Distintos materiales

$X_i$	Material	$\eta_{\min}$	$\eta_{\max}$
0.045	Fibra de vidrio (13 a 20 kg/m <sup>3</sup> )	0.50385	0.64742
0.043	Corcho (90 a 110 kg/m <sup>3</sup> )	0.50697	0.64963
0.038	Poliestireno expandido (15 a 20 kg/m <sup>3</sup> )	0.51475	0.65515
0.020	Poliuretano (32 a 40 kg/m <sup>3</sup> )	0.54279	0.67505

Tabla 3.9. Parámetro: Conductividad térmica del aislante ( $k_a$ ) Intervalo: Distintos materiales

## Capítulo V. Análisis de resultados

### Análisis de resultados del software CSP Dim

En la evaluación del software CSP Dim se consideraron los datos que aparecen en la tabla 1. Se hace evidente de la primera columna (que corresponde al número de colectores) que en latitudes cercanas a los  $18.5^\circ$  es necesario solamente uno o dos colectores para satisfacer la demanda energética desde 2 hasta 5 personas, excepto los casos (a) 16, donde el número de personas es igual a cinco, y la temperatura promedio ambiental es de  $10^\circ\text{C}$ , en el que se requieren 3 colectores solares planos para satisfacer la demanda energética, y (b) 21, donde se consideran 6 usuarios, se requieren 3 colectores solares planos.

El volumen del termo-tanque aumentó con el número de personas. El volumen del termo-tanque para almacenar el agua acondicionada varió desde 225 litros para 2 personas y hasta 675 litros en el caso de 6 personas. Además del volumen de agua obtenido multiplicando el volumen diario de agua usado por persona por el número de personas, se agregó el 50% adicional, para que evitar cambios bruscos en la temperatura del agua acondicionada cuando ésta se ocupe.

El 50% adicional viene de la siguiente discusión:

Sea  $V$  el volumen de agua que utiliza un usuario por día,

$k$  el número de usuarios del sistema de colectores solares planos,

$T_{min}$  la temperatura mínima aceptable por el usuario del agua acondicionada,

$T_{fc}$  la temperatura final del agua caliente (acondicionada),

$T_{ff}$  la temperatura final del agua fría,

$m_{TT}$  la masa de agua en el termotanque,

$m_f$  la masa de agua fría que entra al termotanque

$C_p$  la capacidad calorífica del agua.

Entonces, de acuerdo a la ley de la conservación de la energía tenemos:

$$m_{TT}C_p(T_{fc} - T_{fc}) = m_f C_p (T_{fc} - T_{ff}), \text{ lo cual se reduce a:}$$

$$m_{TT} (T_{fc} - T_{fc}) = m_f (T_{fc} - T_{ff})$$

pero si consideramos la densidad del agua igual a  $1\text{kg/L}$ , entonces, el volumen de agua usado por los usuarios es igual a la masa de agua fría que entró al termotanque; de aquí que la última igualdad se transforme en:

$$m_{TT} (T_{fc} - T_{fc}) = Vk (T_{fc} - T_{ff})$$

donde  $V$  y  $k$  están definidas como se mencionó anteriormente. Entonces,

$$m_{TT} = Vk \left( \frac{T_{fc} - T_{ff}}{T_{fc} - T_{fc}} \right) = Vk (dT)$$

El factor  $(dT)$  de la última igualdad indicará la proporción entre la masa del agua en el termotanque y la masa del agua que se consume diario por los usuarios para evitar cambios en la temperatura del agua acondicionada tan bruscos que no sean aceptables, esto es, que se reduzca la temperatura del agua por debajo de un límite preestablecido. Para este trabajo se consideraron los casos con

minima temperatura para hacer el cálculo del porcentaje adicional de volumen de agua que debe tener el termotanque para evitar cambios bruscos en la temperatura del agua.

El costo mínimo del sistema es de \$11,830.00 pesos (2 usuarios). Para esta evaluación, el software arroja tiempos de recuperación de la inversión entre 19 y 32 años cuando está referido a un calentador de agua a base de gas L.P. A pesar de esto, desde el punto de vista económico no es factible el uso de un sistema solar de calentamiento de agua si se compara con un calentador eléctrico. El mínimo valor que debe tener el costo del uso del combustible es de \$1064.70 pesos. El costo del consumo de la electricidad para satisfacer la demanda energética varía entre \$598.70 pesos y \$707.55 pesos (suponiendo las condiciones mencionadas).

El máximo costo del sistema solar es de \$21,385.00 pesos (6 usuarios). En este caso el sistema es factible desde el punto de vista económico tanto por gas como por electricidad. Los tiempos de recuperación para ambos casos de fuentes energéticas son 8 años para el gas L. P. y 28 años para el caso de la electricidad.

Solamente en cinco de los casos estudiados son factibles por medio de electricidad (casos número 11, 16, 17, 18 y 21). Esto resulta evidente, pues se considera que la unidad de energía proveída por medio del gas L. P. tiene un precio mayor al de la electricidad, y a pesar de considerar una eficiencia mayor para el caso del sistema de calentamiento de agua eléctrico mayor, el tiempo de recuperación del sistema que opera a base de gas L. P. siempre será menor.

De hecho, en una latitud de 18.5°, de acuerdo con los resultados del software, en todos los casos analizados, el uso de un sistema solar de calentamiento de agua doméstica es económicamente factible si se compara con un sistema a base de gas. Los tiempos de recuperación de la inversión por el uso de estos sistemas varía entre 5 y 27 años.

En promedio se obtuvo un costo total del sistema de \$14,142.14 pesos por sistema de la muestra dada, con una desviación estándar de 2451.33 pesos. El promedio de los tiempo de recuperación, calculados basándose en la suposición del uso de un calentador de agua doméstica a base de gas L.P., que se obtuvo fue de 10.14 años, con una desviación estándar de 5.36 años.

Por otra parte, si consideramos un sistema a base de electricidad, comparado con el sistema solar, éste último resulta, en la mayoría de los casos (15 de 21) económicamente no factible. Con todo, los tiempos de recuperación para estos 5 casos se obtienen valores mayor o iguales a 20 años (37, 27, 21, 28 y 26 años), lo cual resulta en un promedio de 27.8 años (prácticamente igual a la moda), con una desviación estándar de 5.8 años.

Debe considerarse que las suposiciones dadas al software causaron, en parte, estos resultados: la diferencias entre los precios de los combustibles usados por los dos distintos tipos de calentadores de agua (a base de gas como de electricidad) varían en gran proporción, mientras que las eficiencias ayudan un poco a obtener estos resultados (50% de eficiencia del calentador a base de gas contra 90% de eficiencia del calentador a base de electricidad). Los resultados serían otros si consideramos precios del kWh de electricidad. Nótese también que no se han considerado casos de otras tarifas de consumo eléctrico, las cuales pueden modificar los resultados en el tiempo de recuperación de la inversión. Sin embargo, esto no debe ser causa de alarma, pues todos estos datos son modificables.

Por ejemplo: consideremos el siguiente caso:

- Número de personas: 4
- Temperatura local promedio: 30°C
- Ancho del colector: 1
- Largo del colector: 2
- Latitud local: 18°
- Inclinación de los colectores: 30°
- Tasa de interés compuesto: 8%
- Precio por colector: \$ 2100.00
- Precio del gas: \$ 7.00 / kg
- Precio de la electricidad: \$ 1.50 / kWh

Los resultados son los siguientes:

- Número de colectores: 1
- Volumen del termotanque: 450 litros
- Costo aproximado del sistema: \$ 12, 610.00 pesos
- Tiempo de recuperación considerando calentador a base de gas L. P.: 11 años
- Tiempo de recuperación considerando calentador a base de electricidad: 6 años

### Análisis de resultados del software CSP Eficiencia

Para la evaluación del software CSP Eficiencia se consideraron los datos que aparecen en la tabla 3.

**Tabla 3.1.** Parámetro: Inclinación del colector ( $\beta$ ) Intervalo: desde  $0^\circ$  hasta  $60^\circ$

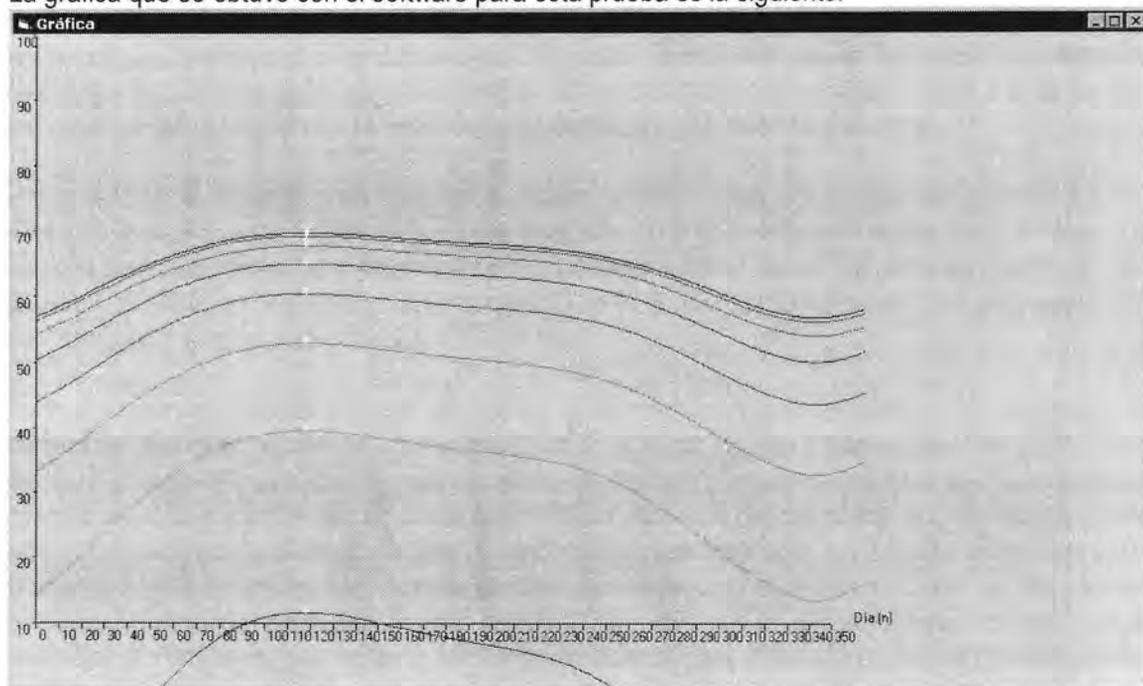
Resultado:  $\sum \frac{\Delta \eta_{\min}}{\Delta X} = -0.0571$ , y  $\sum \frac{\Delta \eta_{\max}}{\Delta X} = -0.0586$ , entonces, la variación específica de la eficiencia debido al parámetro  $\beta$  es:

$$\eta_{\min}^o = \frac{\sum \frac{\Delta \eta_{\min}}{\Delta X}}{n} = \frac{-0.0571}{7} = -0.008257142 \text{ y } \eta_{\max}^o = \frac{\sum \frac{\Delta \eta_{\max}}{\Delta X}}{n} = \frac{-0.0586}{7} = -0.008371428$$

En ambos casos, de la tabla 3.1 es evidente que conforme el parámetro  $\beta$  crece, los valores de  $\eta_{\min}^o$  y de  $\eta_{\max}^o$  crecen igualmente, con signo negativo, no de manera lineal. Esto es, su valor depende del intervalo donde esté variando el parámetro. En otras palabras, un cambio de la inclinación de los colectores causa una disminución de la eficiencia distinta, dependiendo de la inclinación que originalmente tenía. Debe tenerse cuidado y no generalizar el resultado para cualquier valor de  $\beta$ .

En promedio, un cambio de  $1^\circ$  sexagesimal en el parámetro  $\beta$  en el intervalo de  $0^\circ$  a  $60^\circ$  causa una disminución de la eficiencia en un 5.7% en el mes de mínima eficiencia promedio (diciembre), mientras que en el mes de máxima eficiencia (abril) la disminución de la misma es de 0.8%. Este último resultado sugiere considerar por separado meses de alta irradiancia de los meses de baja irradiancia para estudiar el efecto de las variaciones de la inclinación de los colectores sobre la eficiencia de los mismos.

La gráfica que se obtuvo con el software para esta prueba es la siguiente:



**Tabla 3.2.** Parámetro: Coeficiente global de transferencia de calor al ambiente ( $h_w$ )

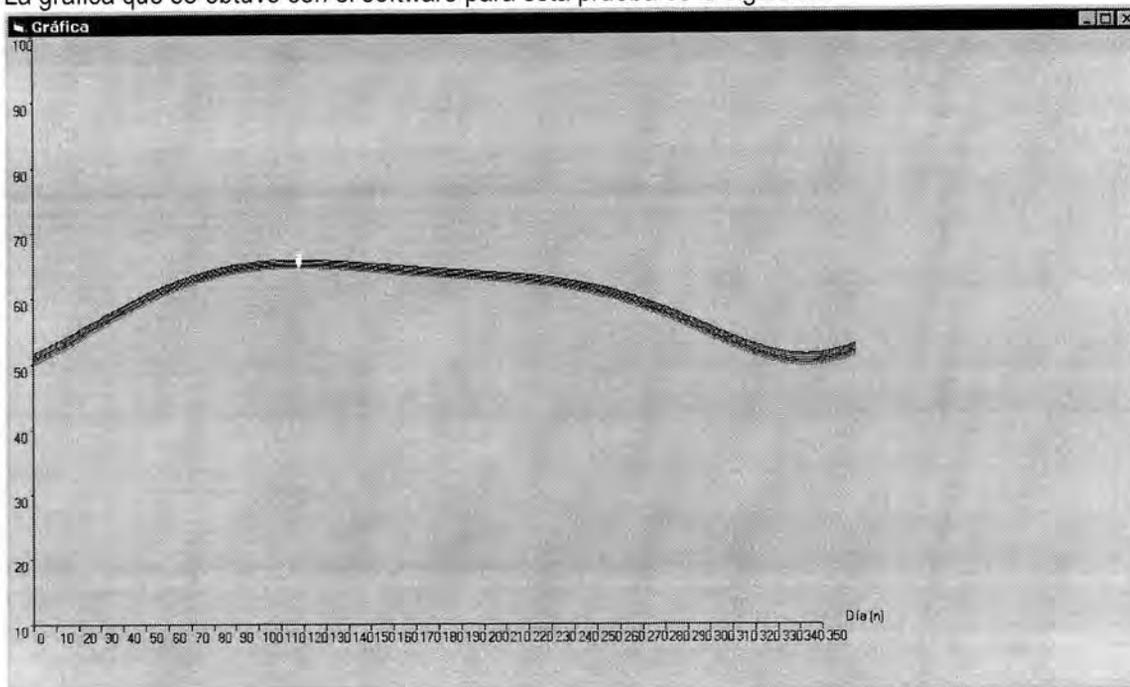
Intervalo: 0.6 a 0.9

Resultado:  $\sum \frac{\Delta \eta_{\min}}{\Delta X} = -0.3674$ , y  $\sum \frac{\Delta \eta_{\max}}{\Delta X} = -0.2606$ , entonces, la variación específica de laeficiencia debido al parámetro  $h_w$  es:  $\eta_{\min}^{\circ} = \frac{\sum \frac{\Delta \eta}{\Delta X}}{n} = \frac{-0.3674}{8} = -0.045925$  en el mes demínima eficiencia, y  $\eta_{\max}^{\circ} = \frac{\sum \frac{\Delta \eta}{\Delta X}}{n} = \frac{-0.2606}{8} = -0.032575$  en el mes de máxima eficiencia.

El signo negativo indica que conforme crece el coeficiente global de transferencia de calor al ambiente, la eficiencia decrece. Un cambio de  $1 \text{ W/m}^2\text{C}$  en el parámetro  $h_w$  en el intervalo de  $0.65 \text{ W/m}^2\text{C}$  a  $0.85 \text{ W/m}^2\text{C}$  causa una disminución de la eficiencia del 4.5% en el mes con eficiencia promedio mínima (diciembre) y del 3.2% en el mes de máxima eficiencia promedio (abril).

La variación específica de la eficiencia debido al parámetro  $h_w$  en este intervalo decrece con mayor magnitud en el mes de menor eficiencia. Esto significa que la eficiencia disminuirá más cuando se dispone de menor recurso solar.

La gráfica que se obtuvo con el software para esta prueba es la siguiente:



049772

**Tabla 3.3.** Parámetro: Coef. de transferencia de calor por convección ( $h_{fi}$ ) Intervalo: 0.35 a 0.6

Resultado:  $\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X} = -1.972$ , y  $\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X} = -1.406$ , entonces, la variación específica de la

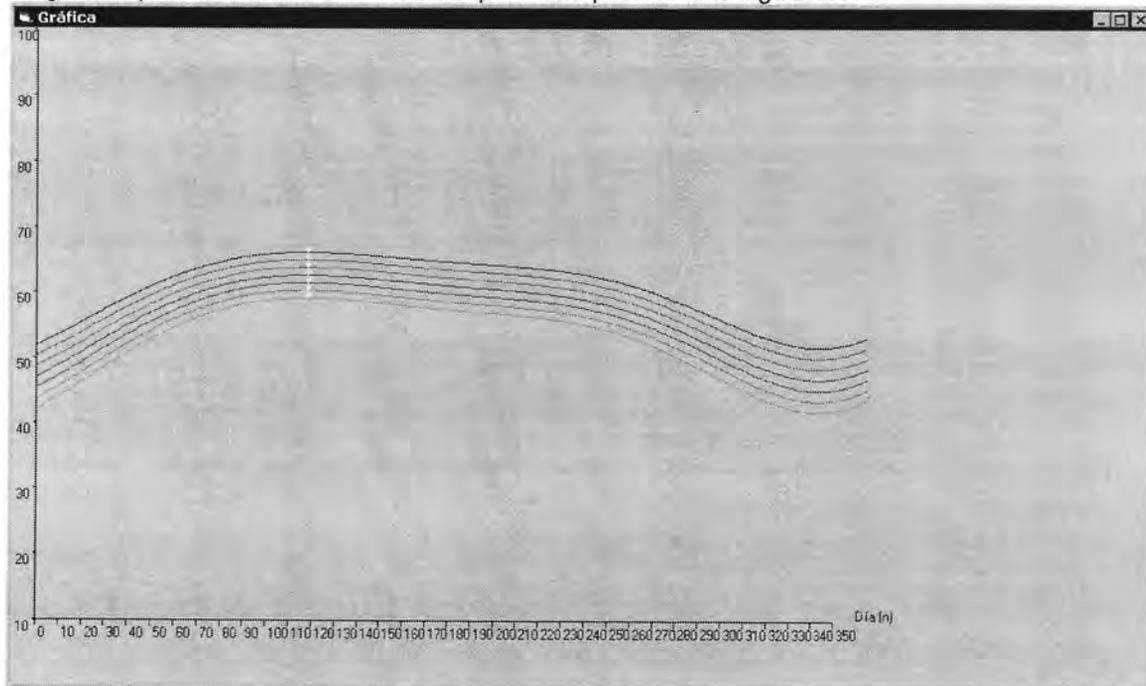
eficiencia debido al parámetro  $h_{fi}$  es:  $\eta_{\min}^o = \frac{\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X}}{n} = \frac{-1.972}{7} = -0.281714$ , y

$$\eta_{\max}^o = \frac{\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X}}{n} = \frac{-1.406}{7} = -0.200857.$$

El signo negativo indica que conforme crece el coeficiente de transferencia de calor al ambiente debido a la convección, la eficiencia decrece. Debe notarse que la variación específica de la eficiencia debido al parámetro  $h_{fi}$  es mayor que la variación específica de la eficiencia debido al parámetro  $h_w$  (el coeficiente global de transferencia de calor al ambiente) en este intervalo, por lo que debe considerarse con mayor peso a la hora del diseño.

De acuerdo a los resultados, un aumento en  $1\text{W/m}^{\circ}\text{C}$  en el parámetro  $h_{fi}$  causa una caída en la eficiencia de un 28% en el mes de eficiencia mínima (diciembre) y de un 20.1% en el mes de máxima eficiencia (abril).

La gráfica que se obtuvo con el software para esta prueba es la siguiente:



**Tabla 3.4.** Parámetro: Temperatura media de placa ( $T_{pm}$ ) Intervalo: 80°C a 115°C

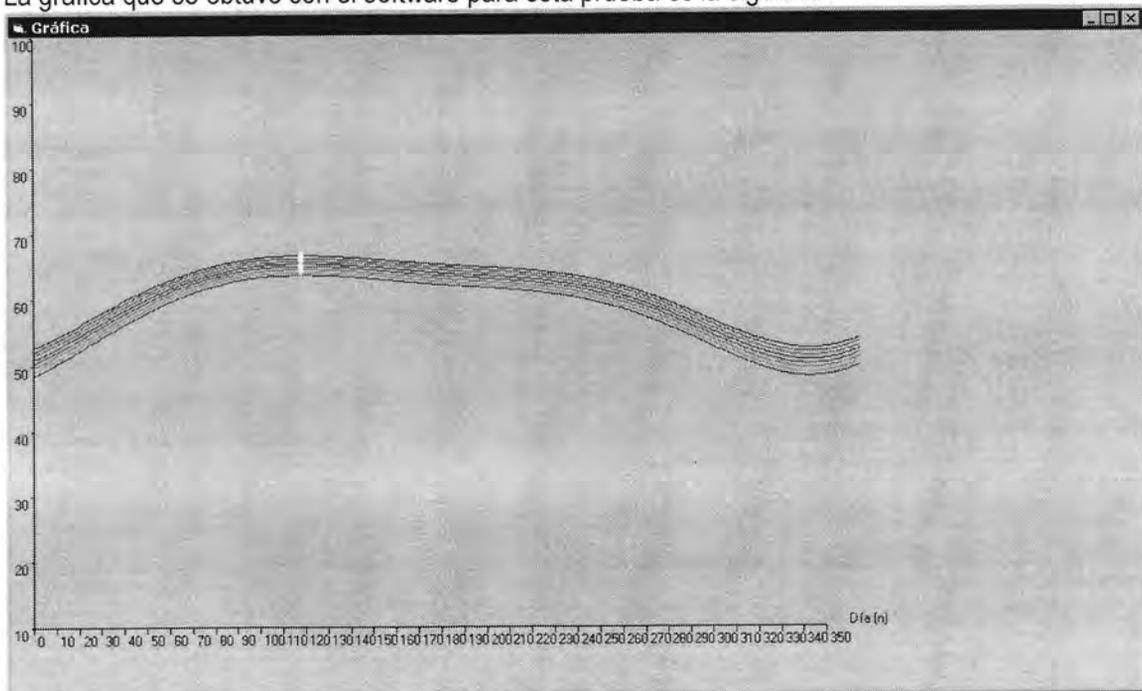
Resultado:  $\sum \frac{\Delta \eta_{\min}}{\Delta X} = -0.00849$  y  $\sum \frac{\Delta \eta_{\max}}{\Delta X} = -0.006028$ , entonces, la variación específica de

la eficiencia debido al parámetro  $T_{pm}$  es:  $\eta_{\min}^o = \frac{\sum \frac{\Delta \eta_{\min}}{\Delta X}}{n} = \frac{-0.00849}{7} = -0.001229$ , y

$$\eta_{\max}^o = \frac{\sum \frac{\Delta \eta_{\max}}{\Delta X}}{n} = \frac{-0.006028}{7} = -0.00086$$

Debe notarse la variación específica de la eficiencia debido al parámetro  $T_{pm}$  es siempre negativa y creciente (negativamente). El incremento de un grado centígrado en la temperatura media de la placa colectora en el intervalo de 80°C a 115°C causa, en promedio una disminución de la eficiencia en un 0.12% para el mes de mínima eficiencia y de un 0.086% en el mes de máxima eficiencia. Esto era de esperarse porque al aumentar la temperatura media de placa, aumentan con ésta las pérdidas radiativas.

La gráfica que se obtuvo con el software para esta prueba es la siguiente:



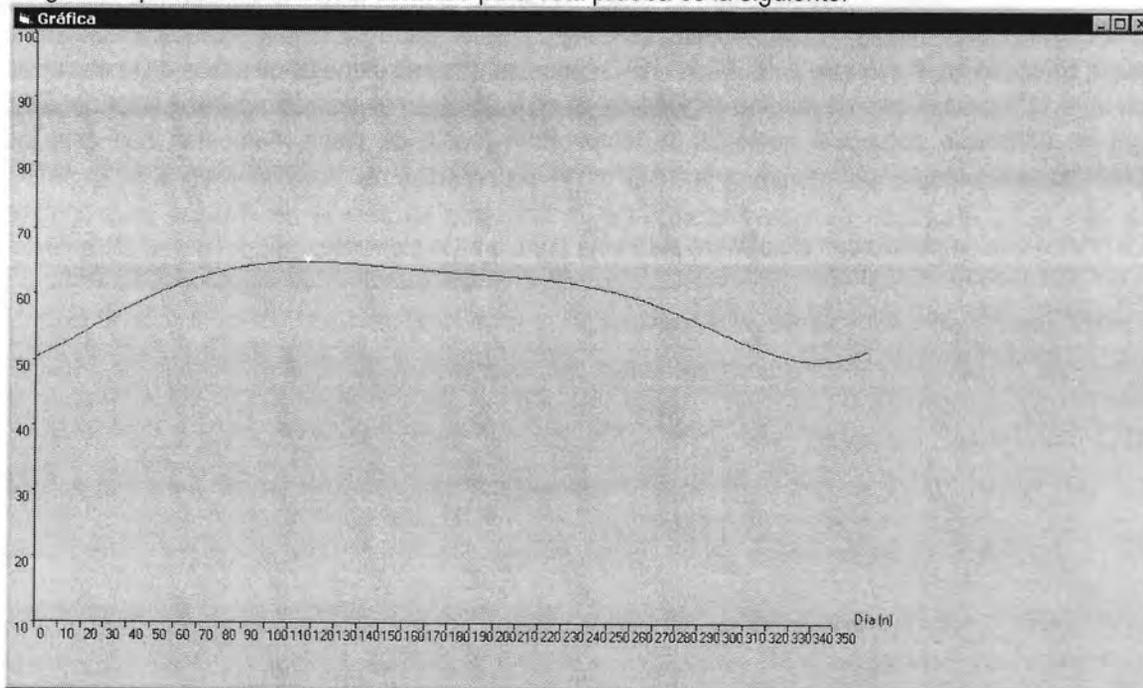
**Tabla 3.5.** Parámetro: Conductancia tubo – aleta ( $C_b$ ) Intervalo: 300 W/m°C a 370 W/m°C

Resultado:  $\sum \frac{\Delta \eta}{\Delta X} = 0.0$ , entonces, la variación específica de la eficiencia debido al parámetro  $C_b$ ,

$$\text{es: } \overset{o}{\eta} = \frac{\sum \frac{\Delta \eta}{\Delta X}}{n} = 0.0.$$

Esto indica que la conductancia tubo – aleta no afecta la eficiencia del colector. Esto no está de acuerdo con la experiencia.

La gráfica que se obtuvo con el software para esta prueba es la siguiente:



**Tabla 3.6.** Parámetro: Espesor de la pared inferior ( $L$ ) Intervalo: 0.05 m a 0.11 m

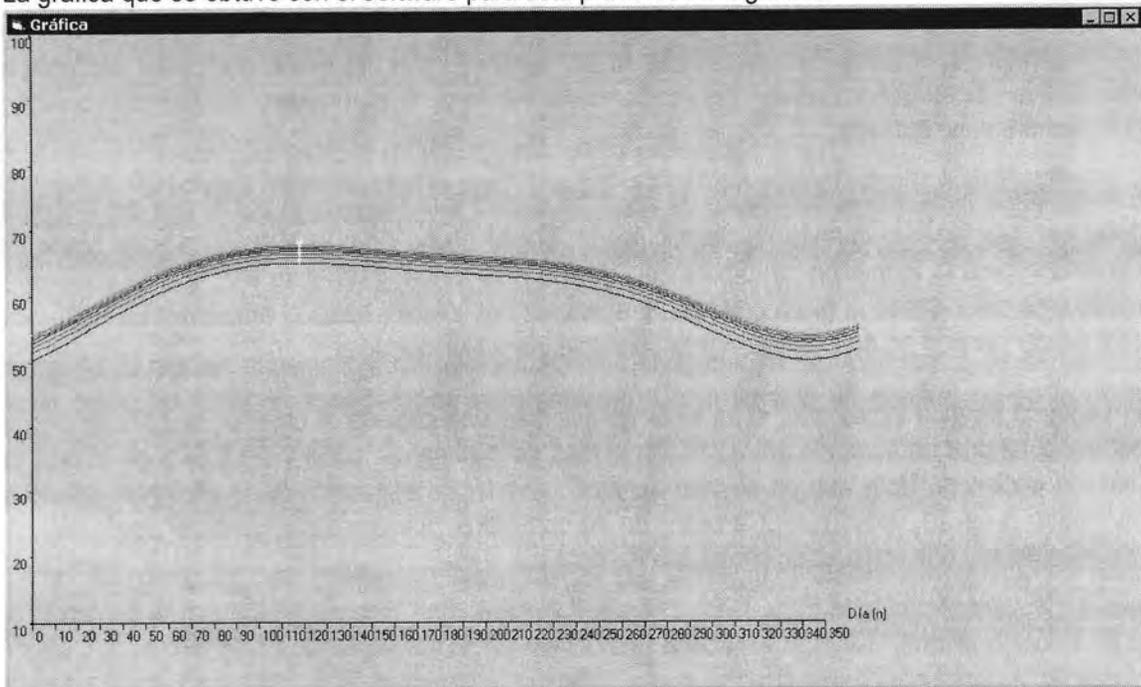
Resultado:  $\sum \frac{\Delta \eta_{\min}}{\Delta X} = 3.823$ , y  $\sum \frac{\Delta \eta_{\max}}{\Delta X} = 2.713$ , entonces, la variación específica de la

eficiencia debido al parámetro  $L$  es:  $\eta_{\min} = \frac{\sum \frac{\Delta \eta_{\min}}{\Delta X}}{n} = \frac{3.823}{7} = 0.5461$ , y

$$\eta_{\max} = \frac{\sum \frac{\Delta \eta_{\max}}{\Delta X}}{n} = \frac{2.713}{7} = 0.38757$$

Una variación de un centímetro en el parámetro  $L$  dentro del intervalo de 0.05 m a 0.12 m causa un aumento en la eficiencia de un 0.5461% para el mes de eficiencia mínima, y de un 0.38757% en el mes de eficiencia máxima.

La gráfica que se obtuvo con el software para esta prueba es la siguiente:



**Tabla 3.7.** Parámetro: Número de cubiertas ( $n$ ) Intervalo: valores de 0, 1, 2

Resultado:  $\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X} = 0.37802$ , y  $\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X} = 0.2683$ , entonces, la variación específica de la

eficiencia debido al parámetro  $L$  es:  $\eta_{\min} = \frac{\sum \frac{\Delta\eta_{\min}}{\Delta X}}{n} = \frac{0.37802}{2} = 0.18901$ , y

$$\eta_{\max} = \frac{\sum \frac{\Delta\eta_{\max}}{\Delta X}}{n} = \frac{0.2683}{2} = 0.13415$$

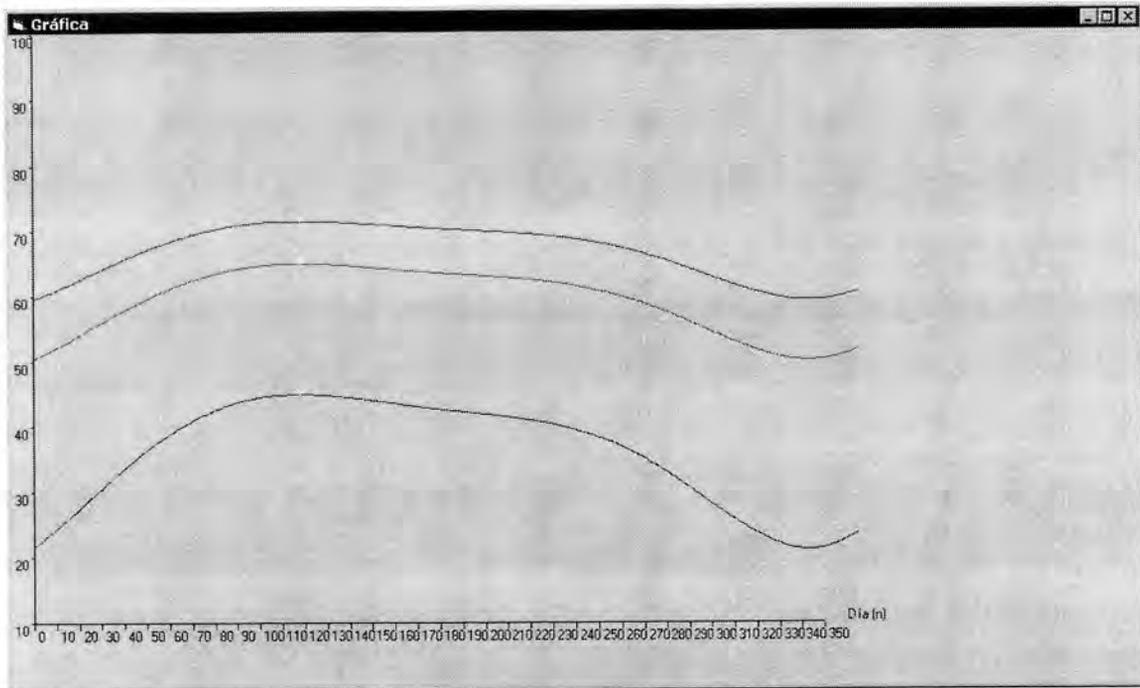
En promedio, un incremento de una cubierta al colector solar plano causa un aumento en la eficiencia en un 18.9% en el mes de mínima eficiencia y de un 13.415% en el mes de eficiencia máxima.

Del primer renglón de la tabla 3.7 se entiende que la diferencia entre no disponer una cubierta al colector solar plano y disponérsela, es un cambio en la eficiencia del colector solar plano en un 28.58% en el mes de mínima eficiencia (diciembre) y del 20.28% en el mes de máxima eficiencia (abril). Sin embargo, debe tenerse cuidado: en este caso se considera que el coeficiente de pérdidas debido a la convección es constante, independientemente de que el modelo matemático considera que siempre tiene cubierta.

Estrictamente hablando el coeficiente de pérdidas debido a la convección por el aire del ambiente debe ser muy distinto cuando no tiene cubierta, por el hecho de que el colector solar plano sin cubierta implica la formación de turbulencias debido a su forma. Esto, a su vez, implica una mayor pérdida de calor desde la placa colectora y el interior del colector hacia el ambiente. En Resumen, este primer renglón no debe considerarse confiable, pero el segundo sí.

El segundo renglón indica que, si en lugar de disponer una cubierta al colector se colocan dos, la eficiencia tendría un aumento del 9.21% en el mes de mínima eficiencia y del 6.54% en el mes de máxima eficiencia. Note que en el caso anterior, la variación específica de la eficiencia debido al parámetro  $n$  es 3.1 veces mayor a pesar de no considerar ninguna variación en el coeficiente de pérdidas debido a la convección con el aire atmosférico.

A continuación se muestra la gráfica que se obtuvo con el software para esta prueba:



**Tabla 3.8.** Parámetro: Conductividad térmica de la placa ( $k$ ) Intervalo: Distintos materiales

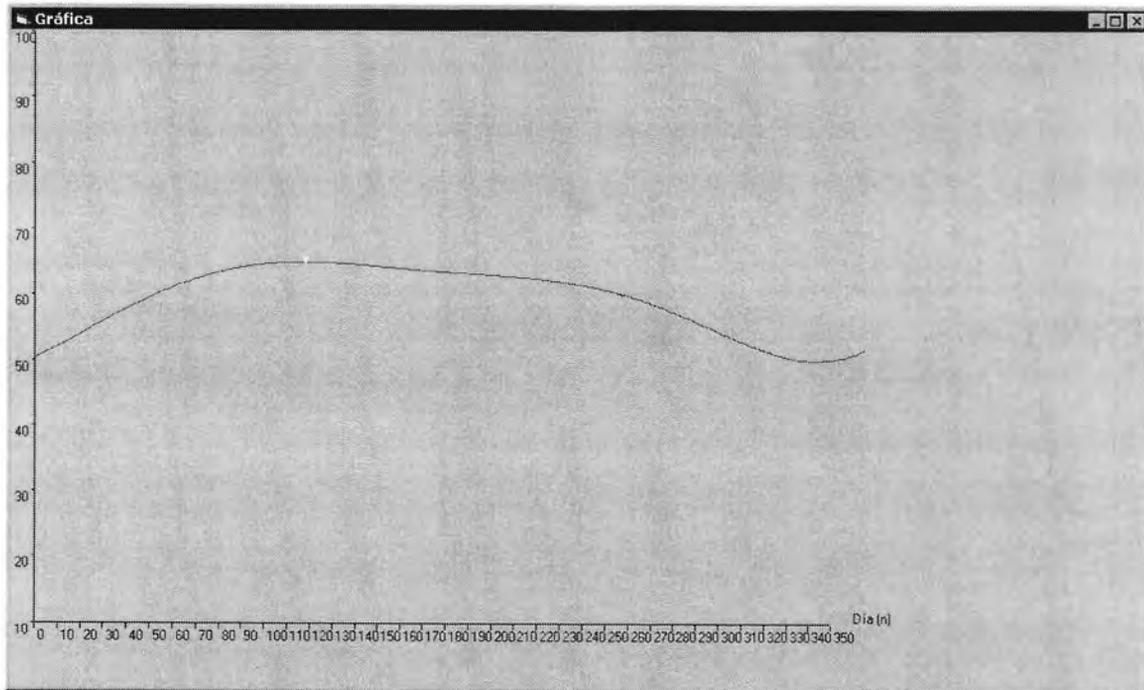
Los resultados indican que la conductividad del material de la altea no afecta la eficiencia del colector solar plano. Esto es contrario a la experiencia. Existen dos posibilidades:

Caso (a) El modelo matemático utilizado actualmente en el cálculo de la eficiencia de un colector solar plano no toma en consideración este parámetro, o al tomarlo en cuenta, no se le da la importancia debida.

El modelo matemático utilizado en el código del software CSP Eficiencia se tomó del cuaderno de notas de los cursos de colectores solares planos editados por la Asociación Nacional de la Energía Solar. En particular las referencias bibliográficas [2] Duffie, J. / Beckman William, A. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, Inc. 1991, y [3] Martínez Strevel, R., Flores Prieto J. J., *Colectores solares planos* Notas del Curso Especializado. XXVI Semana nacional de la Energía Solar. Chetumal, Q. R., sugieren el modelo. Lo que se requiere en este caso es calcular la eficiencia de un colector solar plano variando el parámetro  $k$  y comparando los resultados. Si estos resultados son iguales, entonces, el modelo falla en esta parte.

Caso (b) El software tiene errores en el código. Se comparó el modelo matemático con el código para verificar que las ecuaciones estén escritas correctamente sin detectarse error alguno. Probablemente el modelo matemático contenga el error.

La gráfica que se obtuvo con el software para esta prueba es la siguiente:

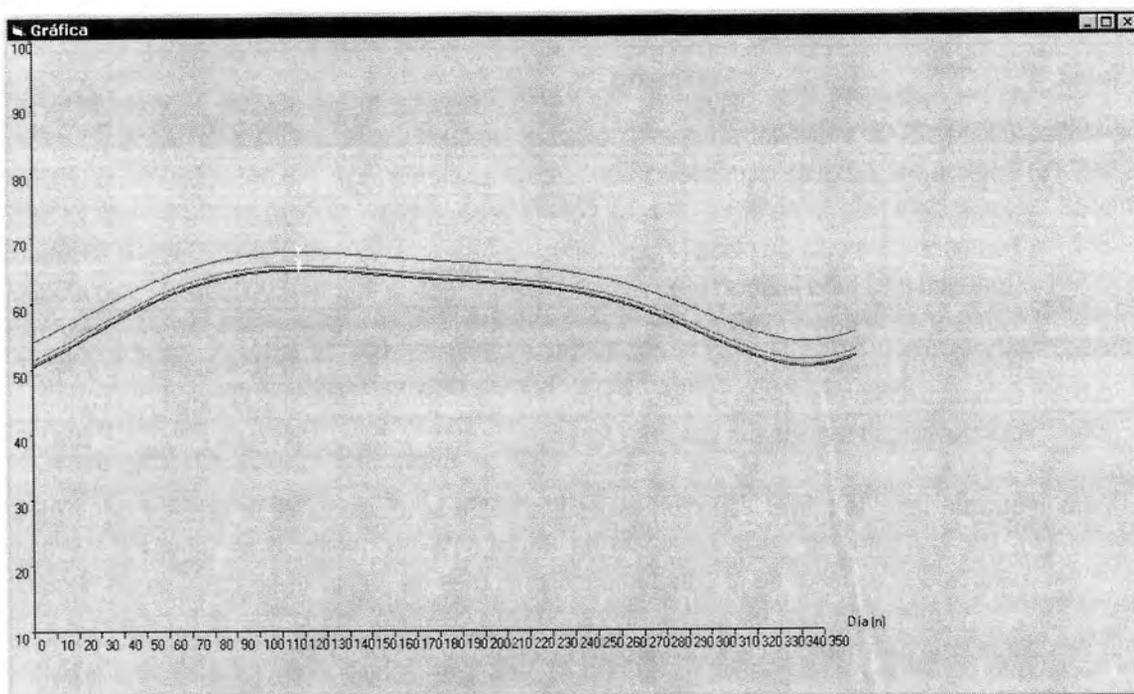


**Tabla 3.9.** Parámetro: Conductividad térmica del aislante ( $k_a$ ) Intervalo: Distintos materiales

En este caso, la tabla indica que al aumentar el parámetro  $k_a$ , la eficiencia del colector solar plano crece. Esto está de acuerdo con la experiencia.

No se calcula la variación específica de la eficiencia respecto al parámetro  $k_a$ , porque no podemos crear materiales con la conductividad térmica que deseemos, sino que la conductividad térmica del material es considerada constante (dentro del intervalo de temperaturas especificado en cada caso).

La gráfica que se obtuvo con el software para esta prueba es la siguiente:



### Comparación de los Resultados

Tabla	Parámetro	$\eta_{\min}^{\alpha}$	$\eta_{\max}^{\alpha}$
3.1	Inclinación del colector ( $\beta$ )	-0.00825714	-0.00837143
3.2	Coefficiente global de transferencia de calor al ambiente ( $h_w$ )	-0.04592500	-0.03257500
3.3	Coefficiente de transferencia de calor por convección ( $h_{fi}$ )	-0.28171400	-0.20085700
3.4	Temperatura media de placa ( $T_{pm}$ )	-0.00122900	-0.00086000
3.5	Conductancia tubo – aleta ( $C_b$ )	0.00000000	0.00000000
3.6	Espesor de la pared inferior ( $L$ )	0.54610000	0.38757000
3.7	Número de cubiertas ( $n$ )	0.18901000	0.13415000
3.8	Conductividad térmica de la placa ( $k$ )	0.00000000	0.00000000
3.9	Conductividad térmica del aislante ( $k_a$ )	N/A	N/A

El parámetro que tiene la mayor variación específica sobre la eficiencia es el espesor de la pared inferior ( $L$ ), con un aumento de la eficiencia de un 54.61% por metro, o un 0.5461% por cada centímetro añadido al espesor de la pared inferior en el mes de menor eficiencia y de un aumento del 38.76% en el mes de mayor eficiencia, utilizando fibra de vidrio. Por lo que se recomienda tener muy en cuenta este parámetro en el momento del diseño.

El parámetro que tiene la menor variación específica sobre la eficiencia es el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_{fi}$ ), que ocasiona una disminución de un 28.17% en la eficiencia del colector solar plano por cada Watt por metro cuadrado – grado centígrado que aumenta en el mes de mínima eficiencia.

En general, se observa que la variación específica de la eficiencia es más sensible en el mes de mínima eficiencia promedio del colector, comparado con el mes de máxima eficiencia promedio del colector.

Debe recordarse que los resultados obtenidos en  $\eta$  son promedios, no resultados puntuales. Por tanto, debe tenerse cuidado de generalizar los resultados. Nótese que la variación específica debido al parámetro X cambia de valor para la mayoría de los parámetros tanto en distintas temporadas del año como en distintos intervalos de valores para cada parámetro.

## Conclusiones y recomendaciones

Debe tomarse en cuenta que el software (tanto CSP Dim como CSP Eficiencia) no considera, ni radiación difusa, ni directa reflejada (esto es, radiación que pudiera llegar a la placa absorbadora del colector solar plano debido a la reflexión de la misma radiación sobre un cristal o agua cercano al mismo) porque estos valores varían dependiendo de las condiciones de ubicación del sistema instalado y sus alrededores.

En la hipótesis de este trabajo se consideró que el modelo matemático utilizado en el estudio de los colectores solares planos está en completo acuerdo con la experiencia. Sin embargo, el software mostró que los parámetros correspondientes a la conductividad térmica de la placa y la conductividad del contacto entre el tubo larguero y la placa no causan ninguna variación en la eficiencia global del colector solar plano.

Este resultado indica que la hipótesis es incorrecta para estos dos parámetros. El resto de los parámetros afecta a la eficiencia como la experiencia y el sentido común lo indican. Esto nos sugiere que seamos más estrictos: la parte experimental no puede dejarse a un lado y confiar solamente en la teoría. Es importante verificar que la teoría esté de acuerdo con la parte experimental y que el software esté libre de suposiciones erróneas, ya que estas pueden acarrear serios errores en los cálculos.

En el caso del Software CSP Eficiencia, se verificó que el código estuviera escrito correctamente y que las instrucciones correspondieran a las fórmulas sugeridas en la bibliografía utilizada en este trabajo. Falta revisar el modelo matemático, lo cual debe realizarse minuciosamente, porque, si el error está contenido ahí, debe ser modificado considerando suposiciones menos globales o más específicas para evitar resultados contrarios a la realidad física del desempeño del colector.

En la comparación de los resultados obtenidos con el software CSP Eficiencia se observa que la variación específica de la eficiencia debido a cada parámetro es más sensible en el mes de mínima eficiencia promedio para el colector solar plano, comparada con el mes de máxima eficiencia promedio.

También se notó en el software que, bajo las condiciones dadas de insolación promedio mensual, promedio de temperatura ambiente mensual y promedio de cielo mensual, el mes de mínima eficiencia y de máxima eficiencia coinciden en todos los casos, independientemente de los parámetros que se varíen. El mes de mínima eficiencia correspondió en todos los casos a diciembre y el mes de máxima eficiencia del colector solar corresponde a abril. Nótese que se consideran en todas las pruebas datos correspondientes a Chetumal, Q. R. Esto indica que estas variables tienen una gran influencia en el desempeño global del colector solar plano.

Se recomienda tener cuidado a la hora de cambiar la latitud en el software. Esto implica un cambio en las condiciones climáticas locales y consecuentemente se deben cambiar los promedios mensuales de irradiancia local, temperatura ambiente y temperatura de cielo. En caso de que no se modifiquen estos datos, el software supondrá los valores que tiene registrados en las cajas de texto, que corresponden a la ciudad de Chetumal, Q. R., México.

En cuanto a los objetivos planteados al principio de este trabajo

- ✓ (a) "Realizar el software para dimensionar un sistema de colectores solares planos para el calentamiento de agua doméstica y evaluarlo", se completó.
- ✓ (b) "Realizar el software para calcular la eficiencia de un colector solar plano y evaluarlo de manera comparativa", se terminó solamente la primera parte, faltando la evaluación comparativa, la cual no se llevó a cabo por no contar con software similar.
- ✓ (c) "Evaluar el desempeño de un colector solar plano con el apoyo del software, bajo distintas condiciones de operación", se realizó, de manera teórica, con datos de Chetumal, Q. R.
- ✓ (d) "Elaborar una guía para la utilización del software", se realizó. La guía se encuentra en el apéndice II, página 74.

### Conclusiones particulares

Además de la evaluación teórica se realizó la comparación del software con el software RET Screen Energy Model. Inmediatamente se encuentran varias ventajas:

- a) El software "CSP Dim" permite modificar todos los parámetros de los cuales depende el dimensionamiento del sistema de colectores solares planos, característica que no permite el software RET Screen. Por ejemplo, no permite indicar la tasa de interés a la cual se compondrá la inversión en caso de ser un préstamo.
- b) El software "CSP Dim" permite indicar la nubosidad promedio para cada mes del año. Esto sirve para que el software haga una penalización a causa de los sombreados para no hacer estimaciones demasiado conservativas a la hora de hacer el cálculo de la cantidad de radiación solar incidente anual por metro cuadrado en esa localidad. Este dato se requiere de manera opcional. La información se puede obtener de cualquier sitio de Internet que dé el servicio de pronóstico del tiempo. Evidentemente es más conveniente, para el cálculo de la cantidad de radiación solar incidente sobre el sistema de colectores planos, el promedio mensual local de irradiancia, pero estos datos no son fáciles de conseguir, y una persona ajena al área solar no los tiene a la mano.
- c) Indica, en caso de que el sistema propuesto no sea factible desde el punto económico, el precio crítico, que se refiere al mínimo costo anual al cual debe ascender el combustible que se requiere para acondicionar el agua doméstica. Asimismo indica el precio actual del combustible requerido.
- d) Por otra parte, el software "CSP Eficiencia" permite:
  - ✓ calcular la eficiencia de un colector solar plano, bien en su fase de diseño, bien en su fase de evaluación, lo cual el software RET Screen no permite.
  - ✓ comparar el desempeño de un colector o distintos colectores en ubicaciones distintas.
  - ✓ Determinar la magnitud de afectación de la eficiencia global del colector debido a la variación de un parámetro del colector mismo. Esta función será de utilidad para las personas que diseñan colectores solares planos.

## Conclusiones generales

El software CSP ha resultado ser bastante útil para dimensionar sistemas de calentamiento de agua para el uso doméstico (CSP Dimensión) y para calcular la eficiencia de un colector solar plano que se encuentra en la fase de diseño como para realizar la evaluación de sistemas que ya se encuentran en operación (CSP Eficiencia). Se recalca que este software hace solamente una aproximación a los valores reales.

Es claro que no es posible, con la tecnología con que contamos, hacer mediciones exactas, sino que éstas siempre tienen un nivel de incertidumbre arrojadas por varias razones: los mismos aparatos de medición, por el mal uso del operador, mala calibración, etc. Por tanto, el software CSP es una buena herramienta para las tareas para las cuales fue diseñado, así como para la enseñanza en escuelas técnicas en el área. Los resultados obtenidos con el software han sido bastante satisfactorios, en el sentido de que los cálculos teóricos han estado en pleno acuerdo con los cálculos (manuales) realizados con el apoyo de la Hoja de Cálculo Excel de Microsoft. Esto indica que el software no contiene errores.

## Recomendaciones

La tarea de un programador es presentar de una manera amena, sencilla y amigable la forma en que el software resolverá un problema. Esto no implica en el más mínimo sentido que la solución del problema sea sencilla. Sin embargo, el usuario, quien algunas veces ignora el nivel de dificultad del problema que está resolviendo el software por él, no lo toma en cuenta. Por tanto, el programador tiene un problema múltiple.

Cuando se realice un software, el programador tiene que verificar que el software realiza la tarea para la cual fue diseñado sin errores. Esto es, debe verificar que el código es correcto. Otro punto importante es que el software debe ser fácil de modificar. Esto se abate casi por completo atacando un tercer punto que consiste en que el software sea comprensible por otros programadores. Para esto es recomendable agregar comentarios en cada parte del código indicando qué función tiene cada intervalo de código. Como cuarto punto, el programador debe tratar en todo lo posible que el software esté eficientemente escrito, con el fin de ahorrar tiempo cuando éste se ejecute y cuando se edite en un compilador. También es importante tener contacto con un especialista en el área del problema que resuelve el software. Él puede indicar qué suposiciones correctas y cuáles son demasiado aventuradas que puedan ocasionar resultados que no estarán de acuerdo a la realidad. Es muy fácil cometer errores en el software, suponer constantes erróneas, omitir factores que son importantes, y errar en muchas otras formas.

Un curso avanzado de programación en los cursos de ingeniería es evidentemente una necesidad imperiosa en toda universidad, puesto que la programación tiene cada día mayor importancia en las ciencias de la ingeniería, y es obvio suponer que esta tendencia continuará en el futuro. Una razón importante para ello es que los problemas de la ingeniería moderna son tan complejos que no pueden resolverse simplemente por metodologías cortas, sino que a veces se requiere el uso de iteraciones, o soluciones aproximadas, que bien pueden ser elaboradas por una computadora digital por medio de un software codificado en un lenguaje de alto nivel.

Como recomendación a los estudiantes de programación y a todos aquellos a quienes tienen que diseñar y crear un software, la más importante desde mi punto de vista, consiste en la partición del problema en pequeñas porciones fácilmente resolubles. Esto ayudará a completar tareas de programación complejas en menor tiempo, con la menor cantidad de errores. Sin embargo, cada partición del software debe estar claramente definida con su función dentro del sistema de programación completo. Finalmente, debe indicarse al usuario cuando una solución imposible se obtenga como resultado con el software (en el caso del software CSP Eficiencia, obtener una eficiencia mayor a 1).

También, se debe indicar que un software puede ayudar a abaratar costos para el diseño de experimentos, simplificar su diseño y reducir el periodo de pruebas. Sin embargo, debe quedar claro que el software es un complemento de la parte experimental. Nada sustituye el diseño de experimentos cuidadosos y realizados con cautela. Éstos revelarán si la teoría es adecuada a la realidad y en qué partes del proceso de diseño y operación aparecen las dificultades. Las comparaciones de los resultados entre el sistema físico y el software de simulación han mostrado, en muchos casos, grandes diferencias. Las razones son dos: primero, la dificultad para hacer mediciones precisas; y segundo, los sistemas instalados comercialmente no siempre son construidos ni operados con el mismo cuidado y conocimiento que en los laboratorios, y por tanto, no operan con el mismo nivel de eficiencia.

### Referencias bibliográficas

- [1] Lucas, T., *How to build a solar heater*. Ed. Crown. U.S.A. 1980.
- [2] Duffie, J. / Beckman William, A. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [3] Martínez Strevel, R., Flores Prieto J. J., *Colectores solares planos* Notas del Curso Especializado. XXVI Semana nacional de la Energía Solar. Chetumal, Q. R. México.
- [4] Almanza Salgado R. / Muñoz Gutiérrez F. *Ingeniería de la energía solar*. Ed. El Colegio Nacional.
- [5] C.C. Cobarg. *Energía solar. Bases y aplicaciones*. Paraninfo. 1983. México, 1994.
- [6] Calentadores solares de agua. ¿Cuál utilizar?. Francisco J. Aceves Hernández, Ignacio Pérez Escalante. Memorias de la ISES 2000. (SSDA 07-01)
- [7] J. Senent, *La contaminación*. Ed. Salvat. España, 1974.
- [8] A. E. Knowlton., *Manual estándar del Ingeniero Electricista*. Tomo I. Ed. Labor, S. A. México, 1967.
- [9] Collier, Courtland, A.; Ledbetter, William B. *Engineering Cost Analysis* Ed. Harper & Row. U. S. A. 1982.
- [10] Martínez Strevel, R., Flores Prieto J. J., *Notas del curso especializado Colectores Solares Planos*. ISES millennium Solar Forum 2000.
- [11] Yogi Goswami D. / Kreith Frank / F. Kreider Jan. *Principles of solar engineering*. Taylor & Francis. 1999.
- [12] Pilatowsky Figueroa, I., Martínez Strevel, R., *Sistemas de calentamiento solar de agua: una guía para el consumidor*.
- [13] W. A. Beckman, S. A. Klein, J. A. Duffie. *Solar Heating Design*. Wi. U.S.A. 1977.

## Apéndice I: Algoritmos del software

En este apartado se presentan de una manera más detallada el algoritmo del software.

### ✓ Algoritmo del Software CSP Dim

1. Inicio
2. Asignamos las variables (Pi, lo, etc.)
3. Leemos los datos del formulario (Phi, np, beta, a, b, ef, ti)
4. Decidir Día Crítico
  - 4.1 Para d = 1 Hasta 361 Paso 5
  - 4.2  $\text{delta} = 23.45 * \text{Sin}(((\text{pi} / 180) * (72 / 73) * (284 + d)))$   
{Declinación Solar}
  - 4.3  $\text{cost} = \text{Cos}(\text{delta}) * \text{Cos}(\text{phi} - \text{beta}) + \text{Sin}(\text{delta}) * \text{Sin}(\text{phi} - \text{beta})$
  - 4.4  $\text{theta} = \text{Atn}(-\text{cost} / \text{Sqr}(1 - \text{cost} * \text{cost})) + 2 * \text{Atn}(1)$   
{Ángulo de incidencia}
  - 4.5  $l = \text{Abs}(1353 * \text{Cos}(\text{theta}) * (1 + 0.034 * \text{Cos}((\text{pi} / 180) * (480 / 487) * d)))$
  - 4.6 Si  $l < l_{\text{min}}$  Entonces  $l_{\text{min}} = l$ : dia = d
  - 4.7 Siguiente d
5. Calcular la Demanda Energética
  - 5.1  $\text{vol} = 75 * \text{np}$  {Volumen de agua requerido}
  - 5.2  $e = 4180 * \text{vol} * (60 - \text{temp})$  {Demanda Energética}
6. Calcular el Recurso Energético
  - 6.1  $\text{etot} = 0$  {Reinicio la Energía total}
  - 6.2  $\text{delta} = 23.45 * \text{Sin}(((72 / 73) * (284 + \text{dia})) * (\text{pi} / 180))$   
{Calculo de la declinación solar p/día crítico}
  - 6.3 Para t = 6 Hasta 12 Paso 0.1 {Inicia el Ciclo}
  - 6.4  $\text{hs} = 15 * (12 - t)$  {Angulo Horario}
  - 6.5  $\text{cost} = \text{Cos}(\text{delta}) * \text{Cos}(\text{phi} - \text{beta}) * \text{Cos}(\text{hs}) + \text{Sin}(\text{delta}) * \text{Sin}(\text{phi} - \text{beta})$
  - 6.6  $\text{theta} = \text{Atn}(-\text{cost} / \text{Sqr}(1 - \text{cost} * \text{cost})) + 2 * \text{Atn}(1)$
  - 6.7  $l = \text{Abs}(1353 * 0.55 * (1 + 0.034 * \text{Cos}(((480 / 487) * \text{dia}) * (\text{pi} / 180)) * \text{Cos}(\text{theta})))$
  - 6.8  $\text{etot} = \text{etot} + l * 360$  {Energía Total Recibida}
  - 6.9 Siguiente t {Termina el ciclo}
  - 6.10  $\text{etot} = \text{etot} * 2$  {Tomo en cuenta la tarde}
7. Dimensionamiento del Sistema
  - 7.1  $\text{atot} = e / (\text{etot})$  {Area de captación}
  - 7.2  $\text{nc} = \text{Int}(\text{atot} / (a * b)) + 1$  {Número de Colectores}
  - 7.3  $\text{voltt} = 1.5 * \text{vol}$  {Volumen del Termo-tanque}
  - 7.4 Si  $\text{voltt} < 114$  Entoces  $\text{ctt} = 2550 + 950$   
{Calcular el costo del termo-tanque}
  - 7.5 Si  $\text{voltt} > 114$  y  $\text{voltt} < 300$  Entoces  $\text{ctt} = 5750 + 1250$
  - 7.6 Si  $\text{voltt} > 300$  Entoces  $\text{ctt} = \text{Int}(\text{voltt} / 300) * 2550 + 2500$
8. Estimación del Precio del Sistema
  - 8.1  $\text{ctot} = \text{nc} * \text{ccol} + \text{ctt}$  {Costo total}
  - 8.2  $\text{ctot} = \text{ctot} * 1.15$  {Agrega Embalaje y Flete}
9. Estimación del Tiempo de Recuperación de la Inversión
  - 9.1 Estimación del Ahorro de Gas L.P.
    - 9.1.1  $\text{cgas} = e / 0.5$  {Consumo de Gas L.P.}
    - 9.1.2  $\text{ccgas} = \text{cgas} / 19920$  {Costo del Gas ahorrado}

- 9.1.3 Si  $(ccgas - ti * ctot) < 0$  Entonces Ir al paso12  
{Decisión Conviene o No}
- 9.1.4 Si  $ti = 0$  Entonces  $tr1 = ccgas / ctot$ : Ir al paso 9.2  
{Calculo de tr si  $ti = 0$ }
- 9.1.5  $tr1 = \text{Log}(ccgas / (ccgas - ti * ctot)) / \text{Log}(1 + ti)$   
{Tiempo de recuperación}
- 9.2 Estimación del Ahorro de Electricidad
  - 9.2.1  $celect = e / 0.8$  {Consumo de Electricidad}
  - 9.2.2  $ccelect = 1.18 * celect / 3600000$   
{Costo de la Electricidad ahorrada}
  - 9.2.3 Si  $(ccelect - ti * ctot) < 0$  Entonces Ir al Paso 12  
{Decisión Conviene o No}
  - 9.2.4 Si  $ti = 0$  Entonces  $tr2 = ccelect / ctot$ : Ir al paso 10  
{Calculo de tr si  $ti = 0$ }
  - 9.2.5  $tr2 = \text{Log}(ccelect / (ccelect - ti * ctot)) / \text{Log}(1 + ti)$   
{Tiempo de recuperación}
- 10. Despliegue de Resultados.
  - 10.1 Número de Colectores
  - 10.2 Volumen del Termo-tanque
  - 10.3 Costo total del sistema
  - 10.4 El tiempo de recuperación usando Gas L.P. y usando electricidad
- 11. Preguntar: "\*I\* Imprimir... \*S\* Salir... " (resp)
- 12. Si resp = "I" o r = "i" entonces ir al paso 17
- 13. Si resp = "S" o r = "s" entonces ir al paso 22
- 14. Mensaje: "Error en argumento..."
- 15. Ir al paso 11
- 16. Preguntar "¿Cuántas copias desea?" (n)
- 17. Mensaje "Por favor, cerciórese de que la Impresora esté lista..."
- 18. Para x ir desde 1 hasta n
- 19. Imprimir Formulario
- 20. Siguiete x
- 21. Mensaje de Inconveniencia de Inversión
  - 21.1 Desplegar mensaje "El Costo del Combustible NO Justifica el Costo del Sistema."
- 22. Fin

✓ **Algoritmo del software CSP Eficiencia**

1. inicio
2. Definir variables
3. Definir constantes
4. Leer los datos del formulario Eficiencia
5. Calcular C  
Si  $\beta \leq 70$  entonces  $C = 520 * (1 - 0.000051 * \beta^2)$   
Si  $\beta > 70$  entonces  $C = 520 * (1 - 0.000051 * 4900)$
6. Leer los datos del formulario Promedios
7. Encontrar polinomio de mejor ajuste para la irradiancia
8. Encontrar polinomio de mejor ajuste para la temperatura ambiente
9. Encontrar polinomio de mejor ajuste para la temperatura de cielo  
Para día = 1 hasta 365
10. Calcular Delta:  $\Delta t_m = 23.45 * \sin((72 / 73) * (284 + \text{día}) * (\pi / 180)) * \pi / 180$
11. Calcular Irradiancia (de acuerdo al polinomio de mejor ajuste)
12. Calcular Temperatura ambiente (de acuerdo al polinomio de mejor ajuste)
13. Calcular Temperatura de cielo (de acuerdo al polinomio de mejor ajuste)
14. Calcular de  $f_{min}$
15. Calcular e
16. Calcular las pérdidas por la placa colectora ( $U_t$ )
17. Cálculo de  $U_b$
18. Cálculo de  $U_e$
19. Cálculo del coeficiente global de pérdidas (UI):  $U_I = U_t + U_b + U_e$
20. Cálculo de m
21. Cálculo de la eficiencia de la aleta (F)
22. Cálculo del factor de eficiencia del colector ( $F_p$ )
23. Cálculo del Factor de Remoción (Fr)
24. Calcular Calor Útil ( $Q_u$ )
25. Cálculo de la Temperatura de Salida del Agua
26. Cálculo de la eficiencia (ef)
27. Asignamos la eficiencia del día al vector eficiencia (1 hasta 365)
28. Se calcula la eficiencia para cada mes, de acuerdo al día y al mes:
29. Encontramos la eficiencia mínima
30. Siguiente día
31. Cálculo de la eficiencia promedio anual
32. Asignar los valores de eficiencia promedio de cada mes a las cajas de texto correspondiente
33. Graficar la eficiencia vs. Días del año
34. Mensaje: "Continuar..."
35. Cargar el Formulario Eficiencia para permitir modificar los parámetros
36. Fin

## Apéndice II: Guía de uso del software CSP

### CSP Dim

El software CSP Dim representa una ayuda en el dimensionamiento de sistemas solares para el calentamiento de agua por medio de colectores solares planos.

Para acceder al software basta dar doble clic (derecho) sobre el icono del software (CSP Dim).

Los datos que se requieren para realizar un dimensionamiento y sus respectivos significados se dan en seguida:

- *Número de personas:* se refiere al número de personas que comúnmente usarán el sistema. Se deben dar valores enteros.
- *Temperatura promedio local:* se refiere a la temperatura promedio anual del lugar donde se instalará el sistema solar de calentamiento de agua. Este valor debe darse en grados centígrados.
- *Ancho del colector:* medido en metros. Comercialmente el ancho del colector más común es de un metro. Sin embargo, pueden encontrarse colectores solares de otras dimensiones.
- *Largo del colector:* medido en metros. Comercialmente el largo del colector más común es de dos metros.
- *Latitud:* Se refiere a la latitud del lugar donde se colocará el sistema solar de calentamiento de agua.
- *Inclinación de los colectores:* Medida en grados sexagesimales de ángulo. Se refiere al ángulo que forma la horizontal con los colectores solares planos.
- *Tasa de Interés compuesto:* Es la tasa de interés anual a la que se compone el capital del mercado local. En caso de que no considere financiar el sistema, utilice la tasa de inflación anual.
- *Precio por colector:* Es el costo en pesos de cada colector solar plano. El precio que supone el software es de \$2,100.00 pesos por colector, pero puede modificarse en caso necesario. Evidentemente este valor puede variar dependiendo del lugar y del tiempo.
- *Precio del gas:* Es el precio en pesos del kilogramo de gas L. P. El software supone un precio de \$6.60 pesos. Este valor es modificable por el usuario
- *Precio de la electricidad:* Es el precio en pesos del Kilowatt-Hora de energía eléctrica. Para calcularlo, puede usar su recibo del consumo de electricidad. El monto divídalo entre el consumo, el resultado es el valor que requiere indicar al software.

Una vez dados estos valores en la caja de texto correspondiente, debe presionar el botón Calcular que aparece en la pantalla e inmediatamente aparecerán los resultados obtenidos por el software.

**NOTA:** En caso de que el precio de la energía que se requiere para acondicionar el agua sea mayor al que deberá pagar por el interés generado por el costo del sistema solar de calentamiento de agua, considerando la tasa de interés compuesto anual, se asigna al tiempo de recuperación de cada caso un valor no definido. En este último caso, aparecerán mensajes que indiquen por qué fuentes no es factible usar el sistema, los precios críticos (mínimos) que deben tener por consumo de energético anual para poder tener una ventaja económica en el uso del sistema solar de calentamiento de agua

doméstica y en la caja de texto correspondiente del software dirá "No Factible". Aunque el software no lo indica, se entiende que el sistema no es factible desde el punto de vista económico.

The screenshot shows a window titled "Dimensión" with the following fields and values:

Número de Personas	Latitud (Grados)	Precio por Colector (Pesos)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	2100
Temperatura Promedio (°C)	Inclinación de los Colectores (°)	Precio del Gas (Pesos/Kg)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	8.40
Ancho del Colector (m)	Tasa de Interés Compuesto (%)	Precio Electricidad (Pesos/KW-h)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.51
Largo del Colector (m)	<input type="text"/>	
	<input type="button" value="Calcular"/>	
Número de Colectores	Tiempos de Recuperación (Años)	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Volumen del Termotanque (L)	Gas L. P.	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Costo del Sistema (Pesos)	Electricidad	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	

Figura 4. Pantalla principal del software CSP Dim

Inmediatamente después aparecerá una pantalla con el mensaje: "\*I\* Imprimir... \*S\* Continuar...". Dependiendo de que usted desee imprimir los resultados para generar un reporte por medio de una impresora o continuar, debe presionar I ó S (mayúscula o minúscula, indistintamente) respectivamente.

La figura 4 muestra la pantalla principal del software CSP Dim.

## CSP Eficiencia

El software eficiencia fue diseñado para ser utilizado por un diseñador de colectores solares planos.

Para acceder al software basta dar doble clic (derecho) sobre el icono del software mismo.

Los datos requeridos para hacer el cálculo de la eficiencia de un colector solar plano y obtener la gráfica del comportamiento de la eficiencia conforme cambia la temperatura son los siguientes:

- Ancho del colector, medido en metros.
- Largo del colector, medido en metros.
- Inclinación de los colectores, medido en grados sexagesimales de ángulo.
- Temperatura ambiente, en grados centígrados.
- Temperatura de cielo, medida en grados centígrados.
- Temperatura de entrada del fluido al colector solar plano, en grados centígrados.
- Flujo másico promedio a través del colector solar plano, medido en kilogramos por segundo.
- Distancia entre los tubos paralelos (largueros), medida en metros.
- Diámetro (externo) de los tubos, medido en metros.
- Coeficiente de transferencia de calor al ambiente, medida en Watts por metro cuadrado.
- Coeficiente de transferencia de calor por convección, medida en Watts por metro cuadrado.
- Temperatura media de placa, medida en grados centígrados.
- Conductividad de la aleta, medida en Watts por metro por grado centígrado.
- Grosor de la aleta, medido en metros.
- Emitancia de la placa.
- Diámetro interno de los tubos, medido en metros.
- Conductividad entre el tubo y la aleta del colector, medida en Watts por metro por grado centígrado.
- Espesor de la pared inferior, medida en metros.
- Emitancia del vidrio (cubierta)
- Número de cubiertas.
- Transmitancia de la cubierta.
- Conductividad del aislante, medida en Watts por metro por grado centígrado.

Inmediatamente después de dar estos valores, presione el botón Calcular que aparece en la misma pantalla para obtener la eficiencia del colector.

El software pregunta si desea ingresar los valores promedios de precipitación pluvial local. En caso de que no los conozca, el software supondrá los valores para la ciudad de Chetumal, Q. R., México, pero se recomienda que ingrese los valores si los conoce, pues los sombreados se calculan a partir de estos.

Después el software devuelve los valores de las eficiencias máxima y mínima calculadas y el día que le corresponde a cada una. Después de presionar Aceptar aparecerá la gráfica del comportamiento de la eficiencia a lo largo del año. Indicará la desviación estándar calculada de la eficiencia a lo largo del año.

La figura 5 muestra la pantalla principal del software CSP Eficiencia.

**CSP Eficiencia**

Datos Requeridos		Resultados	
Área del Colector (m <sup>2</sup> )	Coef. T. Calor Amb. (W/m <sup>2</sup> °C)	Eficiencias Mensuales	
2		Enero	Julio
Latitud	Coef. T. Calor Conv. (W/m <sup>2</sup> °C)	Febrero	Agosto
18.5		Marzo	Septiembre
Inclinación Colectores (°)	Cond. Aleta (W/m <sup>2</sup> °C)	Abril	Octubre
	383	Mayo	Noviembre
Distancia entre tubos (m)	Cond. Tubo - aleta (W/m <sup>2</sup> °C)	Junio	Diciembre
0.15		Eficiencia Promedio Anual	
Diametro tubos (m)	Cond. Aislante (W/m <sup>2</sup> °C)		
0.025	0.045	Ef. Mínima	Ef. Máxima
Diametro Int. Tubos (m)	Emitancia de Placa		
0.02	0.95	Día	Día
Grosor Aleta (m)	Emitancia de Cubierta		
0.0054	0.88		
Espesor Pared Inferior (m)	Transmitancia Cubierta		
0.05	0.82		
Temp. Media Placa (°C)	No. Cubiertas		
	1		
Ayuda...			
Definición:			

Botones: Calcular, Imprimir, Promedios Mensuales

**Promedios mensuales locales**

Irradianza (W/m <sup>2</sup> )		Temp. Ambiente (°C)		Temp. de Cielo (°C)	
Enero	Julio	Enero	Julio	Enero	Julio
575	625	22	27	27	31
Febrero	Agosto	Febrero	Agosto	Febrero	Agosto
650	670	24	27	29	31
Marzo	Septiembre	Marzo	Septiembre	Marzo	Septiembre
700	645	25	27	29	31
Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre
720	630	26	26	30	30
Mayo	Noviembre	Mayo	Noviembre	Mayo	Noviembre
680	580	27	23	31	28
Junio	Diciembre	Junio	Diciembre	Junio	Diciembre
630	570	27	23	30	28

Botón: Regresar

Figura 5. Pantallas del software CSP Eficiencia

## Apéndice III. Código del Software

### CSP Dim

En seguida se muestran las distintas partes del código que corresponden al software CSP Dim. No se incluyen partes del código que corrigen errores del usuario, por ejemplo, en el caso de que oprima letras en lugar de números, pero en el CD adjunto a este trabajo sí están

```
Private Sub Calcular_Click()
```

```
' NOTA: Todas las Unidades están en el sistema Métrico Internacional
```

```
' Nunca se hace uso de prefijos como Kilo, Hecto, etc.
```

```
' Excepto en Kilogramos. El tiempo está medido en años para el tiempo de recuperación de la inversión
```

```
' y en horas para el cálculo de la radiación solar recibida en el día crítico
```

```
On Error GoTo Mistake
```

```
' Primera Parte
```

```
' Asignamos las variables...
```

```
Dim pi, phi, temp, beta, t, hs, ctt, celect, cselect, theta, nc, a, b, jpelect As Double
```

```
Dim lmin, l, e, ef, ti, etot, delta, cost, atot, w, ccol, tmp1, tmp2, jgas As Double
```

```
Dim cgas, ccgas, tr, ctot, cosi, tr1, tr2, volt, vol, pgas, pelect, cegas As Double
```

```
Dim np, dia, d, x, n As Integer
```

```
Dim ang, deltam, Energia, ale, random, sombras As Double
```

```
Dim r As String
```

```
Dim energy(365) As Double
```

```
' Segunda Parte
```

```
' Leemos los datos del formulario
```

```
pi = 3.141592654
```

```
phi = Phi1 ' Latitud
```

```
phi = phi * pi / 180 ' Conversión a Radianes
```

```
np = np1 ' Número de personas
```

```
temp = temp1 ' Temperatura promedio anual
```

```
beta = Beta1 ' Inclinación de los Colectores
```

```
beta = beta * pi / 180 ' Conversión a Radianes
```

```
hs = 0 ' Ángulo Horario (mediodía solar)
```

```
a = A1 ' Ancho del Colector
```

```
b = B1 ' Largo del Colector
```

```
ef = 0.45 ' Eficiencia del colector (opcional)
```

```
ti = i1 / 100 ' Tasa de Interés compuesto anual (opcional)
```

```
ccol = ccol1 ' Costo del colector
```

```
pgas = pgas1 ' Precio del kilogramo de Gas en pesos
```

```
pelect = pelect1 ' Precio del kWh en pesos
```

```
' Tercera Parte
```

```
' Decidir Día Crítico
```

```
dia = 0
```

```
lmin = 4000000
```

```
For d = 1 To 361 ' Inicia el ciclo
```

```
' Cálculo de la Declinación Solar
```

```
delta = 23.45 * Sin(((pi / 180) * (72 / 73) * (284 + d)))
```

```
' Convierto delta a radianes
```

```
delta = delta * pi / 180
```

```
' Cálculo del ángulo de incidencia (theta)
```

```
cost = Cos(delta) * Cos(phi - beta) + Sin(delta) * Sin(phi - beta)
If cost <> 1 Then theta = Atn(-cost / Sqr(1 - cost * cost)) + 2 * Atn(1)
```

```
' Calculo la Radiación Solar Terrestre
```

```
I = Abs(1353 * Cos(theta) * (1 + 0.034 * Cos((pi / 180) * (480 / 487) * d))) ' Considero el ángulo de incidencia
```

```
' Calcular el Dia Crítico
```

```
If I < Imin Then Imin = I: dia = d: deltam = delta
```

```
Next d
```

```
' Cuarta Parte
```

```
' Calcular la Demanda Energética
```

```
vol = 75 * np
```

```
' Se supuso 75 lts agua/persona diarios
```

```
e = 4180 * vol * (75 - temp)
```

```
' Quinta Parte
```

```
' Calcular el Recurso Energético para el día crítico.
```

```
etot = 0
```

```
' Reinicio la Energía total
```

```
' Calculo de la declinación solar para el día crítico
```

```
delta = 23.45 * Sin(((72 / 73) * (284 + dia)) * (pi / 180))
```

```
delta = delta * pi / 180
```

```
' Convierto a Radianes
```

```
' Inicia el Ciclo
```

```
For t = 8 To 12 Step 0.1
```

```
hs = 15 * (12 - t)
```

```
' Ángulo horario
```

```
hs = hs * pi / 180
```

```
' Convierto a Radianes
```

```
cost = Cos(delta) * Cos(phi - beta) * Cos(hs) + Sin(delta) * Sin(phi - beta)
```

```
If cost <> 1 Then
```

```
theta = Atn(-cost / Sqr(1 - cost * cost)) + 2 * Atn(1)
```

```
Else: theta = 0
```

```
End If
```

```
' Calculo la Radiación Solar Terrestre
```

```
' Considerando el ángulo de incidencia
```

```
I = 1353 * (1 + 0.034 * Cos(((480 / 487) * dia) * (pi / 180))) * Cos(theta)
```

```
' Energía Total recibida hasta ese momento
```

```
etot = etot + I * 360
```

```
' Multiplico por 360 porque es el equivalente a 0.1 horas
```

```
' Y así tendré watts x segundos = Joules
```

```
Next t
```

```
' Aquí termina el ciclo
```

```
' Multiplico por 2 etot para tomar en cuenta la tarde también
```

```
etot = etot * 2
```

```
' MsgBox ("Valor del Dia Crítico: " & dia)
```

```
' MsgBox ("Valor de la energía solar recibida en ese día " & Round(etot / 10 ^ 6) & " MJ/m^2")
```

```
' Cuarta Parte B
```

```
' Quinta Parte
```

```
' Dimensionamiento del Sistema
```

```
atot = Round(e / (etot))
```

```
' Area de captación
```

```
nc = Round(atot / (a * b)) + 1
```

```
' Número de Colectores
```

$\text{voltt} = 1.5 * \text{vol}$  ' Volumen del Termo-Tanque  
 If  $\text{voltt} < 114$  Then  $\text{ctt} = 2550 + 950$   
 If  $\text{voltt} \geq 114$  And  $\text{voltt} < 300$  Then  $\text{ctt} = 5750 + 1250$   
 If  $\text{voltt} \geq 300$  Then  $\text{ctt} = \text{Int}((\text{voltt} / 300) + 1) * 2550 + 2500$

' Sexta Parte

' Estimación del Precio del Sistema

$\text{ctot} = \text{nc} * \text{ccol} + \text{ctt}$  ' Se dió un precio de \$2100.00 por colector  
 $\text{ctot} = \text{ctot} * 1.3$  ' y ctt por el costo del termotanque con embalaje y flete.

70

' Séptima Parte

' Contenido energético del gas

$\text{cegas} = 500000$

' Las Unidades son J/kg

' Al multiplicar por kg/peso nos resulta Joules/peso.

' Joules por peso

$\text{jpgas} = \text{cegas} / \text{pgas}1$

$\text{jpelect} = 3600000 / \text{pelect}1$

' Se usaron 3600000 porque  $1\text{kWh} = 1000\text{Wh} = 1000\text{W} * 3600 \text{seg.}$

' Estimación del Tiempo de Recuperación de la Inversión

' Estimación del Ahorro de Gas L. P.

$\text{cgas} = e / 0.75$  ' Calor de combustión Gas L.P.=8.83 cal/cm<sup>3</sup> (50 MJ/kg) CNTP = 2.213  
 Joules/cm<sup>3</sup>

$\text{ccgas} = \text{cgas} / \text{jpgas}$

' Se tomó a \$140.00 el tanque de 20 Kg de gas L.P.

$\text{tmp1} = \text{ccgas} - \text{ti} * \text{ctot}$

' Densidad 1.2225 kg/m<sup>3</sup> a 16.7°C

If  $\text{tmp1} < 0$  Then GoTo 1300

' Peso específico = 0.818m<sup>3</sup>/kg

If  $\text{ti} = 0$  Then  $\text{tr1} = \text{ccgas} / \text{ctot}$ : GoTo 80

$\text{tr1} = \text{Log}(\text{ccgas} / (\text{ccgas} - \text{ti} * \text{ctot})) / \text{Log}(1 + \text{ti})$  ' Tiempo de recuperación

$\text{tr1} = \text{Int}(\text{tr1}) + 1$

80

' Referencia propiedades del gas: (pag. 1140)

' Manual Estándar del Ingeniero Electricista

' A. E. Knowlton, Tomo I

' Ed. Labor, S. A.

' México, 1967.

' Estimación del Ahorro de Electricidad

$\text{celect} = e / 0.95$  ' Se tomó a \$1.18 el kW-hr.

$\text{cselect} = \text{celect} / \text{jpelect}$

$\text{tmp2} = \text{cselect} - \text{ti} * \text{ctot}$

If  $\text{tmp2} < 0$  Then GoTo 1400

If  $\text{ti} = 0$  Then  $\text{tr2} = \text{celect} / \text{ctot}$ : GoTo 90

$\text{tr2} = \text{Log}(\text{cselect} / (\text{cselect} - \text{ti} * \text{ctot})) / \text{Log}(1 + \text{ti})$  ' Tiempo de recuperación

$\text{tr2} = \text{Int}(\text{tr2}) + 1$

90

' Novena Parte

' Despliegue de Resultados.

$\text{nc1.Text} = \text{nc}$

' Número de Colectores

$\text{voltt1.Text} = \text{voltt}$

' Volumen del Termotanque

$\text{ctot1.Text} = \text{ctot}$

' Costo total del sistema

$\text{tr11.Text} = \text{tr1}$

' Tiempo de Recuperación Gas

```

tr21.Text = tr2          ' Tiempo de Recuperación Electricidad
MsgBox ("Resultados..."), vbOKOnly

If Beta1 = 0 Then
deltam = Abs(deltam * 180 / pi)      ' Convierto a Radianes
MsgBox ("Se recomienda colocar los colectores solares planos " & Chr(13) & "con una inclinación de " & Round(deltam)
& " grados respecto al horizonte."), vbOKOnly
End If

' Preguntamos si quieren Imprimir o Salir...
1070
On Error GoTo Horror
r = InputBox("**I* Imprimir... *S* Salir... ")
If r = "I" Or r = "i" Then GoTo 1110
If r = "S" Or r = "s" Then
    GoTo 1500
Else
    MsgBox ("Error en Argumento..."), vbCritical: GoTo 1070
End If

1110
' Iniciamos la Impresion
Dim resp, equis As Integer
1111
resp = InputBox("¿Cuántas copias desea? ")
If resp < 0 Then
    MsgBox ("Error... El número de copias debe ser positivo."), vbCritical
    GoTo 1111
End If

MsgBox ("Por favor, cerciórese de que la Impresora esté lista..." & Chr(13) & "Esto es, encendida, bien conectada y con
hojas."), vbOKOnly

For equis = 1 To resp
    Printer.Zoom = 100
    ' Impresión del formulario
    PrintForm
    ' Terminamos a propósito el documento para que salte una página...
    Printer.EndDoc
Next equis
' Aquí termina la Impresión.

Horror:
If Err = 61 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "El disco duro no tiene espacio
para grabar información..."), vbCritical, "Insuficiencia de Recursos"
If Err = 68 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "La impresora no está conectada a
la computadora, o no está encendida..."), vbCritical, "Dispositivo sin responder"
If Err = 419 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "Permiso denegado para utilizar
la impresora preddefinida..."), vbCritical, "No se permite la Impresión"
If Err = 445 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "El dispositivo no permite la
impresión."), vbCritical, "Dispositivo no válido"
If Err = 482 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "La impresora reporta un error
interno..."), vbCritical, "Error en Impresión"
If Err = 484 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "Controlador de la impresora no
disponible."), vbCritical, "Error en Impresión"

```

```
If Err = 31001 Or Err = 7 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "La computadora no tiene suficiente memoria."), vbCritical
```

```
MsgBox ("Verifique que la impresora no ocasione problemas."), vbOKOnly, "Error en impresión..."
```

```
Err.Clear
```

```
Err.Clear
```

```
GoTo 1070
```

```
' Aqui se muestran los mensajes de inconveniencia  
' de inversión del sistema por ambos casos
```

```
' Inconveniencia por gas
```

```
1300
```

```
tr11.Text = "No Factible."
```

```
tr1 = tr11.Text
```

```
MsgBox ("No factible por gas L. P."), vbOKOnly
```

```
MsgBox ("El costo del combustible no supera el valor critico de " & ti * ctot), vbOKOnly
```

```
MsgBox ("El costo del gas L.P requerido para satisfacer la demanda energética" & Chr(13) & " es de " & Format(ccgas, "###,##0.00")), vbOKOnly
```

```
GoTo 80
```

```
' Inconveniencia por electricidad
```

```
1400
```

```
tr21.Text = "No Factible."
```

```
tr2 = tr21.Text
```

```
MsgBox ("No factible por electricidad"), vbOKOnly
```

```
MsgBox ("El costo de la electricidad no supera el valor critico de " & ti * ctot), vbOKOnly
```

```
MsgBox ("El costo de la electricidad requerida para satisfacer la demanda energética" & Chr(13) & " es de " & Format(ccelect, "###,##0.00")), vbOKOnly
```

```
GoTo 90
```

```
Mistake:
```

```
If Err = 31001 Or Err = 7 Then MsgBox ("Se originó un problema..." & Chr(13) & "La computadora no tiene suficiente memoria."), vbCritical, "Error Fatal"
```

```
If Err = 11 Then MsgBox ("Se originó un problema..." & Chr(13) & "hay una división por cero... Contacte al diseñador del software."), vbCritical, "Error Fatal"
```

```
If Err = 13 Then MsgBox ("Se originó un problema..." & Chr(13) & "Se han escrito caracteres no numéricos... Corrija el error..."), vbCritical, "Error Fatal"
```

```
If Err = 18 Then MsgBox ("Se originó un problema..." & Chr(13) & "El usuario ha detenido el programa"), vbCritical, "Interrupción por el usuario..."
```

```
Err.Clear
```

```
End
```

```
' Fin del programa
```

```
1500
```

```
MsgBox ("Software elaborado por Efrain Soto Apolinar." & Chr(13) & " E-mail: efra_soto_a@yahoo.com"), vbOKOnly, " UQRoo Campus Chetumal"
```

```
End
```

```
End Sub
```

## CSP Eficiencia

En seguida se muestran las distintas partes del código que corresponden al software CSP Eficiencia. La parte que corresponde a un formulario del proyecto de Visual Basic está separada por una línea de signos & & &. No se incluyen partes del código que corrigen errores del usuario, por ejemplo, en el caso de que oprima letras en lugar de números, pero en el CD adjunto a este trabajo sí están

Option Explicit

```
Private Sub Datos_Click()
Promedios.Visible = True
Promedios.SetFocus
End Sub
```

```
Public Sub Eficiencia_Click()
Label27.Caption = "Realizando cálculos..."
Label28.Caption = "Definición: Botón que inicia los cálculos..."
Dim r As String
Dim OldFontSize
Dim ngraph, final As Integer
OldFontSize = FontSize
```

```
ngraph = CInt(ngraph1.Text)
ngraph1.Text = ngraph + 1
ngraph = ngraph Mod 16
If ngraph > 0 Then
Call Graph.Form_Load
```

1070

' Preguntamos si quieren imprimir o salir...

On Error GoTo Horror

r = InputBox("\*\*I\* Imprimir... \*C\* Continuar... \*L\* Limpiar... \*S\* Salir... ")

If r = "I" Or r = "i" Then GoTo 1110

If r = "C" Or r = "c" Then GoTo 2000

If r = "L" Or r = "l" Then Graph.Cls: GoTo 2000

If r = "S" Or r = "s" Then

GoTo 1120

Else

MsgBox ("Error en el Argumento... Responda I, C, L ó S, por favor..."), vbCritical, "Error Corregible...": GoTo 1070

End If

1110

' Iniciamos la Impresion

Dim resp, equis As Integer

1111

resp = InputBox("¿ Cuántas copias desea? ")

If resp < 0 Then

MsgBox ("Error... El número de copias debe ser un número entero positivo."), vbCritical

GoTo 1111

End If

MsgBox ("Por favor, cerciórese de que la Impresora esté lista..." & Chr(13) & "Esto es, encendida, bien conectada y con papel."), vbOKOnly

For equis = 1 To Int(resp)

Printer.Zoom = 100

```

' Impresión del formulario
Graph.PrintForm
Printer.EndDoc ' Terminamos a propósito el documento para que salte una página...
PrintForm
Printer.EndDoc
Next equis
' Aquí termina la Impresión.

' Aquí se vendrá si no quiere imprimir...
FontSize = OldFontSize
Horror:
If Err = 61 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & " El disco duro no tiene espacio
para grabar información..."), vbCritical, "Insuficiencia de Recursos"
If Err = 68 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "La impresora no está conectada a
la computadora, o no está encendida..."), vbCritical, "Dispositivo sin responder"
If Err = 419 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "Permiso denegado para utilizar
la impresora predefinida..."), vbCritical, "No se permite la Impresión"
If Err = 445 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "El dispositivo no permite la
impresión."), vbCritical, "Dispositivo no válido"
If Err = 482 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "La impresora reporta un error
interno..."), vbCritical, "Error en Impresión"
If Err = 484 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "Controlador de la impresora no
disponible."), vbCritical, "Error en Impresión"
If Err = 31001 Or Err = 7 Then MsgBox ("Surgió un Problema durante la impresión..." & Chr(13) & "La computadora no
tiene suficiente memoria."), vbCritical
Err.Clear

GoTo 1070

' Fin del programa
1120
MsgBox ("Software elaborado por Efrain Soto Apolinar." & Chr(13) & " E-mail: efra_soto_a@yahoo.com"),
vbOKOnly, " UQRoo Campus Chetumal": final = 1
Eficiencia.Visible = False
CT.Visible = True

Unload Me
End
End If
2000
Eficiencia.Visible = True
If final <> 1 Then Graph.Visible = False
End Sub

Private Sub Form_Load()
' Inicio
Width = 12000: Height = 10000 ' Establece el tamaño del formulario en twips.
Move 10, 10 ' Mueve el origen del formulario.
End Sub

```

& & & & & & & & & & &

Public Sub Form\_Load()

' NOTA:

' Todas las Unidades están en el sistema Métrico Internacional

' Nunca se hace uso de prefijos como Kilo, Hecto, etc.

' Excepto en Kilogramos

' Y el tiempo está medido en años para el tiempo de recuperación de la inversión

' y en días para el cálculo de la radiación solar recibida en el día crítico

' Inicio de la gráfica

Graph.Visible = False

Eficiencia.Visible = False

On Error GoTo Mistake

' Primera Parte

' Asignamos las variables

Dim sigma, pi, Ta, S, Tau, Te, Cp, w, d, Di, Cb, Hfi, k, delta, epsilon, p, epsilon As Double

Dim hw, beta, Tpm, mass, Ts, L, C, betau, fmin, E, Ut1, Ut2, Ut3, Ut, Ub, ef, Qu, Tcn As Double

Dim Ue, U, a, Ul, Tc, Utn, dUt, Hrpc, Hcpc, Hrca, paso, m, F, Fp, Fr, Tfi, Pend, vi, vd, ka As Double

Dim aprox, Irr, hs, suma, promedio, hsd, dif, ss, sd, del, efmin, efmax, l, porcentaje, porcentom As Double

Dim nc, ngraph, col1, diam, mes, condicion As Integer

Dim col2 As Variant

' Asignamos las variables secundarias...

Dim phi, temp, t, theta As Double

Dim lmin, ti, etot, cost, atot, sef As Double

Dim cgas, ccgas, tr, ctot, cosi, s\_ef, efs As Double

Dim np, dia, x, y, dia\_efmin, dia\_efmax, n As Integer

Dim ang, deltam, Energia, coef0, coef1, coef2, coef3 As Double

Dim coef0, coef1, coef2, coef3 As Double

Dim r, rr As String

Dim ef\_d(366) As Double 'Eficiencia diaria

Dim lmes(13) As Double

Dim Tmpmes(13) As Double

Dim wsmes(13) As Double

Dim efm(13) As Double

' Asignamos las constantes

sigma = 0.0000000566

efmin = 10

efmax = -1

pi = 3.141592654

Energia = 0

' Segunda Parte

' Leemos los datos del formulario

phi = CDb(Eficiencia.Phi1.Text)

' Latitud (°) convierto a radianes

phi = phi \* pi / 180

Cp = 4180

' Capacidad calorifica del agua (Joules/kg°C)

S = CDb(Eficiencia.S1.Text)

' Area del colector (m<sup>2</sup>)

beta = CDb(Eficiencia.Beta1.Text)

' Inclinación de los colectores

beta = beta \* pi / 180

hw = CDb(Eficiencia.Hw1.Text)

' Coeficiente Global de transferencia de calor al ambiente

L = CDb(Eficiencia.L1.Text)

' Espesor de la pared inferior (m)

' Te = CDb(Eficiencia.Te1.Text) + 273

' Temperatura de entrada del fluido de trabajo al colector (K)

Hfi = CDb(Eficiencia.Hfi1.Text)

' Coeficiente de transferencia de calor por convección del tubo al fluido

Tpm = CDb(Eficiencia.Tpm1.Text) + 273

' Temperatura media de la placa (K)

```

k = CDb(Eficiencia.K1.Text)          ' Conductividad de la aleta (W/m°C)
delta = CDb(Eficiencia.Delta1.Text)  ' Grosor de la aleta (m)
epsilon = CDb(Eficiencia.Epsilonp1.Text) ' Emitancia de la placa
w = CDb(Eficiencia.W1.Text) / 1000   ' Distancia entre los tubos (m)
d = CDb(Eficiencia.D1.Text) / 1000   ' Diametro de los tubos (m)
Di = CDb(Eficiencia.Di1.Text) / 1000 ' Diametro interior de los tubos (m)
Cb = CDb(Eficiencia.Cb1.Text)        ' Conductancia de contacto aleta-tubo
epsilon = CDb(Eficiencia.Epsilong1.Text) ' Emitancia del vidrio
nc = CDb(Eficiencia.nc1.Text)        ' Número de cubiertas
Tau = CDb(Eficiencia.Tau1.Text)      ' Transmitancia de la cubierta
ka = CDb(Eficiencia.ka1.Text)        ' Conductividad térmica del aislante (W/m°C)
mass = S * 0.02                      ' Flujo Másico

```

```

MousePointer = 13

```

```

' Cálculo de C

```

```

If beta < 70 Then C = 520 * (1 - 0.000051 * beta ^ 2)

```

```

If beta > 70 Then C = 520 * (1 - 0.000051 * 4900)

```

```

10

```

```

' Cargamos los valores de las variables de acuerdo al mes

```

```

lmes(1) = CDb(Promedios.lrr1.Text)

```

```

lmes(2) = CDb(Promedios.lrr2.Text)

```

```

lmes(3) = CDb(Promedios.lrr3.Text)

```

```

lmes(4) = CDb(Promedios.lrr4.Text)

```

```

lmes(5) = CDb(Promedios.lrr5.Text)

```

```

lmes(6) = CDb(Promedios.lrr6.Text)

```

```

lmes(7) = CDb(Promedios.lrr7.Text)

```

```

lmes(8) = CDb(Promedios.lrr8.Text)

```

```

lmes(9) = CDb(Promedios.lrr9.Text)

```

```

lmes(10) = CDb(Promedios.lrr10.Text)

```

```

lmes(11) = CDb(Promedios.lrr11.Text)

```

```

lmes(12) = CDb(Promedios.lrr12.Text)

```

```

tmpmes(1) = CDb(Promedios.tmpm1.Text) / 300

```

```

tmpmes(2) = CDb(Promedios.tmpm2.Text) / 300

```

```

tmpmes(3) = CDb(Promedios.tmpm3.Text) / 300

```

```

tmpmes(4) = CDb(Promedios.tmpm4.Text) / 300

```

```

tmpmes(5) = CDb(Promedios.tmpm5.Text) / 300

```

```

tmpmes(6) = CDb(Promedios.tmpm6.Text) / 300

```

```

tmpmes(7) = CDb(Promedios.tmpm7.Text) / 300

```

```

tmpmes(8) = CDb(Promedios.tmpm8.Text) / 300

```

```

tmpmes(9) = CDb(Promedios.tmpm9.Text) / 300

```

```

tmpmes(10) = CDb(Promedios.tmpm10.Text) / 300

```

```

tmpmes(11) = CDb(Promedios.tmpm11.Text) / 300

```

```

tmpmes(12) = CDb(Promedios.tmpm12.Text) / 300

```

```

wsmes(1) = CDb(Promedios.ws1.Text)

```

```

wsmes(2) = CDb(Promedios.ws2.Text)

```

```

wsmes(3) = CDb(Promedios.ws3.Text)

```

```

wsmes(4) = CDb(Promedios.ws4.Text)

```

```

wsmes(5) = CDb(Promedios.ws5.Text)

```

```

wsmes(6) = CDb(Promedios.ws6.Text)

```

```

wsmes(7) = CDb(Promedios.ws7.Text)

```

```

wsmes(8) = CDb(Promedios.ws8.Text)

```

```

wsmes(9) = CDb(Promedios.ws9.Text)

```

```

wsmes(10) = CDb(Promedios.ws10.Text)

```

```

wsmes(11) = CDb(Promedios.ws11.Text)

```

```
wsmes(12) = CDbI(Promedios.ws12.Text)
```

```
13
```

```
' Primero debemos definir una función que nos ayude a suavizar la curva de eficiencia
```

```
' Para esto utilizamos mínimos cuadrados
```

```
Dim ndia, cont, cont2, priv As Integer
```

```
Dim sx, sx2, sx3, sx4, sx5, sx6 As Double
```

```
Dim sy, sxy, sx2y, sx3y, mmin, mmax As Double
```

```
Dim det, coef0, coef1, coef2, coef3, Disc, Residuo As Double
```

```
' Reinicio las variables que voy a necesitar
```

```
sx = 0: sx2 = 0: sx3 = 0: sx4 = 0: sx5 = 0: sx6 = 0
```

```
sy = 0: sxy = 0: sx2y = 0: sx3y = 0: n = 12: Residuo = 0
```

```
For ndia = 1 To n
```

```
' Asignamos los datos conocidos (xi, yi)
```

```
x = 15 + 30 * (ndia - 1)
```

```
y = lmes(ndia) / 1000
```

```
x = x / 1000
```

```
' Aquí calculamos las sumas de los valores
```

```
sx = sx + x
```

```
sy = sy + y
```

```
sx2 = sx2 + x ^ 2
```

```
sx3 = sx3 + x ^ 3
```

```
sx4 = sx4 + x ^ 4
```

```
sx5 = sx5 + x ^ 5
```

```
sx6 = sx6 + x ^ 6
```

```
sxy = sxy + x * y
```

```
sx2y = sx2y + y * x ^ 2
```

```
sx3y = sx3y + y * x ^ 3
```

```
Next
```

```
' Encontrar los determinantes auxiliares (CORRECTOS)
```

```
det = n * (sx2 * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx4 - sx3 * sx6) + sx4 * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2))
```

```
det = det - sx * (sx * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx3 - sx6 * sx2) + sx4 * (sx2 * sx5 - sx4 * sx3))
```

```
det = det + sx2 * (sx * (sx3 * sx6 - sx5 * sx4) + sx2 * (sx5 * sx3 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
```

```
det = det - sx3 * (sx * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2) + sx2 * (sx3 * sx4 - sx2 * sx5) + sx3 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
```

```
coef0 = sy * (sx2 * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx4 - sx3 * sx6) + sx4 * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2))
```

```
coef0 = coef0 - sx * (sxy * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx3y * sx5 - sx2y * sx6) + sx4 * (sx2y * sx5 - sx4 * sx3y))
```

```
coef0 = coef0 + sx2 * (sxy * (sx3 * sx6 - sx5 * sx4) + sx2 * (sx3y * sx5 - sx2y * sx6) + sx4 * (sx2y * sx4 - sx3y * sx3))
```

```
coef0 = coef0 - sx3 * (sxy * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2) + sx2 * (sx3y * sx4 - sx2y * sx5) + sx3 * (sx2y * sx4 - sx3y * sx3))
```

```
coef1 = n * (sxy * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx3y - sx2y * sx6) + sx4 * (sx2y * sx5 - sx3y * sx4))
```

```
coef1 = coef1 - sy * (sx * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx5 - sx4 * sx3))
```

```
coef1 = coef1 + sx2 * (sx * (sx2y * sx6 - sx5 * sx3y) + sxy * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx3y - sx2y * sx3))
```

```
coef1 = coef1 - sx3 * (sx * (sx2y * sx5 - sx3y * sx4) + sxy * (sx3 * sx4 - sx2 * sx5) + sx3 * (sx2 * sx3y - sx2y * sx3))
```

```
coef2 = n * (sx2 * (sx2y * sx6 - sx5 * sx3y) + sxy * (sx5 * sx4 - sx3 * sx6) + sx4 * (sx3 * sx3y - sx2y * sx4))
```

```
coef2 = coef2 - sx * (sx * (sx2y * sx6 - sx5 * sx3y) + sxy * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx3y - sx2y * sx3))
```

```
coef2 = coef2 + sy * (sx * (sx3 * sx6 - sx5 * sx4) + sx2 * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
```

```
coef2 = coef2 - sx3 * (sx * (sx3 * sx3y - sx4 * sx2y) + sx2 * (sx3 * sx2y - sx2 * sx3y) + sxy * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
```

```
coef3 = n * (sx2 * (sx3y * sx4 - sx5 * sx2y) + sx3 * (sx2y * sx4 - sx3 * sx3y) + sxy * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2))
```

```
coef3 = coef3 - sx * (sx * (sx4 * sx3y - sx2y * sx5) + sx3 * (sx3 * sx2y - sx2 * sx3y) + sxy * (sx2 * sx5 - sx4 * sx3))
```

```
coef3 = coef3 + sx2 * (sx * (sx3 * sx3y - sx2y * sx4) + sx2 * (sx3 * sx2y - sx2 * sx3y) + sxy * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
```

```
coef3 = coef3 - sy * (sx * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2) + sx2 * (sx3 * sx4 - sx2 * sx5) + sx3 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
```

```
' Encontrar los coeficientes del Polinomio
```

```
coef0 = coef0 / det
```

```
coef1 = coef1 / det
```

```
coef2 = coef2 / det
```

```
coef3 = coef3 / det
```

```
' Cálculo del Error absoluto de la curva de aproximación
```

```
For ndia = 1 To n
```

```
x = 15 + (ndia - 1) * 30
```

```
x = x / 1200
```

```
y = coef0 + coef1 * x + coef2 * x ^ 2 + coef3 * x ^ 3
```

```
Disc = (Imes(ndia) / 1000 - y) ^ 2
```

```
Residuo = Residuo + 1000 * Disc
```

```
Next
```

```
If Tmpmes(1) = Tmpmes(2) And Tmpmes(2) = Tmpmes(3) And Tmpmes(3) = Tmpmes(4) _  
And Tmpmes(4) = Tmpmes(5) And Tmpmes(5) = Tmpmes(6) And Tmpmes(6) = Tmpmes(7) _  
And Tmpmes(7) = Tmpmes(8) And Tmpmes(8) = Tmpmes(9) And Tmpmes(9) = Tmpmes(10) _  
And Tmpmes(10) = Tmpmes(11) And Tmpmes(11) = Tmpmes(12) Then
```

```
coef0 = Tmpmes(1)
```

```
coef1 = 0
```

```
coef2 = 0
```

```
coef3 = 0
```

```
Else
```

```
' Reutilizo Minimos cuadrados para la temperatura
```

```
' Reinicio las variables que voy a necesitar
```

```
sx = 0: sx2 = 0: sx3 = 0: sx4 = 0: sx5 = 0: sx6 = 0
```

```
sy = 0: sxy = 0: sx2y = 0: sx3y = 0: n = 12: Residuo = 0
```

```
For ndia = 1 To n
```

```
' Asignamos los datos conocidos (xi, yi)
```

```
x = 15 + 30 * (ndia - 1)
```

```
y = Tmpmes(ndia) + 273
```

```
' Aquí calculamos las sumas de los valores
```

```
sx = sx + x
```

```
sy = sy + y
```

```
sx2 = sx2 + x ^ 2
```

```
sx3 = sx3 + x ^ 3
```

```
sx4 = sx4 + x ^ 4
```

```
sx5 = sx5 + x ^ 5
```

```
sx6 = sx6 + x ^ 6
```

```
sxy = sxy + x * y
```

```
sx2y = sx2y + y * x ^ 2
```

```
sx3y = sx3y + y * x ^ 3
```

```
Next
```

```
' Encontrar los determinantes auxiliares (CORRECTOS)
```

```
det = n * (sx2 * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx4 - sx3 * sx6) + sx4 * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2))
```

```
det = det - sx * (sx * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx3 - sx6 * sx2) + sx4 * (sx2 * sx5 - sx4 * sx3))
```

```
det = det + sx2 * (sx * (sx3 * sx6 - sx5 * sx4) + sx2 * (sx5 * sx3 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
```

```
det = det - sx3 * (sx * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2) + sx2 * (sx3 * sx4 - sx2 * sx5) + sx3 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
```

```

coef0 = sy * (sx2 * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx4 - sx3 * sx6) + sx4 * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2))
coef0 = coef1 - sx * (sxy * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx3y * sx5 - sx2y * sx6) + sx4 * (sx2y * sx5 - sx4 * sx3y))
coef0 = coef1 + sx2 * (sxy * (sx3 * sx6 - sx5 * sx4) + sx2 * (sx3y * sx5 - sx2y * sx6) + sx4 * (sx2y * sx4 - sx3y * sx3))
coef0 = coef1 - sx3 * (sxy * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2) + sx2 * (sx3y * sx4 - sx2y * sx5) + sx3 * (sx2y * sx4 - sx3y * sx3))

```

```

coef1 = n * (sxy * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx3y - sx2y * sx6) + sx4 * (sx2y * sx5 - sx3y * sx4))
coef1 = coef1 - sy * (sx * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx5 - sx4 * sx3))
coef1 = coef1 + sx2 * (sx * (sx2y * sx6 - sx5 * sx3y) + sxy * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx3y - sx2y * sx3))
coef1 = coef1 - sx3 * (sx * (sx2y * sx5 - sx3y * sx4) + sxy * (sx3 * sx4 - sx2 * sx5) + sx3 * (sx2 * sx3y - sx2y * sx3))

```

```

coef2 = n * (sx2 * (sx2y * sx6 - sx5 * sx3y) + sxy * (sx5 * sx4 - sx3 * sx6) + sx4 * (sx3 * sx3y - sx2y * sx4))
coef2 = coef2 - sx * (sx * (sx2y * sx6 - sx5 * sx3y) + sxy * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx3y - sx2y * sx3))
coef2 = coef2 + sy * (sx * (sx3 * sx6 - sx5 * sx4) + sx2 * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
coef2 = coef2 - sx3 * (sx * (sx3 * sx3y - sx4 * sx2y) + sx2 * (sx3 * sx2y - sx2 * sx3y) + sxy * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))

```

```

coef3 = n * (sx2 * (sx3y * sx4 - sx5 * sx2y) + sx3 * (sx2y * sx4 - sx3 * sx3y) + sxy * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2))
coef3 = coef3 - sx * (sx * (sx4 * sx3y - sx2y * sx5) + sx3 * (sx3 * sx2y - sx2 * sx3y) + sxy * (sx2 * sx5 - sx4 * sx3))
coef3 = coef3 + sx2 * (sx * (sx3 * sx3y - sx2y * sx4) + sx2 * (sx3 * sx2y - sx2 * sx3y) + sxy * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
coef3 = coef3 - sy * (sx * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2) + sx2 * (sx3 * sx4 - sx2 * sx5) + sx3 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))

```

```
' Encontrar los coeficientes del Polinomio
```

```
coef0 = coef0 / det
```

```
coef1 = coef1 / det
```

```
coef2 = coef2 / det
```

```
coef3 = coef3 / det
```

```
'MsgBox ("TA: coef0 " & coef0 & " coef1 " & coef1 & " coef2 " & coef2 & "coef3 & " & coef3)
```

```
End If
```

```
' Reutilizamos minimos Cuadrados para encontrar la Temperatura de Cielo
```

```
If wsmes(1) = wsmes(2) And wsmes(2) = wsmes(3) And wsmes(3) = wsmes(4) _
```

```
And wsmes(4) = wsmes(5) And wsmes(5) = wsmes(6) And wsmes(6) = wsmes(7) _
```

```
And wsmes(7) = wsmes(8) And wsmes(8) = wsmes(9) And wsmes(9) = wsmes(10) _
```

```
And wsmes(10) = wsmes(11) And wsmes(11) = wsmes(12) Then
```

```
' Dejo Constante la temperatura de Cielo
```

```
coef0 = wsmes(1)
```

```
coef1 = 0
```

```
coef2 = 0
```

```
coef3 = 0
```

```
Else
```

```
' Reutilizo Minimos cuadrados para la temperatura
```

```
' Reinicio las variables que voy a necesitar
```

```
sx = 0: sx2 = 0: sx3 = 0: sx4 = 0: sx5 = 0: sx6 = 0
```

```
sy = 0: sxy = 0: sx2y = 0: sx3y = 0: n = 12: Residuo = 0
```

```
For ndia = 1 To n
```

```
' Asignamos los datos conocidos (xi, yi)
```

```
x = 15 + 30 * (ndia - 1)
```

```
y = wsmes(ndia) + 273
```

```
' Aquí calculamos las sumas de los valores
```

```
sx = sx + x
```

```
sy = sy + y
```

```
sx2 = sx2 + x ^ 2
```

```
sx3 = sx3 + x ^ 3
```

```

sx4 = sx4 + x ^ 4
sx5 = sx5 + x ^ 5
sx6 = sx6 + x ^ 6
sxy = sxy + x * y
sx2y = sx2y + y * x ^ 2
sx3y = sx3y + y * x ^ 3
Next

```

' Encontrar los determinantes auxiliares

```

det = n * (sx2 * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx4 - sx3 * sx6) + sx4 * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2))
det = det - sx * (sx * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx3 - sx6 * sx2) + sx4 * (sx2 * sx5 - sx4 * sx3))
det = det + sx2 * (sx * (sx3 * sx6 - sx5 * sx4) + sx2 * (sx5 * sx3 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
det = det - sx3 * (sx * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2) + sx2 * (sx3 * sx4 - sx2 * sx5) + sx3 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))

```

```

coefts0 = sy * (sx2 * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx4 - sx3 * sx6) + sx4 * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2))
coefts0 = coefts0 - sx * (sxy * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx3y * sx5 - sx2y * sx6) + sx4 * (sx2y * sx5 - sx4 * sx3y))
coefts0 = coefts0 + sx2 * (sxy * (sx3 * sx6 - sx5 * sx4) + sx2 * (sx3y * sx5 - sx2y * sx6) + sx4 * (sx2y * sx4 - sx3y * sx3))
coefts0 = coefts0 - sx3 * (sxy * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2) + sx2 * (sx3y * sx4 - sx2y * sx5) + sx3 * (sx2y * sx4 - sx3y * sx3))

```

```

coefts1 = n * (sxy * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx5 * sx3y - sx2y * sx6) + sx4 * (sx2y * sx5 - sx3y * sx4))
coefts1 = coefts1 - sy * (sx * (sx4 * sx6 - sx5 ^ 2) + sx3 * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx5 - sx4 * sx3))
coefts1 = coefts1 + sx2 * (sx * (sx2y * sx6 - sx5 * sx3y) + sxy * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx3y - sx2y * sx3))
coefts1 = coefts1 - sx3 * (sx * (sx2y * sx5 - sx3y * sx4) + sxy * (sx3 * sx4 - sx2 * sx5) + sx3 * (sx2 * sx3y - sx2y * sx3))

```

```

coefts2 = n * (sx2 * (sx2y * sx6 - sx5 * sx3y) + sxy * (sx5 * sx4 - sx3 * sx6) + sx4 * (sx3 * sx3y - sx2y * sx4))
coefts2 = coefts2 - sx * (sx * (sx2y * sx6 - sx5 * sx3y) + sxy * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx3y - sx2y * sx3))
coefts2 = coefts2 + sy * (sx * (sx3 * sx6 - sx5 * sx4) + sx2 * (sx3 * sx5 - sx2 * sx6) + sx4 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
coefts2 = coefts2 - sx3 * (sx * (sx3 * sx3y - sx4 * sx2y) + sx2 * (sx3 * sx2y - sx2 * sx3y) + sxy * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))

```

```

coefts3 = n * (sx2 * (sx3y * sx4 - sx5 * sx2y) + sx3 * (sx2y * sx4 - sx3 * sx3y) + sxy * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2))
coefts3 = coefts3 - sx * (sx * (sx4 * sx3y - sx2y * sx5) + sx3 * (sx3 * sx2y - sx2 * sx3y) + sxy * (sx2 * sx5 - sx4 * sx3))
coefts3 = coefts3 + sx2 * (sx * (sx3 * sx3y - sx2y * sx4) + sx2 * (sx3 * sx2y - sx2 * sx3y) + sxy * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))
coefts3 = coefts3 - sy * (sx * (sx3 * sx5 - sx4 ^ 2) + sx2 * (sx3 * sx4 - sx2 * sx5) + sx3 * (sx2 * sx4 - sx3 ^ 2))

```

' Encontrar los coeficientes del Polinomio

```

coefts0 = coefts0 / det
coefts1 = coefts1 / det
coefts2 = coefts2 / det
coefts3 = coefts3 / det
End If

```

' Evaluar los polinomios ortogonales

For dia = 1 To 365

' Aqui se calcula la radiación Ganada...

' Aqui Calculo la Irradiancia de acuerdo al polinomio encontrado

' Encuentro la declinación para el día actual

```
deltam = 23.45 * Sin((72 / 73) * (284 + dia) * (pi / 180)) * pi / 180
```

' Ahora encontramos el coseno del ángulo de incidencia,

' Se considera la superficie dirigida hacia el sur, esto es,

' el ángulo acimutal de la superficie (gamma) es cero y al mediodía solar

' el ángulo horario (omega) es cero también.

' De acuerdo con lo anterior, debemos usar la fórmula:

'  $\cos(\theta) = -\sin(\delta) * \cos(\phi) + \cos(\delta) * \sin(\phi)$

' Pero,  $-\sin(\delta) * \cos(\phi) + \cos(\delta) * \sin(\phi) = \cos(\delta) * \sin(\phi) - \sin(\delta) * \cos(\phi)$

```

' y además: cos(phi - delta) = Cos(delta) * Sin(phi) - Sin(deltam) * Cos(phi)
' Entonces, cos(theta) = cos(phi - delta)
' cost = Atn(-cost / Sqr(-cost * cost + 1)) + 2 * Atn(1)

x = dia / 1000
l = 500 * (coef0 + coef1 * x + coef2 * x ^ 2 + coef3 * x ^ 3) * Cos(deltam - phi) * Cos(beta)

x = dia
Ta = coef0 + coef1 * x + coef2 * x ^ 2 + coef3 * x ^ 3
' MsgBox ("Temperatura Ambiente: " & Ta & " Dia: " & dia)
Ts = coefts0 + coefts1 * x + coefts2 * x ^ 2 + coefts3 * x ^ 3
Te = (5.5 * Ta + 4.5 * Ts) / 10

' Cálculos para la eficiencia...
' Cálculo de fmin
fmin = (1 + 0.089 * hw - 0.1166 * hw * epsilonp) * (1 + 0.07866 * nc)

' Cálculo de e
E = 0.43 * (1 - 100 / Tpm)

' Cálculo de las pérdidas por la placa colectora (Ut)
Ut1 = nc / ((C / Tpm) * ((Tpm - Ta) / Abs(nc + fmin)) ^ E) + (1 / hw)
Ut2 = sigma * (Tpm + Ta) * (Tpm ^ 2 + Ta ^ 2)
Ut3 = (1 / (epsilonp + 0.0059 * nc * hw)) + ((2 * nc + fmin - 1 + 0.133 * epsilonp) / epsilonp) - nc
Ut = (1 / Ut1) + Ut2 / Ut3

' Notación:
' nc es el número de cubiertas de vidrio
' epsilonp es la emitancia del vidrio
' epsilonp es la emitancia de la placa
' Ta es la temperatura ambiente (K)
' Tpm es la temperatura media de la placa (K)
' hw es el coeficiente global de transferencia de calor al ambiente (W/m^2°C)

' Cálculo de Ub
Ub = ka / L
' Notación:
' ka es la conductividad térmica del aislante (W/m°C)
' L es el espesor de la pared inferior (m)

' Cálculo de Ue
Ue = 2.1 * Hfi * S
' Notación:
' Hfi es el coeficiente de pérdida por convección
' S es el área del colector

' Cálculo del coeficiente global de pérdidas (Ul)
Ul = Ut + Ub + Ue

' Notación:
' Ut es lo que se pierde por la placa colectora
' Ub es lo que se pierde por la parte inferior
' Ue es lo que se pierde por los lados

' Cálculo de m
m = Sqr(Abs(Ul / (k * delta)))
' Notación:

```

' k es la conductividad térmica del material de la aleta  
 ' delta es el grosor de la aleta  
 ' UI es el coeficiente total de pérdidas

' Cálculo de la eficiencia de la aleta (F)  

$$F = (\text{Tan}((\pi / 180) * m * (w - d) / 2)) / (m * (w - d) / 2)$$
  
 ' Notación:  
 ' w es la distancia entre los tubos (m)  
 ' D es el diametro de los tubos (m)

' Cálculo del factor de eficiencia del colector (Fp)  

$$F_p = 1 / (UI * w * ((1 / (UI * (d + (w - d) * F))) + (1 / C_b) + (1 / (\pi * D_i * h_{fi}))))$$
  
 ' Notación:  
 ' Di es el diametro interno de los tubos  
 ' hfi es el coeficiente de transferencia de calor por convección del tubo al fluido  
 ' Cb es la conductancia de contacto aleta-tubo  
 ' F es la eficiencia de la aleta

' Calculo del Factor de Remoción (Fr)  

$$Fr = (\text{mass} * C_p / (S * UI)) * (1 - \text{Exp}(-S * UI * F_p / (\text{mass} * C_p)))$$
  
 ' Notación:  
 ' Ac es el área de colector  
 ' Cp es la capacidad calorífica del fluido de trabajo  
 ' mass es el flujo másico (kg/seg)  
 ' I es la cantidad de Radiación que llega al colector

' Calcular Calor Útil (Qu)  

$$Q_u = \text{Abs}(Fr * S * (I * \text{Tau} - UI * (T_e - T_a)))$$
  
 ' Notación:  
 ' I es la cantidad de radiación que llega al colector  
 ' Tau es la transmitancia de la cubierta  
 ' Te es la temperatura de entrada del fluido al colector  
 ' Ta es la temperatura ambiente

' Cálculo de la Temperatura de Salida del Agua  

$$T_{fi} = T_e + Q_u / (\text{mass} * C_p)$$

' Cálculo de la eficiencia (ef)  

$$ef = 1 - (UI * (T_{fi} - T_a) / (I * \text{Tau}))$$

If ef < 0 Then ef = 0  
 If ef > 1 Then ef = 1

' Asignamos la eficiencia del día  
 ef\_d(dia) = ef

' Aquí terminan los cálculos para la eficiencia...

' Pero empiezan las condiciones para calcular para cada mes...

If dia <= 31 Then efm(1) = efm(1) + ef\_d(dia) / 31      ' Eficiencia para Enero  
 If dia > 31 And dia < 59 Then efm(2) = efm(2) + ef\_d(dia) / 28      ' Eficiencia para Febrero  
 If dia > 59 And dia <= 90 Then efm(3) = efm(3) + ef\_d(dia) / 31      ' Eficiencia para Marzo  
 If dia > 90 And dia <= 120 Then efm(4) = efm(4) + ef\_d(dia) / 30      ' Eficiencia para Abril  
 If dia > 120 And dia <= 151 Then efm(5) = efm(5) + ef\_d(dia) / 31      ' Eficiencia para Mayo  
 If dia > 151 And dia <= 181 Then efm(6) = efm(6) + ef\_d(dia) / 30      ' Eficiencia para Junio  
 If dia > 181 And dia <= 212 Then efm(7) = efm(7) + ef\_d(dia) / 31      ' Eficiencia para Julio  
 If dia > 212 And dia <= 243 Then efm(8) = efm(8) + ef\_d(dia) / 31      ' Eficiencia para Agosto

```

If dia > 243 And dia <= 273 Then efm(9) = efm(9) + ef_d(dia) / 30 ' Eficiencia para Septiembre
If dia > 273 And dia <= 304 Then efm(10) = efm(10) + ef_d(dia) / 31 ' Eficiencia para Octubre
If dia > 304 And dia <= 334 Then efm(11) = efm(11) + ef_d(dia) / 30 ' Eficiencia para Noviembre
If dia > 334 And dia <= 365 Then efm(12) = efm(12) + ef_d(dia) / 31 ' Eficiencia para Diciembre

```

```

' Encontramos la eficiencia mínima
If efmin > ef_d(dia) Then efmin = ef_d(dia): dia_efmin = dia
If efmax < ef_d(dia) Then efmax = ef_d(dia): dia_efmax = dia
Next
'Aquí termina el ciclo

```

```

' Cálculo de la eficiencia promedio anual
For n = 1 To 365
    suma = ef_d(n) + suma
Next n

```

```

promedio = suma / 365

```

```

' Cuarta Parte
' Graficación del Comportamiento de la Eficiencia a lo largo del año
MousePointer = 0
Eficiencia.Ef1.Text = Format(efm(1), "0.00###")
Eficiencia.Ef2.Text = Format(efm(2), "0.00###")
Eficiencia.Ef3.Text = Format(efm(3), "0.00###")
Eficiencia.Ef4.Text = Format(efm(4), "0.00###")
Eficiencia.Ef5.Text = Format(efm(5), "0.00###")
Eficiencia.Ef6.Text = Format(efm(6), "0.00###")
Eficiencia.Ef7.Text = Format(efm(7), "0.00###")
Eficiencia.Ef8.Text = Format(efm(8), "0.00###")
Eficiencia.Ef9.Text = Format(efm(9), "0.00###")
Eficiencia.Ef10.Text = Format(efm(10), "0.00###")
Eficiencia.Ef11.Text = Format(efm(11), "0.00###")
Eficiencia.Ef12.Text = Format(efm(12), "0.00###")
Eficiencia.Ef_min1.Text = Format(ef_d(dia_efmin), "0.00###")
Eficiencia.Ef_max1.Text = Format(ef_d(dia_efmax), "0.00###")
Eficiencia.Dia_min1.Text = dia_efmin
Eficiencia.Dia_max1.Text = dia_efmax
Eficiencia.Ef_pa1.Text = Format(promedio, "0.00###")

```

```

' Quinta Parte
' Aquí Empieza la Gráfica

```

```

' Definimos el color
col1 = CInt(Eficiencia.ngraph1.Text)
col1 = col1 Mod 16
If col1 = 7 Then col1 = col1 + 1
Graph.Visible = True

```

```

Dim v, OldFontSize ' Declara variables.
Dim x0, x1, y0, y1 As Double

```

```

' Cambiamos el aspecto del formulario

```

```

Width = 15000: Height = 9000 ' Establece el tamaño del formulario en twips.
Move 5, 5 ' Mueve el origen del formulario.
AutoRedraw = -1 ' Activa AutoRedraw.

```

```

OldFontSize = FontSize ' Guarda el tamaño de fuente anterior.
BackColor = QBColor(7) ' Establece el color de fondo a gris.
Scale (0, 100)-(500, 0) ' Establece el sistema de coordenadas personalizado.

' Los ejes contendrán:
' Eje x: días del año
' Eje y: Eficiencia del colector en el día n.

' Graficamos los ejes del sistema de coordenadas
Line (10, 10)-(10, 100) ' Eje y.
Line (10, 10)-(360, 10) ' Eje x.

' Dibujado de las marcas de unidades del eje x
For v = 10 To 360 Step 10
    Line (v, 9)-(v, 10)
    CurrentY = 9
    Print (v - 10)
Next v
For v = 10 To 100 Step 10
    Line (9, v)-(10, v)
    CurrentX = 0
    Print (v)
Next v

' Aquí se imprime el Título del Gráfico
FontSize = 14
CurrentX = 100
CurrentY = 115
Print "Distribución de la Eficiencia a lo largo del año"

' Aquí se imprimen los títulos de los ejes.
FontSize = 5
CurrentX = 370
CurrentY = 12
Print "Día (n)"
CurrentX = 5
CurrentY = 105
Print "Eficiencia"

' Se inicia el ciclo del dibujado de la gráfica
' Inicializamos las variables
    x0 = 10
    y0 = ef_d(1) * 100

' Encuentro las coordenadas de los puntos por donde pasa la recta
' Utilizo el vector ef(n) usado en el ciclo anterior.
    Line (x0, ef_d(1) * 100)-(10, ef_d(1) * 100)

For n = 1 To 365
    Line (x0, y0)-(x0 + 1, ef_d(n) * 100), QBColor(col1)
    x0 = x0 + 1
    y0 = ef_d(n) * 100

Next n
    Line (dia_efmax + 10, 100 * ef_d(dia_efmax - 1))-(dia_efmax + 11, 100 * ef_d(dia_efmax) + 1), RGB(255, 255, 255)
    Line (dia_efmax + 10, 100 * ef_d(dia_efmax - 1))-(dia_efmax + 9, 100 * ef_d(dia_efmax) + 1), RGB(255, 255, 255)

```

```
MsgBox ("Continuar..."), vbOKOnly, "CSP Eficiencia"

' Aquí debemos regresar el cursor al formulario Eficiencia
Graph.Visible = False

If Err = 0 Then GoTo 5000

' En Caso de Error...
Mistake:
If Err = 31001 Or Err = 7 Then MsgBox ("Se originó un problema..." & Chr(13) & "La computadora no tiene suficiente
memoria."), vbCritical, "Error Fatal"
If Err = 11 Then MsgBox ("Se originó un problema..." & Chr(13) & "Hay una división por cero... Contacte al diseñador del
software."), vbCritical, "Error Fatal"
If Err = 13 Then MsgBox ("Se originó un problema..." & Chr(13) & "Se han escrito caracteres no numéricos... Corrija el
error..."), vbCritical, "Error Fatal"
If Err = 18 Then

MsgBox ("Se originó un problema..." & Chr(13) & "El usuario ha detenido el programa."), vbCritical, "Interrupción por el
usuario..."

Else
    MsgBox ("Error Número..." & Err), vbOKOnly, "Error Fatal..."
    MsgBox ("Por favor, vuelva a iniciar el programa..."), vbOKOnly, "Error Fatal...": End: Err.Clear
End If

5000
' Aquí continuamos...
Eficiencia.Visible = True

End Sub
```

## Glosario

*Ángulo Acimut de la Superficie ( $\gamma$ ):* La desviación de la proyección sobre un plano horizontal de la normal de la superficie desde el meridiano local. Es igual a cero en el sur, negativo hacia el este y positivo hacia el oeste.  $-180^\circ \angle \gamma \angle 180^\circ$

*Ángulo de Altura Solar ( $\alpha_s$ ):* El ángulo entre la horizontal y la línea al Sol, es decir, el complemento del ángulo Cenit.

*Ángulo del Acimut Solar ( $\gamma_s$ ):* El desplazamiento desde el sur de la proyección de la radiación directa incidente sobre el plano horizontal. Los desplazamientos del este al sur son negativos y del oeste al sur son positivos.

*Ángulo Cenit ( $\theta_z$ ):* El ángulo entre la vertical y la línea al Sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación directa incidente sobre una superficie horizontal.

*Ángulo Horario ( $\omega$ ):* El desplazamiento angular del Sol hacia el este u oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a razón de  $15^\circ$  por hora. Es negativo en la mañana y positivo en la tarde.

*Ángulo de Incidencia ( $\theta$ ):* El ángulo que existe entre la radiación directa incidente a la superficie y la normal a esa superficie.

*Calor,* Una de las formas de la energía, capaz de elevar la temperatura y dilatar, fundir, vaporizar o descomponer un cuerpo.

*Calor específico,* cantidad de calor necesaria para aumentar en  $1^\circ\text{C}$  la temperatura de la unidad de masa de una sustancia.

*Célula solar,* célula fotovoltaica constituida por una unión de monocristales de semiconductor.

*Central solar,* central de producción de energía eléctrica a partir de la energía solar.

*Constante solar,* potencia de la radiación solar antes de su entrada en la atmósfera.

*Declinación ( $\delta$ ):* La posición angular del Sol en el mediodía solar. (es decir, cuando el Sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador. Se considera positivo hacia el norte.  $-23.45^\circ \angle \delta \angle 23.45^\circ$

*Energía,* Facultad que posee un sistema de cuerpos de proporcionar trabajo mecánico o su equivalente. Magnitud física escalar que sirve de medida general a las distintas formas de movimiento de la materia que se estudian en física. La energía de un sistema caracteriza a éste con respecto a las posibles transformaciones del movimiento que pueden ocurrir dentro de él. Estas transformaciones se producen en virtud de la interacción de las partes del sistema, tanto entre sí como entre los cuerpos externos (medio exterior o alrededores).

*Energía renovable*, energía cuyo consumo no agota las fuentes naturales que la producen (las radiaciones solares, el viento, las mareas, etc.).

*Fuentes de energía*, materias primas y fenómenos naturales utilizados para la producción de energía, como carbón, hidrocarburos, uranio, hulla blanca, Sol, geotermia, viento, marea, etc.

El concepto de «energía» es básico en física. En la física clásica y en química, no hay creación ni destrucción de energía sino sólo transformación de una forma en otra (principio de Lavoisier) o transferencia de energía de un sistema a otro (principios de Carnot). En cambio, en la física de las altas energías (por ej., en las reacciones nucleares), son posibles las transformaciones recíprocas de energía en materia según la fórmula de Einstein:  $E = mc^2$ , en la que E es la variación de energía, m la variación de la masa y c la velocidad de la luz. Por último, de acuerdo con las leyes de la termodinámica, toda conversión de energía va acompañada de pérdidas; es decir, la energía de la primera forma no se transforma íntegramente en energía de la segunda forma. Tales pérdidas son particularmente importantes en la conversión de energía térmica en energía mecánica, por ej., en los motores térmicos.

*Gas*, (voz formada por derivación del lat. chaos, caos). Cuerpo que se encuentra en el estado de la materia caracterizado por la fluidez, compresibilidad y expansibilidad.

*Gas ciudad*, gas combustible obtenido por la destilación de la hulla o de productos derivados del petróleo y cuya distribución se efectúa por conductos.

*Gas de los pantanos*, metano.

*Gas licuado*, hidrocarburo ligero, gaseoso en condiciones normales, que se obtiene del gas natural o del gas de refinería y se conserva en estado líquido en recipientes bajo presión.

*Gas natural*, gas constituido principalmente por metano, que se encuentra comprimido en algunas capas geológicas y que constituye un combustible excelente.

*Horno solar*, aparato en el que se utiliza el calor irradiado por el Sol, para obtener temperaturas elevadas.

*Latitud ( $\phi$ )*: Ángulo imaginario formado por el rayo que surge en el centro de la tierra hasta el ecuador y el rayo que surge, también, del centro de la tierra y la posición de un lugar en particular, localizado en la misma longitud. Se toma como cero el ecuador, se consideran los ángulos positivos para el hemisferio norte y negativos para el hemisferio sur. La localización angular al norte o sur del ecuador. Se considera positivo al norte.  $-90^\circ < \phi < 90^\circ$

*Lenguaje de alto nivel*, lenguaje simbólico en el que una instrucción del programa fuente da lugar a varias instrucciones máquina.

*Lenguaje máquina*, lenguaje específico de un ordenador, en el que las instrucciones se expresan en código binario, directamente asimilable por la máquina.

*Longitud*, Ángulo imaginario formado por el rayo que surge en el centro de la tierra y que pasa por el meridiano de Greenwich y el rayo que surge del centro de la tierra y que pasa por una posición particular, localizado a la misma elevación angular medida desde el ecuador.

*Panel solar*, panel utilizado en los sistemas de calefacción por energía solar como colector activo de energía.

*Pendiente ( $\beta$ )*: El ángulo entre el plano de la superficie en estudio y la horizontal.  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ . ( $\beta > 90^\circ$  significa que la superficie está "viendo" hacia abajo)

*Principio de Arquímedes*: Un objeto sumergido parcial o completamente, es empujado hacia arriba por una fuerza igual al peso del fluido que desplaza.

*Sistema solar*, conjunto del Sol y de los astros que gravitan alrededor de él.

*Sol*, Estrella luminosa alrededor de la cual gravitan la Tierra y los demás planetas del sistema solar. (Con este significado suele escribirse con mayúscula.)

*Solar*, Relativo al Sol: rayo, año solar. Relativo a la energía proporcionada por el Sol: horno solar.

*Superficie Selectiva*: Superficie con alta absorción en la banda de emisión solar y baja emitancia en el intervalo de cuerpo negro.

*Temperatura*, Magnitud física que caracteriza de manera objetiva la sensación subjetiva de calor o frío producida por el contacto de un cuerpo.

*Temperatura absoluta*, magnitud definida por las consideraciones teóricas de la termodinámica o de la mecánica estadística, prácticamente igual a la temperatura centesimal aumentada en 273,15 grados.

*Tiempo de recuperación*: Tiempo que se requiere para que el costo de una inversión se iguale al costo del beneficio obtenido por el uso de otro sistema al cual se sustituye.