



Diseño de un calentador solar de agua para condiciones meteorológicas de la ciudad de huacho

Design of solar water Heater for meteorological conditions of Huacho.

Julio César Valencia Bardales¹, Carlos Roberto Pesantes Rojas¹, Aída Nerida Falcón Cerna¹, Juan Carlos Broncano Torres¹

RESUMEN

Objetivo: Fue diseñar un calentador solar para agua, para las condiciones meteorológicas de Huacho, el cual supuestamente debe satisfacer una demanda de agua caliente de 800 litros/día, temperatura de 45°C y hora de consumo 7:00 del día siguiente. **Material y Métodos:** Se utilizaron información meteorológica solar y de temperatura ambiente para el lugar de la aplicación, propiedades físicas de los materiales considerados en el diseño, una computadora personal, software Excel e información sobre el tema de los autores J. Duffie y R. Espinoza. Primero se diseñó una unidad de colector básico, luego se determinó el número de estas unidades que suministren la energía necesaria que permita satisfacer los requerimientos de la demanda antes indicada. En este proceso, se utilizaron desarrollos matemáticos que involucran procesos térmicos de captación neta y pérdidas de calor, métodos matemáticos de interpolación simple, método de cálculos a intervalos finitos, de iteración y recalcular. **Resultados:** Se diseñó un Colector básico con eficiencia de aleta 0,88, eficiencia de placa 0,89, rejilla de siete tubos y relación eficiencia de Placa/Costo de placa de 0,011, cinco colectores básicos, temperatura de 46,5°C alcanzada a las 15:00. **Conclusión:** Se verificó que la data meteorológica del lugar influye en el diseño de la aplicación propuesta, evaluada para un día de verano, enero del 2014. Respecto a los resultados, el número de colectores básicos podría reducirse a cuatro unidades para una temperatura algo menor a los 45°C, lo que redundará en ahorro de materiales y costos.

Palabras clave: Calentador solar, colector básico, rejilla de tubos, factor de eficiencia.

ABSTRACT

Objective: It was designing a solar water heater, for weather conditions Huacho, which is supposed to satisfy a demand hot water 800 liters / day temperature of 45 ° C and time of 7:00 on the next day consumption. **Methods:** Solar weather information were used and ambient temperature for the site of application , physical properties of the materials considered in the design , personal computer , Excel software and information on the subject of the authors J. Duffie and R. Espinoza. First a basic unit collector was designed, then the number of these units that provide the necessary energy that will satisfy the requirements of the aforementioned demand was determined. In this process, mathematical developments involving net capture thermal processes and heat losses, simple mathematical interpolation methods, a finite



calculation method of iteration intervals used and recalculation. **Results:** Basic Manifold with 0.88 fin efficiency, efficiency badge 0,89, seven tubes and grid efficiency ratio of plate / plate cost 0,011, five basic collectors, temperature reached 46.5 ° C at 15: 00. **Discussion:** It was verified that the meteorological data of the location influences the design of the proposed application, evaluated for a summer day, January 2014. Regarding the results, the number of basic collectors could be reduced to four units to a temperature somewhat less than 45 ° C, which will result in savings in materials and costs.

KEY WORDS: Solar heater, basic collector, tube grille, efficiency factor.

INTRODUCCIÓN

Trabajos de construcción y de diseño de estos aplicativos tecnológicos han sido realizados desde los años 60, no solo en el Perú sino en diferentes países latinoamericanos, cuyos artículos fueron publicados en las Memorias de los Simposios y Eventos Internacionales de Energía Solar llevados a cabo en Perú y Bolivia. Sistema solar aplicado al requerimiento de agua caliente para una lavandería y utilizando como método de trabajo el análisis numérico (Olenchnowicz, 1995), método F aplicado al diseño de un sistema de calentamiento de agua de Laboratorio con fines experimentales (Quinto 1995), ecuaciones dispersas para el cálculo de colectores para el calentamiento de agua (Garg, 1982), (Manrique, 1984) y (Duffie, 1974). Toman importancia en este aspecto, las ecuaciones para el cálculo de un colector plano y para un sistema de calentamiento de agua expuesto en los guiones de clase del Ingeniero Rafael Espinoza- Segunda Especialización en Energía Solar en la Facultad de Ciencias de la UNI – Lima (1995-1996). Siendo los que más han contribuido con la metodología al desarrollo del trabajo los autores J. Duffie, J. Manrique y R. Espinoza.

El proyecto encontró justificación en las razones siguientes:

La Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión (UNJFSC), institución promotora e interesada en el desarrollo de la investigación tecnológica en la línea de las Energías Renovables (ER), no cuenta con sistemas elaborados para el dimensionamiento de aplicativos tecnológicos de esta clase, por lo que urge acumular conocimiento y experiencia en el saber hacer. Es cierto que otras universidades como la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y otras del interior del país, así como pequeños empresarios poseen y usan este conocimiento; pero eso es parte de su conocimiento, no disponible a cualquier interesado.

El Proyecto de creación del Centro de Investigación Experimental y Tecnológica en Energías Renovables y Meteorología de la UNJFSC, por ahora en gestión hacia su consolidación.

La existencia de muchas comunidades rurales pobres carentes del servicio de energía eléctrica del valle Huaura – Huacho, pero beneficiados con un gran potencial eólico - solar, donde caben las aplicaciones tecnológicas de las ER que podrían favorecer a su desarrollo.

Es tarea importante que las universidades estatales peruanas, promuevan el desarrollo de las aplicaciones de las ER, para contribuir con energía al desarrollo nacional, frente al déficit de energía que se manifiestan en el país y el mundo.

Por todo ello, como coordinador responsable del proyecto, egresado del Programa SEPES-UNI, titulado en la Segunda Especialización en Energía Solar y autor del Proyecto de "Creación del Centro de Investigación Experimental Tecnológica en Energías Renovables y Meteorología" -



UNJFSC, conjuntamente con otros colegas matemáticos de la Facultad de Ciencias; emprendimos la realización de este trabajo que redundará, en beneficios personales y de la institución universitaria.

El objetivo general del proyecto fue diseñar un calentador solar para agua, para las condiciones meteorológicas de la ciudad de Huacho para una demanda de agua caliente de 800 litros/día, temperatura de 45°C, a las 7:00 del día siguiente; destacando la influencia de las condiciones meteorológicas del lugar y de otros parámetros, en la obtención del diseño.

Los objetivos específicos del trabajo fueron:

Demostrar que tanto temperatura ambiente como materiales seleccionados para el diseño, caracterizados por sus propiedades físicas, influyen en la determinación de los factores de eficiencia de elemento placa del calentador solar para agua.

Demostrar que tanto la data meteorológica solar disponible para la ciudad de Huacho y materiales considerados para el sistema, influyen en el diseño del colector solar básico y del calentador para agua integrado como sistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño estimado, tuvo como fecha de aplicación el día 8 de enero del 2014, supuestamente para satisfacer una supuesta demanda de agua caliente de 800 litros /día para un albergue niños especiales, donde 20 niños utilizarán el agua para bañarse en cuatro duchas a las 7:00 del día siguiente, estando ésta a la temperatura de 45°C.

MATERIALES

Se utilizaron como materiales: los básicos de escritorio, una computadora personal, hoja de cálculo Excel y modelos matemáticos asociados con los procesos térmicos que intervienen en el funcionamiento del aplicativo, hallado en la información bibliográfica.

DATOS METEOROLÓGICOS Y OTROS

Dato del Promedio anual de la irradiancia solar diaria por metro cuadrado para el distrito de Humaya, adoptado para la ciudad de Huacho, dado que para ésta no se encontró data meteorológica solar histórica y por ser ambas ciudades cercanas entre sí (Farrington, 1982) y poseer condiciones meteorológicas semejantes para los meses de verano; publicado por Atlas Minería y Energía en el Perú, 2001 del Ministerio de Energía y Minas. Otros datos de entrada fueron las coordenadas geográficas de Huacho, datos generales de órbita solar y la temperatura ambiente del lugar procesada para intervalos horarios usando el método de interpolación simple y el software Logger Pro, a partir de algunos pocos datos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrografía del Perú (SENAMHI) para el día 08 de enero del 2014. Ver Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. *Datos de las coordenadas geográficas de Huacho, coordenadas del Sol y energía.*



DATOS DE LA FECHA Y COORDENADAS DEL LUGAR DE APLICACIÓN	MAGNITUD	VALOR	UNIDAD
FECHA DE INTERÉS	DÍA	08 de Enero, 2014	DÍA
NÚMERO DEL DÍA DEL DISEÑO	n	8	DÍA
NÚMERO DE DÍAS DEL AÑO	N	365	DÍA
NÚMERO PARA EL CÁLCULO DE LATITUD EN LA ECUACIÓN DE LA LATITUD	No	284	DÍA
NÚMERO PI	π	3,1416	
ÁNGULO DE LA ÓRBITA SOLAR	Φ	360	°
LATITUD DE HUACHO	λ	-11,1	°
ÁNGULO DE ORIENTACIÓN DEL COLECTOR	ϕ	180	°
ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL COLECTOR	β	11,1	°
DECLINACIÓN SOLAR MÁXIMA DEL SOL	δ_{max}	23,45	°
PROMEDIO ANUAL DE LA IRRADIANCIA SOLAR DIARIA PARA HUMAYA (*)	E/A	4,65	kWh/m ²

(*)Fuente: Atlas Minería y Energía en el Perú 2001 – Ministerio de Energía y Minas; valor adoptado para Huacho por la cercanía a Humaya

Tabla 2. Datos de la temperatura ambiente (T_{amb}) para Huacho, fecha 08 de Enero 2014

NÚMERO	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
HORA	h	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
TEMPERATURA	°C	21,00	20,16	19,93	19,98	21,18	22,61	24,10	25,76	27,39	28,84	29,50	29,93	30,14	29,62	28,87	27,98	26,35	24,67	23,06	22,06	21,29	21,00

Cabe señalar que en el trabajo no se han utilizado instrumentos físicos de medición pero si datos con las propiedades físicas de los materiales (madera, platinas y tubos de fierro galvanizado, vidrio semidoble transparente, poliestireno expandido, cartón, tanque de fibra de vidrio, lana de vidrio, pintura negro mate y otros que facilitan la integración del todo) considerados para el diseño. Las propiedades físicas (térmicas y ópticas) de los materiales utilizados, fueron tomadas de la información encontrada en los textos (Manrique, 1981), (Karlekar 1985),(Valera, 1993) y Tablas de empresas comerciales Milliarium (2014) y Buenas Tareas (2012).

Otros elementos que se incluyeron en el diseño del calentador solar son los valores a priori de las dimensiones que se asumieron para la placa, tubos de la rejilla y envoltura del colector, lo cual depende del corte en tres fragmentos completos de cada tubo comercial de 6,4 m de longitud; ello con fines de optimizar el uso de dichos materiales. Especificaciones de fábrica de algunos insumos y propiedades físicas de materiales. Ver tablas 3 - 9

Tabla 3. Dimensiones y datos de placa colector asumidos para el diseño del colector.

Parámetros de placa	Magnitud	Valor	Unidades
Longitud de placa colector	X_{placa}	2,1	m
Ancho de placa colector	Y_{placa}	0,96	m
Espesor de placa colector	Z_{placa}	0,00079	m
Conductividad térmica de placa	$k_{fierrog}$	73	W/(m K)
Temperatura de placa colector	T_{placa}	333	K

Tabla 4. Dimensiones y propiedades físicas del tubo de rejilla



Parámetros del tubo de rejilla	Simbología	Valor	Unidades
Longitud de tubo	X_{tubrej}	2,1	m
Diámetro exterior	$(D1)_{\text{ext}}$	0,0217	m
Diámetro interior	$(D1)_{\text{int}}$	0,0166	m
Densidad del hierro galvanizado	δ_{fierrog}	7208	kg/m ³
Calor específico del hierro galvanizado	c_{fierrog}	452	J/(kg °C)
Conductividad del hierro galvanizado	k_{fierrog}	73	W/(m K)

Tabla 5. Dimensiones y propiedades físicas del aislante térmico, poliestireno expandido

Parámetros del tecnopor	Magnitud	Valor	Unidades
Espesor	Z_{tecnopor}	0,0381	m
Conductividad térmica	k_{tecnopor}	0,0303	W/(m.K)

Tabla 6. Dimensiones y posición del Colector

Parámetros del Colector	Magnitud	Valor	Unidades
Altura del del colector	Z_{colect}	0,093	m
Inclinación del colector	β	11,108	°

Tabla 7. Otros parámetros del colector y constantes físicas

Otros parámetros importantes	Magnitud	Valor	Unidades
Separación placa - vidrio	$Z_{\text{p-v}}$	0,04	m
Temperatura ambiente asumida	T_{amb}	287,7	K
Temperatura inicial del vidrio asumida	$T0_v$	313	K
Constante de Estefan Boltzman	σ	0,000000567	W/(m ² .K ⁴)
Velocidad de viento	v	1	m/s
Aceleración de la gravedad	g	9,8	m s ⁻²

Tabla 8. Propiedades físicas del fluido a calentar

Propiedades físicas del agua	Magnitud	Valor	Unidades
Densidad	δ_{agua}	988,9	kg/m ³
Viscosidad	μ_{agua}	0,000000542	m ² s ⁻¹
Conductividad térmica	k_{agua}	0,641	W/(m K)
Coefficiente de expansión volumétrica	B_{agua}	0,003	1/K
Número de Prandlt	Pr_{agua}	3,545	1
Calor específico	c_{agua}	4186	J/(kg K)
Flujo de masa de agua	m/t	0,13	kg/s

Tabla 9. Valores de las propiedades ópticas de materiales utilizados.

Propiedades ópticas de Materiales	Magnitud	Valor	Unidades
Emitancia de Placa	ϵ_p	0,91	1
Emitancia del vidrio	ϵ_v	0,94	1
Emitancia del espacio exterior	ϵ_a	1,00	1
Índice de refracción del vidrio	η	1,25	1
Cuadrado del índice de refracción	η^2	1,563	1
Número de cubiertas de vidrio	N_v	1,00	1
Coefficiente de extinción del vidrio	KL	0,037	1
Factor de reflectancia difusa del vidrio (01 cubierta)	ρ_d	0,16	1
Absortancia de la pintura negro mate (placa)	α	0,92	1
Tramitancia por absorción del vidrio (cubierta)	τ_v	0,964	1
Factor 01 (**)	$1 - \alpha$	0,08	1
Factor 02 (**)	$(1-\alpha)\rho_d$	0,013	1
Factor 03 (**)	$1-(1-\alpha)\rho_d$	0,987	1
Factor 04 (**)	$1-\tau_v$	0,036	1

COMPONENTES DEL CALENTADOR DE AGUA

- 1) Unidad de colector o colector básico
- 2) Tanque
- 3) Conexiones externas

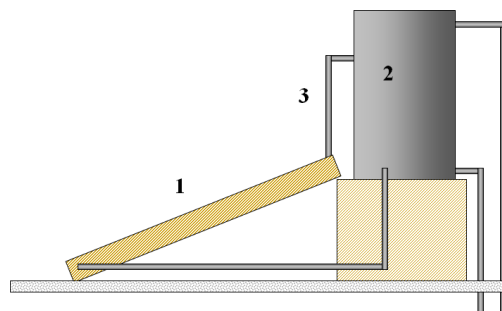


Figura 1. Componentes del calentador solar para agua

Forman parte del colector 1, la rejilla de tubos y la placa (ambos de hierro galvanizado), el aislamiento térmico (tecnopor y cartón), la envoltura (madera) y la cubierta de vidrio plano. La rejilla lo constituyen N tubos largos paralelos soldados perpendicularmente a dos tubos cabeceros cortos dando forma a la rejilla. La rejilla está soldada a la placa a lo largo de los tubos largos. El conjunto pintado con pintura negro mate, está colocado en la caja térmica de madera con sus paredes y fondo aislados térmicamente. Los tubos cabeceros ocupan los extremos superior e inferior del colector inclinado (Figura 1). El colector básico se completa con la cubierta de vidrio colocada como tapa de la caja térmica. Cuando el subsistema rejilla placa se calienta por acción de la radiación solar incidente y la generación del efecto invernadero, el calor captado es transferido al agua que circula por los tubos. El agua fría ingresa al colector por el tubo cabecero inferior, se calienta mientras asciende por los tubos largos (principio del termosifón) y sale del colector como agua caliente por el tubo cabecero superior camino hacia el tanque (parte superior) de almacenamiento vía la conexión externa de salida. El agua fría sale de la parte inferior del tanque hacia el colector vía la conexión externa de salida, repitiéndose el proceso una y otra vez durante el día.

DISEÑO DE LA UNIDAD DE COLECTOR

La unidad de colector básico es subsistema cerrado y del tipo plano. El esquema térmico básico de dicho dispositivo se representa en la Figura 2.

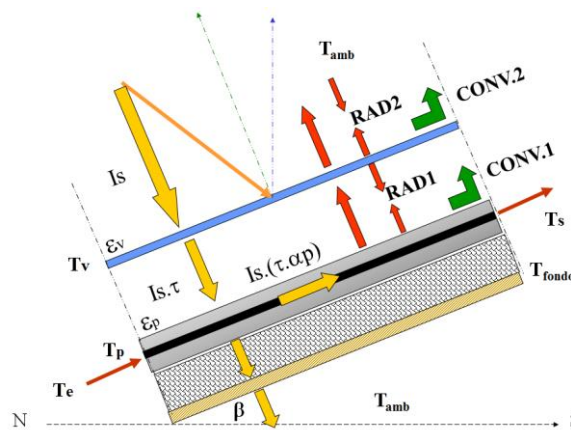


Figura 2. Esquema Térmico Básico del Colector

La ecuación del BALANCE DE ENERGÍA DEL SISTEMA es:

Calor absorbido por el colector = Calor útil en el colector + Pérdidas desde el colector

$$A_{\text{colector}} I_s (\tau\alpha)_{\text{ef}} = \dot{m} c_p [(T_{\text{agua}})_s - (T_{\text{agua}})_e] + U_L A_{\text{colector}} (T_p - T_{\text{amb}})$$

Y la EFICIENCIA DEL SISTEMA es:

$$\eta = \frac{\text{Calor util}}{\text{Radiacion solar incidente}} = (\tau\alpha)_{\text{ef}} - U_L \left[\frac{T_p - T_{\text{amb}}}{I_s} \right]$$

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN EL COLECTOR:

Dentro del colector se producen procesos de captación de calor pero también pérdidas de calor hacia el exterior que se dan por las paredes laterales, por el fondo y a través de la cubierta de vidrio. Por las paredes laterales y fondo en forma de pérdidas por conducción, despreciando aquellas por convección y por la parte superior en forma de pérdidas por convección y radiación. Las pérdidas por radiación y convección por la parte superior se dan entre tres superficies calientes paralelas que emiten radiación, ellas son la placa negra, la cubierta de vidrio y el ambiente externo (considerada como la tercera superficie plana paralela), todas caracterizadas por sus respectivos valores de emitancias especificadas en la Tabla 5. En las figuras 3 y 4 se observan con flechas las direcciones en que se producen las pérdidas y el circuito de resistencias térmicas elaboradas para el colector, respectivamente.

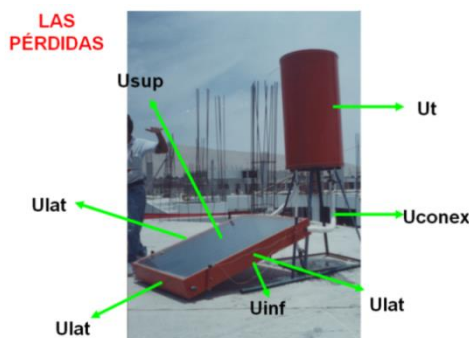


Figura 3. Diagrama de pérdidas en el colector, tanque y conexiones externas

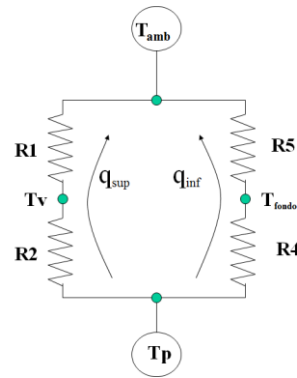


Figura 4. Circuito de resistencias térmicas del colector

Asumiendo valores iniciales de temperatura de placa de $T_p = 60^\circ\text{C}$ (333 K), temperatura de vidriote $T_v = 40^\circ\text{C}$ (313 K) y de ambiente externo de $T_{amb} = 14,7^\circ\text{C}$ (287,7 K), valores de dimensiones de placa y espesores de materiales aislantes y conductores especificados de fábrica (Tablas 3, 4 y 5), se resuelve fácilmente el problema de las pérdidas, utilizando las ecuaciones de la física de transferencia de calor y empíricas de la hidrodinámica con calor, conocidas para el caso. La Figura 4, muestra los tipos de pérdidas de calor tanto por el fondo y la parte superior del colector; así como la ganancia de calor por el agua dentro de los tubos.

$$\dot{Q}_{sup} = h_{12} A (T_p - T_{amb}) \quad \dot{Q}_{inf} = h_{34} A (T_p - T_{amb})$$

$$\dot{Q}_{sup} = \frac{(T_p - T_{amb})}{(R_1 + R_2)} \quad \dot{Q}_{inf} = \frac{(T_p - T_{amb})}{(R_3 + R_4)}$$

$$q''_{sup} = h_{12} (T_p - T_{amb}) \quad q''_{inf} = h_{cond} (T_p - T_{amb})$$

Las pérdidas de por la parte superior del colector y por el fondo se evalúan con las ecuaciones siguientes:

$$U_{sup} = \frac{1}{\frac{1}{h_{12}}} \quad U_{inf} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cond}}}$$

$$U_{sup} = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right]} \quad U_{inf} = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_{cond}} \right]}$$

$$U_{\text{sup}} = \frac{1}{\left[\frac{1}{hr_{pv} + hc_{pv}} + \frac{1}{hr_{va} + hc_{va}} \right]} \quad U_{\text{inf}} = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_{\text{cond}}} \right]} = h_{\text{cond}} = \frac{k_{\text{ais}}}{Z_{\text{ais}}}$$

Los coeficientes de pérdidas por radiación se calculan con las ecuaciones siguientes, que corresponden a tres superficies radiantes paralelas: placa, vidrio y ambiente.

$$hr_{pv} = \frac{\sigma \left[(T_p)^2 + (T_v)^2 \right] [T_p - T_v]}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad hr_{va} = \frac{\sigma \left[(T_v)^2 + (T_{\text{amb}})^2 \right] [T_v - T_{\text{amb}}]}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_a} - 1}$$

$$hc_{pv} = \frac{(P_{\text{colector}})(T_p - T_v)^{(0,310)}}{(Z_{pv})^{(0,070)} (K)^{(0,310)}} \left[1 - (0,0018) \left[\frac{1}{2} (T_p + T_v) (1K)^{-1} - 273 - 10 \right] \right]$$

$$hc_{va} = \left[5,7 \frac{W}{m^2 K} \right] + \left[3,8 \frac{W s}{m^3 K} \right] v_{\text{viento}} \quad U_{\text{lat}} = \frac{k_{\text{ais}} Z_{\text{colector}} P_{\text{colector}}}{Z_{\text{ais}} A_{\text{colector}}}$$

Finalmente, se suman los coeficientes parciales de pérdidas para obtener el coeficiente global de pérdidas en el colector.

$$(UL)_{\text{colector}} = U_{\text{sup}} + U_{\text{inf}} + U_{\text{lat}}$$

Tres procesos de recálculo o de iteración mejoran los valores asumidos inicialmente para la temperatura de la cubierta de vidrio, de los coeficientes convectivos placa-vidrio y vidrio-ambiente externo, los coeficientes de pérdidas laterales, por el fondo, por la parte superior y finalmente el global de pérdidas, cuyos resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores de los coeficientes de pérdidas parciales y global en el colector.

COEFICIENTES CALCULADOS	MAGNITUD	VALOR	UNIDADES
COEFICIENTE CONVECTIVO PLACA - CUBIERTA	$(h_{\text{conv}})_{pv}$	2,799	W/(m ² .K)
COEFICIENTE CONVECTIVO CUBIERTA - AMBIENTE	$(h_{\text{conv}})_{va}$	9,5	W/(m ² .K)
TEMPERATURA DE LA CUBIERTA DE VIDRIO	T_v	304,82	K
COEFICIENTE DE PÉRDIDAS - PARTE SUPERIOR	U_{sup}	56,854	W/(m ² .K)
COEFICIENTE DE PÉRDIDAS - PARTE INFERIOR	U_{inf}	0,7953	W/(m ² K)
COEFICIENTE DE PÉRDIDAS - PARTE LATERAL	U_{lat}	0,2245	W/(m ² K)
COEFICIENTE GLOBAL DE PÉRDIDAS	U_L	6,705	W/(m ² K)

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE ALETA

La eficiencia de aleta se calcula usando el factor M y la ecuación de la Eficiencia de Aleta (F_{aleta}) dados a continuación con los resultados de la Tabla 10 y los datos de la Tabla 11.

$$M = \left[\frac{(UL)_{colector}}{Z_{placa} k_{fierrog}} \right]^{1/2}$$

$$F_{aleta} = \frac{\tanh \left[M \left(\frac{W - (D1)_{tex}}{2} \right) \right]}{\left[M \left(\frac{W - (D1)_{tex}}{2} \right) \right]}$$

Tabla 11. Valores calculados de las Eficiencias de aleta para varios tubos.

PARÁMETROS CALCULADOS	MAGNITUD	VALOR	UNIDADES
Factor M	M	10,783	m ⁻¹
Número de tubos	N6	6	1
Número de tubos	N7	7	1
Número de tubos	N8	8	1
Número de tubos	N9	9	1
Distancia entre centros de tubos contiguos	W6	0,160	m
Distancia entre centros de tubos contiguos	W7	0,137	m
Distancia entre centros de tubos contiguos	W8	0,120	m
Distancia entre centros de tubos contiguos	W9	0,107	m
Factor 06	φ6	0,746	1
Factor 07	φ7	0,622	1
Factor 08	φ8	0,530	1
Factor 09	φ9	0,458	1
Tangente hiperbólica del Factor 06	tanh(φ6)	0,633	1
Tangente hiperbólica del Factor 07	tanh(φ7)	0,553	1
Tangente hiperbólica del Factor 08	tanh(φ8)	0,485	1
Tangente hiperbólica del Factor 09	tanh(φ9)	0,429	1
Eficiencia de aleta con 6 tubos	F6	0,848	1
Eficiencia de aleta con 7 tubos	F7	0,888	1
Eficiencia de aleta con 8 tubos	F8	0,916	1
Eficiencia de aleta con 9 tubos	F9	0,935	1

Los resultados de cálculo finales de la eficiencia de aleta se muestran al final de la misma Tabla 7 para varios tubos, obteniéndose la mayor eficiencia con 9 tubos.

CÁLCULO DEL COEFICIENTE PELICULAR DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS TUBOS

Utilizando las ecuaciones dadas a continuación y los primeros datos de la Tabla 8, se determinó el valor coeficiente pelicular de transferencia de calor entre las superficies de los tubos y el agua circula por ellos. El resultado final del coeficiente pelicular se muestra al final de la misma Tabla 8.

$$(h_{conv})_{agua} = \frac{N_u k_{agua}}{(D1)_{tin}} \quad Nu = (0.47) (Ra)^{1/4} \quad Ra = (Gr)(Pr_{agua})$$

$$Gr = \frac{(g)(B_{agua})(D1)_{tin}}{(\mu_{agua})^2}$$

Tabla 12. Datos para el cálculo del coeficiente convectivo entre la superficie interna de los tubos y el agua que circula por ellos y el resultado de éste, calculado al final de la tabla.

PARÁMETRO O PROPIEDAD FÍSICA	MAGNITUD	VALOR	UNIDADES
Número de tubos	N_{tubos}	7	1
Espesor de placa absorbadora	Z_{placa}	0,00079	m
Ancho de la placa colectora	Y_{placa}	0,96000	m
Conductividad térmica de placa	$k_{fierrog}$	73	W/(m K)
Diámetro exterior de tubo largo	$(D1)_{tex}$	0,0217	m
Diámetro interior de tubo largo	$(D1)_{tin}$	0,0166	m
Densidad del agua	δ_{agua}	988,9	kg/m ³
Viscosidad del agua	μ_{agua}	0,000000542	m ² /s
Conductividad del agua	k_{agua}	0,641	W/(m K)
Número de Prandlt	Pr_{agua}	3,545	1
Calor específico del agua	c_{agua}	4186	J/(kg °C)
Aceleración de la gravedad	g	9,8	m/s ²
Temperatura del agua en el centro del tubo	$(T_{dem})_{agua}$	45	°C
Temperatura del agua en el centro del tubo	$(T_{dem})_{agua}$	318	K
Temperatura de la superficie interna del tubo	$(T_{si})_{tubo}$	60	°C
Temperatura de la superficie interna del tubo	$(T_{si})_{tubo}$	333	K
Cálculo de Temperatura media del agua	$(Tm)_{agua}$	325,5	K
Diferencia de temperaturas TUBO - AGUA	ΔT	15	K
Cálculo del Coefic. de expansión volumétrica	B_{agua}	0,003072197	K ⁻¹
Cálculo del Número de Grasshof	Gr	7032213,262	1
Cálculo del Número de Rayleigh	Ra	24929196,01	1
Cálculo del Número de Nusselt	(Nu)	33,21046267	1
Coeficiente convectivo	$(h_{conv})_{agua}$	1282,40	W/(m² K)

CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE PLACA

La Eficiencia de placa (F_{placa}) se calculó usando las ecuaciones de la Resistencia térmica de aleta, de la Resistencia pelicular tubo-agua y la Eficiencia de placa dadas a continuación, con los datos de la Tabla 9. El resultado se muestra al final de la Tabla 13 para varios tubos.

$$R_{aleta} = \frac{W}{(UL)_{colector} [[W - (D1)_{ex}] F_{aleta} + (D1)_{ex}]}$$

$$R_{pelicular} = \frac{W}{\pi (D1)_{in} (h_{conv})_{agua}}$$

$$F_{placa} = \frac{\left[\frac{1}{(UL)_{colector}} \right]}{[R_{aleta} + R_{pelicular}]}$$

Tabla 13. Datos para el cálculo del coeficiente de eficiencia de placa para *N* tubos.

MAGNITUD FÍSICA	MAGNITUD	VALOR	UNIDADES
Diámetro exterior de tubo largo	(D1) _{tex}	0,0217	m
Diámetro interior de tubo largo	(D1) _{tin}	0,0166	m
Coefficiente global de pérdidas en el colector	(UL) _{colector}	6,7052	W/(m ² K)
Coefficiente convectivo	h _{conv}	1282,4040	W/(m ² K)
Ancho de placa entre 2 de tubos	W6	0,1600	m
Ancho de placa entre 2 de tubos	W7	0,1371	m
Ancho de placa entre 2 de tubos	W8	0,1200	m
Ancho de placa entre 2 de tubos	W9	0,1067	m
Resistencia térmica de aleta 06	R _{aleta6}	0,1716	(m ² K)/W
Resistencia térmica de aleta 07	R _{aleta7}	0,1646	(m ² K)/W
Resistencia térmica de aleta 08	R _{aleta8}	0,1602	(m ² K)/W
Resistencia térmica de aleta 09	R _{aleta9}	0,1572	(m ² K)/W
Resistencia pelicular tubo - agua 06	R _{pelicular6}	0,0024	(m ² K)/W
Resistencia pelicular tubo - agua 07	R _{pelicular7}	0,0021	(m ² K)/W
Resistencia pelicular tubo - agua 08	R _{pelicular8}	0,0018	(m ² K)/W
Resistencia pelicular tubo - agua 09	R _{pelicular9}	0,0016	(m ² K)/W
Resistencia térmica total tubo - aleta 06	R _{taal6}	0,1740	(m ² K)/W
Resistencia térmica total tubo - aleta 07	R _{taal7}	0,1667	(m ² K)/W
Resistencia térmica total tubo - aleta 08	R _{taal8}	0,1620	(m ² K)/W
Resistencia térmica total tubo - aleta 09	R _{taal9}	0,1588	(m ² K)/W
Eficiencia de placa con 06 tubos	F_{placa6}	0,857	1
Eficiencia de placa con 07 tubos	F_{placa7}	0,895	1
Eficiencia de placa con 08 tubos	F_{placa8}	0,921	1
Eficiencia de placa con 09 tubos	F_{placa9}	0,939	1

CÁLCULO DE LA RELACIÓN EFICIENCIA DE PLACA-COSTO

Los valores de la Relación (Eficiencia de placa/costo de placa) relacionados con el número de tubos, factores de eficiencia y ancho de aleta, se muestran en la Tabla 14.

NOTA: Hay que indicar que la longitud de los tubos de la rejilla y la longitud de la placa, ambos de hierro galvanizado, se han seccionado en función de la longitud comercial en que se expenden los tubos, según se muestra en la Tabla 14. A estos nos referíamos cuando se decía que hay valores previamente asumidos para las dimensiones del sistema placa rejilla y colector básico; pues de dos tubos comerciales se obtienen 6 para el diseño. Esto permite por una parte, optimizar materiales y por otra parte las dimensiones asumidas para el colector permiten su manipulación y mantenimiento por parte del usuario.



Tabla 14. Valores calculados de la Relación (Eficiencia de placa/Costo de placa) y su relación con el N° de tubos, Factores de eficiencia y Acho de aleta.

N° TUBOS	F _{aleta}	F _{placa}	L. TUBO		N° TUBO COM.	N° TUBOS COM.	Cto. TUBOS		Cto. PLACA		Cto. TUBOS CAB.		Cto. PINTURA		C. TOTAL	Cr
			m	m			US\$	US\$	US\$	US\$	US\$	US\$				
6	0,848	0,857	2,1	12,6	1,969	2	25,50	25,00	13,00	15,01	13,00	15,01	15,01	78,51	0,0109	
7	0,888	0,895	2,1	14,7	2,297	2	25,50	25,00	13,00	15,01	13,00	15,01	15,01	78,51	0,0114	
8	0,916	0,921	2,1	16,8	2,625	3	38,25	25,00	13,00	15,01	13,00	15,01	15,01	91,26	0,0101	
9	0,935	0,939	2,1	18,9	2,953	3	38,25	25,00	13,00	15,01	13,00	15,01	15,01	91,26	0,0103	

F _{aleta}	EFICIENCIA DE ALETA															
F _{placa}	EFICIENCIA DE PLACA															
L. TUBO	LONGITUD DE TUBO EN LA PLACA															
L. TOTAL	LONGITUD TOTAL DE TUBERÍA															
N° TUBO COM.	LONGITUD DE TUBOS COMERCIALES A ADQUIRIR (De 6.4 m de largo cada tubo)															
Cto. TUBOS	COSTO TOTAL POR TUBOS															
Cto. TUBOS CAB.	COSTO TOTAL POR TUBOS CABECEROS															
Cto. PINTURA	COSTO POR PINTURA NEGRA + SOLDADURA															
Cto. TOTAL	COSTO TOTAL DE PLACA															
F/C. TOTAL = Cr	RELACIÓN EFICIENCIA DE PLACA - COSTO TOTAL DE PLACA															

PREPARACIÓN DEL RECURSO ENERGÉTICO – FECHA: 08 DE ENERO DEL 2014

DETERMINACIÓN DE LA DECLINACIÓN SOLAR

Para ello se utiliza la ecuación de la Declinación solar para la fecha indicada, dada a continuación, con los datos de la Tabla 1.

$$\delta = (23.45^\circ) \operatorname{sen} \left[\frac{(360^\circ)(284 + N) \text{ dias}}{(365 \text{ dias})} \right]$$

Tabla 15. Valor calculado de la Declinación Solar y otros parámetros importantes.

MAGNITUD FÍSICA	SÍMBOLOGÍA	VALOR	UNIDADES
DECLINACIÓN SOLAR PARA LA FECHA DE INTERÉS	δ	-22,303349	°
NÚMERO DE HORAS CON INSOLACIÓN	H _{insolación}	12,615	h
HORA DE SALIDA DEL SOL	H _{salida}	5,692	h (am)
HORA DEL OCASO SOLAR	H _{ocaso}	18,308	h (pm)
VALOR DE PICO DE LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN INCIDENTE	I _p	608,69	W/m ²

DISTRIBUCIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR EFECTIVA EN INTERVALOS HORARIOS

Para distribuir la irradiancia solar efectiva en intervalos horarios se utilizaron las ecuaciones para la irradiancia solar sobre un plano horizontal (I_z) y también sobre un plano inclinado (I_s), dadas por la mecánica celeste (Manrique, 1984) entre las 06:00 y 18:00. La radiación efectiva que incide sobre el colector es la irradiancia sobre el plano inclinado del colector multiplicada por el coeficiente de transmitancia-absortancia efectiva que incluye todas las pérdidas ópticas de la radiación solar en el vidrio de la cubierta (reflexión, absorción) cuando ingresa al colector. Los resultados preparados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores calculados de la Irradiancia solar horaria sobre un plano horizontal, sobre el plano inclinado del colector e Irradiancia solar efectiva para el colector inclinado.



MAGNITUD	UNIDADES	1	2	3	4	5	7	8	10	12	13
HORA	h	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	12:00	13:00	15:00	17:00	18:00
I_z	W/m ²	-44,472	98,555	231,836	346,287	434,109	508,146	489,316	346,287	98,555	-44,472
I_s	W/m ²	87,278	222,228	347,981	455,968	538,829	608,684	590,918	455,968	222,228	87,278
$(\tau\alpha)_{ef}$	1	0,4104	0,7534	0,8549	0,8796	0,8850	0,8860	0,8859	0,8796	0,7534	0,4104
$S=I_s(\tau\alpha)_{ef}$	W/m ²	35,8232	167,4240	297,4752	401,0730	476,8882	539,2822	523,5123	401,0730	167,4240	35,8232

I_z : $I_p \cos\theta_z$ (Irradiancia sobre un plano horizontal)
 I_s : $I_p \cos\theta_s$ (Irradiancia solar sobre el plano inclinado del colector)
 $(\tau\alpha)_{ef}$: Coeficiente (Tramitancia-absortancia) efectiva
 $I_s (\tau\alpha)_{ef}$: Irradiancia solar efectiva sobre el plano del colector inclinado

CÁLCULO DE LA DEMANDA DE AGUA CALIENTE

La Tabla 17 muestra los datos que se utilizan en el cálculo de la demanda de agua, y al final de la misma el resultado del volumen de demanda de agua con reserva incluida.

Tabla 17. Cálculo de la demanda de agua caliente incluido una reserva de 100 litros/día.

MAGNITUD FÍSICA	SÍMBOLOGÍA	VALOR	UNIDADES
TEMPERATURA DE DEMANDA	$(T_{dem})_{siete}$	45	°C
VOLUMEN DE DEMANDADA POR PERSONA DÍA	VP	35	lit/pers-día
NÚMERO DE USUARIOS QUE UTILIZARÁN EL AGUA CALIENTE	N_{pers}	20	pers
VOLUMEN DE DEMANDA DIARIA	VD	700	lit/día
VOLUMEN TOTAL DE DEMANDA = VOLUMEN DE DEMANDA + RESERVA	V_{agua}	800	lit/día
VOLUMEN TOTAL DE DEMANDA = VOLUMEN DE DEMANDA + RESERVA	V_{agua}	0.8	m ³ /día

CÁLCULO DE LA ENERGÍA REQUERIDA

PARA CALENTAR EL VOLUMEN DE AGUA DE LA DEMANDA A LA TEMPERATURA Y HORA DESEADAS

La Tabla 18, muestra los datos requeridos para el cálculo de la energía requerida para calentar el volumen de agua de la demanda y también el resultado (Eu).

Tabla 18. Valores calculados de Energía requerida para calentar la demanda de agua.

MAGNITUD FÍSICA	SÍMBOLOGÍA	VALOR	UNIDADES
DENSIDAD DEL AGUA	δ_{agua}	988,9	kg/m ³
VISCOSIDAD DEL AGUA	μ_{agua}	0,00000542	m ² s ⁻¹
CONDUCTIVIDAD DEL AGUA	k_{agua}	0,6410	W/(m K)
COEFICIENTE DE EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA	B_{agua}	0,0030	1/K
NÚMERO DE PRANDLT	Pr_{agua}	3,5450	1
CALOR ESPECÍFICO DEL AGUA	C_{agua}	4186,00	J/(kg K)
CAPACIDAD CALORÍFICA DEL AGUA	$(mc)_{water}$	3311628,3	J/K
ENERGÍA REQUERIDA PARA CALENTAR EL VOLUMEN TOTAL DE DEMANDA A 45°C	Eu	86102336,3	J
ENERGÍA DE RESERVA ALMACENADA AL CABO DE 14 HORAS	ΔE	81047905,4	J
TEMPERATURA ACTUAL DEL VOLUMEN DE DEMANDA CUMPLIDAS LAS 14 HORAS	$(T_{actual})_{siete}$	43,5	°C
DISMINUCIÓN DE LA TEMPERATURA AL CABO DE LAS 14 HORAS	ΔT_{agua}	1,5	°C

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN TODAS LAS PARTES DEL SISTEMA

Las pérdidas que se evalúan para el sistema se clasifican en:

- 1) Pérdidas por transferencia de calor a través de las paredes del tanque.



- 2) Pérdidas por calentamiento de materiales en el tanque (fibra de vidrio y lana de vidrio).
- 3) Pérdidas por calentamiento de agua en el colector (en la rejilla de tubos y en los tubos cabeceros).
- 4) Pérdidas por calentamiento de materiales en el colector (en la placa absorbadora, en la rejilla de tubos y en los dos tubos cabeceros).
- 5) Pérdidas por calentamiento de agua en las conexiones externas.
- 6) Pérdidas por calentamiento de materiales en las conexiones externas.
- 7) Pérdidas por conducción en las conexiones externas.

Para la evaluación de las pérdidas por conducción o por convección se evaluaron utilizando las ecuaciones conocidas de la transferencia de calor y algunas empíricas válidas para esta aplicación por el tipo de flujo del fluido.

Para la evaluación de las pérdidas por calentamiento de materiales de manera general se ha recurrido al concepto de capacidad calorífica o masa térmica y se calcula para todos los materiales del calentador que se calientan, utilizando además las propiedades de materiales (densidad, volumen, masa, calor específico). También es posible evaluar el calor perdido en cada uno de los materiales usando los incrementos de temperatura que experimentan los materiales.

A continuación se muestra el resumen de todas las pérdidas y coeficientes de pérdidas, evaluadas en todas las partes del calentador solar. Ver Tablas 19 y 20.

Tabla 19. Resumen de las pérdidas por calentamiento de materiales en el sistema

MAGNITUD FÍSICA	MAGNITUD	VALOR	UNIDADES
PÉRDIDAS POR CALENTAMIENTO DE LA MASA DE AGUA DENTRO DEL SISTEMA	(mc) _{water}	3311628,32	J/K
PÉRDIDAS POR CALENTAMIENTO EN EL MATERIAL DEL TANQUE	(mc) _{fibra}	2972,100834	J/K
PÉRDIDAS POR CALENTAMIENTO EN EL AISLANTE DE LANA DE VIDRIO	(mc) _{lana}	28463,51571	J/K
PÉRDIDAS POR CALENTAMIENTO EN EL AGUA	(mc) _{agua}	32761,13622	J/K
PÉRDIDAS POR CALENTAMIENTO DE LA PLACA ABSORBEDORA	(mc) _{placa}	5188, 8466	J/K
PÉRDIDAS POR CALENTAMIENTO DE LOS TUBOS DE REJILLA	(mc) _{tubrej}	6700,15251	J/K
PÉRDIDAS POR CALENTAMIENTO DE LOS TUBOS CABECEROS	(mc) _{tubcab}	1654,02859	J/K
PÉRDIDAS POR CALENTAMIENTO DE MATERIAL EN LAS CONEXIONES EXTERNAS	(mc) _{conex}	8432, 43313	J/K
MASA TÉRMICA O CAPACIDAD CALORÍFICA DEL SISTEMA	(MC)_{sistema}	3397800,534	J/K

Tabla 20. Resumen de coeficientes de pérdidas calculados en todas las partes del sistema.

MAGNITUD FÍSICA	MAGNITUD	VALOR	UNIDADES
PÉRDIDAS TOTALES A TRAVÉS DEL TANQUE DESPRECIANDO P. POR CONVECCIÓN	(UA) _{tan}	4,360	W/K
PRODUCTO PÉRDIDAS - ÁREA POR CONDUCCIÓN A TRAVÉS DE LAS CON. EXTERNAS	(UA) _{cond}	2,673	W/K
COEFICIENTE GLOBAL DE PÉRDIDAS EN EL TANQUE Y CONEXIONES EXTERNAS	(UA)_{exterior}	7,033	W/K
COEFICIENTE GLOBAL DE PÉRDIDAS EN EL COLECTOR	(U)_{colector}	6,705	W/(m² K)

PREDICCIÓN DE TEMPERATURA DEL AGUA PARA CADA HORA DEL DÍA

Para hacer esta operación se utilizaron los datos de la Tabla 17 y se calcularon valores medios de algunas variables como irradiancia, temperatura ambiente, temperatura de agua en el tanque, flujo de masa, factor de tramitancia-absortancia efectiva y con ellos se calcularon, el factor de remoción del agua, eficiencia del sistema, potencia calórica y calor ganados en cada intervalo horario.



Tabla 21. Datos para la predicción de temperatura del agua cada hora del día con un Área efectiva de $A_x = 10,080 \text{ m}^2$, equivalente a cinco unidades de colector.

MAGNITUDES FÍSICAS	MAGNITUD	VALORES	UNIDADES
FACTOR DE EFICIENCIA DE PLACA CON 07 TUBOS	F_{placa}	0,895	1
COEFICIENTE GLOBAL DE PÉRDIDAS EN EL COLECTOR	$(UL)_{\text{colector}}$	6,705	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
COEFICIENTE GLOBAL DE PÉRDIDAS EN EL TANQUE Y CONEXIONES EXTERNAS	$(UA)_{\text{exterior}}$	7,033	W/K
MASA TÉRMICA DEL SISTEMA	$(MC)_{\text{sistema}}$	3397800,534	J/K
ÁREA DE PLACA DE LA UNIDAD DE COLECTOR DISEÑADA	A_{placa}	2,016	m^2
ÁREA EFECTIVA Y ARBITRARIA DE PLACA ABSORBEDORA (REAJUSTABLE)	A_x	10,080	m^2
FACTOR DE PÉRDIDAS 01	C_1	376746,8746	$\text{J}/(\text{m}^2 \text{ K})$
FACTOR DE PÉRDIDAS 02	C_2	7,4850	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
CALOR ESPECÍFICO DEL AGUA	C_{agua}	4186	$\text{J}/(\text{kg K})$
INCREMENTOS EN LA TEMPERATURA DEL FLUIDO	ΔT_{agua}	10	K
FACTOR C3	C_3	0,00289	kg/s
FACTOR C4	C_4	67,05155	W/m^2
NÚMERO DE COLECTORES	A_x/A_{placa}	5	1

Tabla 22. Predicción de la temperatura del agua para cada hora del día con un área efectiva de $A_x = 10,08 \text{ m}^2$, equivalente a cinco unidades de colector.

N°	INTERVALO HORARIO	IRRADIANCIA MEDIA HORARIA	TEMPERATURA. AMB. MEDIA	Δt	TEMPERATURA AGUA TANQUE	INCREMENTOS TEMP. AGUA T.	FLUJO DE MASA	FACTOR DE REMOCIÓN DE CALOR	$(\tau\alpha)_{\text{ef}}$	η	Q_u	E_u	
	Δh	W/m^2	$^{\circ}\text{C}$	s	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kg/s	FR			W	Wh	
1	05:00-06:00	S[05-06]	17,9116	20,58	3600	19,000	0,284	0,0000					
2	06:00-07:00	S[06-07]	101,6236	21,90	3600	19,284	1,158	0,0035	0,609	0,377	0,27	146,16	146,16
3	07:00-08:00	S[07-08]	232,4496	23,36	3600	20,442	2,430	0,0093	0,770	0,804	0,67	390,93	390,93
4	08:00-09:00	S[08-09]	349,2741	24,93	3600	22,871	3,485	0,0142	0,809	0,867	0,73	592,37	592,37
5	09:00-10:00	S[09-10]	438,9806	26,58	3600	26,356	4,210	0,0175	0,825	0,882	0,73	733,66	733,66
6	10:00-11:00	S[10-11]	500,2003	28,12	3600	30,567	4,604	0,0194	0,824	0,885	0,71	803,80	803,80
7	11:00-12:00	S[11-12]	531,3973	29,17	3600	35,171	4,649	0,0195	0,832	0,886	0,67	815,53	815,53
8	12:00-13:00	S[12-13]	531,3973	29,72	3600	39,819	4,355	0,0185	0,828	0,886	0,64	774,26	774,26
9	13:00-14:00	S[13-14]	500,2003	30,04	3600	44,174	3,768	0,0140	0,808	0,885	0,51	584,64	584,64
10	14:00-15:00	S[14-15]	438,9806	29,88	3600	47,943	2,903	0,0122	0,797	0,882	0,51	510,50	510,50
11	15:00-16:00	S[15-16]	349,2741	29,25	3600	50,846	1,793	0,0073	0,738	0,867	0,37	304,29	304,29
12	16:00-17:00	S[16-17]	232,4496	28,43	3600	52,638	0,489	0,0009	0,273	0,804	0,07	38,56	38,56
13	17:00-18:00	S[17-18]	101,6236	27,17	3600	52,638	-0,851	0,0000					
14	18:00-19:00	S[18-19]	17,9116	25,51	3600	52,638	-1,769	0,0000					
											0,605	5351,85	5351,85

RESULTADOS

Los resultados obtenidos, al desarrollar el trabajo son los siguientes:

Con los valores iniciales asumidos para la placa, se ha obtenido una unidad de colector, se ha estimado un coeficiente global de pérdidas $(UL)_{\text{colector}} = 6,705 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Se ha obtenido un Coeficiente pelicular de transferencia de calor para la interface tubo y agua de $(h_{\text{conv}})_{\text{agua}} = 1282,40 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$.



Con los valores iniciales asumidos para la placa se ha obtenido una unidad de colector con eficiencias de aleta y de placa óptimos de 0,888 y 0,895, respectivamente, para siete tubos, determinado por la relación (Eficiencia de placa/Costo de placa) $Cr = 0,0114$.

Se ha obtenido para la fecha de realización del diseño el ángulo de declinación solar del Sol, equivalente a $-22,3^\circ$; indicando que la posición del Astro Rey para esta fecha se encuentra por debajo del Ecuador celeste al igual que el Perú (latitud sur), por esta razón la iluminación es más intensa (día de verano).

Se cuantificó el valor del Promedio anual de energía por metro cuadrado diaria del dato de la irradiancia para Humaya de $(E/A) = 4,65 \text{ kWh/m}^2$, arrojando un valor pico de la radiación incidente de $I_p = 608,69 \text{ W/m}^2$.

Se ha obtenido, mediante cálculos sencillos la demanda de volumen de agua, incluyendo una reserva de 100 litros/día, equivalente a $V_{\text{agua}} = 0,8 \text{ m}^3/\text{día}$.

Se han determinado dos datos necesarios para la predicción de la temperatura del agua para intervalos horarios, como son: la capacidad calorífica del sistema $(MC)_{\text{sistema}} = 3397800,53 \text{ J/K}$ y el Coeficiente global de pérdidas en las conexiones externas $(UA)_{\text{exterior}} = 7,03 \text{ W/K}$.

Utilizando un área efectiva A_x de exposición al Sol, equivalente a 5 unidades de colector, la temperatura del agua alcanzó los 45°C entre las 14:00 horas y las 15:00 horas del día. También se obtuvo el rendimiento del sistema, $\eta = 0,6$.

DISCUSIÓN

Durante el desarrollo del trabajo se verificó que en el proceso de diseño están presentes fenómenos de transferencia de calor, donde participan el Sol como fuente de calor y el ambiente como sumidero a baja temperatura; en estas circunstancias las condiciones meteorológicas determinadas por Sol en el interior del colector y el ambiente van a generar pérdidas (flujos de calor no favorables) desde el interior del sistema diseñado hacia el exterior. Mientras mayor sea la diferencia de temperaturas mayores serán las pérdidas. Por ello no es válido proponer un calentador diseñado para un lugar X para otro Y si las condiciones meteorológicas son totalmente diferentes.

Por tanto, las condiciones meteorológicas de la ciudad de Huacho o de cualquier otro lugar, las propiedades físicas de los materiales, así como las dimensiones y costos de los insumos (obligan a realizar dimensionamientos a priori) son determinantes o influyen en el diseño de este tipo de aplicativos tecnológicos.

En cuanto al diseño de la unidad de colector, consideramos que es la mejor, a menos que las dimensiones estándar de los tubos de fierro galvanizado hayan cambiado.

En cuanto a la toma de decisión, de considerar cuatro o cinco unidades de colector, se pudo observar que si se cambia el valor de $A_x = 10,08 \text{ m}^2$ (equivalente a cinco unidades de colector) por un valor $A_x = 8,064 \text{ m}^2$ (equivalente a cuatro unidades de colector), el método iterativo nos permite obtener los siguientes resultados:

Utilizando cinco unidades de colector:

A las 14:00 horas se alcanza la temperatura de $44,17^\circ\text{C}$

A las 15:00 horas se alcanza la temperatura de $47,94^\circ\text{C}$

A las 16:00 horas se alcanza la temperatura de $50,84^\circ\text{C}$

Utilizando cuatro unidades de colector:

A las 14:00 horas se alcanza la temperatura de $39,79^\circ\text{C}$

A las 15:00 horas se alcanza la temperatura de $43,04^\circ\text{C}$



A las 16:00 horas se alcanza la temperatura de 45,62°C

A las 17:00 horas se alcanza la temperatura de 47,33°C

De aquí se deduce que en los casos reales, hasta las 16:00 horas es segura la incidencia solar y por tanto la productividad de captación y con cinco unidades de colector se asegura la temperatura deseada; pero con cuatro unidades de colector la temperatura se alcanza justo a estas horas (15:00). En todo caso si la exigencia de los 45°C no es tan rígida y se puede aceptar en 42, 43 o 44°C, se podría decidir por 4 unidades de colector, lo que repercute en ahorros de material y costos.

Para el caso particular de esta aplicación la decisión más recomendable es optar por cuatro unidades de colector, lo cual da lugar a un ahorro de US\$ 78,51 (S/. 221 nuevos soles y 00/100 aproximadamente) solamente en placa, sin considerar la envoltura del colector.

El diseño de la presente aplicación, constituye solo una estimación del dimensionamiento del sistema y es válido solamente para Huacho, en época de verano y específicamente para la fecha 08 de enero; pues las condiciones meteorológicas en la ciudad de Huacho son muy variables en todo el año. Sin embargo sería más representativo si el diseño se hubiese elaborado para lugares de la sierra o lugares como Sayán, Quintay, Tres Montones, San Jerónimo en el valle del río Huaura, donde la irradiancia solar es más energética y de incidencia regular durante todo el año; contando además con mejores datos promedio anual diario de las diferentes variables meteorológicas involucradas.

Es posible que el diseño del sistema elaborado requiera de reajustes, pero desde luego constituye una herramienta de trabajo referencial que nos ayuda a estimar el diseño de un calentador solar para agua, ajustable a condiciones meteorológicas de cualquier lugar.

La verificación o validez del diseño teórico elaborado con el software Excel, como cualquier desarrollo teórico, tiene su base en el método experimental, lo que significa construir el calentador de acuerdo a las especificaciones del diseño o haciendo reajustes en ambos lados y ponerlo a prueba bajo insolación.

El método de la iteración o recalcado y el uso de la computadora en un proceso de diseño son recursos muy valiosos pues dan opción a asumir valores arbitrarios razonables y luego hacer los reajustes necesarios para consolidarlo.

Para la aplicación del diseño no se ha elaborado ni costos por desarrollo, ni costos de venta, por inconvenientes de tiempo no se ha permitido visitar a modelos de calentadores, ni precios actuales de los diferentes insumos que intervienen en el diseño. Se han tomado como referencia algunos datos y costos del año 1996.

El diseño del sistema elaborado en Excel, aún requiere de una mejor organización en las tablas elaboradas, terminando en una sola página ejecutiva, con ingreso para datos y respuestas de salida.

AGRADECIMIENTOS

A los docentes de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Ingeniería: Ing. Rafael Espinoza, Aníbal Valera, MamfredHorn y Germán Comina; cuyas enseñanzas influyeron mucho para que el



responsable titular de este proyecto se mantenga activo en el trabajo con las energías renovables.

A nuestras esposas, familiares y colegas sinceros, que motivan nuestra superación en el día a día.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Garg, H. (1982). *Treatise on Solar Energy: Fundamentals of Solar Energy*. New Delhi, India: John Wiley & Sons.

Manrique, J. (1984). *Energía Solar: Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas*. México: Harla & Row Latinoamericana.

Duffie, J y Beckman, W. (1974). *Solar Energy Thermal Processes*. Madison, Wisconsin, USA: John Wiley & Sons.

Manrique, J. (1981). *Transferencia de Calor*. México: Harla S. A.

Karlekar, B. y Desmond, R. (1985). *Transferencia de Calor*. México: Nueva Editorial Interamericana S. A.

Farrington, D. (1982). *Uso Directo de la Energía Solar*. Madrid, España: Editorial H. Blume.

Valera, A. (1993). *Energía Solar: Teoría y Práctica*. Lima, Perú: Impresiones UNI.

Espinoza R. (1996). Distribución de energía solar en un colector solar plano (Régimen estable). *Apuntes de clases del docentes de la Asignatura de Colectores Solares*. Segunda Especialización en Energía Solar (SEPES – UNI). Lima. Perú.

Olechnowicz E. y Martínez R. (1995). Análisis por Computadora de Sistemas Solares para el Calentamiento de Fluidos. *Memoria de la XIX Semana de Energía Solar*. (77 - 82). La Paz: Asociación Nacional de Energía Solar.

Quinto, P. y Flores, V. (1995). Comparación del comportamiento de un Sistema Solar de Calentamiento de Agua, usando Datos Teóricos y Experimentales. *XIX Semana de Energía Solar*. (85 – 91). La Paz: Asociación Nacional de Energía Solar.

Milliarium. (2014). Tabla: Propiedades térmicas de materiales de construcción y aislantes. *Milliarium.com. Ingeniería Civil y Medio Ambiente*. Recuperado 01 del 2014, desde <http://www.milliarium.com/prontuario/Tablas/Química/Propiedades Térmicas.asp>

Buenas Tareas. (2012). Tabla: Coeficientes de Conductividad Térmica de Diversos Materiales. *Buenas Tareas.com*. Recuperado 10, 2012, desde <http://www.buenastareas.com/ensayos/Tabla-Coeficientes-De-Conductividad-T%C9rmica/5652554.html>