

# ENSAYO CUASI-DINÁMICO DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA EN URUGUAY DE ACUERDO A LA NORMA ISO 9806:2017

Recibido: DD/MMM/AAAA y Aceptado: DD/MMM/AAAA

## **Resumen**

*Los ensayos de colectores solares en estado transitorio permiten aumentar la capacidad de ensayo de los laboratorios respecto a los ensayos en estado estacionario. Esto ha sido validado en laboratorios internacionales, especialmente en Europa. En Latinoamérica este método no ha tenido mucha difusión y a la fecha ningún laboratorio de esta región había validado (ni implementado) su uso en climas locales, por lo que los laboratorios de la región que están desarrollando capacidades de ensayo de colectores solares no consideran aún este método en forma comercial. En este trabajo se presentan los resultados de un ensayo en estado transitorio (cuasi dinámico) de un colector solar de placa plana de acuerdo a la norma ISO 9806:2017 en Uruguay, región de la Pampa Húmeda en Sudamérica. Se compara sus resultados con la metodología de ensayo tradicional en estado estacionario y se demuestra que es posible aplicarlo en la región incluso con la ventaja de ampliar la cantidad anual de ensayos, como se ha observado en Europa.*

**PALABRAS CLAVE:** *colectores solares térmicos, ensayos de desempeño, modelos dinámicos, estado estacionario, ISO 9806.*

## QUASI-DYNAMIC TEST OF FLAT PLATE SOLAR COLLECTORS IN URUGUAY ACCORDING TO THE ISO 9806:2017 STANDARD

### **Abstract**

*Transient-state efficiency tests for solar thermal collectors allow increasing the laboratories annual test capacity in comparison to steady-state efficiency tests. This characteristic has been evaluated by international laboratories, especially in Europe. In Latin America this method has not been widely disseminated and to date no regional laboratory had validated (or implemented) its utilization under the local climates, so laboratories in the region that are developing solar collector testing capabilities do not yet consider this method commercially. This article presents the results of a transient-state (quasi-dynamic) test of a flat plate solar collector according to ISO 9806:2017 standard in Uruguay, a part of the broader Pampa Húmeda region in South America. Test results are compared to those of the traditional steady-state methodology, demonstrating that the method can be applied in the region and has also the advantage of increasing the annual test capacity, as observed in Europe.*

**KEYWORDS:** *solar thermal collectors, performance test, dynamic model, steady state, ISO 9806.*

## **1. Introducción**

El aumento sostenido del consumo final de energía mundial sumado al hecho de que el 85 % proviene de combustibles fósiles (IEA, 2016a) genera gran preocupación respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> y su efecto en el cambio climático. Las dos acciones más importantes para reducir estas emisiones son la incorporación de fuentes de energías renovables al uso final de energía y la reducción de la demanda a través de medidas de eficiencia energética.

En 2016 el sector edilicio fue responsable del 30 % del consumo final de energía mundial (IEA, 2016a) mientras que en Uruguay este sector represento el 25 % (IEA, 2016b). Una parte importante de este consumo se debe al calentamiento de agua sanitaria (ACS) y a los sistemas de calefacción y refrigeración.

La energía solar térmica de baja temperatura se presenta como una candidata para sustituir el uso tradicional de energía para ACS y para los sistemas de acondicionamiento térmico en el sector edilicio. Entre 2007 y 2017 la capacidad instalada de colectores solares térmicos aumentó de forma sostenida pasando de 145 GW en 2007 a 472 GW en 2017 (REN21, 2018). No obstante, si bien la energía solar térmica ha crecido de forma notoria, la participación de esta tecnología en la matriz energética mundial sigue siendo pequeña. Para lograr una mayor participación se deben abordar distintas problemáticas, una de ellas es la calidad de los productos que se comercializan. En este sentido, varias organizaciones internacionales de reconocido prestigio, como la *International Organization of Standardization* (ISO) y la *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), han elaborado normativas que describen procedimientos para evaluar el desempeño térmico de colectores solares y la calidad de los materiales con los que se fabrican. El hecho que un país cuente con estas capacidades de ensayo no garantiza que la capacidad instalada de colectores solares aumente, dado que esto dependerá en definitiva de las políticas energéticas que adopte cada país. No obstante, dicha capacidad es necesaria para el desarrollo del sector, ya que difícilmente una política energética tendrá éxito si la calidad de los colectores comercializados no es la adecuada. Además, los ensayos de desempeño térmico constituyen un insumo básico para la evaluación económico financiera de los proyectos.

Tradicionalmente los ensayos de eficiencia de colectores solares (desempeño térmico) se han realizado en estado estacionario (*Steady State Testing*, SST). Para asegurar el estado estacionario se requiere mantener con gran estabilidad diversas variables durante el ensayo. Algunas de ellas son controlables, como la temperatura del fluido a la entrada del colector y el caudal, y otras son no controlables, como la irradiancia solar o las condiciones de viento sobre el colector. Es posible mitigar la acción del viento en los alrededores forzando viento de forma artificial a una velocidad determinada sobre el colector, elemento que es considerado por todos los laboratorios al exterior. El control del ángulo de incidencia es también una limitante, dado que el movimiento aparente del Sol varía para cada momento del año. Por ende, dada todas las restricciones geométricas, no es sencillo conseguir los ángulos de incidencia necesarios para un ensayo bajo norma, incluso utilizando sistemas de seguimiento solar. Estas condicionantes, en especial, las relacionadas con irradiancia solar y ángulo de incidencia, limitan la cantidad de ensayos que un laboratorio puede realizar en un año.

Buscando solucionar esta situación, en la década de los 90' se realizaron los primeros ensayos de eficiencia en estado transitorio (*Quasi Dynamic Testing*, QDT) para colectores solares (Muschaweck J. y Spirkel W., 1993; Perers B., 1993) y se comenzaron a evidenciar

las ventajas de este método en sitios con nubosidad variable, donde las condiciones meteorológicas para el ensayo SST son difíciles de conseguir. Algunos laboratorios en Europa ubicados en sitios con estas características climáticas adoptaron esta metodología (Fischer et al., 2004; Osório T. y Carvalho M., 2014; García de Jalón A., 2011; Zambolin E., 2010) y también en Estados Unidos (Rojas D., 2008), pero en Latinoamérica, por distintos motivos, esta metodología no ha sido adoptada por la mayoría de los laboratorios, existiendo muy pocos antecedentes a la fecha (Kratzenberg M., 2006). Dado que el método SST requiere condiciones exigentes de cielo despejado para su correcta implementación, el método QDT se presenta como una alternativa más factible de realizarse en climas con mayor presencia de nubosidad, donde los días de cielo despejados son escasos. Dadas sus características, la metodología QDT no sólo permite, sino que es un requisito de la misma, que durante el ensayo hayan ocurrido diferentes condiciones de cielo (cielo despejado, parcialmente nublado y nublado), siendo difícil de implementar en sitios con predominancias de cielos despejados (en climas áridos o desérticos, por ejemplo). Los laboratorios pueden optar por utilizar una u otra metodología según sean las condiciones meteorológicas locales (utilizando la misma infraestructura de ensayo).

El objetivo central de este artículo es demostrar la aplicabilidad del método QDT en el clima de la región conocida como la Pampa Húmeda, sudeste de Sudamérica, que abarca la región climática afín de Uruguay, las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y la Pampa, y el sur de Brasil. Para ello se realizan dos cosas: (1) se presenta en este trabajo el ensayo de un colector solar de placa plana en Uruguay bajo las metodologías QDT y SST, siguiendo normativa ISO vigente, y se muestra que sus resultados de ensayo son equivalentes, y (2) se proporciona un análisis de la cantidad de ensayos por mes y por año de la metodología (QDT) en la región, encontrándose que esta metodología es capaz de aportar más del doble de ensayos anuales en la región en comparación con la metodología tradicional. El trabajo busca además darle mayor difusión a la metodología de ensayo QDT en Latinoamérica, describiendo una implementación del método realizada y validada por un laboratorio local.

Este artículo se organiza de la siguiente forma. En la Sección 2 se describe el modelado matemático de la norma ISO 9806:2017 para describir el comportamiento térmico de un colector solar con cubierta, incluyendo una descripción de las variables de ensayo relevantes. En la Sección 3 se presenta brevemente la plataforma de ensayo, a saber, el Banco de Ensayos de Calentadores Solares (BECS) del Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Udelar, y se describen las características comunes a ambos ensayos. La Sección 4 describe el procedimiento de ensayo utilizado para ambas metodologías (SST y QDT) y la Sección 5 presenta y compara sus resultados. Se presenta al final de la Sección 5 el análisis de la cantidad de ensayos anuales que se podrían obtener con ambas metodologías, evidenciando las ventajas del método QDT en la región. Finalmente, en la Sección 6 se resumen las conclusiones.

## **2. Modelado térmico del colector**

La norma ISO 9806:2017 (ISO, 2017) propone dos modelos matemáticos para describir el desempeño térmico de un colector solar con cubierta. El primer modelo es el más simple y se describe según:

$$C \frac{dT_m}{dt} = A_g [\eta_{0,hem} \cdot K_{hem}(\theta) \cdot G - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2] - \dot{m}c_p(T_o - T_i). \quad (1)$$

El segundo modelo surge de separar la irradiancia global en sus subcomponentes directa y difusa, y reemplaza el modificador de ángulo considerando su efecto distinto sobre ambas componentes, de la siguiente manera:

$$\eta_{0,hem} \cdot K_{hem}(\theta) \cdot G = \eta_{0,b} \cdot [K_b(\theta) \cdot G_b + K_d \cdot G_d]. \quad (2)$$

Lo que da lugar a:

$$C \frac{dT_m}{dt} = A_g [\eta_{0,b} \cdot [K_b(\theta) \cdot G_b + K_d \cdot G_d] - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2] - \dot{m}c_p(T_o - T_i). \quad (3)$$

En el caso del método SST se determinan los coeficientes  $\eta_{0,hem}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $K_{hem}(\theta)$  y  $C$  de la Ec. (1) en forma separada a través de tres ensayos independientes: (i) Ensayo de rendimiento en donde se determinan los coeficientes  $\eta_{0,hem}$ ,  $a_1$  y  $a_2$ ; (ii) Ensayo de modificador por ángulo de incidencia en donde se determina  $K_{hem}(\theta)$ ; y (iii) Ensayo de capacidad térmica en donde se determina la constante  $C$ . Cabe destacar que los primeros dos ensayos son en estado estacionario pero el tercero no. En el caso del método QDT se determinan los coeficientes  $\eta_{0,b}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $K_b(\theta)$ ,  $K_d$  y  $C$  de la Ec. (3) en un único ensayo que integra los tres ensayos independientes del método SST.

Para el modificador por ángulo de incidencia  $K_{hem}(\theta)$  se utiliza la siguiente relación:

$$K_{hem}(\theta) = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right). \quad (4)$$

En el anexo B de la norma ISO 9806:2017 se describe como determinar  $\eta_{0,b}$ ,  $K_b(\theta)$  y  $K_d$  a partir  $\eta_{0,hem}$  y  $K_{hem}(\theta)$  y viceversa. Para calcular  $K_d$  primero se asume que  $K_{hem}(\theta) \cong K_b(\theta)$  y luego  $K_b(\theta)$  es promediado y normalizado sobre el ángulo sólido visto por el colector, esto es:

$$K_d = \frac{\int_0^{90^\circ} k_b(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_0^{90^\circ} \sin\theta \cos\theta d\theta}. \quad (5)$$

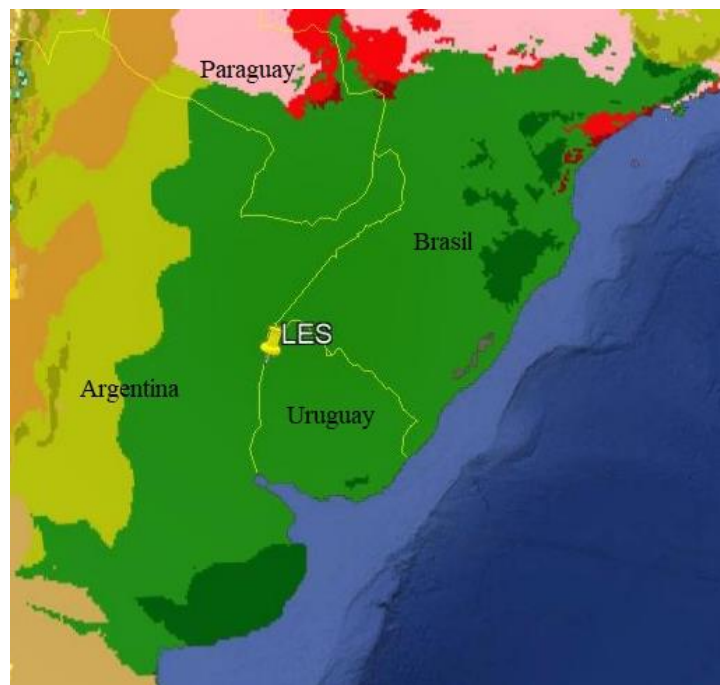
La constante  $\eta_{0,b}$  se calcula a partir de la Ec. (2) asumiendo incidencia normal y una fracción difusa de 15% en el plano del colector. Para calcular  $\eta_{0,b}$ , se utilizó la mejora propuesta por Kovacs et al. (2011) de utilizar en la Ec. (6) la fracción difusa promedio en el plano del colector durante el ensayo de rendimiento en estado estacionario. Entendemos que este procedimiento es el más apropiado.

$$\eta_{0,b} = \frac{\eta_{0,hem}}{(1 - f_d) + f_d K_d} \quad (6)$$

### 3. Características generales de los ensayos

Las pruebas se realizaron en el Banco de Ensayos de Calentadores Solares (BECS) del Laboratorio de Energía Solar (LES, <http://les.edu.uy/>) de la Universidad de la República (Udelar) ubicado en la localidad de Salto (31° sur), Uruguay. En la Figura 1 se muestra la ubicación del LES dentro de la región climática afín de la pampa húmeda (verde claro). Dicha región se ubica al sureste de Sudamérica y está clasificada como Cfa (clima templado-cálido, húmedo, con veranos calurosos) según la clasificación actualizada de Köppen-Geiger (Peel et al. 2007). Las zonas identificadas en verde oscuro corresponden a la clasificación Cfb, muy similar a Cfa, con la excepción de que los veranos son más frescos por la influencia de la costa.

**Figura 1. Ubicación del LES dentro de la región de la pampa húmeda (verde).**



**Fuente: Mapa de Peel et al. (2007) para la aplicación Google Earth.**

Se utilizó el mismo banco de ensayos para los dos métodos (SST y QDT). Cabe destacar que dicho banco fue diseñado por investigadores del propio laboratorio, en base a las instalaciones preexistentes del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) de España. Recientemente esta capacidad de ensayo participó de una inter-comparación de laboratorios de ensayo a nivel de Latinoamérica organizada por el PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*), Instituto Metrológico de Alemania. En esta inter-comparación (de ensayos SST) se obtuvo una puntuación satisfactoria en todos los parámetros medidos (valor absoluto de Z-score menor 2). El BECS fue el único laboratorio de Latinoamérica que presentó además resultados de ensayo bajo la metodología QDT, obteniendo valores satisfactorios en todos los parámetros medidos, excepto en el parámetro  $K_d$ , en el que se obtuvo un valor absoluto de Z-score entre 2 y 3. El informe final de dicha actividad se encuentra en (Fisher, 2020).

**Figura 2. Instalación de ensayo.**



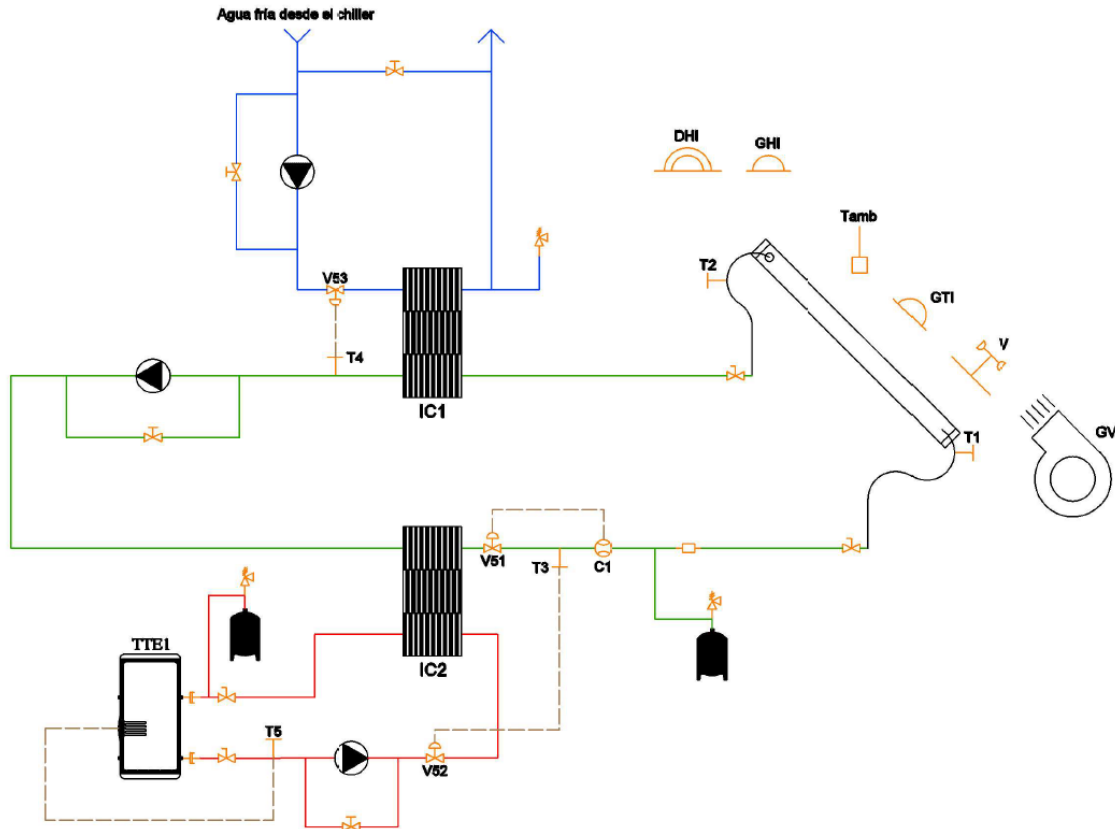
**Fuente:** Elaboración propia.

Para este trabajo se ensayó un colector solar térmico de placa plana de  $2.01 \text{ m}^2$  de área bruta entre el 17 y el 25 de noviembre de 2019. Los datos se procesaron de diferente forma según el método empleado, SST o QDT. El colector se montó sobre un seguidor móvil como se muestra en la Figura 2. La inclinación horizontal de este seguidor se puede ajustar manualmente entre  $0^\circ$  y  $75^\circ$  y el azimut se puede ajustar de forma manual o automática con un paso de 2 minutos entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ . Se impuso una velocidad de  $3 \text{ m/s}$  (promedio espacial) sobre el colector utilizando los ventiladores axiales que se muestra en Figura 2. El caudal de ensayo se fijó en  $2.4 \text{ lts/min}$  y durante todas las pruebas el ángulo de inclinación del seguidor se fijó en  $45^\circ$ , el azimut se ajustó de forma manual o automática

según el ensayo. En todos los casos, antes del periodo de medición, al colector se lo hizo pasar por un periodo de acondicionamiento previo de 15 minutos a la temperatura de ensayo correspondiente; dicho período no fue incluido en la identificación de parámetros de ensayo en ninguna de las metodologías.

En la Figura 3 se muestra un esquema simplificado de la instalación termo-hidráulica del BECS. La misma cuenta con tres circuitos independiente: (1) circuito primario, en verde, (2) circuito de calentamiento, en rojo, y (3) circuito de enfriamiento, en azul. Los tramos de cañería en negro en el circuito primario corresponden a las cañerías flexibles que se pueden observar en la Figura 2. El control temperatura a la entrada del colector (circuito primario) se realiza en dos etapas. Primero el fluido caliente a la salida del colector debe ser enfriado, proceso que se realiza en el intercambiador de calor IC1. Luego el fluido es calentado en forma precisa a la temperatura de entrada establecida para el ensayo a través del intercambiador de calor IC2. El circuito de enfriamiento utiliza agua a 10 °C que proviene de una enfriadora eléctrica de agua (no mostrada en el diagrama) y el circuito de calentamiento utiliza agua caliente que proviene del termotanque TTE1. Los caudales en los tres circuitos son regulados mediante válvulas reguladores electroneumáticas (V51, V52 y V53) accionadas por controladores PID (indicados en línea punteada). Todo el sistema de control se desarrolló localmente utilizando un PLC marca Siemens modelo S7-1200. El diagrama indica además la ubicación de los sensores de temperatura de agua (T1, T2, T3, T4 y T5), el sensor de temperatura ambiente (Tamb), los sensores de irradiancia global horizontal (GHI) y en plano inclinado (GTI), el sensor de irradiancia difusa horizontal (DHI), la medida de viento (V) y el forzador de viento (GV).

**Figura 3. Esquema de instalación termo-hidráulica.**



Referencias							
	Bomba de agua		Anemómetro		Caudalímetro		Válvula de seguridad
	Válvula esférica manual		Piranómetro		Circuito primario		Intercambiador de calor
	Válvula reguladora manual		Piranómetro de difusa		Circuito de calentamiento		Vaso de expansión
	Válvula de control		Sensor de temperatura ambiente		Circuito de enfriamiento		
	Visor		Sensor de temperatura		Cañería flexible		

Fuente: Elaboración propia.

Para medir la temperatura a la entrada y a la salida del colector (T1 y T2) se utilizaron PT100 de 3 hilos con transmisores de 4-20 mA de la marca Herten. Dichos sensores fueron calibrados bajo normativa ISO vigente en el LES reportándose una incertidumbre estándar de 0.02 °C. La temperatura ambiente (Tamb) se registró con un sensor PT1000 de 2 hilos Honeywell también calibrado en el LES con una incertidumbre estándar de 0.02 °C. La medida de caudal (C1) se realizó con un caudalímetro electromagnético de Endress & Hauser con una incertidumbre estándar de 0.5 % de la medida. La velocidad del viento paralelo al plano del colector (V) se midió con un anemómetro de copa NGR con incertidumbre estándar de 0.25 m/s. La irradiancia global en el plano del colector (GTI) se midió con un piranómetro Kipp & Zonen CMP 10. La irradiancia directa  $G_b$  en el plano del colector se estimó de la siguiente manera: por un lado, se midió la irradiancia global en plano horizontal (GHI) con un piranómetro Kipp & Zonen CMP11 y la irradiancia difusa en plano horizontal (DHI) con un piranómetro Kipp & Zonen CMP6 montado con una



banda de sombra del mismo fabricante, luego, la irradiancia en incidencia normal (DNI) se estimó por diferencia de estas dos medidas, y, multiplicando la DNI por el coseno del ángulo de incidencia en el plano del colector se obtuvo  $G_b$ . La medida de irradiancia difusa en plano inclinado con la banda de sombra es corregida con un factor provisto por el fabricante. Dichos piranómetros son calibrados anualmente en el LES de acuerdo a la norma ISO 9747:1992 contra un estándar secundario Kipp & Zonen CMP22 que es enviado cada cinco años a calibrar contra la referencia radiométrica mundial en World Radiation Center en Davos, Suiza. Todas las medidas se registraron cada 10 segundos usando un adquirente de datos Fischer Scientific DT85.

## 4. Procedimiento

### 4.1 Condiciones requeridas

La Tabla 1 muestra las condiciones requeridas por cada metodología para cada variable, incluyendo la variabilidad permitida. Estas son las condiciones que deben cumplir las medidas registradas durante el ensayo para poder ser utilizadas para determinar los parámetros con cada metodología. Como se puede observar, la metodología SST presenta requerimientos más estrictos respecto a los valores requeridos y su variabilidad. Por otro lado, la metodología QDT requiere que se representen diferentes condiciones meteorológicas durante el ensayo, como se explica en la Subsección 5.2.

**Tabla 1. Condiciones de ensayo y variabilidad permitida.**

Variable	SST		QDT	
	Irradiancia solar global ( $W/m^2$ )	>700	$\pm 50$	-
Fracción difusa (%)	<30	-	-	-
Ángulo de incidencia ( $^\circ$ )	<20	-	-	-
Temperatura de entrada ( $^\circ C$ )	-	$\pm 0.1$	-	$\pm 1$
Temperatura a la salida ( $^\circ C$ )	-	$\pm 0.4$	-	-
Temperatura ambiente ( $^\circ C$ )	-	$\pm 1.5$	-	-
Velocidad del aire paralela al colector (m/s)	$3 \pm 1$	$\pm 1.0$	<4	-
Caudal másico ( $kg/(s.m^2)$ )	0.02	1 %	0.02	2 %

**Fuente:** ISO 9806:2017.

### 4.2 Ensayo en Estado Estacionario SST

**4.2.1 Ensayo de Rendimiento:** Para este ensayo se midió la energía útil por unidad de área para cuatro temperaturas de entrada diferentes, y la temperatura de ensayo más alta fue  $85^\circ C$ . A su vez, por cada temperatura de entrada, se obtuvieron cuatro puntos independientes dando así un total de 16 puntos. Cada punto consistió en un promedio sobre un período de medición 10 minutos. Para verificar el estado estacionario, para cada punto, se tomaron promedios en períodos sucesivos de 30 segundos y se verificaron que las variaciones de

dichos promedios respecto al promedio 10 minutal se encontraran dentro de los límites dados por la Tabla 1. Finalmente, los parámetros  $\eta_{0,hem}$ ,  $a_1$  y  $a_2$  se determinaron por regresión lineal usando el siguiente modelo:

$$\dot{Q}_u'' = \eta_{0,hem} \cdot G - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2. \quad (7)$$

En donde  $\dot{Q}_u''$  es la energía útil del colector por unidad de área bruta y se calcula según:

$$\dot{Q}_u'' = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_g}. \quad (8)$$

Se definió como variable dependiente para la regresión lineal a la energía útil por unidad de área y como variables independientes  $G$ ,  $(T_m - T_a)$  y  $(T_m - T_a)^2$ ; los coeficientes a determinar son  $\eta_{0,hem}$ ,  $a_1$  y  $a_2$ . Para asegurar la condición de incidencia normal se realizó un seguimiento acimutal durante el ensayo. La Ec. (7) resulta de imponer la condición de estado estacionario ( $dT_m/dt = 0$ ) y la condición de incidencia normal ( $K_{hem} = 1$ ) en la Ec. (1).

**4.2.2 Ensayo de Modificador por Ángulo de Incidencia:** En este caso el acimut del seguidor se fijó en  $0^\circ$  (orientación norte) y se tomaron distintas medidas de energía útil para diferentes ángulos de incidencia entre  $40^\circ$  y  $70^\circ$  antes y después del mediodía solar. El procesamiento de datos se realizó de igual forma que en el ensayo de rendimiento. Se impuso, para cada periodo de medición, una temperatura de entrada tal que la temperatura media del fluido fuera lo más próxima posible a la temperatura ambiente (para disminuir las pérdidas térmicas). El modificador por ángulo de incidencia se determinó usando:

$$K_{hem}(\theta) = \frac{\dot{Q}_u'' + a_1(T_m - T_a) + a_2(T_m - T_a)^2}{\eta_{0,hem} \cdot G}. \quad (9)$$

La Ec. (9) resulta de despejar de la Ec. (1) el modificador por ángulo de incidencia  $K_{hem}$  e imponer el estado estacionario ( $dT_m/dt = 0$ ). Finalmente, el parámetro  $b_0$  de la Ec. (4) se determinó por regresión lineal usando como variable dependiente ( $K_{hem} - 1$ ) y como variable independiente ( $1/\cos(\theta) - 1$ ).

**4.2.3 Ensayo de Capacidad Térmica:** Este ensayo se hizo de acuerdo a la sección 25.2 de la norma ISO 9806:2017 pero teniendo en consideración el ajuste de segundo orden en las pérdidas térmicas, es decir el coeficiente  $a_2$ . Al inicio del ensayo se fijó una temperatura de entrada igual a la temperatura ambiente y luego se cubrió el colector con una manta reflectiva dejando que alcance el estado estacionario. Luego, la cubierta se removió y se dejó que el colector alcance un nuevo punto en estado estacionario, diferente al primero por el efecto de la irradiancia solar. La capacidad térmica efectiva se determinó integrado la Ec.

(1) sobre el periodo de tiempo entre los dos puntos de funcionamiento estacionarios, como se muestra en la Ec. (10). Para esto se utilizaron los datos promediados cada 30 segundos.

$$\frac{C}{A_g} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (\eta_{0,hem} \cdot G - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2 - \dot{Q}_u'') dt}{T_{m2} - T_{m1}} \quad (10)$$

En este caso, también se realizó un seguimiento acimutal y por este motivo en la Ec. (10) se asume incidencia normal ( $K_{hem} = 1$ ).

### 4.3 Ensayo en estado Cuasi-Dinámico QDT

Para este ensayo se midió la energía útil por unidad de área para cuatro temperaturas de entrada diferentes. Los datos fueron promediados cada 5 minutos y para cada temperatura el periodo de medición fue de al menos 3 horas. Se verificó además que durante cada período de medición se cumplieran las condiciones de la Tabla 1, comparando los promedios cada 30 segundos con los promedios de todo el período de medición. Para la temperatura más baja se tomó una serie de datos realizando seguimiento acimutal, de modo de obtener medidas con bajo ángulo de incidencia, y otra serie de datos fijando el azimut del seguidor en  $0^\circ$  (orientación norte) para obtener ángulos de incidencia altos. Ambas series se tomaron bajo condiciones de cielo claro. Las temperaturas restantes se realizaron bajo distintas condiciones de cielo realizando seguimiento acimutal para trabajar con ángulos de incidencia pequeños ( $K_{hem} = 1$ ). Si bien esto no es requisito de la norma, permite un mayor desacople de las variables dependientes y mejora la identificación de parámetros. Finalmente, las constantes  $\eta_{0,b}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $K_d$  y  $C$  se determinaron todas a la vez por regresión lineal utilizando el modelo siguiente:

$$\dot{Q}_u'' = \eta_{0,b} \cdot G_b - \eta_{0,b} b_0 \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) G_b + \eta_{0,b} \cdot K_d \cdot G_d - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2 - \frac{C}{A_g} \frac{dT_m}{dt} \quad (11)$$

En donde la derivada temporal de la temperatura media del fluido se estimó por diferencias hacia adelante según:

$$\frac{dT_m}{dt} \cong \frac{T_m(t + \Delta t) - T_m(t)}{\Delta t} \quad (12)$$

En donde  $\Delta t = 300$  s (correspondiente a 5 minutos). La Ec. (11) surge de reemplazar la Ec. (4) en la Ec. (3) y reordenar algunos términos. La variable dependiente en este caso es la energía útil por unidad de área y las variables independientes  $G_b$ ,  $(1/\cos(\theta)-1)G_b$ ,  $G_d$ ,  $(T_m - T_a)$ ,  $(T_m - T_a)^2$  y  $dT_m/dt$ ; los coeficientes a determinar son  $\eta_{0,b}$ ,  $\eta_{0,b}b_0$ ,  $\eta_{0,b}K_d$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $C/A_g$ .

## 5. Resultados

### 5.1 Comparación de métodos de ensayo

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos para ambos métodos. En dicha tabla se presentan los coeficientes de los modelos térmicos de las Ecs. (1) y (3), sus respectivas incertidumbres y el estadístico t para cada parámetro (cociente entre el valor de un parámetro y su incertidumbre). No se reportó la incertidumbre de los parámetros  $\eta_{0,b}$  y  $K_d$  para el caso SST por tratarse de magnitudes derivadas (Ecs. (5) y (6)).

**Tabla 2. Resultados.**

Parámetro	SST			QDT		
	Valor	Incert.	Valor/Incert.	Valor	Incert.	Valor/Incert.
$\eta_{0,hem}$	0.716	0.002	358	-	-	-
$\eta_{0,b}$	0.720	-	-	0.718	0.003	290
$b_0$	0.105	0.006	17	0.108	0.010	11
$K_d$	0.920	-	-	0.963	0.012	80
$a_1$ (W/m <sup>2</sup> .K)	4.035	0.117	36	3.903	0.179	22
$a_2$ (W/m <sup>2</sup> .K <sup>2</sup> )	0.011	0.002	6	0.013	0.003	4.5
$C/A_g$ (J/K.m <sup>2</sup> )	6100	1400	4.5	6900	1600	4.4

**Fuente:** Elaboración propia.

En todos los casos se obtuvo un estadístico t mayor 3, que indica que los parámetros son estadísticamente significativos. Los parámetros  $\eta_{0,b}$  y  $b_0$  difieren en menos de 1 % (cociente entre diferencia de los valores y el valor promedio) lo cual da cuenta de una buena concordancia entre estos parámetros. En el caso de los coeficientes  $a_1$  y  $a_2$  la diferencia es mayor, 3 % y 18 % respectivamente. Ahora, si se presta atención a la Tabla 2 se puede observar que el término  $a_1$  en el caso SST es mayor que en el QDT y el término  $a_2$  en el caso SST es menor que en el caso QDT, es decir, que la diferencia tiende a compensarse. El signo negativo de la covarianza entre estos dos parámetros, obtenido en los dos casos, confirma esta relación inversa. Este comportamiento no es nuevo; lo mismo se observa en las referencias (Fischer et al., 2004; Osório T. y Carvalho M., 2014). Una forma más adecuada de comparar los coeficientes de pérdidas es utilizando un coeficiente de pérdida linealizado a una diferencia de temperatura dada  $\Delta T$ , eso es:

$$a(\Delta T) = a_1 + a_2 \Delta T \quad (13)$$

Para una diferencia de 50 K se tienen  $a(50 \text{ K}) = 4.585 \text{ W/m}^2.\text{K}$  para el método SST y  $a(50 \text{ K}) = 4.553 \text{ W/m}^2.\text{K}$  para el caso QDT, lo que da una diferencia menor al 1 %. Las mayores diferencias se presentan en el modificador de ángulo para la irradiación difusa  $K_d$  y para la capacidad térmica por unidad de área  $C/A_g$ , 5 % y 12 % respectivamente. Entendemos que la diferencia en  $K_d$  puede deberse en parte al factor de corrección empleado para corregir

la media de difusa en plano horizontal por el efecto de la banda de sombra. Este factor supone que la difusa es isotrópica, por lo tanto, este factor se puede mejorar utilizando factores de corrección que contemplen la anisotropía de la atmósfera (Batlle et al., 1995). Otro causante de esta diferencia puede ser que las horas bajo condiciones de cielo parcialmente y totalmente cubierto durante el ensayo realizado estén sub-representadas, dado que una adecuada representación de estas condiciones es importante para la determinación de este parámetro bajo la metodología QDT. La diferencia en la capacidad térmica efectiva puede deberse a dos motivos: (i) puede ser que la cantidad de horas en condiciones de cielo variable (variable  $dT_m/dt$  alta en valor absoluto) estén sub-representadas, y (ii) que el intervalo de tiempo 5 minutos para promediar los datos sea demasiado grande y por este motivo tal vez no se capturó correctamente el comportamiento dinámico del colector. Todos estos aspectos son motivo de nuestro trabajo actual, en particular, en lo que refiere a los factores de corrección de la radiación difusa.

Finalmente, para estudiar el efecto combinado de las diferencias entre los parámetros, se calculó para cada caso la energía útil producida por el colector utilizando la Ec. (11), asumiendo incidencia normal y estado estacionario, para distintas condiciones de temperatura y de cielo. Para las distintas condiciones de cielo se utilizaron las condiciones de reporte estándar (*Standard Reporting Conditions, SRC*) dadas por la norma ISO 9806:2017. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Potencia útil (W) producida por el colector bajo distintas condiciones de cielo y temperatura.**

$(T_m - T_a)$	Cielo claro ( $G_b = 850 \text{ W/m}^2$ , $G_d = 150 \text{ W/m}^2$ )			Cielo parcialmente nublado ( $G_b = 440 \text{ W/m}^2$ , $G_d = 260 \text{ W/m}^2$ )			Cielo cubierto ( $G_b = 0 \text{ W/m}^2$ , $G_d = 400 \text{ W/m}^2$ )		
	SST	QDT	Dif.	SST	QDT	Dif.	SST	QDT	Dif.
0	1437	1442	0.4 %	988	1001	1.3 %	535	559	4.3 %
20	1265	1274	0.7 %	816	833	2.1 %	363	390	7.3 %
40	1075	1085	0.9 %	626	644	2.8 %	174	201	15 %
60	868	875	0.8 %	419	434	3.5 %	0	0	-

**Fuente:** Elaboración propia.

Para condiciones de cielo claro la diferencia en la energía útil es poco significativa (menor al 1 %). En condiciones de cielo parcialmente nublado la diferencia comienza a crecer a medida que crece la diferencia de temperatura, si bien sigue siendo poco significativa. En condiciones de cielo cubierto la diferencia comienza a ser significativa alcanzando el 15 % a una diferencia de temperatura de 40 K. Entendemos que esa diferencia se debe principalmente a la diferencia en el modificador por ángulo de incidencia para la irradiancia difusa  $K_d$ , lo que es motivo actual de estudio.

## 5.2 Estimación de cantidad de ensayos anuales

Para mostrar la aplicabilidad del método QDT en el clima de la región, en la Tabla 4 se muestra un estimativo de la cantidad de ensayos posibles por mes en la localidad de Salto (Uruguay) tanto para seguir el método SST realizando un seguimiento acimutal como para seguir el método QDT con una orientación norte, en ambos casos, con una inclinación horizontal fija de 45°. Una hora se considera válida para un tipo de ensayo si cumple las condiciones presentadas en la Tabla 1. Para el caso SST se verificó además que las horas fueran en condiciones de cielo claro. El análisis se realizó utilizando el año meteorológico típico de la localidad de Salto (latitud = 31.28° S, longitud = 57.92° O, altitud = 56 m sobre el nivel del mar), Uruguay, a escala horaria (Alonso-Suárez et al., 2019). Se supuso una duración de los ensayos de 10 horas para el caso SST y de 15 horas para el caso QDT, tiempo estimado en el cual se logra medir las variables necesarias para cada ensayo si se cumplen las condiciones de la Tabla 1. Además, para el caso QDT se impuso que al menos un 30 % de las horas fueran con cielo claro, debido a que es importante para este ensayo capturar cierta dispersión en las condiciones meteorológicas, y las condiciones de cielo despejado no deben ser sub-representadas. Para verificar esta condición se impuso que el índice de cielo claro fuera mayor a 0.8 y que la irradiación horaria en incidencia normal (DNI) fuera mayor a 200 Wh/m<sup>2</sup>. Para el cálculo del índice de cielo claro se utilizó la expresión dada por Pérez et al. (1990):

$$k'_t = \frac{k_t}{1 + 1.031e^{\left(\frac{-1.4m}{9.4+0.9m}\right)}} \quad (14)$$

En donde  $k_t$  es el índice de claridad horario usual (cociente entre la irradiación horaria global en plano horizontal y la correspondiente irradiación en un plano horizontal en el tope de la atmósfera) y  $m$  es la masa de aire (Duffie & Beckman, 2013).

**Tabla 4. Comparativa de cantidad de ensayos posibles por mes.**

MES	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
SST	1.0	1.2	3.5	5.0	2.3	2.6	3.4	3.4	4.6	2.7	1.9	1.5	33
QDT	2.0	2.4	5.8	10.2	6.8	8.8	10.2	9.2	9.2	5.4	3.8	3.0	76

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Tabla 4 se puede ver que la cantidad de ensayos posibles en un año en el caso QDT es más del doble que la cantidad de ensayos en el caso SST. Esta proporción coincide con lo estimado en otras localidades (Rojas D., 2008; Osório T. y Carvalho M., 2014).

## 6. Conclusiones

Se estudió la aplicabilidad del método cuasi dinámico en Uruguay y se determinó la cantidad de ensayos a nivel anual que podrían llegar a realizarse si se siguiera este método.

Esta cantidad es mayor al doble de la cantidad de ensayos que podrían obtenerse con la metodología tradicional en estado estacionario, lo cual muestra la ventaja de la metodología QDT en Uruguay y en la región climática homogénea de la Pampa Húmeda del sureste de Sudamérica.

Por otra parte, se concluye que el método QDT se implementó correctamente para el colector estudiado y se puede utilizar en el clima de la región, en tanto su comparación con los ensayos SST está dentro de lo esperado y reportado en otras publicaciones. La principal diferencia entre los parámetros se observó en  $K_d$  y  $C/A_g$ . Teniendo en cuenta que el parámetro  $K_d$  afecta la producción de energía útil del colector en condiciones de cielo parcialmente nublado y cubierto, y que además una porción significativa de las horas en el año en nuestro país corresponde a este tipo de condiciones (Alonso-Suárez et al., 2019), consideramos importante continuar estudiando los motivos de esta diferencia. La diferencia en el parámetro  $C/A_g$  es otro punto a estudiar a futuro. Si bien en muchos programas de simulación de colectores este término no es tenido en cuenta, restándole importancia (asumen estado estacionario), en el ensayo QDT este término es determinado de forma simultánea con los otros parámetros y por lo tanto una mala determinación de éste puede afectar negativamente a los otros.

El presente trabajo creemos es un paso significativo en el desarrollo de capacidades de ensayo de colectores solares en la región. No obstante, entendemos necesario continuar ensayando colectores de placa plana y en especial otros tipos de colectores, como los de tubos al vacío, para poner a punto la metodología QDT. Esperamos que el presente trabajo impulse el uso de la metodología de ensayos QDT no sólo en nuestra región, sino en el resto de Latinoamérica, y que ésta pueda ser validada para su uso en otros climas o países.

## **Agradecimientos**

Los autores desean agradecer al Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM, Uruguay), en especial a su Dirección Nacional de Energía (DNE), al Fideicomiso Uruguayo de Ahorro y Eficiencia Energética (Fudae, Uruguay) y a la Corporación Nacional para el Desarrollo (CND, Uruguay), por haber proporcionado apoyo financiero y logístico para el desarrollo del BECS y haber impulsado este proyecto con capacidades nacionales. Los autores agradecen también al PTB de Alemania por impulsar y financiar el inter-laboratorio de ensayos de eficiencia de colectores solares, lo que nos ha brindado certezas técnicas sobre la capacidad de ensayo local.

## **Nomenclatura**

$A_g$	área bruta del colector ( $m^2$ )
$a$	factor de pérdidas térmicas linealizado ( $W/(m^2.K)$ )
$a_1$	factor de pérdidas térmicas de primer orden ( $W/(m^2.K)$ )
$a_2$	factor de pérdidas térmicas de segundo orden ( $W/(m^2.K^2)$ )
$b_0$	factor de ajuste del modificador de ángulo (adimensionado)

C	capacidad térmica del colector (J/K)
$C_p$	calor específico del fluido a la temperatura $T_m$ (J/Kg.K)
$f_d$	fracción difusa en el plano del colector (adimensionado)
G	irradiancia solar global en el plano del colector ( $W/m^2$ )
$G_b$	irradiancia solar directa en el plano del colector ( $W/m^2$ )
$G_d$	irradiancia solar difusa en el plano del colector ( $W/m^2$ )
$k_t$	índice de claridad
$k_t'$	índice de cielo claro
$K_{hem}$	modificador por ángulo de incidencia de la irradiancia solar global (adimensionado)
$K_b$	modificador por ángulo de incidencia de la irradiancia solar directa (adimensionado)
$K_d$	modificador por ángulo de incidencia de la irradiancia solar difusa (adimensionado)
m	masa de aire
$\dot{m}$	caudal másico de fluido que circula a través del colector (kg/s)
$\dot{Q}_u''$	energía útil producida por el colector por unidad de área ( $W/m^2$ )
$T_i$	temperatura del fluido a la entrada del colector ( $^{\circ}C$ )
$T_o$	temperatura del fluido a la salida del colector ( $^{\circ}C$ )
$T_m$	temperatura media del fluido en el colector (promedio de la entrada y la salida) ( $^{\circ}C$ )
$T_a$	temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ )
$\eta_{0,hem}$	rendimiento máximo del colector referido a irradiancia solar global (adimensionado)
$\eta_{0,b}$	rendimiento máximo del colector referido a irradiancia solar directa (adimensionado)
$\theta$	ángulo de incidencia en el plano del colector ( $^{\circ}$ )

## Referencias

Alonso-Suárez R., Bidegain M., Abal G., Modernell P. (2019). Año Meteorológico Típico para aplicaciones de Energía Solar (AMTUES): series horarias típicas para 5 sitios del Uruguay. Ediciones Universitarias (UCUR) de la Universidad de la República (Udelar), ISBN 978-9974-0-1674-7.

Duffie J.A, Beckman W.A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, third edition, 2006.

Batlles F.J., Olmo F.J, Alados-Arboledas L. (1995). On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, 54(2): 105-114.

Fischer S., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Perers B., Bergquist P., Hellström B. (2004). Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2. *Solar Energy*, 76(1-3):117-123.

Fisher S. (2020). Expert Report - Quality Infrastructure for Energy Efficiency and Renewable Energy in Latin America and the Caribbean.+ Report #95309. Recuperado de [http://les.edu.uy/papers/Expert\\_Report-RR-Test\\_R1.pdf](http://les.edu.uy/papers/Expert_Report-RR-Test_R1.pdf)

García de Jalón A., Sallaberry F., Olano X., Mateu E., Astiz R., Ezcurra M., Ramírez L. (2011). Comparison of thermal efficiency curves of solar collectors tested in outdoor conditions. *Proceedings of ISES Solar World Congress*, 28 august - 2 september, Kassel, Germany.

International Energy Agency (IEA). (2016a). Final Energy Consumption in the World. Recuperado de <https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption>



International Energy Agency (IEA). (2016b). Final Energy Consumption in Uruguay. Recuperado de <https://www.iea.org/Sankey/#?c=Uruguay&s=Final20consumption>

ISO 9806. (2017). Solar Energy – Solar thermal collectors – Test methods. Switzerland: International Organization of Standardization.

Kovács P., Petterson U., Persson M., Perers B., Fischer S. (2011). Improving the accuracy in performance prediction for new collector designs. *Proceedings of ISES Solar World Congress*, 28 august - 2 september, Kassel, Germany.

Kratzenberg M.G., Beyer H.G., Colle S. (2006). Uncertainty calculation applied to different regression methods in the quasi-dynamic collector test. *Solar Energy*, 80, 1453-1462.

Muschaweck J., Spirkel W. (1993). Dynamic solar collector performance testing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 30(2):95-105.

Osório T., Carvalho M. (2014). Testing of solar thermal collectors under transient conditions. *Solar Energy*, 104, 71-81.

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon T.A. (2007). Update world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11, 1633-1644.

Perers B. (1993). Dynamic method for solar collector array testing and evaluation with standard database and simulation programs. *Solar Energy*, 50(6), 517-526.

Perez R., Ineichen P., Seals R., Zelenka A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy* 45(2), 111-114.

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). (2018). Renewables 2018 Global Status Report. Recuperado de <http://www.ren21.net/gsr-2018/pages/foreword/foreword/>

Rojas D., Beerermann S.A., Klein S.A., Reindl D.T. (2008). Thermal performance testing of flat-plate collectors. *Solar Energy*, 82, 746-757.

Zambolin E., Del Col D. (2010). Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84, 1382-1396.