



Dimensionado de un sistema térmico solar mediante simulación y su validación energética

Sizing of a solar thermal system by means of simulation and their energy validation

Jesús M. - Iglesias Ferrer
Joel - Morales Salas

Recibido: Julio del 2012

Aprobado: Noviembre del 2012

Resumen/ Abstract

El trabajo presenta las formulaciones para dimensionar y simular instalaciones térmicas solares. Se establecen los criterios para el análisis del sistema energético y la descripción del método de recuperación diferencial de la inversión. Se presentó un Proyecto Ejecutivo que fue ejecutado en el Hotel "Puesta del Sol". Posteriormente se realizó una evaluación en la instalación solar construida con el objetivo de validar los resultados obtenidos en la simulación. La comparación de los resultados se establece definiendo el % de aportación energética solar obtenido en las simulaciones y los resultados en los ensayos realizados con carga real. Se muestra el esquema de la instalación con el equipamiento que fuera utilizado en los ensayos establecidos. Estos resultados se recogieron en ficheros y gráficos en valores horarios, diarios y resultados mensuales. El estudio concluyó en un análisis integral anual donde se definió el comportamiento de la instalación solar en el período de explotación.

Palabras clave: aporte energético solar, instalación térmica solar, recuperación diferencial.

Sizing an and evaluation of a solar thermal installation

This article presents the formulations to size and simulate a solar thermal installation. It is establish the criterions for the analysis of the energy system and description of the method of differential payback of the investment. With the results of the simulation, an Executive Project was presented was executed in the Hotel "Puesta del Sol". Later on is decided to carry out an evaluation in the built installation with the objective of validating the results of the contribution energy feigned lot, with the real results that it contributes the installation with real load. The level of comparison of the results settles down with the definition of the % of solar energy contribution is obtains in the previous simulations and the later results obtained in the test carried out in the installation built in the Hotel. The scheme of the installation is shown with the equipment was used in the established tests. These results are picked up in files and graphics in values of each hour, everyday and monthly results. The study concludes in an annual integral analysis where is defined the behavior of the solar installation in the period of exploitation.

Key words: solar energy contribution, solar thermal installation, differential payback.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el interés mundial hacia la investigación, desarrollo y aplicación de las fuentes renovables de energías, viene dado por la irrefutable conclusión de que al utilizar estas

fuentes energéticas, conlleva a disminuir los efectos del cambio climático a nivel global. Dentro de las fuentes renovables de energías se tiene una amplia gama de tipos de energías, como: la eólica, la marítima, geotérmica, la solar fotovoltaica y la obtenida de la biomasa. Dentro de todas estas fuentes de energía renovable, la energía solar térmica se destaca por ser una tecnología viable y factible en diversos usos domésticos, industriales y en aplicaciones tecnológicas. Las instalaciones solares objeto de nuestro trabajo, tienen un esquema estructural-funcional muy sencillo, el mismo está formado por el sistema de captación de la radiación, el sistema de almacenamiento térmico, las redes hidráulicas y el sistema energético de apoyo. En Cuba, la experiencia en la construcción de instalaciones térmicas solares, data de la década de los 80 cuando se inaugura en la Empresa SEGERE la primera línea de construcción de colectores solares planos destinados a ser instalados en obras sociales en el país. Entre 1982 y 1991 se montaron en Cuba 13,252 colectores solares, entre 1992 y 2006 se instalaron 3,991 equipos. Sólo en el 2007 se montaron 1,300 sistemas solares. Luego de la inauguración de la nueva fábrica con tecnología China para la construcción de equipos solares, los programas de instalar estos sistemas solares en el país son aún más ambiciosos.

El cálculo en el dimensionado de estas instalaciones se ha realizado partiendo de bases de datos suministradas por los clientes, las cuales han sido conformadas a criterio de experiencias empíricas para diferentes escenarios energéticos. Luego, se han estado analizando algunas valoraciones cualitativas en función de las prestaciones energéticas en las citadas instalaciones, las cuales han desfavorecido la selección de estas tecnologías, en contradicción al amplio universo de criterios que se tienen a favor del empleo de la tecnología solar; esto acontece por no disponer del recurso de los resultados de una simulación antes de ejecutar los proyectos y su posterior evaluación del aporte energético real del equipamiento instalado. En las instalaciones solares construidas en España, Alemania e Israel, éstas cuentan con un sistema de monitoreo en tiempo real el cual forma parte activa del equipamiento tecnológico obligado a ser instalado y permite conocer a lo largo de su vida útil, el ahorro real que aportaron luego de ser instaladas. Utilizar ésta tecnología garantiza el conocimiento de la realidad en la fiabilidad de la explotación de estos esquemas energéticos. No se tienen reportes de la Academia de Ciencia de Cuba, tampoco del Centro de Investigaciones de Energía Solar ni de las instituciones que se dedican a proyectar y ejecutar montajes en el país, donde se plantee un estudio de simulación preliminar y posterior evaluación de una instalación solar durante tres años seguidos con el objetivo de conocer y demostrar la aportación energética solar y su comportamiento en explotación con carga real. En la actualidad se mantienen numerosas críticas y reclamos de las instituciones donde existen sistemas solares construidos de los cuales no se conocen o no se hace posible definir el ahorro real que aporta el sistema solar. En nuestro trabajo abordamos el tema y la importancia de la simulación y evaluación posterior de las instalaciones solares térmicas justificando el empleo de estas técnicas de validación como único método de certificar las instalaciones construidas y en explotación. Es un método fácil y viable de implementar para con rapidez obtener los resultados en función del período de medición establecido.

Dimensionamiento del Sistema Térmico Solar

Los Sistemas Térmicos Solares (STS) con esquema estructural integrado y utilizando un régimen termosifónico, se reconocen como los sistemas energéticos renovables de más amplia aplicación en la producción de agua caliente de uso sanitario y de cocina para diversos objetos de obras; en ello, no se establecen fronteras de utilización entre regiones apartadas o rurales, de igual forma son utilizados en las grandes urbes de los países desarrollados. Estos equipos y sistemas termosifónicos son compatibles en la mayoría de las redes hidráulicas que se establecen en los diferentes objetos de obras como: la vivienda familiar y multifamiliar, hospitales, hoteles, albergues, campamentos, hogares de ancianos, centros deportivos, guarderías, instalaciones sociales, etc.

Entre las ventajas más relevantes y atractivas de los STS con régimen termosifónico, se encuentra que para su funcionamiento, sólo se depende de la incidencia de la radiación solar como recurso energético, no requieren de sistemas automáticos de control en la operación, lo cual no representa un problema para su utilización en zonas rurales o apartadas. El dimensionamiento de los STS con régimen termosifónico, se realiza en función de hipótesis, entre ellas dos fundamentales: la distribución horaria de la carga térmica o demanda energética y la disponibilidad horaria del recurso solar, ya que estos datos tienen una variabilidad significativa, ello implica, que la precisión

en los resultados energéticos queda acotado y limitado a la coexistencia o no, de ambos factores en el tiempo, estos escenarios establecen la representatividad de las condiciones reales reflejada por ambas hipótesis. Existen diversos métodos de dimensionamiento de STS, que establecen simples formatos de cálculos hasta la presentación de poderosos y complejos software informáticos para el dimensionamiento mediante sistemas de simulación entre otros programas, podemos mencionar: TRNSYS, FCHART, TRANSOL3, Tsol4, CLEANERYSOLAR y CETSOLAR como los más utilizados por diferentes instituciones dedicadas a los proyectos solares. El método FCHART es el seleccionado para realizar los cálculos necesarios; este software de cálculo es muy utilizado a nivel internacional, desde su creación en el año 1997 por los profesores Klein, Beckman y Duffie, mundialmente conocidos por sus aportes en la temática. El método FCHART es ampliamente aceptado por físicos, arquitectos e ingenieros en todo el mundo como un proceso de cálculo fiable, partiendo de bases de datos con valores medios mensuales. Su aplicación sistemática consiste en identificar las variables adimensionales del sistema de calentamiento solar y utilizar la simulación del funcionamiento mediante ordenador. Para dimensionar las correlaciones entre estas variables en función del rendimiento medio del sistema solar se define el período de tiempo del análisis, estas dimensiones se presentan por medio de ecuaciones y de forma gráfica; permitiendo modelar y evaluar el desempeño de un STS, bajo parámetros técnicos y económicos durante todos los meses del año.

Las ecuaciones que emplea **FCHART** para el cálculo de la cobertura solar se presentan a continuación:

- Carga calorífica mensual de agua caliente sanitaria: [1-2]

$$Q_a = C_e \times C \times (t_{ac} - t_r) \times n \quad [\text{Kwh. /mes}] \quad (1)$$

C_e	Calor específico del fluido,	C	Consumo de agua caliente sanitaria
t_{ac}	Temperatura del agua acumulada,	t_r	Temperatura del agua de la red
n	Número de días del mes		

- Cálculo del parámetro D_1 : este parámetro expresa la relación entre la energía absorbida por la placa del captador y la carga calorífica total de calentamiento durante el período de tiempo analizado.

$$D_1 = \frac{S_c \times F'_R (\overline{\tau\alpha}) \times R_l \times n}{Q_a} \quad (2)$$

Donde:

$$F'_R (\overline{\tau\alpha}) = F'_R (\tau\alpha)_n \times \left[\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \right] \times \left[\frac{F'_R}{F_R} \right] \quad (3) \quad \left[\frac{F'_R}{F_R} \right] = \frac{1}{1 + [y(x-1)]} \quad (4)$$

$$x = \frac{C}{E_l \times C_{\min}} \quad (5) \quad y = \frac{S_c \times (F_R U_L)}{C} \quad (6)$$

Siendo:

n	Número de días del mes en consideración,	S_c	Superficie de captación
C_{\min}	Capacidad calorífica mínima,	E_l	Efectividad de intercambio.
$T\alpha$	Producto Transmitancia-absortancia,	U_L	Coeficiente de pérdida del colector solar
$(T\alpha)_n$	Producto Transmitancia-absortancia para radiación con incidencia normal	C	Consumo de agua caliente
F_r	Factor de eficacia del colector solar,		
R_l	Radiación media diaria recibida por el captador, por unidad de superficie		
F'_R / F_R	Factor de corrección del conjunto captador-intercambiador		

Cálculo del parámetro D_2 : este parámetro expresa la relación entre las pérdidas de energía en el captador, para una demanda de temperatura y la carga calorífica total del tiempo analizado.

$$D_2 = \frac{S_c \times F'_R U_L \times (100 - t_a) \times \Delta tiempo}{Q_a} \times K_1 \times K_2 \quad (7)$$

Siendo:

K_1 Factor de corrección por almacenamiento, k_2 Factor de corrección, relaciona la t_{ac} , t_y y la t_a
 t_a Temperatura ambiente media mensual (100- t_a) Valor de la temperatura de referencia

1.1 El cálculo de la Fracción f de la carga calórica mensual aportada por el sistema de energía térmica solar, puede ser calculado por la ecuación:

$$f = 1.029D_1 - 0.065D_2 - 0.245D_1^2 + 0.0018D_2^2 + 0.0215D_1^3 \quad (8)$$

Estableciéndose los límites de aplicación en: $0 < D_1 < 3$ y $0 < D_2 < 18$

Cálculos de la cobertura solar mensual

$$Q_u = f \times Q_a \quad (9) \text{ donde: } Q_a \text{ la carga calórica mensual}$$

- Cálculo de la cobertura solar anual

$$Cobertura_{anual} = \frac{\sum_1^{12} Q_u}{\sum_{12} Q_a} \quad (10)$$

Para la evaluación económica del sistema solar [3], definiremos el término: *Inversión Diferencial*, con el cual nos referiremos a la inversión real en la instalación solar, descontando la inversión en la instalación convencional que sustituye, en el caso de que ésta no exista. Calculamos el período de retorno del capital invertido y la tasa de rentabilidad interna con la cual queda determinado el interés efectivo del dinero que produce la inversión realizada. Para ello utilizamos las siguientes ecuaciones:

$$A \sum_1^t \left(\frac{1+c}{1+e} \right)^t \quad (11) \quad M \sum_1^t \left(\frac{1+i}{1+e} \right)^t \quad (12) \quad B = A \sum_1^t \left(\frac{1+c}{1+e} \right)^t - M \sum_1^t \left(\frac{1+i}{1+e} \right)^t - C \quad (13)$$

Siendo:

A Ahorro previsto anualmente como costo del combustible sustituido en el proceso

B Beneficio neto en unidades monetarias que la instalación solar proporciona

C Costo de la inversión diferencial evaluada

M Costos de mantenimiento de la instalación solar

t Período de tiempo analizado, c Incremento del combustible, e Interés financiero,

i Inflación anual

Definiendo para t el valor de 20 años que es la experiencia en Cuba para estas instalaciones energéticas; tendremos que:

$$A \sum_1^{20} \left(\frac{1+c}{1+r} \right)^t - M \sum_1^{20} \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^t - C = 0 \quad (14)$$

Para proseguir el desarrollo de las expresiones, utilizaremos la fórmula de la suma de una serie geométrica de n términos cuyo primer término es a y cuya razón es k , a saber:

$$\sum_1^n (a_i) = S = \frac{ak^n - a}{k - 1} \quad (15)$$

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN SOLAR CONSTRUIDA

El Hotel "Puesta de Sol" es una institución para albergar estudiantes de post-grado. El sistema de colectores solares está instalado sobre la losa plana del techo del último nivel del bloques de habitaciones. En su conjunto, la instalación solar está formada por tres baterías de colectores solares que se encuentran interconectados y forman una red hidráulica encargada de suministrar toda el agua caliente a las instalaciones del Hotel. Los resultados de la simulación proponen, utilizar una a la instalación solar de 22 colectores planos **CHROMAGEN** modelo **SR-190**, cada panel solar tiene un área de 1.9 m², cada colector tiene acoplado un termo tanque de 200 litros de capacidad unitaria, esto hace una relación volumétrica de 105.26 litros/m² de área captadora. El área total de captación útil en la instalación solar es de 41.8 m² y el volumen total almacenado es de 4400 litros de agua caliente. El principio de funcionamiento de la instalación solar, está basada en un régimen termosifónico o de circulación natural. El agua contenida en el interior de los equipos solares es calentada al incidir la radiación solar y transfiere esta energía al líquido, provocando un aumento de su temperatura. El sistema energético auxiliar está diseñado con resistencias eléctricas que serán activadas sólo y cuando la temperatura del agua sea inferior a los 40 °C esta acción se ejecuta mediando un termostato de inmersión. La red hidráulica de interconexión entre los módulos de una misma batería, contempla distribuciones en serie-paralelo. En todas las baterías, la distribución del agua de reposición y la caliente al consumo están concebidas en un esquema en paralelo. Entre el tanque y el colector existe una red de tuberías aisladas que permiten el movimiento del agua en el sistema colector-tanque. Estos tanques termos están contruidos para trabajar de forma horizontal y cuentan con un depósito de acero con un revestimiento interior vitrificado al horno que lo protege de los efectos de la oxidación, además de mantener las mejores condiciones para el almacenamiento del agua caliente de uso sanitario. Ver foto1.



Foto 1. Vista general de la Instalación Solar con 3 Baterías y 41.8 m² de área total de captación.

EQUIPAMIENTO UTILIZADO EN LAS MEDICIONES

Luego de ser construida la instalación térmica solar para el calentamiento de agua de uso sanitario y de cocina en el Hotel, se realizó una evaluación del comportamiento real del sistema energético y con ello validar los resultados que fueran modelados al inicio del proyecto de investigación; para lo cual se utilizó un procesador de datos al cual se le indico el modo de organizar las lecturas requeridas en los diferentes puntos de medición, con ello se facilitó el trabajo de certificar y procesar las bases de datos que arrojaron las mediciones realizadas. Para tales efectos, se elaboró un cronograma de monitoreo y se confeccionaron las bases de datos que permitieron validar y procesar toda la información registrada en el período de medición planificado. Los resultados obtenidos en las mediciones estarían acordes al comportamiento en la explotación del Hotel con carga real. En la figura 1, se muestra un esquema mono lineal con el principio de funcionamiento de la instalación solar construida, en el cual aparecen representadas las tres baterías de colectores solares interconectadas en paralelo, además, se muestra todo el recorrido

hidráulico entre el sistema de reposición desde el tanque elevado, los sistemas de suministro y retorno del agua caliente a los consumidores y el sistema energético auxiliar. Se incluye la disposición e interconexión del equipamiento de medición utilizado en la evaluación de la instalación energética.

ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN SOLAR

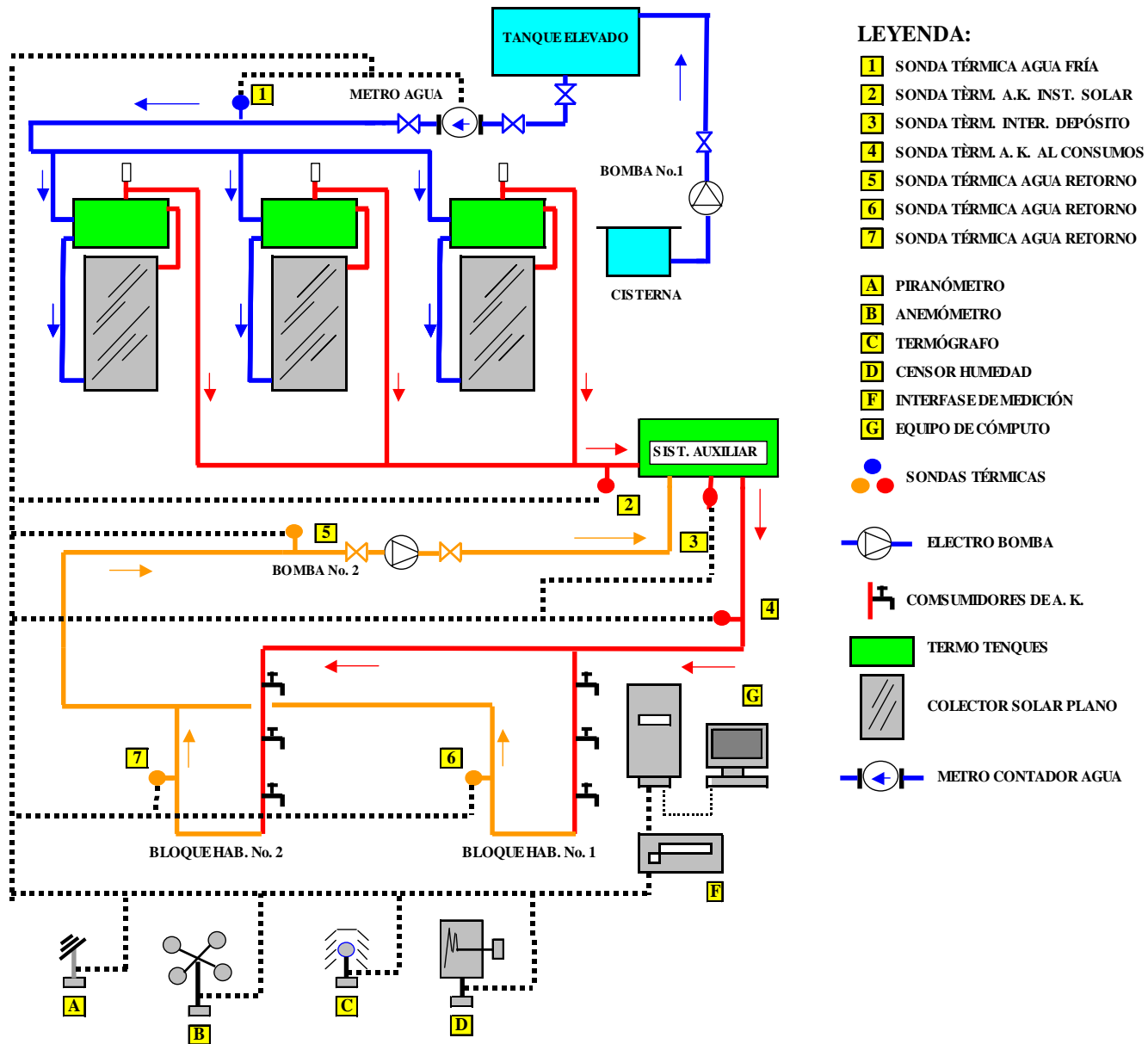


Fig.1. Esquema mono-lineal de la instalación solar.

LEYENDA: 1 al 7 Sondas térmicas

A Piranómetro

B Anemómetro

C Termógrafo

D Censor de Humedad

E Interfase de medición

F Equipo de Cómputo

DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES REALIZADAS

La instalación solar térmica del hotel cuenta con un esquema estructural funcional Termosifónico. Además se analiza la instalación solar como un sistema integral de captación-acumulación, con ello concentraremos nuestro análisis en los diferenciales de temperatura establecidos por la demanda horaria y la radiación incidente. En el análisis realizado quedaron registradas mediciones de la radiación que incide en el plano inclinado de los colectores, la temperatura ambiente y la velocidad del viento. Estos parámetros fueron registrados cada de cinco minutos, logrando compatibilizar las mediciones en iguales períodos de lectura. En cada una de las tres baterías de colectores solares se instalaron sondas térmicas de inmersión para conocer y registrar la temperatura del agua de reposición en el circuito de entrada en cada batería de colectores solares. De igual forma se instalaron sondas con similares características en los tres ramales que suministran el agua caliente del sistema solar. Con estos dispositivos se logra determinar el valor diferencial de la temperatura en el sistema de colectores solares. Se acoplaron en la pizarra eléctrica general dos registradores o contadores de tiempo de operación, uno en el bloque de resistencias eléctricas del sistema auxiliar y el segundo en la electro bomba del circuito de recirculación de agua caliente del hotel. Se utilizó un metro contador de agua en la línea de suministro general a la instalación solar.

Objetivos propuestos en la evaluación de la instalación construida.

1. Caracterizar las necesidades energéticas en el calentamiento de agua en el Hotel.
2. Definir el Aporte Energético Solar en la instalación energética construida.
3. Validar los resultados de la simulación con los registrados en las evaluaciones con carga real.

Se dispuso del equipamiento para realizar las mediciones con adquisición de datos por microprocesador, el cual permitió acumular información en un período de 36 meses las 24 horas del día. Con los resultados que arrojaron las evaluaciones realizadas, se logró calcular las necesidades energéticas reales horarias, el ahorro de combustible y la aportación energética solar referida al calentamiento de agua. Las tablas 1, 2 y 3, aparecen valores registrados y datos anuales de: la radiación diaria (columna 2) y la ocupación mensual (columna 4). Resultados calculados: aporte solar, demanda energética, cobertura posible a suplir, aporte real utilizable y la Cobertura Real que aporta la instalación solar. En la tabla 4, aparecen los resultados económicos obtenidos, comparando los valores alcanzados por el sistema solar utilizando energía auxiliar con otro sistema energético trabajando con energía convencional.

Tabla.1.Distribución mensual de consumo energético y la producción de agua caliente en el 2008							
Base de Datos A/2008 COMPORTAMIENTO EVALUADO							
1	2	3	4	5	6	7	8
MES	Radiación diaria [kWh/m² día]	Aporte Solar [kWh/día]	% Ocupación mes	Demanda Energética [kWh/día]	% Cobertura Solar	Aporte real [kWh/día]	% Cobertura Real
ENE	4.47	93.9	54	132	71.1	93.9	71.09
FEB	5.04	112	80	165.4	67.7	112	67.73
MAR	6.69	161.2	85	162.2	99.4	161.2	99.39
ABR	6.55	155	92	171.3	90.5	155	90.47
MAY	6.08	146.9	100	156.4	93.9	146.9	93.92
JUN	5.52	130	100	153.3	84.8	130	84.8
JUL	6.03	147.5	99	149.1	98.9	147.5	98.93
AGO	6.54	162.9	100	156.4	104.1	156.4	100
SEP	5.63	136.6	78	130.8	104.4	130.8	100
OCT	5.12	123.2	86	146.9	83.8	123.2	83.85
NOV	4.54	100.7	86	166.8	60.4	100.7	60.38
DIC	4.66	103.5	85	170.7	60.6	103.5	60.63
Total anual		47919.6		56588.4	84.7	47544.3	84.02

Tabla .2. Distribución mensual de consumo energético y la producción de agua caliente en el 2009							
Base de Datos A/2009 COMPORTAMIENTO EVALUADO							
1	2	3	4	5	6	7	8
MES	Radiación diaria [kWh/m ² día]	Aporte Solar [kWh/día]	% Ocupación mes	Demanda Energética [kWh/día]	% Cobertura Solar	Aporte real [kWh/día]	% Cobertura Real
ENE	4.48	95.4	51	124.6	76.6	95.4	76.62
FEB	5.01	110.8	84	172.4	64.3	110.8	64.28
MAR	6.64	158.9	85	164.4	96.7	158.9	96.69
ABR	6.54	154.7	91	169.4	91.4	154.7	91.35
MAY	6.11	146.4	100	160.7	91.1	146.4	91.11
JUN	5.53	130.7	98	149.9	87.2	130.7	87.22
JUL	6.04	146.1	100	155.2	94.2	146.1	94.17
AGO	6.43	159.7	100	155.8	102.5	155.8	100
SEP	5.64	137.6	80	131.1	105	131.1	100
OCT	5.34	129.9	87	148.7	87.4	129.9	87.36
NOV	4.42	97.2	85	164.9	58.9	97.2	58.94
DIC	4.68	104	87	174.2	59.7	104	59.72
Total anual		47864.1		56870.8	84.2	47548.1	83.61

Tabla.3. Distribución mensual de consumo energético y la producción de agua caliente en el 2010							
Base de Datos A/2010 COMPORTAMIENTO EVALUADO							
1	2	3	4	5	6	7	8
MES	Radiación diaria [kWh/m ² día]	Aporte Solar [kWh/día]	% Ocupación mes	Demanda Energética [kWh/día]	% Cobertura Solar	Aporte real [kWh/día]	% Cobertura Real
ENE	4.44	92.7	53	130.8	70.9	92.7	70.87
FEB	5.03	111.6	86	174.9	63.8	111.6	63.79
MAR	6.61	158.9	85	162.2	98	158.9	97.96
ABR	6.52	153.8	95	176	87.4	153.8	87.38
MAY	6.08	147.1	100	155.8	94.4	147.1	94.42
JUN	5.56	131.5	89	140.5	93.5	131.5	93.55
JUL	6.06	148.3	87	136.7	108.5	136.7	100
AGO	6.57	163.8	100	156.4	104.8	156.4	100
SEP	5.64	136.6	82	135.9	100.6	135.9	100
OCT	5.22	127.6	88	144.9	88.1	127.6	88.06
NOV	4.44	97.5	80	158.9	61.4	97.5	61.35
DIC	4.47	97.6	83	167.8	58.2	97.6	58.17
Total anual		47721.9		55928.3	85.3	47108.7	84.23

Tabla 4. Comparación entre: Energía Solar con apoyo y Sistema Convencional solamente										
1 MES	2 DIAS	Utilizando Solar y Diesel				Utilizando sólo Diesel				11 Cobertura
		3 Déficit Energético Diario [kWh/día]	4 Energía Generada [kWh/día]	5 Consumo de diesel [Kg.]	6 Costo [usd]	7 Demanda Total [kWh/día]	8 A Generar [kWh/día]	9 Consumo [Kg.]	10 Costo [usd]	
ENE	31	38.11	54.45	134.64	\$69.61	130.82	186.88	462.16	\$238.94	70.87%
FEB	28	63.34	90.49	202.12	\$104.50	174.91	249.87	558.14	\$288.56	63.79%
MAR	31	3.31	4.73	11.70	\$6.05	162.22	231.74	573.11	\$296.30	97.96%
ABR	30	22.21	31.72	75.92	\$39.25	176.02	251.45	601.80	\$311.13	87.38%
MAY	31	8.68	12.41	30.68	\$15.86	155.77	222.54	550.34	\$284.53	94.42%
JUN	30	9.07	12.96	31.00	\$16.03	140.52	200.75	480.44	\$248.39	93.55%
JUL	31	0	0	0	\$ -	136.68	195.25	482.88	\$249.65	100.00%
AGO	31	0	0	0	\$ -	156.39	223.42	552.52	\$285.66	100.00%
SEP	30	0	0	0	\$ -	135.88	194.11	464.56	\$240.18	100.00%
OCT	31	17.30	24.72	61.13	\$31.60	144.91	207.02	511.97	\$264.69	88.06%
NOV	30	61.39	87.70	209.90	\$108.52	158.85	226.94	543.12	\$280.79	61.35%
DIC	31	70.20	100.28	248.01	\$128.22	167.81	239.73	592.86	\$306.51	58.17%
Total Anual				1005.10	\$519.65			6373.95	\$3,295.34	84.23%

RESULTADOS

Utilizar la metodología FCHART permitió dimensionar y diseñar un esquema estructural funcional para una instalación térmica solar con un régimen de circulación termosifónico. En el análisis preliminar, la metodología pronosticó una demanda energética de 55.92 [MWh/año] y una cobertura posible de 87.1%, el aporte solar de 47.74 [MWh/año] y una cobertura de 85.63%.

En el análisis económico realizado el valor de retorno de la inversión se efectúa a los tres años, con una tasa de rentabilidad del 37%, el costo del litro de agua caliente de 4.52 [usd] y el costo del equipamiento por habitación de 297.07 [usd]. Al evaluar la instalación solar con carga real: en el primer año, la demanda energética fue de 56.58 [MWh] con una cobertura posible del 84.7%, el aporte solar 47.54 [MWh/año] y la cobertura solar real de 84.02%. En el segundo año de evaluación la demanda energética fue de 56.87 [MWh/año], la cobertura posible de 84.2%, el aporte solar de 47.54 [MWh/año] y un 83.61% de la cobertura real en el año. El tercer año la demanda energética en el hotel fue de 55.92 [MWh/año] con una cobertura solar posible del 85%, el aporte solar de 47.10 [MWh/año] y la cobertura real de 84.23%.

En la tabla 5, aparecen los valores utilizados en la simulación inicial, en ella se define la radiación solar promedio mes, el Aporte Solar calculado para cada mes, la demanda Energética partiendo de la ocupación promedio mensual, queda calculado la Cobertura Solar y el Aporte Real utilizado en los consumos energéticos, además, estos valores se visualizan en el gráfico 1, donde se puede apreciar el comportamiento simulado de la Cobertura Solar conjuntamente con la Demanda y el Déficit energético.

Tabla.5. Valores de la simulación de la Cobertura Solar en la producción del agua caliente sanitaria.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN INICIAL							
1	2	3	4	5	6	7	8
MES	Radiación diaria [kWh/m ² día]	Aporte Solar [kWh/día]	% Ocupación al mes	Demanda Energética [kWh/día]	% Cobertura Solar	Aporte real utilizado [kWh/día]	% Cobertura Real
ENE	4.62	100.4	85	168.1	59.8	100.4	59.76
FEB	5.11	115.4	85	163	70.8	115.4	70.82
MAR	6.06	141.3	85	157.9	89.5	141.3	89.48
ABR	6.63	158.4	90	159.2	99.5	158.4	99.54
MAY	6.15	148	100	154.2	95.9	148	95.94
JUN	5.67	136.5	100	142.4	95.8	136.5	95.83
JUL	6.22	154	100	142.4	108.1	142.4	100
AGO	6.33	157.1	100	148.3	105.9	148.3	100
SEP	5.75	138.9	80	131.9	105.3	131.9	100
OCT	5.34	129.3	87	144.9	89.2	129.3	89.22
NOV	4.66	106.6	87	155.3	68.6	106.6	68.62
DIC	4.85	110	87	165.7	66.3	110	66.34
Total anual		48587.7		55760.3	87.1	47747.2	85.63

[kWh/día]

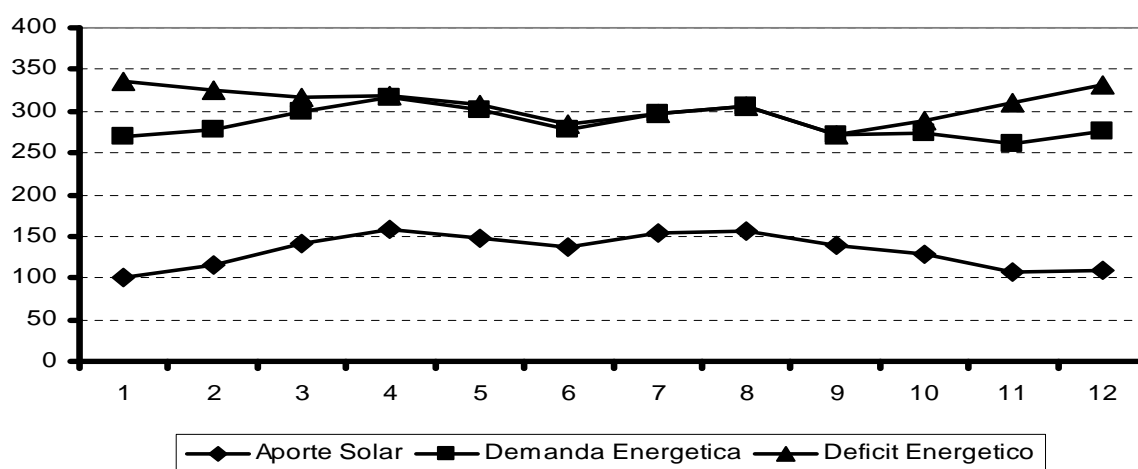


Gráfico 1. Comportamiento de la Cobertura solar simulada

CONCLUSIONES

Se realizó un trabajo de simulación de las condiciones y régimen de explotación de una instalación térmica solar utilizando colectores planos y tanques integrados con régimen termosifónico. Ésta simulación pretendió como objetivo principal: anticipar el comportamiento térmico de dicha instalación, para luego servir de tarea técnica para la realización de un Proyecto Ejecutivo, el cual fue diseñado con las recomendaciones obtenidas mediante el trabajo de simulación. La instalación está construida y se logró realizar una evaluación térmica y económica en la cual se validaron los principales parámetros termo-energéticos, quedando definido el ahorro establecido por la utilización de la energía solar. Esta instalación figura como un Laboratorio Solar con carga real donde aún se definen algunos parámetros térmicos y funcionales de los esquemas con régimen

termosifónico como la relación volumétrica del sistema auxiliar y la aplicación de intercambiadores de calor de doble envoltura en el termo-tanque. Durante 36 meses se estableció un seguimiento y registro de las variables térmicas más significativas a tener en cuenta para el posterior análisis y validación del aporte energético solar brindado por el proyecto energético en el hotel. Resulta de gran interés realizar los cálculos del dimensionado de la instalación partiendo de las simulaciones de la demanda energética, con ello valoramos el futuro comportamiento de las instalaciones térmicas solares, al lograr un pronóstico con el cual podamos seleccionar las variables adecuadas, con ello realizar cálculos más fiables en cuanto al dimensionado del sistema solar. Se respondió a las solicitantes del proyecto con una solución técnica avalada con resultados calculados. Aunque en muchos casos los resultados no resultan generales para todas las variables simuladas, en nuestro caso, se logró realizar una validación de todos los parámetros simulados en el sistema de cálculo, los cuales arrojaron valores compatibles y en el orden con los resultados simulados; estas Desviaciones Standard obtenidas y referidas a los valores de la simulación inicial de: Necesidades Energéticas difiere en un 0.38%, la Cobertura Solar posee una variación del 2.23% y el Aporte Energético difiere en un 0.25% con referencia al pronóstico inicial calculado.

REFERENCIAS

- [1]. **CREUS S Antonio**, "Energía Termosolar". Madrid: amadrid, 2010.196 p. ISBN: 9788496960510
- [2]. **DUFFIE John; BECKMAN William**, "Solar Engineering of Thermal Processes". Madrid: Grupo Cero, 1974.386 p. ISBN: 84-85498-07-0.
- [3]. **CENSOLAR**. *Instalaciones de Energía Solar, Tomos III y IV*, Centro de Estudios de la Energía Solar, Sevilla: PROGENSA, 1989, 311 p. ISBN: 84-86505-16-X.
- [4]. **Bestenlehner1, D**. *Complete Test Facility for Solar Thermal Collectors and Systems, in RIO 9 – World Climate & Energy Event*. 2009: Rio de Janeiro, Brazil.
- [5]. **CHRISTOPHER Martin L, GOSWAMI Yogi D**. *Solar Energy Pocket Reference*. International Solar Energy Society. 2005. ISBN 0-9771282-0-2
- [6]. **GERMAN L Alfredo, LOPEZ L Enrique**. *Criteria to establish an evaluation methodology for the qualification of the visual impact of solar thermal systems on urban landscapes*. Proceedings of Paper no ISEC2005 International Solar Energy Conference August 6-12, p. 21-24; 2005, Orlando, Florida, ISEC 2005-76032 6. ISBN: 0-7918-4737-3 Disponible en: <http://titulaciongeografia-sevilla.es/web/contenidos/profesores/publicaciones/archivos/ASME2005-76032.pdf>
- [7]. **SIELFELD Rolf, PETERSEN Hans**. *Sistemas Solares Térmicos. Manual de diseño para el calentamiento de agua*. Corporación de Desarrollo Tecnológico. Chile, 2007. 360 p. ISBN: 978-956-7911-09-7
- [8]. **RUIZ Valeriano**. *Instalaciones solares técnicas para producción de agua caliente sanitaria*. Editor ATECYR, Instituto Eduardo Torroja, Madrid: Editorial El Instalador, 2006. 260 p. ISBN: 84-95010-12-7.

AUTORES

Jesús M. Iglesias Ferrer

Ingeniero Mecánico. Investigador. Profesor Universitario, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables CETER. Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría-CUJAE, La Habana, Cuba.

e-mail: jiglesias@alastor.cu

Joel Morales Salas

Ingeniero Mecánico. Asistente. Master en Ciencias Profesor Universitario, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables CETER. Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría-CUJAE, La Habana, Cuba.

e-mail: jmorales@ceter.cujae.edu.cu