

Ing. Rhona I. Díaz M, MSc.
CINEMI-UTP
www.cinemi.utp.ac.pa

Ejemplo de cálculo de una instalación solar térmica



Cálculo de una instalación solar térmica: aplicación al sector agropecuario y edificaciones

Índice

1. Introducción
2. Colectores solares térmicos
3. Aplicaciones
4. Ventajas y Desventajas
5. Cálculo de Sistemas
6. Bibliografía



Energías Renovables



1. Introducción

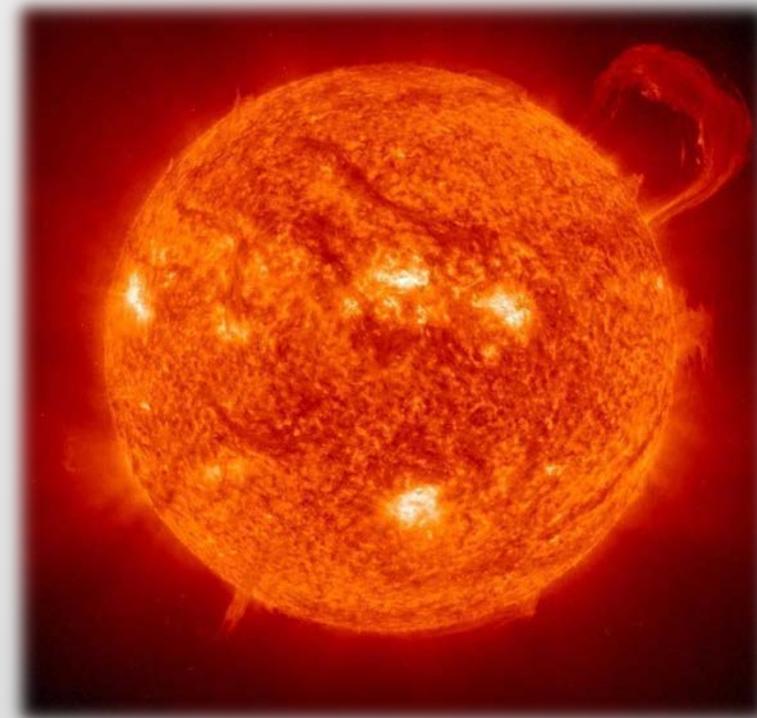


Cálculo de una instalación solar térmica: aplicación al sector agropecuario y edificaciones

INTRODUCCIÓN

¿Qué es la Energía Solar Térmica?

- Es el aprovechamiento de la radiación del Sol para producir calor a través de su efecto térmico
- La radiación del Sol que llega a nuestro planeta puede ser utilizada para calentar agua, aire u otras sustancias con la finalidad de usarlas como fuentes de energía primarias o secundarias
- Esta energía se aprovecha a través de equipos denominados ***colectores solares térmicos***





2. Colectores solares térmicos



Cálculo de una instalación solar térmica:

COLECTORES SOLARES TÉRMICOS

Un **captador solar**, también conocido **colector solar**, es cualquier dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica



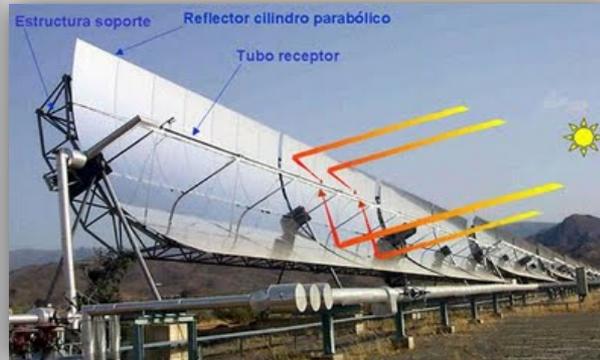
COLECTORES SOLARES TÉRMICOS

Clasificación

Baja Temperatura
50 a 100 ° C



Media Temperatura
100 a 400° C



Alta Temperatura
> 400° C

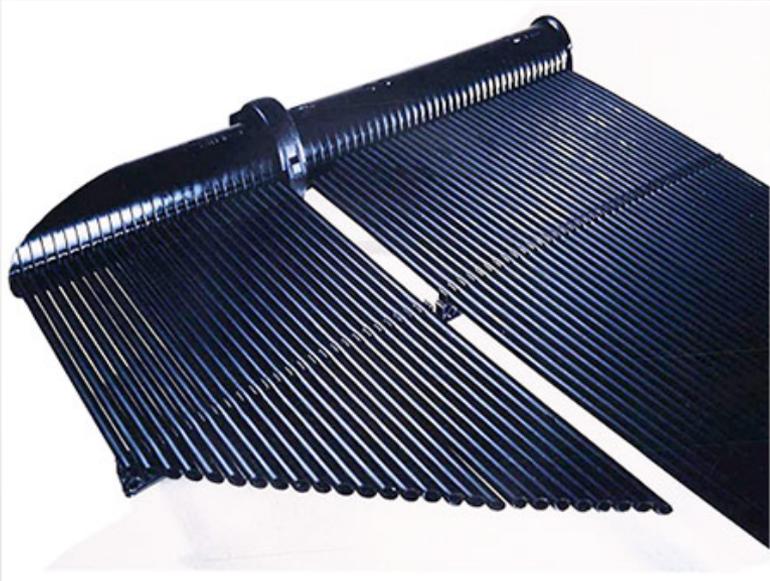


COLECTORES SOLARES TÉRMICOS

Clasificación

- **Baja Temperatura**

- Colectores sin cubierta de vidrio (40 a 60 °C)

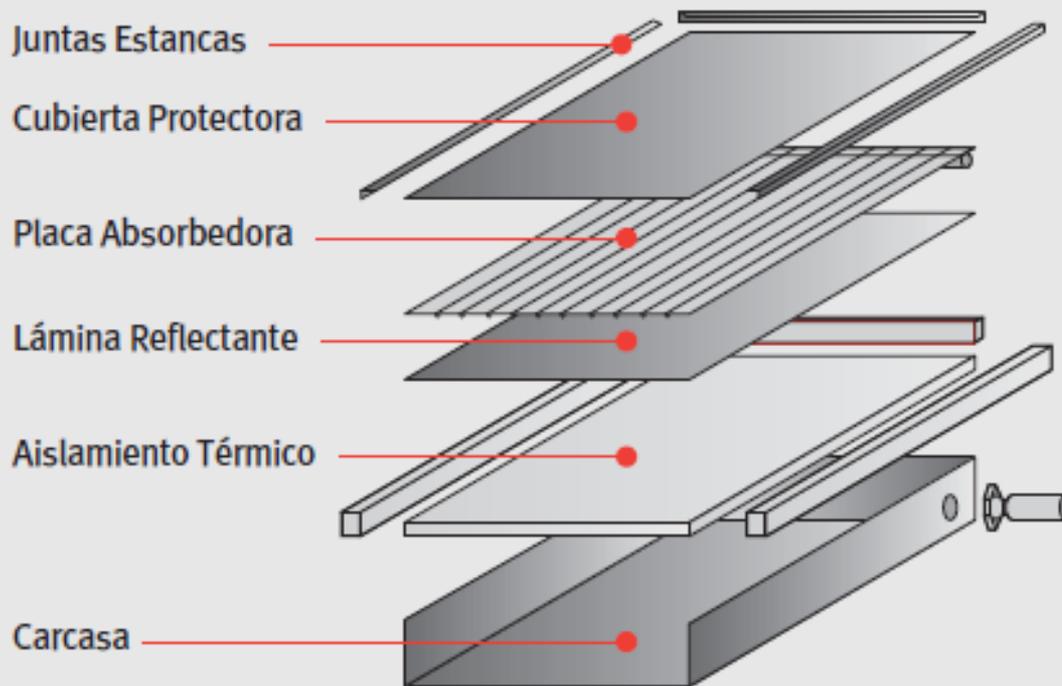


COLECTORES SOLARES TÉRMICOS

Clasificación

- **Baja Temperatura**

- Colectores de Placa Plana (60 a 90°C)



COLECTORES SOLARES TÉRMICOS

Clasificación

- **Baja Temperatura**
 - Tubos de vacío (hasta 100°C)



COLECTORES SOLARES TÉRMICOS

Clasificación

- **Media Temperatura**
 - Concentrador Parabólico (de 100°C a 400°C)



COLECTORES SOLARES TÉRMICOS

Clasificación

- **Alta Temperatura**
 - Heliostatos (más de 400°C)



COLECTORES SOLARES TÉRMICOS

Clasificación

- **Alta Temperatura**

- Discos Parabólicos (más de 400°C)



Principios de su aprovechamiento

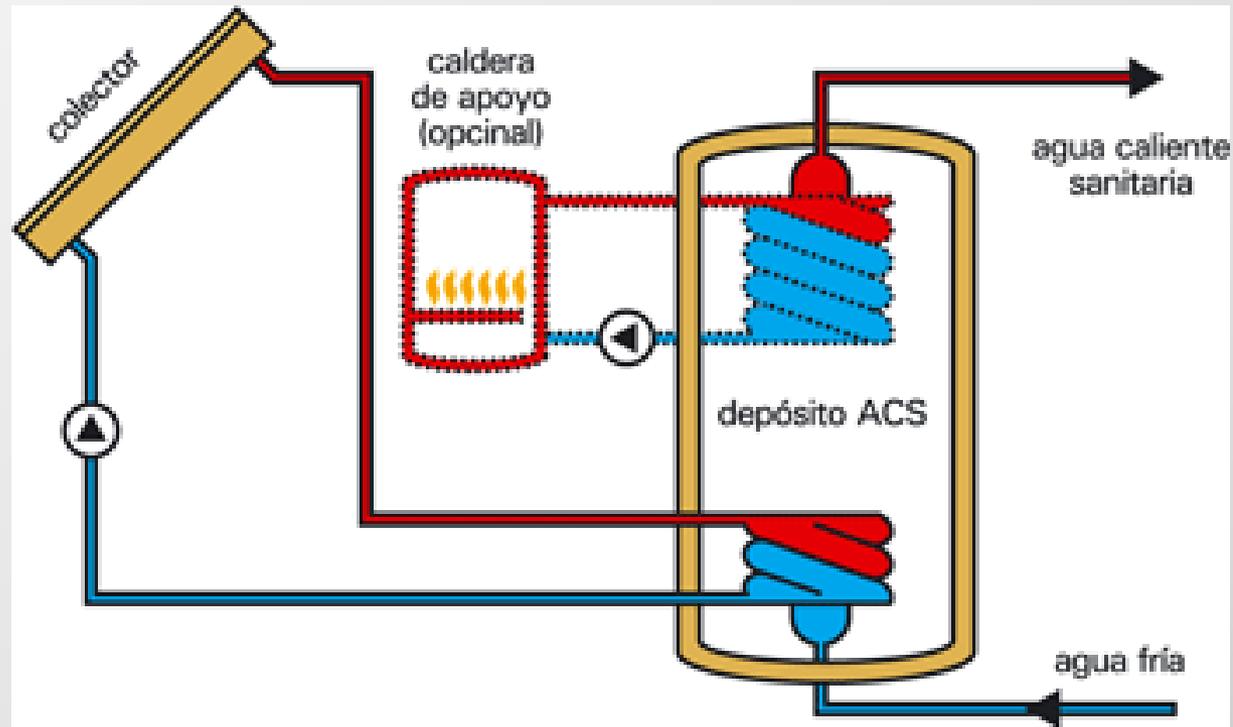
- Factores a considerar:
 - Radiación
 - Condiciones Ambientales
 - Orientación e Inclinación (latitud)
 - Periodo de uso (invierno, verano)
 - Superficie disponible
 - Sombreamiento
 - Condiciones del agua
 - Demanda





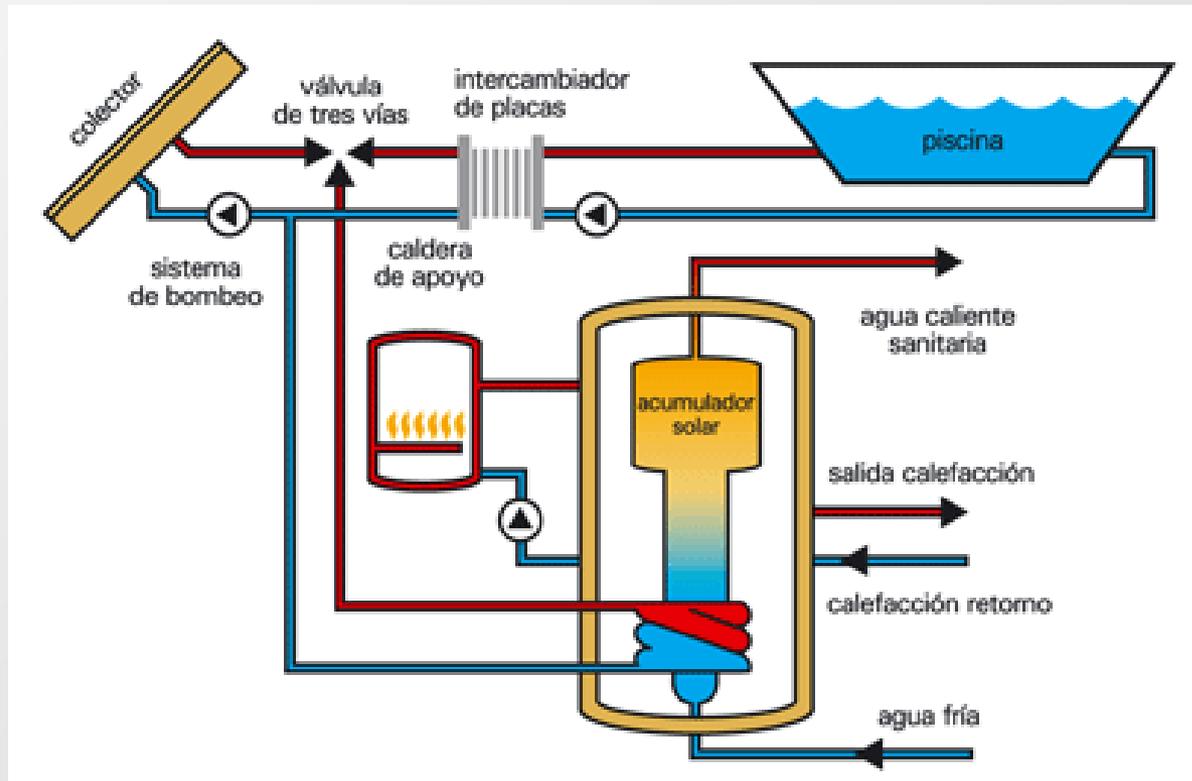
3. Aplicaciones

- **Baja Temperatura**
 - Agua Caliente



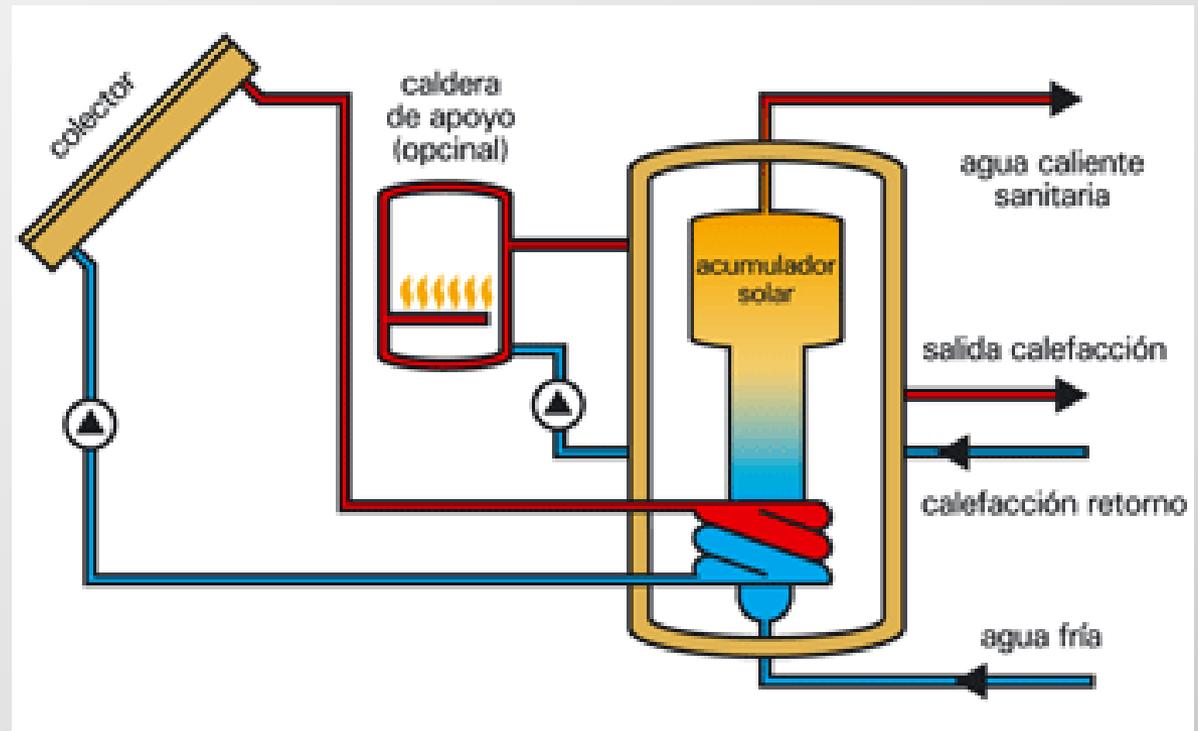
APLICACIONES

- ▶ **Baja Temperatura**
 - ▶ **Agua Caliente (Piscina)**



APLICACIONES

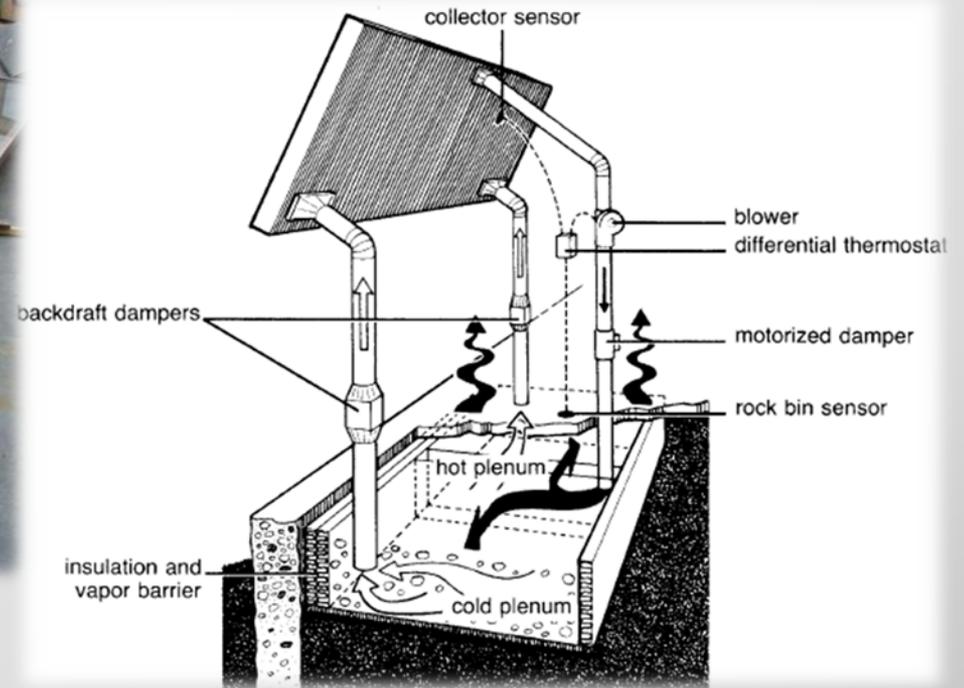
- ▶ **Baja Temperatura**
 - ▶ **Calefacción (Radiadores o suelo radiante)**



APLICACIONES

► Baja Temperatura

- Calefacción o Secado (40 a 70°C)

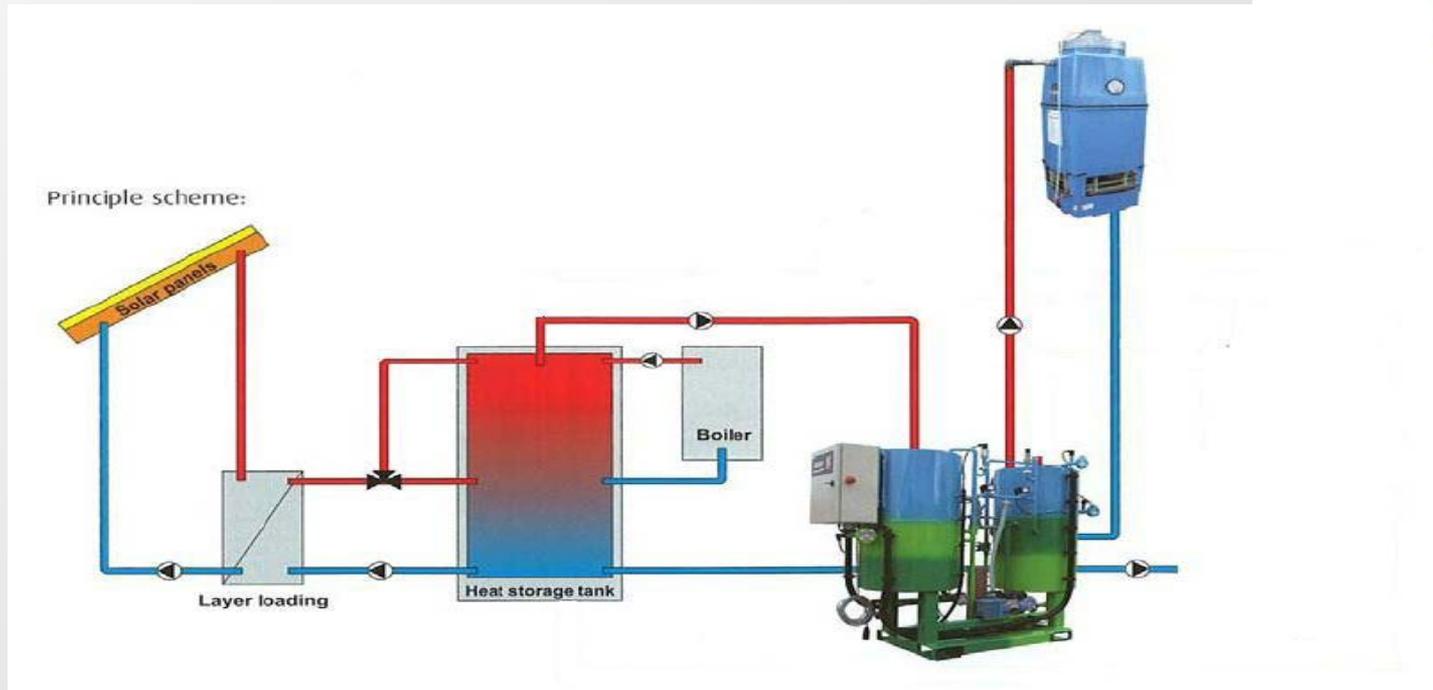


APLICACIONES

Secado de alimentos: el aire caliente puede ser utilizado en la deshidratación o secado de alimentos como el café, para su conservación.

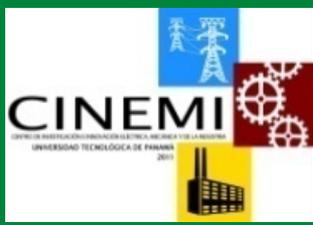


- **Baja Temperatura**
 - Refrigeración



Producción de energía eléctrica:





Energías Renovables



4. Ventajas y Desventajas



Cálculo de una instalación solar térmica

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

VENTAJAS

- Es una fuente energética gratuita e inagotable
- No es contaminante
- Se puede construir con materiales endógenos
- Son autónomas y descentralizadas
- Alta rentabilidad económica
 - Poco mantenimiento
 - Larga vida útil (15-20 años)
- Ahorro Energético (calderas, resistencias)
- Disminución de impacto ambiental

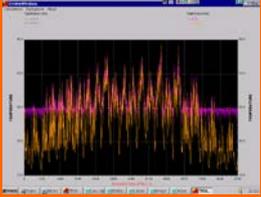


Cálculo de una instalación solar térmica

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

DESVENTAJAS

- Altos costes de instalación
- Inversión inicial elevada
- Técnica aún insuficiente en cuanto al almacenamiento de la energía y eficiencia de los materiales
- Afecta la estética de las construcciones
- Falta de mano de obra capacitada



5. Cálculo de Sistemas Solares Térmicos



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos -Demanda

Cálculo de la Demanda

- Cálculo directo: Con flujómetro
- Cálculo indirecto: con factura o con tablas promedio

Demanda

Tabla 3.1. Demanda de referencia a 60°C (1)

Criterio de demanda	Litros ACS/día a 60° C	
	Viviendas unifamiliares	30
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hotel ****	70	por cama
Hotel ***	55	por cama
Hotel/Hostal **	40	por cama
Camping	40	por emplazamiento
Hostal/Pensión *	35	por cama
Residencia (ancianos, estudiantes, etc)	55	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15	por servicio
Escuelas	3	por alumno
Cuarteles	20	por persona
Fábricas y talleres	15	por persona
Administrativos	3	por persona
Gimnasios	20 a 25	por usuario
Lavanderías	3 a 5	por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10	por comida
Cafeterías	1	por almuerzo

(1) Los litros de ACS/día a 60°C de la tabla se han calculado a partir de la tabla 1 (Consumo unitario diario medio) de la norma UNE 94002:2005 "Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria: cálculo de la demanda energética".

Para el cálculo se ha utilizado la ecuación (3.2) con los valores de $T_1 = 12^\circ\text{C}$ (constante) y $T = 45^\circ\text{C}$.

Número de dormitorios	1	2	3	4	5	6	7	más de 7
Número de Personas	1,5	3	4	6	7	8	9	Nº de dormitorio



Cálculo de una instalación solar térmica

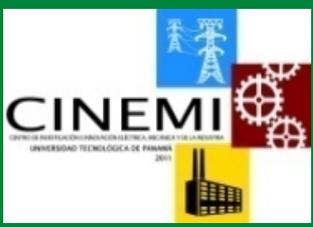
Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Demanda

Demanda

Para el caso de que se elija una temperatura en el acumulador final diferente de 60°C, se deberá alcanzar la contribución solar mínima correspondiente a la demanda obtenida con las demandas de referencia a 60°C. De allí que la demanda a considerar para efectos de los cálculos, según la temperatura elegida, será la que se obtenga a partir de las siguientes expresiones:

$$D(T) = \sum_{1}^{12} D_i(T)$$

$$D_i(T) = D_i(60^{\circ}\text{C}) * \frac{(T - T_i)}{(60 - T_i)}$$



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Demanda

Demanda

$$D(T) = \sum_{1}^{12} D_i(T)$$

$$D_i(T) = D_i(60^{\circ}\text{C}) * \frac{(T - T_i)}{(60 - T_i)}$$

D(T): Demanda de agua caliente sanitaria anual a la temperatura T elegida.

D_i(T): Demanda de agua caliente sanitaria para el mes i a la temperatura T elegida.

D_i(60°C): Demanda de agua caliente sanitaria para el mes i a la temperatura de 60°C.

T: Temperatura del acumulador final.

T_i: Temperatura media del agua fría en el mes i.



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Demanda

Demanda

- Se considerará **ocupación plena**, salvo instalaciones de uso residencial turístico en las que se justifique un perfil de demanda propio originado por ocupaciones parciales.
- En el caso de edificios de varias viviendas o usuarios de agua caliente, se considera la suma de las demandas de todos ellos.

Radiación en Panamá

CIUDAD	RADIACIÓN HORIZONTAL PANAMA (Fuente ReetScreen y NASA)												LATITUD
	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Changuinola	4.14	4.56	4.89	4.63	4.16	4.09	4.00	3.94	4.14	3.90	3.59	3.70	9.40
David	4.94	5.56	5.61	5.03	4.44	4.00	4.19	4.28	4.28	4.00	5.11	4.42	8.40
Penonomé	4.45	5.42	5.89	5.73	5.62	5.30	5.21	5.29	5.31	4.95	4.26	4.12	8.30
Colón	4.92	5.85	6.40	6.28	6.02	5.53	5.40	5.46	5.48	4.99	4.46	4.51	9.21
Kusapin	4.64	5.23	5.65	5.35	4.89	4.24	3.90	4.14	4.77	4.42	3.89	3.86	9.20
Ukupseni	5.18	5.49	5.81	5.49	4.60	4.18	4.33	4.46	4.55	4.34	4.04	4.34	9.30
Ustupo	5.53	5.78	6.07	5.76	5.01	4.61	4.89	4.96	4.85	4.64	4.41	4.70	9.10
Jaqué	6.02	6.48	6.81	6.06	4.74	3.86	4.02	4.16	4.18	4.13	4.24	4.86	7.50
La Palma	5.44	5.97	6.34	5.83	4.88	4.32	4.43	4.44	4.33	4.22	4.23	4.62	8.40
Chitré	5.44	6.04	6.37	5.69	4.61	4.13	4.13	4.14	4.03	3.84	4.04	4.60	8.00
Las Tablas	4.48	5.42	5.80	5.52	5.23	4.75	4.75	4.86	4.88	4.80	4.41	4.23	7.45
Tocumen	4.97	5.39	5.22	5.39	4.64	4.42	4.50	4.33	4.72	4.47	4.33	5.06	9.10
Panamá	5.10	5.73	6.02	5.73	4.69	4.04	4.17	4.18	4.25	4.20	4.20	4.33	9.00
Santiago	4.83	5.44	6.00	5.28	4.86	4.39	4.69	4.75	4.39	4.31	4.42	4.42	8.10
Río de Jesús	6.17	6.72	6.82	5.98	4.88	4.54	4.66	4.57	4.31	4.24	4.51	5.19	8.00
Soná	4.50	4.98	5.46	5.00	4.20	4.04	3.96	3.84	3.99	3.76	3.69	3.96	8.00



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Existen tres tipos de métodos para el cálculo de sistemas):

- Método simplificado
- Métodos de correlación (f-chart)
- Métodos de simulación dinámica (TRNSYS)

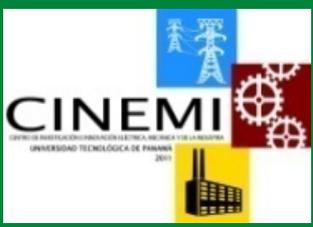


Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Método simplificado

Nº ocupantes / camas [1]			
Consumo diario ACS por persona o cama a 60°C [2]			
Consumo diario ACS a 45°C en l/día [3]	$[1] \times [2] \times (T - T_i) / (60 - T_i)$	Volumen de acumulación a 45°C en l [4]	≈ 3
Nº colectores [5]	[4]:150	Superficie colectora en m ² [6]	[5] x 2



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Método simplificado

Ejemplo:

En una edificación se requiere agua para 5 personas a 45°C.

$T_i = 25^\circ\text{C}$

Nº ocupantes / camas [1]	5		
Consumo diario ACS por persona o cama a 60°C [2]	50		
Consumo diario ACS a 45°C en l/día [3]	$[1] \times [2] \times (T - T_i) / (60 - T_i)$ 111.11 112	Volumen de acumulación a 45°C en l [4]	≈ 3 112
Nº colectores [5]	$[4] : 150$ 1	Superficie colectora en m ² [6]	$[5] \times 2$ 2



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

- 1974. Creado por los padres de un programa de simulación dinámica para sistemas solares térmicos (TRNSYS)
- MOTIVACIÓN:
 - Falta de potencia de cálculo de los ordenadores
 - Simulación de:
 - Sistemas solares de ACS sistemas
 - Solares de aire
 - Configuraciones determinadas
- LIMITACIÓN DE CONFIGURACIONES



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

- CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES: Cálculo en base MENSUAL
- Basado en PARAMETROS ADIMENSIONALES del sistema
- El resultado es el RENDIMIENTO MEDIO del sistema
- Proporciona CORRELACIONES entre estos parámetros del sistema y el rendimiento medio: CURVAS-F
- Las correlaciones se han encontrado realizando la SIMULACIÓN DINÁMICA DETALLADA de los sistemas (TRNSYS)
- También se han comparado con datos experimentales
- 300 simulaciones para una única zona climática



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: **1. Calcular, mes a mes, el consumo energético mensual**

$$Q_a = C_e * m * (t_{ac} - t_r) * n * \rho$$

- **Q_a**: Carga calorífica mensual [J/mes].
- **m**: Cantidad de agua consumida por día [l/día].
- **C_e**: es el calor específico del agua (4187 J/kg.°C).
- **t_{ac}**: temperatura de acumulación del ACS en °C (normalmente 45°C).
- **t_r**: temperatura del agua fría de red en °C, (tabla 4).
- **n**: número de días del mes considerado.
- **ρ**: densidad del agua (1 kg/l).|



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: **2. Calcular la energía incidente E sobre la superficie del captador con la inclinación correspondiente**

$$E = 0,94 * k * H \text{ (MJ/m}^2 \text{ día)}$$

H= energía sobre la superficie horizontal

k = coeficiente de corrección



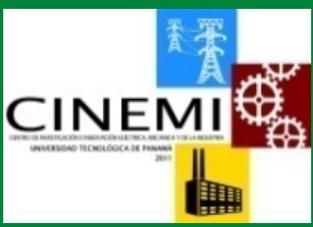
Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: **3. Hallar la intensidad incidente I sobre la superficie del captador**

Hay que dividir la energía E (en joules) entre el número de horas útiles de sol (en segundos).



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: *4. Calcular el rendimiento mensual del colector*

$$\eta = F_R * (\tau * \alpha)_N - F_R * U_L [(t_m - t_a) / I], \text{ donde:}$$

- t_m : temperatura media del fluido caloportador en °C (normalmente 45°C).
- t_a : temperatura ambiente en °C, (tabla 3).



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: **5. Calcular la aportación solar media diaria por m² de colector:**

$$\eta * E \text{ (en MJ/m}^2\text{día)}$$



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: **6. Corrección de la aportación:**

Caso general: $0,85 * \eta * E$

Caso desfavorable: $0,8 * \eta * E$ (si no existe seguridad sobre la validez de los datos utilizados en los cálculos anteriores)

Caso favorable: $0,9 * \eta * E$ (si se considera que los datos utilizados son perfectamente válidos para la instalación elegida)



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: **7. Cálculo de la superficie captadora total necesaria (m^2) y del volumen de acumulación total (l):**

Superficie Necesaria (m^2) = demanda anual (MJ/año)/Aportación solar anual (MJ/m^2 año)

Q_a / E corregida

Se redondea a entero, luego dicho número se multiplica por la superficie útil del colector para conocer los m^2 de superficie captadora.



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: **7. Cálculo de la superficie captadora total necesaria (m^2) y del volumen de acumulación total (l):**

El acumulador se calcula considerando 70 litros de acumulación por m^2 instalado.

$$V = \text{Volumen Total de Acumulación (l)} = 70 * S$$

Luego hay que corregir el valor de Q_a

$$Q_a = Q_a * \text{superficie captadora a instalar} / \text{superficie necesaria}$$



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: **8. Cálculo del parámetro Y**

$$Y = \frac{F_R (\tau\alpha)_n \times (F'_R / F_R) \times \left(\frac{\overline{(\tau\alpha)}}{(\tau\alpha)_n} \right) \times E \times n \times S}{Q_a}$$



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

Pasos: *9. Cálculo del parámetro X*

$$X = \frac{F_R U_L \times (F'_R / F_R) \times (t_{Ref} - t_a) \times \Delta tiempo \times S}{Q_a} \times K_1 \times K_2$$



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de correlación (método f-chart)

$$X = \frac{\text{Perdidas del captador a Temp. referencia}}{\text{Carga total mensual}}$$

$$Y = \frac{\text{Energía Solar absorbida en Captadores}}{\text{Carga total mensual}}$$

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 \cdot Y^3$$

Con: $0 < Y < 3$ y $0 < X < 18$

Metodología de correlación (método f-chart)

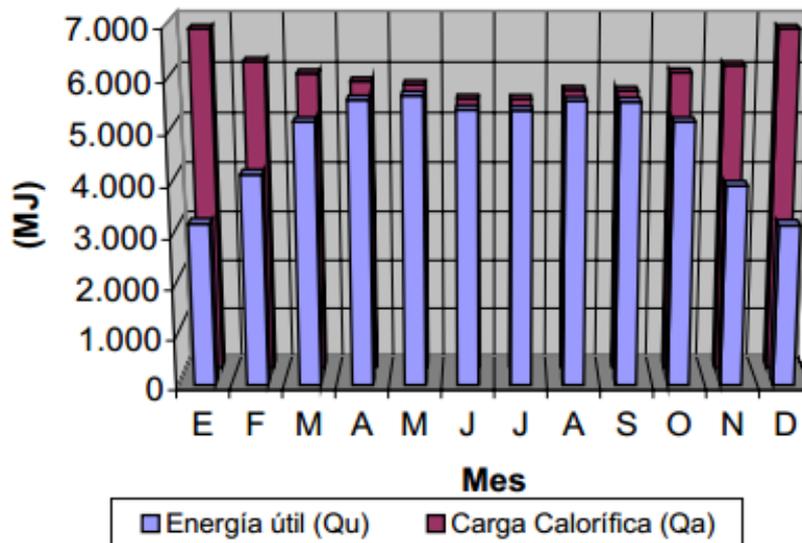
La energía útil (Q_u) captada cada mes tiene el valor:

$Q_u = f * Q_a$, donde:

- Q_a : Carga calorífica mensual (MJ/mes).

12. Cálculo de la cobertura solar anual

$$\text{Cobertura anual} = \frac{\sum_{\text{Enero}}^{\text{Diciembre}} Q_u \text{ necesaria}}{\sum_{\text{Enero}}^{\text{Diciembre}} Q_a \text{ necesaria}}$$



Metodología de correlación (método f-chart)

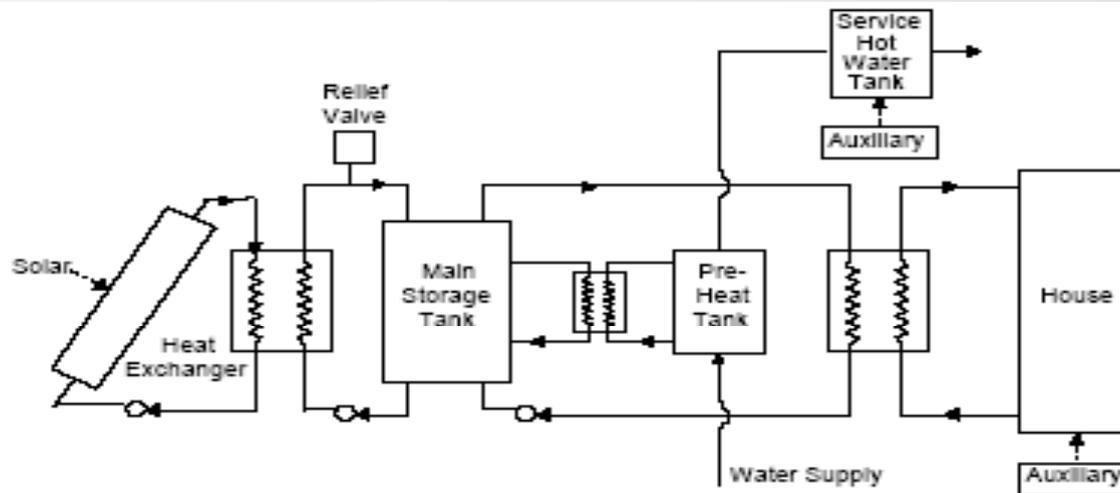


Figure 4.3: Water Storage Space and Water Heating System



Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

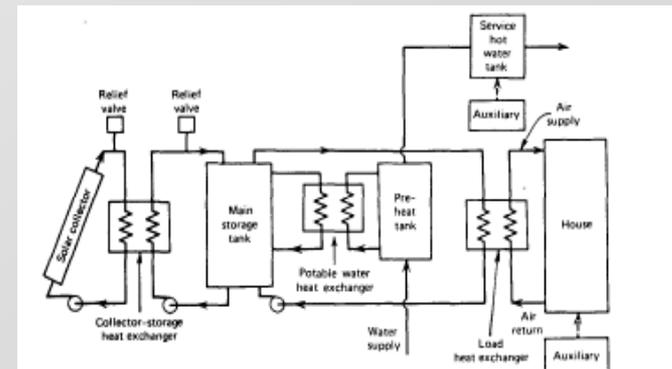
Metodología de correlación (método f-chart)

Ejemplo: (excel)

Metodología de simulación (TRNSYS, TRANSOL)

Con la simulación se intenta reproducir de forma teórica el funcionamiento de un sistema, pudiéndose obtener información detallada del comportamiento de cada uno de los componentes que conforman el sistema.

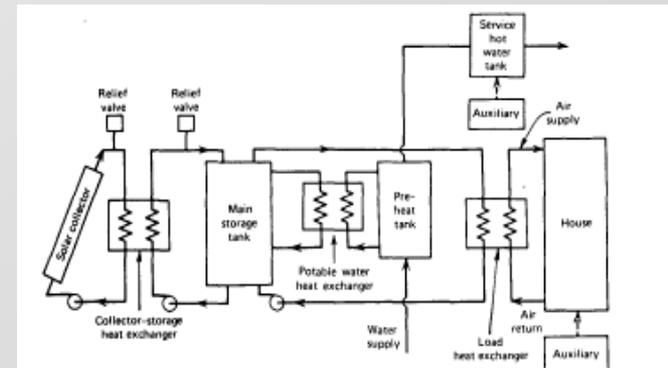
Los errores de buenos programas de simulación como TRNSYS respecto al comportamiento real de los sistemas pueden ser menores al **1%**.



Metodología de simulación (TRNSYS, TRANSOL)

VENTAJAS DE UN MÉTODO DE SIMULACIÓN FRENTE A EXPERIMENTACIÓN

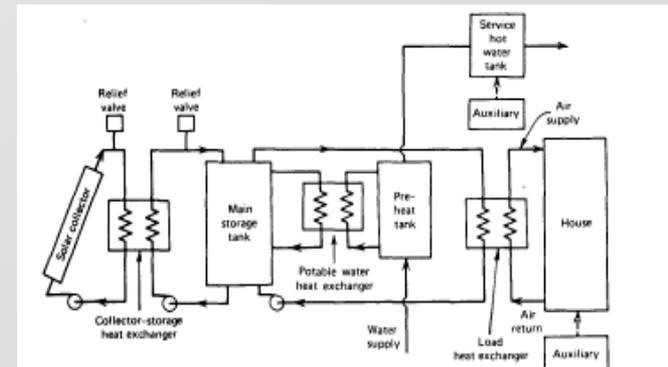
- Es varios ordenes de magnitud **más rápida** que la experimentación
- Es varios ordenes de magnitud **más económica** que la experimentación
- Es más adecuada para sistemas que exhiben una **dependencia no lineal de los datos climáticos**
- Permite estudiar de forma adecuada y simple la variación entre el **comportamiento a corto y largo termino de sistemas**



Metodología de simulación (TRNSYS, TRANSOL)

VENTAJAS DE UN MÉTODO DE SIMULACIÓN FRENTE A EXPERIMENTACIÓN

- Es varios ordenes de magnitud **más rápida** que la experimentación
- Es varios ordenes de magnitud **más económica** que la experimentación
- Es más adecuada para sistemas que exhiben una **dependencia no lineal de los datos climáticos**
- Permite estudiar de forma adecuada y simple la variación entre el **comportamiento a corto y largo termino de sistemas**

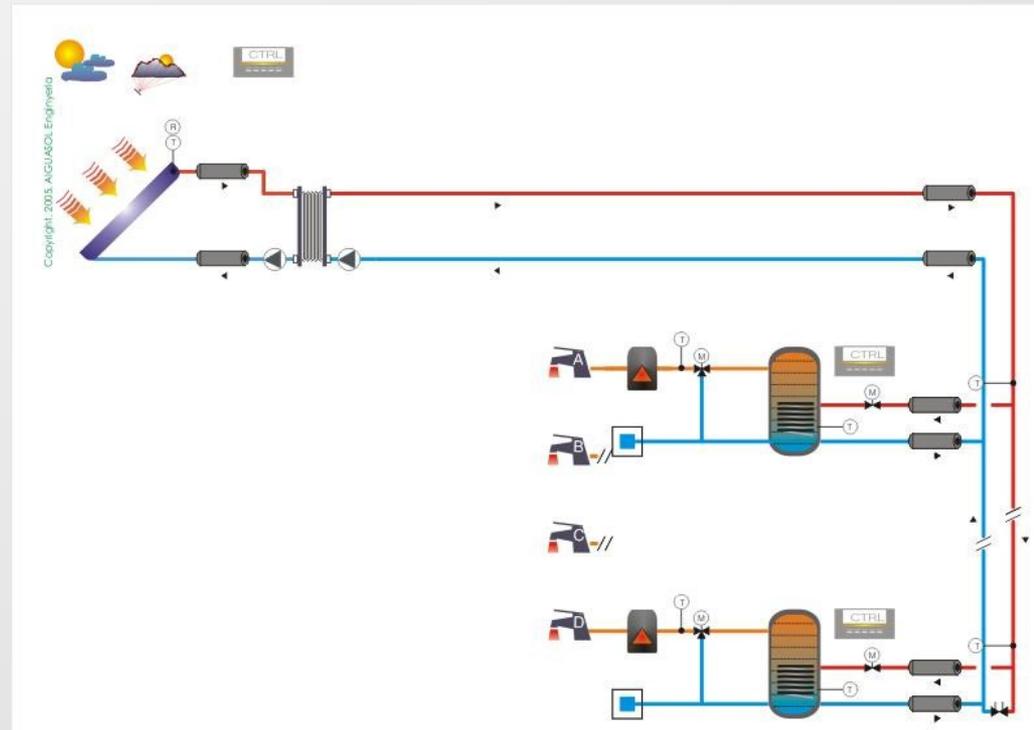


Cálculo de una instalación solar térmica

Cálculo de Sistemas Solares Térmicos - Métodos

Metodología de simulación (TRANSOL)

Ejemplo:





Gestión eficiente de la Energía

Bibliografía

- *NABCEP. 2013. The NABCEP (SH) Solar Heating Installer Resource Guide. <http://www.nabcep.org/resources>*
- *Zabalza, I. 2007. Energía solar térmica. El colector de placa plana: elementos constructivos, ecuación de rendimiento y montaje.*
- *Instituto Tecnológico de Canarias. 2007. Guía didáctica de energía solar.*
- *Placco.C., Saravia, L., Cadena, C. n.d. Colectores solares para agua caliente.*
- *Weiss, W. ,Mauthner, F. (2012). Solar Heat Worldwide Markets and Contribution to the energy Supply 2010.*



Gestión eficiente de la Energía

Bibliografía

Regionales

- *REDIENE (Red Iberoamericana de Energía)*
www.rediene.cu/
- *Organización Lationamericana de Energía*
www.olade.org/
- *proyecto TECH4CDM* www.tech4cdm.com/

Europeas

- *European Solar Thermal Industry Federation*
www.estif.org/
- *Solar District Heatieng* www.solar-district-heating.eu/

Mundiales

- *International Energy Agency* www.iea-shc.org/
- *Solrico* www.solrico.com/
- *Solar Thermal World* www.solarthermalworld.org/



Gestión eficiente de la Energía

Bibliografía

Software

- *International Energy Agency*
- *Retscreen*
- *Transol*
- *TRNSYS*

www.iea-shc.org/

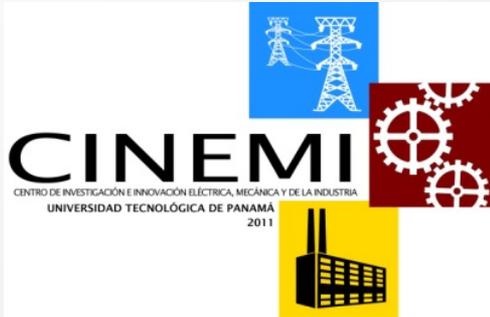
www.retscreen.net/

www.aiguasol.com

www.trnsys.com



¡Gracias!



Centro de Investigación e Innovación Eléctrica,
Mecánica y de la Industria (CINEMI)
Universidad Tecnológica de Panamá

www.cinemi.utp.ac.pa

rhona.diaz@utp.ac.pa