

## **MODELADO DEL AHORRO ENERGÉTICO EN SISTEMAS TERMOSOLARES HÍBRIDOS BAJO EXIGENCIAS NORMALES DE USO**

A. Lanson, C. Raichijk  
INEDES - GERSolar, Universidad Nacional de Luján  
Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (B6700CED) Luján, Buenos Aires, ARGENTINA  
E-mail: [gersolar@yahoo.com.ar](mailto:gersolar@yahoo.com.ar)

*Recibido 14/08/14, aceptado 25/09/14*

### **RESUMEN:**

Con el fin de modelar el ahorro energético en el calentamiento de agua domiciliar que produce un termotanque híbrido solar comercial con respecto a un sistema convencional equivalente, en condiciones de uso habituales, GERSolar ha realizado un ensayo destinado a cuantificar este ahorro y relacionarlo con las condiciones climáticas a las que los equipos están sometidos. Fueron validados ocho modelos de ahorro energético diferentes mediante la comparación de valores modelados con registros que no formaron parte de la base de modelado. Dos de ellos derivaron un error cuadrático medio relativo RMSE de 39 % y un sesgo medio relativo MBE alrededor de -12 %.

Estos resultados nos permiten concluir que mediciones diarias de radiación solar y temperatura permiten modelar y predecir el ahorro energético que brindan las actuales tecnologías híbridas solares con acumulación, bajo condiciones reales de uso.

**Palabras clave:** energía solar, termotanque solar, modelo de ahorro

### **INTRODUCCIÓN**

Desde hace varios años las reservas de combustibles fósiles han comenzado a decrecer a nivel mundial. La situación se ha advertido en particular desde los comienzos de la crisis del petróleo, en los años 70 (Commoner, 1978). La producción parece decaer definitivamente, por lo cual es razonable esperar un incremento de los precios del petróleo y del gas (Saravia, 2006).

Simultáneamente, el desarrollo económico y el crecimiento poblacional suman más consumidores a la matriz energética que es abastecida por estos recursos convencionales. A nivel nacional esta situación se repite en líneas generales: por un lado una declinación en la producción de petróleo en pozos ya maduros y en yacimientos gasíferos, y por el otro, un incremento sostenido en el consumo domiciliario e industrial, en particular de gas natural.

Si bien el gas natural puede ser remplazado por gas importado, los precios a pagar son más altos, por lo que el estado debe optar entre subsidiar el consumo domiciliario o permitir incrementos en el precio al consumidor final. Una alternativa interesante consiste en estimular el empleo de sistemas híbridos solares con el objetivo de ahorrar energía convencional y tener mayor disponibilidad para uso industrial.

En este sentido es posible encontrar gran cantidad de trabajos sobre temas relacionados con el calentamiento de agua sanitaria (CAS) como la producción de energía en función del recurso disponible, la eficiencia de diferentes diseños (Beikircher et al., 2014), el modelado de su funcionamiento (Schnieders, 1997; Cadafalch, 2009 y Cadafalch et al., 2014), incluso se ha estudiado en profundidad las posibilidades de los tubos de vacío y heat-pipes en esta aplicación (Launay et al., 2006). En Argentina, Lucchini et al. (2012) modelaron la respuesta de un colector solar del tipo placa plana con inercia térmica donde la unidad de tiempo es horaria, el error al final del día es del 2% mientras que durante la noche el modelo subvalúa la temperatura de salida, comenzando al día siguiente con un error del 10%.

¿Pero qué ocurre cuando estos sistemas son sometidos a las mismas exigencias que los convencionales? Un nivel de servicio constante, como es el consumo de agua caliente de una familia tipo, requiere de una prestación confiable de manera de asegurar el nivel de confort con el que sus usuarios cuentan actualmente. Asegurar esta continuidad temporal hace necesario el respaldo de las fuentes convencionales de energía, y propone a la energía solar como pilar del ahorro energético.

Existen programas de simulación que estiman la cobertura de la demanda energética en base a especificaciones de fabricación de distintos sistemas y a una demanda estimada. Pero estas estimaciones surgen de modelos físicos y supuestos de funcionamiento.

En este trabajo proponemos un análisis desde datos reales de ahorro energético en base a una demanda real, donde el uso está distribuido a lo largo del día, en horarios de extracciones de agua caliente habitual y con la exigencia de una temperatura constante en todas ellas. Este perfil de consumo asegura que el sistema híbrido solar deba responder con el mismo nivel de servicio que el sistema convencional, sin concesiones de prestación ni de época del año.

Toda la bibliografía existente coincide en que la respuesta de los sistemas termosolares es dependiente, principalmente, de la radiación solar y la temperatura ambiente.

Dada la dependencia del consumo eléctrico de sistemas híbridos solares con las condiciones climáticas, se modeló su ahorro en comparación con un sistema de calentamiento de agua convencional en función de diversas variables. Los modelos contemplaron variables como la radiación solar incidente en el plano del colector solar, la temperatura ambiente exterior y el índice de claridad del cielo entre otras. La unidad de tiempo de las mediciones y los modelos es diaria.

Se espera obtener un modelo robusto capaz de ser replicado en otras zonas del país de manera de analizar el potencia solar térmico que Argentina posee en el escenario actual.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### BASE DE DATOS

Para poder generar la base de datos que alimente el modelo, se realizó un ensayo simultáneo de 1 termotanque híbrido y 1 termotanque estándar comercial en el laboratorio de GERSolar de la Universidad Nacional de Lujan (34,588 °S; 59,065 °W; 30 msnm) entre los meses de Mayo 2013 y Junio 2014 inclusive.

El primer equipo es un híbrido solar-eléctrico, Figura 1, que consta de un tanque horizontal exterior de 290 litros, con una camisa de intercambio de calor alimentada con un líquido caloportador de solución de propilenglicol que absorbe energía en un colector solar de parrilla de cobre. El tanque es a su vez recubierto por una gruesa capa de aislante mineral. El colector de 1,73m<sup>2</sup> de superficie colectora, cuenta con un vidrio solar, una superficie de absorción selectiva y aislación de lana de vidrio. La fuente de apoyo de energía convencional es una resistencia eléctrica de 1500 W. Todo el sistema se encuentra a 14 metros del punto de consumo. El segundo equipo es un termotanque eléctrico estándar, de interior y de pie, de 155 litros, con una resistencia de 1600 W. Este sistema dista a solo 1 metro del punto de consumo y dentro del mismo recinto.



Figura 1: Sistema híbrido eléctrico-solar

El tablero de medición y control, Figura 3, está compuesto por:

- Un PLC Siemens Logo! 12/24RC flexible, fácilmente programable y con contadores rápidos compatibles con la frecuencia de pulsos del caudalímetro. Brinda una precisión de reloj de 2 segundos por día y un retraso máximo en el cambio de señal (de 0 a 1 ó de 1 a 0) menor a 1 milisegundo. Su programa ejecuta el protocolo de extracción de agua en todos y cada uno de los termotanques
- Un sensor de microcaudal digital Signet2000 versión 22 controla el volumen de agua caliente con una incertidumbre de 1,3% sobre el fondo de escala, que corresponde a 0,143 litros por minuto. Este sensor envía el equivalente a 834,9 pulsos por litro al PLC
- Las electroválvulas controladas por el PLC son Jefferson 1335B que tienen un tiempo de respuesta máximo de 50 milisegundos, una para cada termotanque, a poca distancia de la válvula de mezcla que regula la temperatura del agua de salida. Además se instaló una en la salida de agua caliente del tablero para evitar fugas de agua en caso que se rompiera la válvula mezcladora.
- Una válvula mezcladora modera la temperatura del volumen de agua de cada extracción regulando la relación de caudal de agua fría y agua caliente proveniente del termotanque en ensayo, regulada a 42°C
- Un datalogger NOVUS Field Logger, que cuenta con 8 entradas digitales y 8 entradas analógicas. Sus entradas analógicas reciben la señal de termocuplas PT100 de 3 hilos que sensan la temperatura del agua en distintos puntos del ensayo. Las entradas digitales reciben la señal de pulsos de un relé que indica señala los minutos en que transcurre cada extracción y los contadores de volumen de gas. El error de apreciación del instrumento es de 0,15 % del valor de "fondo de escala" para las termocuplas que abarcan un rango de -200°C a 850°C.
- La radiación solar es registrada por un Novus LogBox AA en caja IP65 de dos canales analógicos de 16 bits, una precisión de 0,2 % de la faja máxima para mediciones de tensión y corriente. Una de sus entradas detecta la tensión de salida de un sensor fotovoltaico (inclinado un ángulo igual al plano de los colectores) fabricado por la Comisión Nacional de Energía Atómica:



Figura 2: Fotografía del sensor fotovoltaico CNEA

- Tres wattímetros TBCin DD-282 clase 2 marcan el consumo eléctrico total de cada uno de los sistemas eléctrico. El estado de estos medidores es registrado manualmente a la hora de corte de cada día
- Tres medidores de caudal de gas Itron, con contador mecánico y salida digital, miden y registran el consumo de los termostanques a gas con un nivel de apreciación de 0,0001 m<sup>3</sup>



Figura 3: Fotografías del tablero de medición y control

Todo este instrumental permitió realizar las siguientes mediciones:

- a) La cantidad de energía extraída de cada uno de los dos sistemas. En primer instancia se definió, a partir del perfil de extracción propuesto en el protocolo interno de ENARGAS (NAG-313/09) que establece que la población del centro y norte del país utiliza agua caliente 5 veces por día: aproximadamente a las 7:00; 7:30; 12:00; 20:00 y 20:30 hs, en un promedio de 40 litros por vez, un total de 200 litros diarios a una temperatura de 42 °C.
- b) La temperatura:
  - i. Del agua a la entrada al sistema
  - ii. Del agua a la salida de la válvula mezcladora, la denominaremos temperatura de mezcla
  - iii. Ambiente exterior
- c) La energía solar incidente en el plano del colector solar.
- d) La energía eléctrica consumida por el sistema híbrido solar-eléctrico y por el termostanque puramente eléctrico.

Las variables analizadas fueron:

- Energía eléctrica consumida por cada sistema, expresadas en kWh,  $C_{conv}$  y  $C_{hib}$
- Energía solar recibida por el plano inclinado de los colectores Rad, expresada en kWh
- Energía solar registrada el día anterior  $Rad_{-1}$
- Índice de claridad medio diario del cielo  $K_t$  (radiación registrada durante el día / radiación calculada a tope de atmósfera, en el ángulo de inclinación del colector)
- Índice de claridad medio diario de cielo  $K_{t,-1}$  del día anterior
- Temperatura ambiente media diaria  $T_e$
- Temperatura máxima registrada durante el día  $T_{max}$
- Energía calórica en kWh entregada por cada sistema,  $Q_{conv}$  y  $Q_{hib}$  durante las extracciones de agua caliente calculada como:

$$Q = V Cp [T_m - T_1] \quad (1)$$

donde:

V es el volumen de agua extraído del sistema

$C_p$  es la capacidad calorífica del agua para ese rango de temperaturas,  
 $T_m$  es la temperatura media del agua de mezcla durante la extracción  
 $T_1$  es la temperatura media del agua fría que entra al circuito

Debido a las dificultades técnicas para lograr una temperatura de mezcla idéntica para ambos sistemas en cada extracción, la energía calórica extraída del sistema convencional y del sistema híbrido mostraron diferencias en 3 de las 5 extracciones diarias. En estas condiciones la comparación directa de los consumos energéticos requeridos implicaba la introducción de un error sistemático. Para corregir esta desviación, se ha definido para cada extracción el valor de la energía calórica teórica requerida por el protocolo (NAG-313/09), denominada energía calórica de referencia  $Q_{ref}$ , en función de la temperatura real del agua fría de entrada y la temperatura de mezcla estipulada en 42°C.

$$Q_{ref} = V C_p [42 \text{ °C} - T_1] \quad (2)$$

Finalmente, la energía convencional ahorrada por el sistema híbrido, si ambos sistemas hubiesen entregado exactamente la energía calórica establecida, se definió de la siguiente manera:

- Ahorro:

$$Ahorro = Q_{ref} \left[ \frac{C_{conv}}{Q_{conv}} - \frac{C_{hib}}{Q_{hib}} \right] \quad (3)$$

donde:

$C_{conv}$  es la energía eléctrica consumida por sistema convencional  
 $C_{hib}$  la energía eléctrica consumida por sistema híbrido  
 $Q_{conv}$  la energía calórica extraída del sistema convencional  
 $Q_{hib}$  la energía calórica extraída del sistema híbrido  
 $Q_{ref}$  la energía correspondiente al volumen de agua de 40 litros establecido por el protocolo, con un salto térmico entre la temperatura real promedio del agua fría de entrada y los 42 °C requeridos.

El ensayo fue ejecutado durante 13 meses corridos. La extracción de aquellos datos que no respondían a las exigencias del protocolo configuró la base de datos depurada. Este proceso arrojó 256 datos diarios válidos, de los cuales se reservaron aleatoriamente 25 registros para la validación de los modelos propuestos utilizando los restantes 231 para ajustarlos.

## MODELOS

En un análisis de la relación individual entre el ahorro y cada variable, se detectó que el ahorro era explicado por la radiación incidente con un  $R^2$  de 32%; por la radiación del día anterior con un  $R^2$  de 46% y por el  $K_t$  con un  $R^2$  de 37%.

Con la depuración de los registros obtenidos volcados en el programa estadístico SPSS y en base a las observaciones anteriores, se analizaron 8 modelos lineales distintos, considerando diferentes conjuntos de variables. El número máximo de variables contempladas fue 7: radiación diaria incidente en el plano del colector,  $Rad$ ; temperatura media diaria exterior,  $T_e$ ; temperatura máxima diaria,  $T_{max}$ ; energía diaria a extraer,  $Q_{ref}$ ; radiación diaria incidente del día anterior,  $Rad_{-1}$ ; índice de claridad,  $K_t$  e índice de claridad del día anterior,  $K_{t-1}$ .

A continuación se detallan cada una de las combinaciones usadas:

- El primer modelo (ML1) contempló las 7 variables descriptas,
- el segundo (ML2) todas menos la temperatura máxima diaria,  $T_{max}$
- el tercero (ML3) todas menos el  $K_{t-1}$
- el cuarto (ML4) todas menos el  $K_t$  y el  $K_{t-1}$
- el quinto (ML5) todas menos la  $T_{max}$  y el  $K_{t-1}$
- el sexto (ML6) descartó la  $T_{max}$ ; el  $K_{t-1}$  y la  $Q_{ref}$
- el séptimo (ML7) no incluyó la  $T_{max}$ ; el  $K_{t-1}$ ; la  $Q_{ref}$  ni el  $K_t$
- el último modelo (ML8) reincorporó la  $Q_{ref}$  y descartó la  $Rad_{-1}$ ; la  $T_{max}$  y el  $K_t$

$$Ahorro_{ML1} = a + b Rad + c T_e + d T_{max} + e Q_{ref} + f Rad_{-1} + g K_t + h K_{t-1}$$

$$Ahorro_{ML2} = a + b Rad + c T_e + e Q_{ref} + f Rad_{-1} + g K_t + h K_{t-1}$$

$$Ahorro_{ML3} = a + b Rad + c T_e + d T_{max} + e Q_{ref} + f Rad_{-1} + g K_t$$

$$Ahorro_{ML4} = a + b Rad + c T_e + d T_{max} + e Q_{ref} + f Rad_{-1}$$

$$Ahorro_{ML5} = a + b Rad + c T_e + e Q_{ref} + f Rad_{-1} + g K_t$$

$$Ahorro_{ML6} = a + b Rad + c T_e + f Rad_{-1} + g K_t$$

$$Ahorro_{ML7} = a + b Rad + c T_e + f Rad_{-1}$$

$$Ahorro_{ML8} = a + b Rad + c T_e + e Q_{ref} + h K_{t-1}$$

Estos 8 modelos fueron procesados en SPSS (Software y soluciones de análisis predictivo de IBM). En todos los casos se probó optimizarlos con la función Solver y ejecutar modelos semiempíricos forzando el cruce por cero de las predicciones del modelo con los datos medidos. En todos los casos los coeficientes obtenidos de SPSS arrojaron los mejores resultados.

## RESULTADOS

En la tabla 1 se pueden observar los coeficientes de ajuste obtenidos, el  $R^2$  de ajuste y los resultados del estudio de validación realizado para cada uno de los 8 modelos analizados.

| Modelo | cte.    | Rad    | $T_e$  | $T_{max}$ | $Q_{ref}$ | Rad <sub>-1</sub> | $K_t$  | $K_{t-1}$ | Modelo | Validación |       |        |
|--------|---------|--------|--------|-----------|-----------|-------------------|--------|-----------|--------|------------|-------|--------|
|        |         |        |        |           |           |                   |        |           | $R^2$  | $R^2$      | RMSE% | MBE%   |
| ML1    | -17,991 | -0,049 | 0,239  | -0,026    | 2,116     | 0,175             | 8,054  | 3,432     | 65%    | 68%        | 41%   | -14%   |
| ML2    | -17,608 | -0,057 | 0,209  |           | 2,054     | 0,179             | 7,955  | 3,316     | 65%    | 68%        | 41%   | -14%   |
| ML3    | -17,810 | -0,118 | 0,232  | -0,023    | 2,101     | 0,267             | 10,527 |           | 65%    | 67%        | 42%   | -14%   |
| ML4    | -17,750 | 0,149  | 0,188  | -0,007    | 2,260     | 0,257             |        |           | 63%    | 71%        | 39%   | -12,1% |
| ML5    | -17,479 | -0,122 | 0,205  |           | 2,047     | 0,268             | 10,367 |           | 65%    | 67%        | 42%   | -14%   |
| ML6    | -3,166  | -0,160 | 0,029  |           |           | 0,259             | 11,700 |           | 62%    | 66%        | 43%   | -17%   |
| ML7    | -1,797  | 0,143  | -0,019 |           |           | 0,247             |        |           | 60%    | 70%        | 40%   | -15%   |
| ML8    | -17,773 | 0,160  | 0,207  |           | 2,117     |                   |        | 9,563     | 64%    | 71%        | 39%   | -12,7% |

Tabla 1: Coeficientes e indicadores del estudio de validación de los modelos analizados

Se repitió el mismo procedimiento de análisis para todos los modelos. Durante el análisis, el ahorro mostró una débil relación con la temperatura máxima, incluso no se observó pérdida de poder predictivo al eliminar esta variable. La energía calórica a extraer no presenta grandes fluctuaciones dado que las condiciones de ensayo se mantuvieron constantes. A pesar de su baja variabilidad, se observó sensibilidad del modelo a esta componente por lo que se optó por mantenerla en los modelos restantes. Dada la relación directa entre la radiación y el  $K_t$ , se buscó la combinación mas representativa y simple de las variables Rad; Rad<sub>-1</sub>;  $K_t$  y  $K_{t-1}$  en los modelos evaluados. Se encontró que el modelo ML8 responde de mejor manera a estos requerimientos.

A continuación, en la Figura 4, se presentan las gráficas de  $Ahorro_{modelado}$  vs.  $Ahorro_{medido}$  para los modelos ML4 y ML8 con los mejores indicadores observados en el estudio de validación.

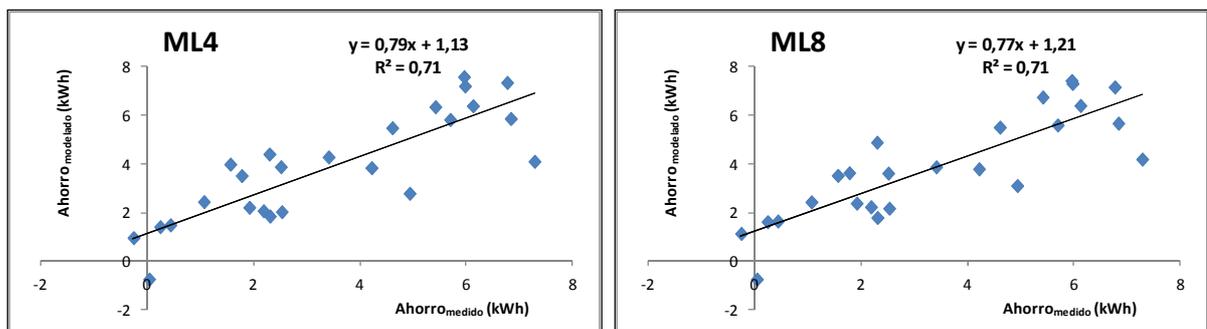


Figura 4:  $Ahorro_{modelado}$  vs.  $Ahorro_{medido}$  para los modelos ML4 y ML8

## DISCUSION

Las validaciones de todos estos modelos presentan una dispersión similar y de gran magnitud.

La bibliografía demuestra que existe una relación entre algunos factores climáticos, como la heliofanía y la amplitud térmica, con la radiación global. Basado en la presunción de una dependencia estadística entre variables, los modelos no incluyeron estos factores entre sus componentes.

Un análisis de la existencia efectiva de dependencia estadística de estas variables con las variables contempladas y su eventual inclusión en el modelado del ahorro podría disminuir la dispersión de nuevos modelos y mejorar su capacidad de predicción.

## CONCLUSIONES

La radiación diaria en el plano de los colectores, su equivalente al tope de atmósfera, el resultante índice de claridad de cielo, junto con la misma información correspondiente al día anterior y la temperatura media diaria permiten modelar el ahorro que conlleva el uso de sistemas híbridos termosolares con tanque de acumulación, con un grado aceptable de determinación y error para primeras estimaciones como las de este trabajo.

En próximos estudios se evaluarán la significancia de otras variables tales como el barrido acumulado diario del viento sobre los equipos sometidos a la intemperie, la amplitud térmica y la humedad media diaria, para buscar modelos con mejor ajuste y menor error.

En el futuro, una vez que se reúnan suficientes datos y se sumen al análisis otros sistemas híbridos, como por ejemplo combinaciones solar-gas, la información recolectada permitirá evaluar ahorros potenciales de gas en distintas zonas del país en las que se usen estos equipos. Esa información podrá constituirse en una herramienta de planificación importante por parte del estado, para fundamentar políticas de incentivo a la instalación de estos sistemas. En un contexto de aumento de la demanda de los combustibles fósiles y el agotamiento de las reservas (con la suba de precios que ello trae aparejado) contar con dicha información presupondrá una ventaja en la confección de políticas de manejo de los recursos energéticos.

El hecho de contar con un banco de ensayos operativo y con facilidades de medición y flexibilidad de extracción, que puede acomodarse a distintos escenarios, presenta una doble ventaja: por un lado, la posibilidad de ensayar distintos perfiles de extracción de agua para estudiar diferentes situaciones de demandas sobre los sistemas y la respuesta de los mismos, por el otro, facilitará el análisis de modificaciones en los parámetros de instalación de los sistemas híbridos, permitiendo evaluar su impacto en el ahorro del consumo de energía.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Salvador Gil por su participación en este proyecto, a ENARGAS y la UNSAM, quienes han contribuido al financiamiento del mismo. De igual forma agradecemos la participación generosa de las firmas Orbis y Rheem, quienes facilitaron el equipamiento. Y al departamento de Estadística de la Universidad Nacional de Luján por su asesoramiento en las técnicas utilizadas.

## REFERENCIAS

- Beikircher T., Berger V., Osgyan P., ReuB M., Streib G. (2014). Low-e confined air chambers in solar flat-plate collectors as an economic new type of rear side insulation avoiding moisture problems. *Solar Energy* 105, 280-289.
- Cadafalch J. (2009). A detailed numerical model for flat-plate solar thermal devices. *Solar Energy* 83, 2157-2164.
- Cadafalch J. y Cónsul R. (2014). Detailed modeling of flat plate solar thermal collectors with honeycomb-like transparent insulation. *Solar Energy* 107, 202-209.
- Commoner B. (1978). *L'energía alternativa*, pp. 168. Riuniti, Roma.
- Launay S., Sartre V., Bonjour J. (2006). Parametric analysis of loop heat pipe operation: a literature review. *International Journal of Thermal Sciences* 46, 621-636.
- Lucchini, J. M., Stoll, R. G., Garnica, J. H., Barral, J. R. (2012). Modelado físico matemático de un colector solar del tipo placa plana con inercia térmica. *Actas del III Congreso Argentina de Ingeniería Mecánica*
- Saravia L. (2006). Energías de fuentes renovables: cada vez más cerca. *Ciencia Hoy* 16, 92, 58-64.
- Schnieders, J. (1997). Comparison of the energy yield predictions of stationary and dynamic solar collector models and the models' accuracy in the description of vacuum tube collector. *Solar Energy* 61, 179-190.

## ABSTRACT

GERSolar has developed a testing experiment to quantify the energy savings in domestic solar hot water production in relation with weather conditions. A commercial solar hybrid system was compared with an equivalent conventional system, both under normal conditions of use. Energy saving was evaluated using eight different models that were validated by matching estimated and measured values that were not part of the modeling base. Best performances yielded a RMSE of 39% and an MBE around -12%. According to these results, we conclude that daily radiation and temperature measurements allow the modeling of present hybrid solar technologies with storage power savings under actual use conditions.

**Keywords:** solar energy, hot hybrid systems, model, saving