

## CONTRIBUCION PARA INNOVAR EN PROYECTOS SOLARES DE CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA EN CIUDADES DEL DESIERTO DE ATACAMA: COSTO DEL m<sup>2</sup> INSTALADO

Jiménez, W.<sup>(p)</sup>; Galleguillos, R.; Echevarría, J.F.

### Abstract

In this work were registered the domiciliary solar hot water of flat plate collectors for innovating projects that rationalize their use in Antofagasta (23°47' S; 70°26' W). A distribution of tabulated data (discreet statistic) defines quantitative variables: as area solar collectors and volume of hot water. It is proposed a simple model of lineal regression with two parameters, such that the value of one predicts to the other one. The regression estimates that to heat 100 liters of water up to 40°C, is necessary 1 m<sup>2</sup> of solar collector. The city has 60 of these facilities in hospitals, school, high school and housings and 7 of them don't work. Our study informs of a total of 700 m<sup>2</sup> of solar collector and 33400 available of hot water liters.

*Keywords: Solar Energy, Solar hot water of flat plate collectors.*

### Resumen

Se empadronan colectores solares domiciliarios de placa plana para innovar proyectos que racionalizan su uso en Antofagasta (23°47' S; 70°26' W). Una distribución de datos tabulados (estadística discreta) definen variables cuantitativas: área colectora solar y volumen de agua caliente. Se propone un modelo de regresión lineal simple que las liga, tal que el valor de una predice a la otra. El estudio demuestra que para calentar 100 litros de agua (a 40°C) se requiere un m<sup>2</sup> de colector solar. La ciudad tiene 60 de estas instalaciones en hospitales, liceos y viviendas y 7 no funcionan. Con un total aproximado de 700 m<sup>2</sup> y 33400 litros disponibles.

*Palabras clave: Energía solar. Agua caliente solar de colectores de placa plana*

## 1. Introducción

Variadas como numerosas son las publicaciones sobre las singularidades helioenergéticas de Antofagasta, Chile (23°46' S; 70°24' W) de 300 mil habitantes y radiación solar de 20 MJ/m<sup>2</sup>día promedio diario anual. Con temperatura media del agua de la red de 17 °C y 77% de humedad relativa. De precipitaciones menor a un mm con una rapidez de brisa marina promedio 2,5 m/s que la ventilan desde el pacífico SW. Ambiente propicio para aplicar la energía solar y contribuir en innovar en proyectos en consideración de las condiciones meteorológicas muy estables (planas) a lo largo del año

Los estudios realizados por Espinosa y Alcayaga [1] 1973 comparan las máximas solarimétricas con las de otras latitudes y concluyen que, la radiación solar incidente en el desierto de Atacama es una de las más alta del mundo. En el mismo contexto, Jiménez y Galleguillos [2], miden radiación directa en San Pedro de Atacama y constatan que durante semanas sobrepasa los 1000 [W/m<sup>2</sup>], durante el mediodía en periodos estivales y destacan que, raramente existen dos días consecutivos nublados. Alcayaga [3] (1987), evalúa el potencial energético solar incidente, desde el punto de vista de las longitudes de ondas del espectro electromagnético; para ello, mide sistemáticamente a través de filtros, la radiación solar, tanto directa como difusa. Los estudios precedentes, subrayan las bondades climáticas y solarimétricas de la ciudad; pero con un alto del espectro solar en longitudes del UV-B.

En la región las aplicaciones solares son: fotovoltaica, pozas de evaporación y calentamiento de agua, vía placa plana. Esta última, es la aplicación doméstica más difundidas. El estudio sobre la optimización de la producción de agua caliente ha sido descritos, entre otros, por Portillo [4] (1985) que escribe principios físicos y conceptos termodinámicos que informan de métodos y procedimientos de cálculo de las instalaciones productoras de agua caliente sanitaria e industrial e incluye ejemplos prácticos de estas instalaciones, tablas y extractos de normativas vigentes. En el mismo contexto Sarmiento (1986) [5] y Arata [6] (1988) complementan con datos locales, informan sobre la tabla Grados-días, y describen balances energéticos, así como a las consideraciones técnicas y económicas de diseños en plantas solares. Dimensionan instalaciones y analizan factores como demanda de agua caliente, cantidad que se desea acumular, condiciones climáticas y, sobre todo, el tipo de colector, desde el punto de vista de la circulación del fluido, abierto o cerrado, termosifón o forzado, cuyas características técnicas influyen en el comportamiento final.

Los métodos de cálculo del área pasan por simples identificaciones matemáticas, hasta sofisticados cálculos computacionales que procesan variables térmicas, climáticas y solarimétricas como el estudios del modelo de simulación Carta f, aplicado por Beckman, Klein y Duffie 1977 [7], de la Universidad de Wisconsin, constituyen aportes referenciales técnicos de los estudios para quienes analizan las caídas de presión en el colector y afirman que son más intensas al final de la placa absorbente que en el centro. O sea, la rapidez del fluido es mayor al final de los tubos ascendentes que en su centro y recomiendan un número suficiente de 24 tubos ascendentes que satisfacen cualquier circulación forzada o natural. Otros modelos son propuestos por Hotel y Whillier y comentados por Liu y Jordan como el de utilizabilidad diaria  $\Phi$ , desarrollado.

El estudio precedente, permite el trabajo que se propone desde el punto de vista de la aplicación del funcionamiento de las instalaciones domiciliarias en la ciudad que, en su mayoría colectores de placa plana, con circulación abierta y termosifón (convección natural). Se pretende innovar en proyectos para ello se contribuye a racionalizar la relación área colectora y volumen de agua caliente. La aplicación de la estadística discreta proporciona

una distribución de datos tabulados que definen variables cuantitativas, área y volumen; a juicio de los autores es una información relevante.

La explotación de la distribución de datos pasa por la aplicación de la estadística inferencial, para tipificar las instalaciones solares y concluir respecto, de la temperatura producida en función a área disponible y al volumen en litros de agua caliente y el costo involucrado.

Es objetivo general, el reconocer en la identificación matemática la herramienta de cálculo de área de colector plano en función del volumen de agua caliente requerida, para analizar la eficiencia de las instalaciones y contribuir a la optimización de la producción de agua caliente a 40°C, en consideración de las singularidades helioclimáticas locales.

## 2. Proposición de la identificación que relaciona el área de colector y el rendimiento.

El cálculo del área del colector plano, expuesto a la radiación solar en condiciones tales que los rayos son perpendiculares al plano del colector es:

$$S = \frac{mc(T_C - T_F)}{tI\eta} \quad (1)$$

Donde,  $S$  es la superficie de colector solar de placa plana, en  $[m^2]$  requerida;  $m$ , la masa de agua caliente requerida, en  $[Kg]$  unidades relativas al equivalente másico, un litro de agua igual a un  $Kg$ ;  $c$  el calor específico en  $[N/m^3]$ ;  $\eta$ , el rendimiento de los colectores como máquinas térmicas, indicadas por los fabricantes;  $(T_C - T_F)$ , nivel calórico entre la entrada y la salida del agua al sistema solar. El agua que entra al sistema solar es la fría suministrada por la red de agua potable de la ciudad y  $T_C$  es el nivel calórico de agua caliente deseada;  $t$ , el tiempo de residencia del agua en el sistema solar, equivalente a un día en  $[s]$ ;  $I$  es la radiación solar global de la ciudad, promedio diario anual en  $[MJ/m^2 \text{ día}]$ .

La hipótesis planteada se basa en que si, los parámetros climáticos de la región son estables, entonces se contribuye a predecir un comportamiento termodinámico de un sistema de calentamiento de agua, vía colector solar de placa plana, de circulación abierta (sin intercambiadores de calor) y distribución de calor por convección natural (termosifón).

En efecto, un modelo de regresión lineal liga una variable dependiente (superficie de colector) con otra independiente (masa de agua caliente deseada) a través de la ecuación de la recta.

Las distribución de datos meteorológicos acusan que su estabilidad, se debe a las masas de aire que provienen desde el océano pacífico (SW) y que ventilan el litoral con brisas, cuya rapidez no sobre pasan los  $2,5 [m/s]$  ayudado por la orografía de la cordillera de la costa en esta región.

La ecuación (1) tiene más de un parámetro constante, estos son: la radiación solar  $I \approx 20 [MJ/m^2 \text{ día}]$ ; los niveles de calor del agua que entra y sale de sistemas solar; temperatura del agua de la red,  $T_F \approx 17 [^\circ C]$ ; y el nivel calórico de la salida del agua caliente deseada  $T_C \approx 40 [^\circ C]$ ; el rendimiento promedio de los colectores de placa plana, según su fabricación  $\eta \approx 0,45\%$  y el tiempo de residencia del flujo solar, equivalente a un día es  $86400 [s]$ .

Experimentalmente, se miden las dimensiones de un colector instalado en la ciudad y se calcula su superficie efectiva  $S$ . De igual forma, las dimensiones del estanque termoacumulador, permite conocer la masa de agua caliente confinada (se descuenta volumen equivalente a aislación y envolventes metálicas, según fabricación). Por lo tanto, se

puede estimar el nivel calórico del agua caliente efectiva confinada en los estanques termoacumuladores, interactuando con estas dos variables.

En atención, que se diseña para alcanzar 40°C, los alcances técnicos y argumentos físicos estiman la eficiencia de la instalación solar de placa plana de circuito abierto y termosifón en la ciudad.

La ecuación (2) resume la hipótesis precedente y es consecuencia de los conceptos físicos involucrados, describe que la temperatura  $T_C$  es función de la superficie del colector ( $S$ ) y del volumen de agua caliente confinada en el estanque termoacumulador, expresado en masa de agua, por lo tanto  $n$  Kg.

$$T_C = \left[ 17 + \frac{S}{m} \psi \right] [^\circ\text{C}] \quad (2)$$

Donde  $\psi$  es una magnitud constante equivalente a 1863 [Kg/m<sup>2</sup>] que resulta de las magnitudes de los parámetros dicho de poca variabilidad y aludidos anteriormente. El valor obtenido por este método corresponde al promedio diario anual de la temperatura de agua caliente almacenada en el estanque termoacumulador.

### 3. Justificación del método

Se asume que en una instalación básica la temperatura del nivel calórico del agua deseada debe ser  $T_C = 40$  [°C]. Este valor corresponde a un diseño técnicamente óptimo, estas condiciones son: orientación del plano del colector hacia el Norte geográfico e inclinado en 45° respecto del plano horizontal; consideraciones heliotécnicas del colector en sistema abierto sin intercambiadores de calor, termosifón esto es transferencia de calor por convección natural; con altura manométrica apropiadas, aislación, etc.. La inclinación de 45° del plano de colector, es la resultante de la suma parcial entre la latitud de la ciudad y la declinación solar para el mes del año, cuya radiación solar es la más desfavorable, esto es en el solsticio de invierno del hemisferio Sur (21 de Junio).

Una instalación así concebida sirve de patrón de comparación.

En consecuencia el método utilizado se reduce a medir el área de colector ( $S$ ) y el volumen del termoacumulador ( $m$ ) y se obtiene indirectamente el nivel de calor ( $T_C$ ) confinado en el estanque termoacumulador de la instalación. Al comparar con los 40 [°C] de temperatura de agua caliente que idealmente debiera tener, se determina el rendimiento relativo.

De esta forma, una instalación puede ser más o menos favorable dependiendo si la temperatura de agua caliente calculada es mayor o menor a los 40 [°C], en virtud de las condiciones iniciales. He ahí, la hipótesis.

### 4. Comprobación del método utilizado.

El método es un procedimiento práctico que puede ser verificado igualmente. Se trata de comprobar si efectivamente los niveles calóricos calculados del modelo matemático concuerdan con los medidos en forma práctica. La tabla 1, muestra la comparación teórica-práctica de las temperaturas del agua caliente solar en una instalación prototipo de una casa habitación familiar. Se mide cada cierta hora, directamente de la ducha de agua caliente, su nivel calórico alcanzado. El termómetro utilizado es uno digital Cole Parmer, Digi-Sense con termocupla (type K) por sensor. Modelo 8520-50 y rango-50 [°C] a +1100 [°C]. Se realizan mediciones consecutivamente y se estima de esta forma un promedio.

De esta forma, se obtiene una información de la temperatura en la salida más próxima al estanque termoacumulador. Concientes que esta información no corresponde a éste último, no existe otra posibilidad, a que no sea perforándolo. Obviamente muy difícil.

Modelo matemático Tc [°C]	Medición práctica	
	hora	Tc [°C]
35,6	8:15	41,0
35,6	12:00	44,0
35,6	15:00	47,0
35,6	18:00	49,0
35,6	19:00	49,0
<b>Media diaria 46 °C</b>		

Tabla 1 Comprobación del método (Diciembre 2007)

La Tabla 1 describe la comprobación del método en una instalación escogida aleatoriamente. La temperatura calculada teóricamente mediante el método es un valor medio-diario y los obtenidos mediante la lectura del termómetro, corresponden a valores instantáneos medidos a distintas horas. Al comprobar en estos últimos su valor medio, se evidencia su similitud, si se tiene en cuenta que en verano el valor instantáneo debe ser más alto. Ello confirma la versatilidad del método y se desprende que 1 [m<sup>2</sup>] de colector solar calienta aproximadamente 100 litros de agua a 40 [°C] con una fluctuación de un 10%, asumida en 4 [°C]. Este criterio toma en cuenta las singularidades climáticas de la ciudad de Antofagasta en el comienzo del período estival en una instalación tipo convección natural, y distribución de calor por termosifón.

## 5. Argumentos matemáticos para procesar datos del empadronamiento.

La distribución de datos son procesado mediante series de tiempo que facilita predecir comportamiento entre las variables aludidas: la superficie de colector v/s volumen de agua caliente confinada (masa), a partir del método de las correlaciones. En efecto, la regresión lineal liga, una variable respecto de la otra. La ecuación de la recta se obtiene a partir del método de los mínimos cuadrados de la distribución de 60 datos encuestados y cuyos resultados se procesan en una planilla electrónica para determinar la función lineal, a partir de:

$$\begin{aligned} \sum S &= A \sum V + BN \\ \sum SV &= A \sum V^2 + B \sum V \end{aligned} \quad (3)$$

El sistema de ecuaciones (3) para los datos empadronados donde  $N = 60$  instalaciones solares, donde  $\sum S = 768,8m^2$ ;  $\sum V = 33480litros$ ;  $\sum SV = 298824$ ;  $\sum V^2 = 4,2x10^7$  cuyo resultado define la recta que describe las superficies de colector solar de placa plana instalada en Antofagasta en función del volumen de agua caliente confinada:  $S = f(V)$ :

$$S = 0,07V + 8 \quad (4)$$

#### 4. Conclusión

Si a la ecuación (4) le asignamos un volumen equivalente a 100 litros, el valor de S es igual a 8 m<sup>2</sup>, claramente indica un sobre dimensionamiento de las instalaciones hasta ahora instaladas en Antofagasta, en el sentido que existen más superficies que las requeridas, respecto del volumen de agua caliente confinada.

En la ciudad hay 60 instalaciones solares, de las cuales 7 no funcionan. La superficie total disponible de colector es 700 [m<sup>2</sup>] y el volumen de agua caliente disponible alcanza a 33400 [l] diarios. Un 11%, son de circulación forzada que implican mover las masas mediante bombeo eléctrico.

Que, la optimización del sistema afirma que un [m<sup>2</sup>] instalado de colector solar de placa plana es calienta 100 [l] de agua a una temperatura promedio diario-anual de 40 [°C], en condiciones solarimétricas y climáticas de Antofagasta.

Que el mantenimiento de los colectores solares es nulo, y que cada vez que hubo que visitar las instalaciones se tuvo que limpiar una espesa capa de barro formado por polvo y humedad. Estudios indican que este hecho disminuye el rendimiento del colector, como máquina térmica, hasta en un 20%. Esto es grave si se toma en cuenta la nula precipitación.

En Antofagasta actualmente existen dos empresas que venden, instalan y realizan mantenimiento a los equipos solares, estas son Solahart Chile Ltda. y CovaSolar.

Que la forma de transferencia de calor es por convección natural o termosifón es la recomendada, hasta volúmenes de metro cúbico.

El método propuesto, podrá usarse donde se desee si las medias diarias-anales de los parámetros de entrada (temperatura de la red, radiación solar, área de colector, etc.), son las adecuadas. La temperatura calculada teóricamente mediante el modelo matemático del cálculo de la eficiencia relativa es un valor medio-diario y los obtenidos mediante la lectura del termómetro, corresponden a valores instantáneos medidos a distintas horas. Al comprobar en estos últimos su valor medio, se evidencia su similitud, si se tiene en cuenta que en verano el valor instantáneo suele ser más alto. Ello confirma la versatilidad del método y se desprende que 1 [m<sup>2</sup>] de colector solar calienta aproximadamente 100 litros de agua a 40 [°C] con una fluctuación de un 10%, asumida en 4 [°C]. Este criterio toma en cuenta las singularidades climáticas de la ciudad de Antofagasta y una instalación tipo convección natural, es decir, sin motobomba eléctrica ni termostatos.

El escaso desarrollo de los colectores solares en Antofagasta, presumiblemente se debe a:

- a) Condicionantes económicos-financieros. El empadronamiento acusó una inversión inicial elevada que no todos pueden asumir.
- b) El periodo de la amortización de la inversión es alrededor de 5 años.
- c) Autoridades sin compromiso ecológico y medioambiental.
- d) Desinformación sobre el tema de las energías renovables, por cuestión cultural
- e) No se toman en cuenta la mantención de la instalación solar.
- f) Las viviendas no han sido diseñadas para estos fines y encarecen su implementación.

Por las razones expuestas innovar en energía solar es responder a estas últimas inquietudes y a los conceptos básicos de facilitar la implementación de los sistemas solares a nivel de subsidios por parte del gobierno regional y aprender de la experiencia de países europeos, respecto de lo tecnológico.

## Referencias

- [1] Espinosa C. y Alcayaga O., *Seminario de Energía*, Actas. Septiembre, 1973, pp.45-50. Departamento de Física. Universidad del Norte. Antofagasta, Chile
- [2] Jiménez W.W, y Galleguillos V.R. Heliocalentamiento de agua en Liceo A16. *Seminario Nacional de Energía Solar y Eólica*. Universidad de Concepción. Concepción. 1986. pp 57-62.
- [3] Alcayaga M.O. Solarimetría posicional en la Segunda Región. *Seminario Nacional de Energía Solar y Eólica*. Universidad de La Serena. La Serena. 1992. pp 69-74
- [4] Portillo P. (1985 M.O. Solarimetría posicional en la Segunda Región. *Seminario Nacional de Energía Solar y Eólica*. Universidad de La Serena. La Serena. 1992. pp 69-74
- [5] Sarmiento P. (1985 M.O. Solarimetría posicional en la Segunda Región. *Seminario Nacional de Energía Solar y Eólica*. Universidad de La Serena. La Serena. 1992. pp 69-74
- [6] Arata A.A. (1985 M.O. Solarimetría posicional en la Segunda Región. *Seminario Nacional de Energía Solar y Eólica*. Universidad de La Serena. La Serena. 1992. pp 69-74
- [7] Portillo P. (1985 M.O. Solarimetría posicional en la Segunda Región. *Seminario Nacional de Energía Solar y Eólica*. Universidad de La Serena. La Serena. 1992. pp 69-74
- [8] Beckman, Klein y Duffie], *Solar Heating Desing*, Ed. *Solar Heating Desing* y editado por J. Wiley & Sons, N.Y.

## Correspondencia

Wilfredo Jiménez Wong  
Departamento de Construcción Civil, Universidad Católica del Norte Avenida Angamos 0610  
Antofagasta, Región de Antofagasta, Chile,  
Phone: 56-55-355502  
Fax 355521  
E-mail: [wjimenez@ucn.cl](mailto:wjimenez@ucn.cl)