



UNIVERSIDAD  
DE LA REPUBLICA  
URUGUAY



## **BANCO DE ENSAYO DE CALENTADORES SOLARES**

*Especificaciones técnicas para realizar ensayos de desempeño térmico y pérdida de presión a colectores solares de acuerdo a la norma ISO 9806:2017*

### **Laboratorio de Energía Solar**

Universidad de la República

Av. Luis Batlle Berres km 508, CP 50.000, Salto, Uruguay

Tel: +598 47303278 / +598 47303400

Marzo 2022

Autores:

Mag. Ing. Juan M. Rodríguez Muñoz

Dr. Ing. Rodrigo Alonso Suárez

Dr. Italo Bove

Mag. Ing. Ignacio Texeira



## Resumen

El Banco de Ensayos de Calentadores Solares (BECS) tiene como objetivo principal la caracterización del desempeño térmico de colectores solares y sistemas prefabricados para producción de agua caliente sanitaria de acuerdo a normativa ISO vigente. El BECS se construyó en el marco de un convenio entre el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), la Universidad de la República (UdelaR) y la Corporación Nacional para el Desarrollo (CND), se ubica en el Laboratorio de Energía Solar (LES-UdelaR) en Salto, Uruguay.

Se hace notar el BECS no está acreditado bajo la norma ISO 17025:2017, pero se siguen todas sus recomendaciones. En este sentido, en el año 2019 el BECS participó de una intercomparación de laboratorios de ensayos de colectores a nivel de Latinoamérica organizada por el Instituto Meteorológico Alemán (PTB), en la cual se obtuvieron excelentes resultados. En esta actividad se logró validar la implementación de los métodos de ensayos de desempeño térmico: método tradicional en estado estacionario (SST – *Steady State Testing*) y método en condiciones cuasi-dinámicas (QDT – *Quasi Dynamic Testing*), siendo el BECS el único participante Latinoamericano en presentar y validar exitosamente el método QDT.

En este informe se brindan las especificaciones técnicas para acometer los ensayos de desempeño térmico y de pérdida de presión a colectores solares de acuerdo a la norma ISO 9806:2017. Si bien la normativa abarca distintas tecnologías de colectores solares, este informe se limita a colectores de baja temperatura con cubierta. Este documento se organiza de la siguiente manera. En la sección 1 se describe el puesto Este de ensayo para colectores del BECS. En la sección 2 se describe el pre-acondicionamiento al que se debe someter el colector previo al ensayo de desempeño térmico. En la sección 3 se describe el ensayo de desempeño térmico; metodología SST y QDT, y se especifica el formato sugerido por la norma para el informe final. Finalmente, en la sección 4 se especifica el ensayo de pérdida de presión.



## Tabla de contenido

1. Instalación de ensayo .....	1
1.1. Seguidor Solar.....	2
1.2. Sistema hidráulico .....	2
1.3. Sistema eléctrico y de control .....	5
1.4. Sensores de medida y sistema de adquisición de datos .....	6
1.5. Sistema neumático .....	8
2. Pre-acondicionamiento del colector .....	8
3. Ensayo de desempeño térmico .....	8
3.1. Método en estado estacionario .....	8
3.1.1. Ensayo de eficiencia .....	9
3.1.2. Determinación del modificador por ángulo de incidencia .....	10
3.1.3. Determinación de la capacidad térmica efectiva y la constante de tiempo .....	12
3.2. Método en condiciones cuasi-dinámicas .....	13
3.3. Conversión de parámetros SST-QDT .....	15
3.4. Presentación general de los resultados del ensayo de desempeño térmico.....	16
3.4.1. Parámetros característicos del desempeño térmico del colector.....	16
3.4.2. Cálculo de potencia útil bajo condiciones de reporte estándar.....	17
4. Ensayo de caída de presión .....	18
4.1 Condiciones de ensayo .....	18
4.2 Procedimiento de ensayo .....	18
4.3. Tratamiento de datos y presentación de resultados.....	18
Referencias .....	19



## 1. Instalación de ensayo

En la Figura 1 se muestra una foto frontal del BECS. En esta figura se pueden ver los cuatro puestos de ensayos que este posee: dos para colectores ubicados en los extremos, y dos para sistemas prefabricados ubicados en el centro. En esta figura también se puede ver dos contenedores verdes, uno de 20 pies el cual contiene la mayor parte del equipamiento termo-hidráulico, y otro de 10 pies el cual contiene los tableros eléctricos, el sistema de control y el sistema de adquisición de datos.



*Figura 1 - Foto frontal del Banco de Ensayos de Calentadores Solares.*

La fachada principal del BECS se orienta al Norte y su desarrollo es Este-Oeste (de izquierda a derecha). El nombre de cada puesto de ensayo fue establecido según su ubicación respecto a la línea Norte-Sur y según si se trata de un puesto para ensayar colectores o sistemas prefabricados. Los puestos de ensayos ubicados a la izquierda de la Figura 1 se denominan puestos Este: puesto Este de colectores y puesto Este de sistemas prefabricados, y los que se encuentran a la derecha se denominan puestos Oeste: puesto Oeste de colectores y puesto Oeste de sistemas prefabricados.

En esta sección se describe el puesto Este de colectores. El objetivo de esta instalación es proporcionar agua a caudal y temperatura controlada a la entrada del colector bajo ensayo. Los elementos principales son:

- **Seguidor solar.** Sistema de seguimiento a dos ejes, con centralita de control.
- **Sistema hidráulico.** Abarca todos los elementos hidráulicos como lo son las bombas, válvulas, tanques, cañerías, etc.
- **Sistema eléctrico y de control.** Abarca todos los elementos necesarios para alimentar eléctricamente el equipamiento y controlar su funcionamiento (PLC, relés, etc).
- **Sistema de adquisición de datos.** Compuesto por los sensores de medida y el adquisidor de datos.
- **Sistema neumático.** Producción de aire comprimido para el accionamiento de las válvulas reguladoras automáticas.

A continuación se describe cada uno de estos elementos.

## 1.1. Seguidor Solar

El colector solar y algunos de los instrumentos de medidas se sitúan sobre un seguidor solar a dos ejes modelo SF09 de la marca FEINA, como se muestra en la Figura 2. La inclinación horizontal de este seguidor se puede ajustar de forma manual o automática entre  $5^\circ$  y  $85^\circ$  y el azimut se puede ajustar de forma manual o automática entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ ; el ajuste automático se realiza cada dos minutos.

La estructura original de este seguidor tuvo que sustituirse por una estructura más robusta fabricada en perfiles de rectangulares de hierro debido a que la original se deformaba debido al peso de los ventiladores. Estos ventiladores están montados en línea sobre una tobera convergente de acero galvanizado y se utiliza para generar un flujo de aire a una velocidad determinada sobre el colector a ensayar. Los ventiladores pueden regularse en altura lo que permite que la corriente de aire artificial fluya por todas las caras del colector. La regulación de velocidad de los ventiladores se realiza mediante reguladores de voltaje. El montaje del colector cumple con todos los requisitos de la norma ISO 9806:2017.



Figura 2 - Seguidor solar.

## 1.2. Sistema hidráulico

En la Figura 3 se muestran un esquema de la instalación termo-hidráulica. La misma cuenta con tres circuitos independientes: circuito primario (verde), circuito de calentamiento (rojo) y circuito de enfriamiento (azul). Estos circuitos permiten mantener estables las condiciones del fluido a la entrada del colector. La mayor parte de las cañerías son de acero inoxidable ( $1/2''$  SH40) y están asiladas con espuma elastomérica de 20 mm de espesor. Además, los tramos que se encuentran en el exterior están recubiertos con membrana asfáltica reflectiva.

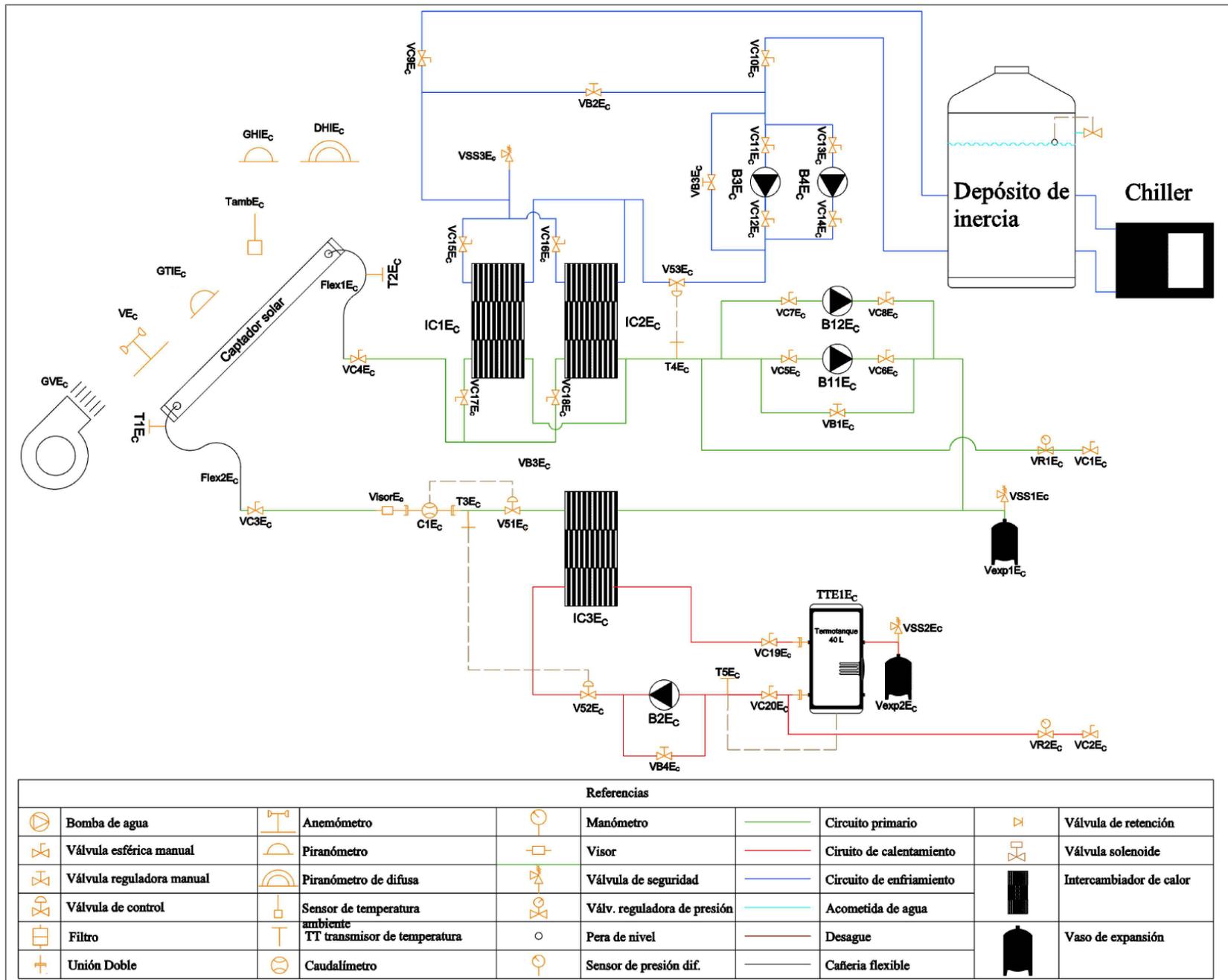


Figura 3 - Esquema termo-hidráulico del puesto Este de ensayo de colectores.

Como se dijo con anterioridad, los tres circuitos funcionan en conjunto para establecer las condiciones del fluido a la entrada del colector. El control de temperatura a la entrada del colector (circuito primario) se realiza en dos etapas. Primero el fluido caliente a la salida del colector es enfriado, proceso que se realiza en el intercambiador de calor IC1Ec o IC2Ec, según el tamaño del colector. Luego, el fluido es calentado en forma precisa a la temperatura de entrada establecida para el ensayo a través del intercambiador de calor IC3Ec. El circuito de enfriamiento utiliza agua a 10 °C que proviene de un tanque de inercia de 600 litros enfriado por un chiller. El circuito de calentamiento utiliza agua caliente que proviene de un termotanque eléctrico de 40 litros (TTE1Ec). El circuito primario y el de enfriamiento posee dos bombas circuladoras (B11Ec y B12Ec en el primario, B2Ec y B3Ec en el de enfriamiento), y el circuito de calentamiento posee una sola bomba (B4Ec). Además, cada circuito posee una válvula reguladora manual: VB1Ec, VB2Ec y VB3Ec. Estas válvulas se utilizan para regular en forma aproximada el caudal en cada circuito. La válvula reguladora manual VB4Ec se utiliza para regular la temperatura del fluido a la entrada del intercambiador de calor IC1Ec/IC2Ec, mezcla el retorno caliente y el agua fría a 10 °C. Los caudales en los tres circuitos se regulan de forma precisa mediante válvulas reguladoras electroneumáticas V51Ec, V52Ec y V53Ec. A continuación, se brinda una lista completa de los elementos que constituyen cada circuito. Los detalles técnicos de los instrumentos de medida y del adquisidor de datos se brindan en la sección siguiente de este informe.

El **circuito primario (verde)** es el circuito por donde circula el fluido de ensayo que circula a través del captador. La temperatura a la entrada del colector se denota  $T_{main}$  y corresponde a la temperatura de ensayo. El circuito contiene los siguientes elementos:

- Tres intercambiadores de calor: **IC1Ec, IC2Ec y IC3Ec.**
- Dos bombas circuladoras: **B11Ec y B12Ec.**
- Una válvula electroneumática para regular el caudal: **V51Ec.**
- Un caudalímetro: **C1Ec.**
- Una válvula reguladora manual: **VB1Ec.**
- Diversas válvulas de corte: **VC1Ec, VC3Ec, VC4Ec, VC5Ec, VC6Ec, VC7Ec, VC9Ec, VC17Ec, VC18Ec.**
- Un vaso de expansión de 20 lts (**Vexp1Ec**) y una válvula de seguridad de 3 bar (**VSS1Ec**).
- Diversos purgadores de aire que no están representados en el diagrama.
- Sensores de temperatura PT100: **T1Ec, T2Ec, T3Ec, T4Ec.**
- Sensor de presión diferencial: **PDEc.**

El **circuito de calentamiento (rojo)** es un circuito auxiliar para acondicionar la temperatura a la entrada del captador. Funciona a una temperatura superior a la del circuito primario ( $T_{main}+6^{\circ}\text{C}$ ). Consta de los siguientes elementos:

- Un termotanque de 40 lts y 1500 W: **TTE1Ec.**
- Una bomba circuladora: **B4Ec.**
- Una válvula electroneumática para regular el caudal: **V52Ec.**
- Una válvula reguladora manual: **VB4Ec.**
- Diversas válvulas de corte: **VC2Ec, VC19Ec, VC20Ec.**
- Un vaso de expansión de 8 lts (**Vexp2Ec**) y una válvula de seguridad de 6 bar (**VSS2Ec**).
- Sensores de temperatura PT100: **T5Ec.**
- Diversos purgadores de aire que no están representados en el diagrama.

El **circuito de enfriamiento (azul)** es un circuito auxiliar para acondicionar la temperatura a la entrada del captador. Funciona a una temperatura inferior a la del circuito primario ( $T_{\text{main}}-2^{\circ}\text{C}$ ). Consta de los siguientes elementos:

- Un chiller de 8 kW de capacidad de enfriamiento.
- Un depósito de inercia de 600 lts (atmosférico).
- Dos bombas circuladoras: **B3Ec y B4Ec**.
- Una válvula electroválvula para regular el caudal: **V53Ec**.
- Dos válvulas reguladoras manuales: **VB2Ec y VB3Ec**.
- Diversas válvulas de corte: **VC9Ec, VC10Ec, VC11Ec, VC12Ec, VC13Ec, VC14Ec, VC15Ec, VC16Ec**.
- Una válvula de seguridad de 6 bar: **VSS3Ec**.
- Diversos purgadores de aire que no están representados en el diagrama.

El chiller y el depósito de inercia de 600 lts son comunes a los cuatro puestos de ensayos del BECS.

Se hace notar que el circuito primario y el de calentamiento son circuitos presurizados y se llenan a través de las válvulas VC1Ec y VC2Ec; se abren permitiendo el llenado de dichos circuitos y luego permanecen cerradas durante el ensayo. Las válvulas VR1Ec y VR2Ec son reguladoras de presión y tienen la función de reducir la presión de red, los circuitos se deben llenar con agua fría a 1 bar. El circuito de enfriamiento es atmosférico y se llena por gravedad a través del depósito de inercia de 600 lts.

Este puesto de ensayos permite ensayar colectores solares desde  $1\text{ m}^2$  hasta  $5\text{ m}^2$ . Para colectores de área bruta menor a  $2.5\text{ m}^2$  se debe utilizar la bomba B11Ec y el intercambiador de calor IC1Ec, y para colectores de área bruta mayor a  $2.5\text{ m}^2$  se debe utilizar la bomba B12Ec y el intercambiador de calor IC2Ec. Se destaca que las bombas poseen tres velocidades de funcionamiento y las válvulas reguladora manual poseen 40 posiciones de ajuste, esto le permite a la instalación adaptarse a diversas condiciones de funcionamiento.

### 1.3. Sistema eléctrico y de control

Los componentes eléctricos se dividen en dos categorías:

- Elementos de protección y seguridad: Interruptores magneto térmicos y diferenciales
- Elementos de control: PLC y relés de control.

Existen dos tableros eléctricos; (i) tablero Este y (ii) tablero Oeste. En el primero se conectan los equipos de los puestos de ensayo Este (captadores y sistemas prefabricados) y en el segundo los equipos de los puestos de ensayos Oeste. El funcionamiento de las válvulas reguladoras y los termotanques es controlado a través del PLC mediante los lazos de control siguiente:

**Lazo de control de temperatura primario (a la salida del captador).** Formado por el sensor de temperatura TC4Ec y la válvula electroválvula V53Ec. El control es del tipo PID, el PLC controla la apertura de la válvula electroválvula de manera que la lectura del sensor TC4Ec sea igual a  $T_{\text{main}}-2^{\circ}\text{C}$ .

**Control del chiller (circuito de enfriamiento).** El funcionamiento del chiller no es controlado por el PLC, este posee su propio termostato que se encarga de encenderlo o apagarlo de manera que la temperatura del agua del depósito se mantenga en  $10^{\circ}\text{C}$ . En las medidas estaciones o en invierno cuando la temperatura ambiente es baja se establece la temperatura de agua fría en  $5^{\circ}\text{C}$  para poder ensayar a una  $T_{\text{main}}$  cercana a la temperatura ambiente. No se recomienda operar con temperaturas de set-point por debajo de  $5^{\circ}\text{C}$  debido a que pueden llegar a presentarse problemas de congelamiento en el evaporador del chiller.

**Lazo de control de temperatura secundario (a la entrada del colector).** Formado por el sensor de temperatura TC3Ec y la válvula electroválvula V52Ec. El control es del tipo PID, El PLC controla la apertura de la válvula electroválvula de manera que la lectura del sensor TC3Ec sea igual a  $T_{main}$ .

**Lazo de control del termotanque (circuito de calentamiento).** Formado por el sensor de temperatura TC5Ec y la Resistencia del termotanque TTE1Ec. El control es del tipo ON/OFF, el PLC enciende o apaga las resistencias del termotanque de manera tal que la lectura del sensor TC5Ec sea igual a  $T_{main}+6^{\circ}\text{C}$ .

**Lazo de control de caudal.** Formado por el sensor de caudal C1Ec y la válvula electroválvula V51Ec. El control es del tipo PID, el PLC controla la apertura de la válvula electroválvula de manera que la lectura del sensor C1Ec sea igual a 0.02 lts/s por metro cuadrado de colector.

#### 1.4. Sensores de medida y sistema de adquisición de datos

A continuación se listan las medidas realizadas en este puesto de ensayo:

- Irradiancia solar global en el plano del colector **GTIEc** (W/m<sup>2</sup>)
- Irradiancia solar global en plano horizontal **GHIec** (W/m<sup>2</sup>)
- Irradiancia solar difusa en plano horizontal **DHIec** (W/m<sup>2</sup>)
- Temperatura del fluido a la entrada del colector **T1Ec** (°C)
- Temperatura del fluido a la entrada del colector **T2Ec** (°C)
- Temperatura del fluido para el sistema de control **T3Ec, T4Ec, T5Ec** (°C)
- Temperatura de aire ambiente **TA1Ec y TA2Ec** (°C)
- Caudal volumétrico de fluido **C1Ec** (m<sup>3</sup>/s).
- Velocidad del viento paralela al plano del colector **V1Ec** (m/s).
- Presión diferencial entre la entrada y la salida del colector **PDEc** (Pa).

Las tres medidas de irradiación solar se realizan con piranómetros Kipp & Zonen CMP10, siendo todos ellos Clase A según la norma ISO 9060:2018, y son calibrados anualmente en el LES de acuerdo a la norma SIO 9457:1992 contra un estándar secundario Kipp & Zonen CMP22 que es enviado a cada cinco años a calibrar contra la referencia radiométrica mundial en World Radiation Center en Davos, Suiza. El sensor GTIEc se encuentra instalado en el seguidor solar y su ángulo de inclinación difiere en menos de  $\pm 1^{\circ}$  con respecto al ángulo de inclinación del colector. El sensor DHIec se realiza junto a una banda de sombra del mismo fabricante. Esta banda bloquea la irradiación solar directa y también parte de la irradiación solar difusa. Por este motivo, la medida del equipo debe ser corregida por un factor de corrección.

Para la determinación de los parámetros del colector es necesario separar la irradiación global en el plano del colector en sus sub-componentes directa y difusa. Esta separación se realiza de la siguiente manera. Primero se estima la irradiación solar directa en incidencia normal (DNI) a través de las medidas en plano horizontal (GHIec y DHIec) utilizando la relación de clausura:

$$DNI = \frac{GHIec - DHIec}{\cos \theta_z}, \quad (1)$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital solar. Luego, se calcula la irradiación solar directa en el plano del colector multiplicando la DNI por el coseno del ángulo de incidencia. Finalmente, la irradiación solar difusa en el plano del colector se calcula por diferencia entre la global y la directa.

Para medir la temperatura a la entrada y salida del colector (T1Ec y T2Ec) se utilizan sensores PT100 de 3 hilos envainados y con transmisores 4-20 mA de la marca Herten. Cada uno de estos sensores está montado sobre un Tee a 90° en forma tal que las vainas quedan apuntando en la dirección contraria al caudal de fluido (como lo especifica la norma). Además, los tramos de cañería entre el colector y estos sensores están aislados con 30 cm de espuma elastomérica recubierta con membrana asfáltica reflectiva. La temperatura ambiente se registra con sensores PT1000 de 2 hilos Honeyell, el sensor TA1Ec está montado sobre una caseta de plástico blanco para protegerla de la irradiancia solar y el sensor TA2Ec está montado a la salida de los forzadores de aire. Estos sensores de temperatura (T1Ec, T2Ec, TA1Ec y TA2Ec) son calibrados en el LES anualmente siguiendo un procedimiento estándar validado por el LATU, reportándose una incertidumbre estándar de 0.02 °C.

Los sensores de temperatura T3Ec, T4Ec y T5Ec se realizan con sensores Pt100 de 4 hilos modelo 1/3 DIN, los sensores T3Ec y T4Ec son de la empresa Endress & Hauser y el sensor T5Ec es de la empresa Herten. Estos sensores no son calibrados anualmente debido a que no se utilizan para el cálculo de los parámetros del colector, son utilizado únicamente por el sistema de control.

La medida de caudal C1Ec se realiza con un caudalímetro electromagnético Endress & Hauser modelo 53H04 - BB0B]-AAoABAA con una incertidumbre de 0.25 % de la medida. El caudal másico luego se calcula como el producto del caudal volumétrico C1Ec por la densidad del fluido. En el anexo C de la norma ISO 9806:2017 se dan expresiones analíticas para la densidad y el calor específico del agua en función de la temperatura y se asume poseen incertidumbres menores al 0.5 %.

La velocidad del viento paralela al plano del colector, V1Ec, se mide con un anemómetro de copa marca NGR modelo 4C con incertidumbre estándar de 0.25 m/s. Esta medida se ubica a 50 mm del plano del colector y a un poco menos de 1/3 del largo del colector respecto al borde inferior del mismo. Este anemómetro se encuentra sobre una base de acrílico de 20 cm de ancho por 40 cm de largo paralela al plano del colector. Además, se cuenta con un anemómetro portátil marca Kimo Instruments modelo VT100S que se utiliza para medir la distribución espacial de la velocidad del viento y ajustar la velocidad de los ventiladores. La ubicación del primer anemómetro (NGR) se definió de manera tal que su medición fuera igual al promedio espacial de la media del anemómetro portátil. La intensidad turbulenta del viento  $I_u$  (adimensional) sobre cierto período de medición se calcula de acuerdo a:

$$I_u = \frac{\vartheta_u}{\bar{v}}, \quad (2)$$

donde  $\bar{v}$  y  $\vartheta_u$  son la velocidad promedio y la desviación estándar de la velocidad sobre el período de medición.

La medida de presión diferencial se realiza con un sensor marca Yokogawa modelo EJA110E-JMS4-J912DB/A/FU. Este sensor permite el ajuste del rango de medida (span) entre 10 y 100 Pa, siendo la incertidumbre de la medida proporcional a este rango. Esto permite realizar del ensayo de pérdida de presión a distintas tecnologías de colectores dentro de los rangos de incertidumbre admitidos por la norma.

Todas las medidas anteriores, a excepción del anemómetro portátil, se registran cada 10 segundos en un adquisidor de datos Ficher Scientific modelo DT85.

El ángulo de incidencia se monitorea con un puntero solidario al seguidor solar (ver Figura 1 a la derecha del colector). Este instrumento se utiliza como control visual dado que el ángulo de incidencia que se utiliza para la determinación de los parámetros del colector se calcula para cada instante a partir de la posición del Sol y la del colector.

### 1.5. Sistema neumático

Esta instalación se encarga de suministrar aire comprimido a las válvulas electro neumáticas (V51Ec, V52Ec y V53Ec). Se compone por un compresor recíprocante de 2 HP y 10 bar, un tanque de 40 litros, un regulador de presión que reduce de 10 bar a 4 bar, y dos filtros dispuestos en serie; uno de 100 µm y otro de 5 µm.

## 2. Pre-acondicionamiento del colector

Previo a la realización de los ensayos de desempeño térmico la norma exige realizar un pre- acondicionamiento del colector. Este proceso consiste en someter al colector a condiciones de estancamiento por al menos 5 horas. Las condiciones de estancamiento se logran exponiendo el colector a una irradiancia solar mayor a 700 W/m<sup>2</sup> y una temperatura ambiente mayor a 10 °C. Además, durante esta exposición el colector no debe contener fluido de trabajo (agua) y todas las conexiones deben estar selladas excepto una, para prevenir el enfriamiento del colector por convección natural. La cobertura de vidrio del colector debe estar limpia antes de cualquier ensayo y si se advierte la presencia de humedad en el interior del colector se le debe hacer circular fluido a alta temperatura hasta que dicha humedad desaparezca. Si antes del ensayo de desempeño térmico se realiza un ensayo de exposición entonces este pre-acondicionamiento se puede obviar.

## 3. Ensayo de desempeño térmico

La norma ISO 9806:2017 propone dos métodos de ensayos para caracterizar el desempeño térmico de colectores solares: método en estado estacionario (SST) y método en condiciones cuasi-dinámicas (QDT). En la sección 3.1. se describe el método SST y en la sección 3.2. el método QDT. Luego, en la sección 3.3. se muestra como convertir los parámetros del modelo SST al QDT y finalmente, en la sección 3.4., se especifica el formato del informe final del ensayo de desempeño térmico.

### 3.1. Método en estado estacionario

El modelo térmico que se utiliza en la metodología SST es el siguiente:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_G} = \eta_{0,hem} \cdot K_{hem}(\theta) \cdot G - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2 - \frac{C}{A_G} \frac{dT_m}{dt}, \quad (3)$$

donde G es la irradiancia solar global en el plano del colector, T<sub>m</sub> es la temperatura media del fluido que atraviesa el colector (promedio entre la entrada y la salida), T<sub>a</sub> es la temperatura del aire circundante al colector y  $\dot{Q}_u$  es la potencia útil producida por el colector y se calcula como:  $\dot{Q}_u = \dot{m}c_p(T_o - T_i)$ , donde T<sub>i</sub> y T<sub>o</sub> corresponde a la temperatura del fluido a la entrada y salida del colector, respectivamente.

Los parámetros que caracterizan el comportamiento térmico del colector son:  $\eta_{0,hem}$ ,  $K_{hem}(\theta)$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y C. El primer parámetro corresponde a la eficiencia óptica del colector en incidencia normal,  $a_1$  y  $a_2$  son los factores de pérdidas térmicas, y C es la capacidad térmica efectiva del colector. Todos estos parámetros son constantes a excepción del modificador por ángulo de incidencia,  $K_{hem}(\theta)$ , el cual es una función dependiente del ángulo de incidencia. El parámetro  $A_G$  corresponde al área total del colector y debe medirse antes de la realización de los ensayos de desempeño térmico.

En el caso del ensayo SST los parámetros se estiman en forma separada a través de tres sub-ensayos independientes: (i) Ensayo de eficiencia, donde se determinan los coeficientes  $\eta_{0,hem}$ ,  $a_1$  y  $a_2$ ; (ii) Ensayo de modificador por ángulo de incidencia, donde se determina  $K_{hem}(\theta)$ ; y (iii) Ensayo de capacidad térmica, donde se

determina la constante C. Cabe destacar que los primeros dos ensayos son en estado estacionario ( $dT_m/dt \approx 0$ ) pero el tercero no. A continuación, se describe cada uno de estos sub-ensayos.

### 3.1.1. Ensayo de eficiencia

#### 3.1.1.1. Condiciones de ensayo

La temperatura del fluido a la entrada del captador debe permanecer estable dentro de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  del valor fijado y se debe medir con una exactitud de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . La temperatura del aire circundante no debe variar más de  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ .

La irradiancia solar total en el plano del del colector debe ser mayor a  $700 \text{ W/m}^2$  y no debe variar más de  $\pm 50 \text{ W/m}^2$  de su valor promedio en cada período de ensayo. Además, la irradiancia solar difusa debe ser menor al 30%. El ángulo de incidencia de radiación solar directa en la abertura de colector debe estar en el rango en el cual el modificador de ángulo de incidencia no varía más de  $\pm 2\%$  de su valor a incidencia normal.

El promedio de la velocidad del viento paralelo al plano del colector (promedio temporal y espacial) debe ser  $3 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$ .

El caudal de fluido debe ser aproximadamente  $0,02 \text{ kg/s}$  por metro cuadrado de área total del captador y debe permanecer estable dentro de  $\pm 1\%$  del valor fijado durante cada período de ensayo.

#### 3.1.1.2. Procedimiento de ensayo

Se debe medir la potencia útil producida por el colector para al menos cuatro temperaturas de entrada de fluido diferentes, espaciadas uniformemente sobre el rango de funcionamiento del captador (por ejemplo  $(T_m - T_i) = 0^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  y  $60^\circ\text{C}$ ). Se sugiere seleccionar una de las temperatura de entrada de manera que la temperatura media del fluido en el captador se ubique cerca de  $\pm 3^\circ\text{C}$  de la temperatura ambiente, a fin de obtener  $\eta_{0,hem}$  de forma precisa. Se deben obtener al menos cuatro puntos de entrada de datos independientes por cada temperatura de entrada, para dar un total de 16 puntos de entrada de datos.

El período de ensayo para la entrada de datos en estado estacionario debe incluir un período de acondicionamiento previo de al menos 15 minutos con la temperatura de ensayo, seguido de un período de medición en estado estacionario de al menos 10 min. En resumen, para cada temperatura de entrada se debe medir por un período de 55 minutos ( $15' + 10' + 10' + 10' + 10'$ ). Se considera que un colector ha funcionado en estado estacionario en un período de medición dado, si durante este período de medición, ninguno de los parámetros experimentales se desvía de sus valores medios en más de los límites indicados en la sección anterior. Para establecer que existe estado estacionario, los valores promedios de cada parámetro tomados en períodos sucesivos de 30 s, se deben comparar con el valor promedio en el período de medición.

#### 3.1.1.3. Tratamiento de datos y presentación de resultados

En primer lugar, se debe constatar que los datos relevados para las diferentes temperaturas de entrada se encuentren dentro de los rangos admisibles dados en la sección 3.1.1.3. Luego se procede determinar los parámetros  $\eta_{0,hem}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  mediante regresión lineal múltiple utilizando el siguiente modelo:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_G} = \eta_{0,hem} \cdot G - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2. \quad (4)$$

Este modelo surge de asumir incidencia normal ( $K_{hem}(\theta) \approx 1$ ) y estado estacionario ( $dT_m/dt \approx 0$ ) en la Ec. (3). Para realizar el ajuste se debe definir como variable dependiente a la energía útil por unidad de área ( $\dot{Q}_u/A_G$ ) y como variables independientes:  $G$ ,  $(T_m - T_a)$  y  $(T_m - T_a)^2$ .

Si al realizar el ajuste lineal uno de los parámetros presenta un t-ratio menor a 3 (cociente entre la incertidumbre y el valor del parámetro) entonces este parámetro debe obviarse y el ajuste se debe repetir fijando en cero este parámetro. El informe final debe contener el valor y la incertidumbre de cada parámetro.

Si bien la última versión de la ISO 9806 no exige que se presente la curva de eficiencia, se considera que la realización de la misma constituye una buena práctica dado que permite realizar un control de calidad de los datos mediante inspección visual. La curva de eficiencia resulta de dividir la Ec. (4) por la irradiancia solar global G, esto es:

$$\eta = \eta_{0,hem} - a_1 \frac{T_m - T_a}{G} - a_2 G \left( \frac{T_m - T_a}{G} \right)^2. \quad (5)$$

Esta curva suele representarse en función de la temperatura reducida ( $T^* = (T_m - T_a)/G$ ) en superposición con los datos experimentales, en la Figura 4 se muestra un ejemplo.

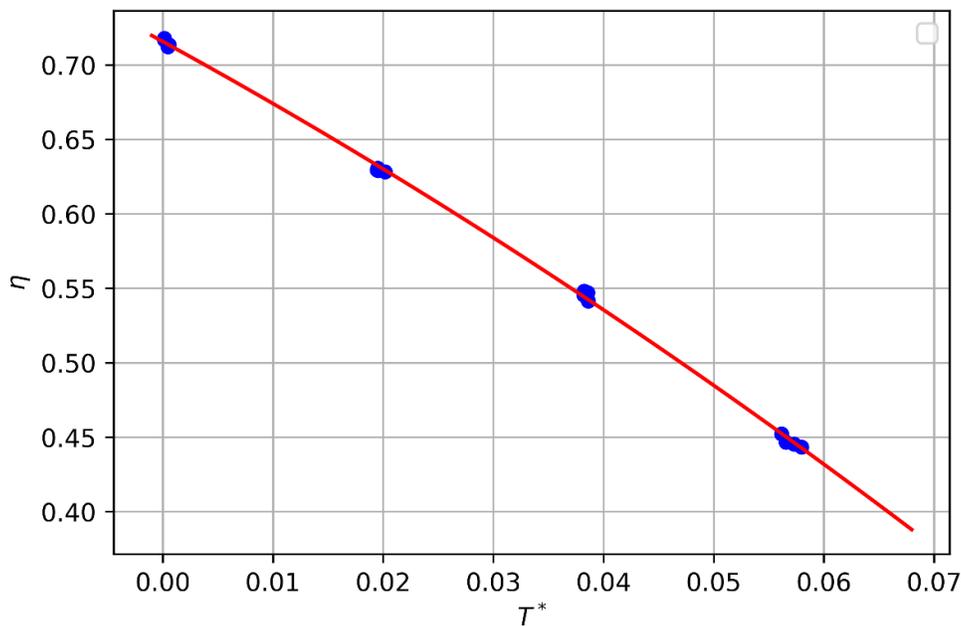


Figura 4 - Curva de eficiencia ajustada (rojo) y datos experimentales (puntos azules).

### 3.1.2. Determinación del modificador por ángulo de incidencia

Para un ángulo de incidencia dado, el modificador por ángulo de incidencia se define como el cociente de la eficiencia óptica del captador para ese ángulo de incidencia sobre la eficiencia óptica del colector en incidencia normal:

$$K_{hem}(\theta_L, \theta_T) = \frac{\eta_{0,hem}(\theta_L, \theta_T)}{\eta_{0,hem}} \quad (6)$$

En un caso general este parámetro es una función de dos ángulos; ángulo longitudinal ( $\theta_L$ ) y ángulo transversal ( $\theta_T$ ). Dichos ángulos corresponden a la proyección del ángulo de incidencia ( $\theta$ ) sobre dos planos de simetría perpendiculares. El plano longitudinal corre paralelo al eje óptico del captador y da lugar al ángulo longitudinal, el plano transversal corre perpendicular al eje óptico del captador y da lugar al ángulo transversal. En este caso

general, el modificador de ángulo se puede estimar como el producto de dos modificadores de ángulos separados,  $K_{\theta_L}$  y  $K_{\theta_T}$ , esto es:

$$K_{hem}(\theta_L, \theta_T) = K_{hem}(\theta_L, 0) \cdot K_{hem}(0, \theta_T) \quad (7)$$

En el caso de colectores planos, el efecto de estos dos modificadores es simétrico y por lo tanto  $K_{hem}$  puede escribirse como una función univariada dependiente del ángulo de incidencia. En cambio, para colectores de tubos evacuados el efecto no es simétrico, y para lograr una caracterización adecuada es necesario determinar los dos modificadores por separado.

### 3.1.2.1. Procedimiento de ensayo

La temperatura de entrada se debe mantener de forma tal que la diferencia entre la temperatura media del fluido ( $T_m$ ) sea lo más cercana posible a la temperatura del aire ( $T_a$ ), idealmente dentro del rango  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Durante cada periodo de medida el ángulo de incidencia no debe variar más de  $\pm 2,5^\circ$  y la fracción solar difusa debe ser menor al 30 %. Además, se deben cumplir las mismas condiciones de estabilidad del ensayo de eficiencia. Se debe medir el modificador de ángulo para dos ángulos de incidencia ( $\theta$ ) diferentes entre  $20^\circ$  y  $70^\circ$ . Si las mediciones se realizan con el seguidor fijo entonces por cada ángulo se deben tomar dos medidas; una antes y otra después del mediodía solar, y luego se deberá tomar un promedio.

### 3.1.3.2 Tratamiento de datos y presentación de resultados

Los datos se deben promediar cada cierto periodo de tiempo (al menos 10 minutos) y la verificación del estado estacionario se debe realizar de igual manera que en el ensayo de eficiencia, incluyendo los requerimientos de 3.1.2.1.

Si la temperatura media del fluido se mantiene muy cerca de la temperatura ambiente ( $T_m - T_a \approx 0^\circ\text{C}$ ) el modificador de ángulo se computa según la Ec. (6), donde  $\eta_{0,hem}(\theta_L, \theta_T) = \dot{Q}_u / (G \cdot A_G)$ . Si la temperatura media del fluido no puede mantenerse igual a la temperatura ambiente con una tolerancia de  $\pm 1^\circ\text{C}$  entonces el modificador de ángulo se debe computar de la siguiente manera:

$$K_{hem}(\theta_L, \theta_T) = \frac{\eta_{0,hem}(\theta_L, \theta_T) + a_1 \cdot \left(\frac{T_m - T_a}{G}\right) a_2 \cdot G \cdot \left(\frac{T_m - T_a}{G}\right)^2}{\eta_{0,hem}} \quad (8)$$

En el informe se debe reportar el modificador por ángulo de incidencia en pasos de  $10^\circ$  grados, como se muestra en la Tabla 1. Para ello se puede interpolar entre las medidas realizadas asumiendo  $K_{hem}(0^\circ) = 1$  y  $K_{hem}(90^\circ) = 0$ .

Tabla 1 - Modificador por ángulo de incidencia para colectores de tubulares

$\theta_L \backslash \theta_T$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$K_{hem}(\theta_L, 0)$										
$K_{hem}(0, \theta_T)$										

Los datos de la tabla anterior también deben presentarse en forma gráfica como se muestra en la Figura 5 (en la figura se muestran datos correspondientes a un colector de tubos al vacío).

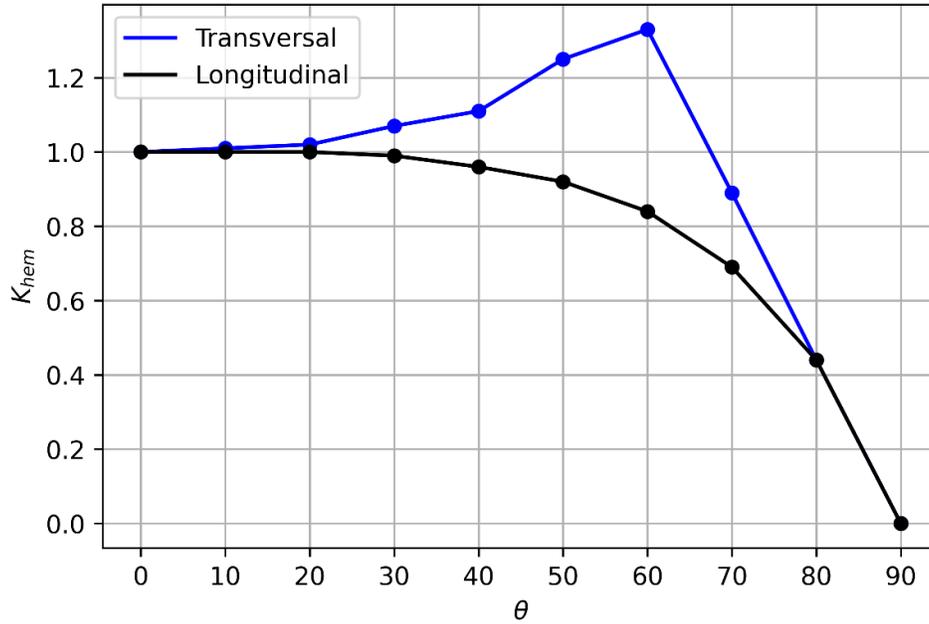


Figura 5- Modificador por ángulo de incidencia de un colector tubular.

### 3.1.3. Determinación de la capacidad térmica efectiva y la constante de tiempo

#### 3.1.3.1. Procedimiento de ensayo

La norma propone varios métodos para estimar la capacidad térmica efectiva. En este informe se sigue el procedimiento descrito en la sección 25.2 de la ISO 9806:2017 pero teniendo en consideración el ajuste de segundo orden en las pérdidas térmicas (parámetro  $a_2$ ). El procedimiento para determinar la constante de tiempo es el mismo que el de la sección 25.2 y se describe a continuación.

El fluido de transferencia de calor debe circular a través del colector con el mismo caudal que el usado durante el ensayo de eficiencia. La abertura del colector se debe proteger de la radiación solar mediante una cubierta reflectante solar y la temperatura del fluido a la entrada del colector se debe fijar aproximadamente igual a la temperatura ambiente. Cuando se ha alcanzado el estado estacionario, la cubierta se debe remover y continuar las mediciones hasta que se haya logrado nuevamente condiciones de estado estacionario. Para el propósito de este ensayo, se asume que existe una condición de estados estacionario cuando la temperatura de salida del fluido varía menos de 0.5°C por minuto.

#### 3.1.3.2. Cálculo de la capacidad térmica efectiva

La capacidad térmica efectiva se halla integrando la Ec. (3) sobre el periodo entre los dos puntos de funcionamiento estacionarios:

$$\frac{C}{A_G} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} [\eta_{0,hem} \cdot G - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2 - \dot{Q}_u/A_G] dt}{T_{m2} - T_{m1}} \quad (9)$$

#### 3.1.3.3. Cálculo de la constante de tiempo

La temperatura media del fluido y la del aire circundante se debe trazar en función del tiempo, iniciando con la condición inicial en estado estacionario y continuando hasta que se alcance el segundo estado estacionario. La constante de tiempo  $\tau_c$  del colector, se define como el tiempo que toma la temperatura media del fluido en

alcanzar el 63.2% del incremento total siguiendo un cambio en forma escalón en la irradiancia solar en el tiempo cero.

### 3.2. Método en condiciones cuasi-dinámicas

El modelo térmico que utiliza esta metodología surge de separar la irradiancia global en sus sub-componentes directa y difusa, y reemplaza en la Ec. (3) el modificador por ángulo de incidencia considerando su efecto distinto sobre ambas componentes, de la siguiente manera:

$$\eta_{0,hem} \cdot K_{hem}(\theta) \cdot G = \eta_{0,b} \cdot [K_b(\theta) \cdot G_b + K_d \cdot G_d]. \quad (10)$$

Lo que da lugar a:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_G} = \eta_{0,b} \cdot [K_b(\theta) \cdot G_b + K_d \cdot G_d] - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2 - a_5 \frac{dT_m}{dt}, \quad (11)$$

donde  $K_b$  y  $K_d$  son los modificadores por ángulo de incidencia para la irradiancia solar directa y difusa, respectivamente. El primero es una función del ángulo de incidencia y el segundo es una constante. Además, el modelo sustituye el término  $C/A_G$  por el parámetro  $a_5$  (mismo significado). En esta metodología los parámetros se determinan todos a la misma vez a través de un único ensayo que integra los tres sub-ensayos de la metodología SST.

#### 3.2.1. Condiciones de ensayo

La temperatura del fluido a la entrada del captador y el caudal de fluido no pueden variar en más de  $\pm 1^\circ\text{C}$  y  $\pm 1\%$  respecto de los valores fijados, respectivamente. Además, la velocidad del viento paralela al colector debe ser menor a 4 m/s.

#### 3.2.2. Procedimiento de ensayo

El conjunto de medidas deberá estar constituido por al menos una secuencia por cada day type. Los day type corresponden a secuencias de ensayos específicas definidas por la norma y se tienen 4 day type diferentes en total. El número total de secuencias dependerá de las condiciones climáticas del lugar y del momento en el que se lleve a cabo el ensayo. Cada secuencia (day type) deberá tener una duración de al menos 3 horas, pudiendo estar constituida a su vez por varias sub-secuencias no consecutivas con una duración de al menos 30 minutos cada una. El conjunto total de datos (todas las secuencias) deberá contener la suficiente variabilidad en las condiciones de funcionamiento para lograr una correcta determinación de los parámetros. Esta variabilidad se logra usando diversas temperaturas a la entrada del colector y haciendo que el colector funcione bajo distintas condiciones de cielo (cielo claro, cielo parcialmente nublado y nublado). A continuación, se describen las condiciones que deben verificar para cada day type:

**Day type 1:** esta secuencia se debe realizar con la temperatura del fluido lo más próxima posible a la temperatura ambiente (se recomienda que  $T_m$  esté en el rango  $T_a \pm 3^\circ\text{C}$ ), y mayormente en condiciones de cielo claro. Además, el ángulo de incidencia debe variar entre un valor tal que el modificador por ángulo de incidencia para la irradiancia directa no varíe en más de 2% de su valor en incidencia normal hasta valores mayores a  $60^\circ$ . Esta secuencia contribuye a la determinación de los parámetros relacionados a la eficiencia óptica del colector ( $\eta_{0,b}$ ,  $K_b(\theta)$  y  $K_d$ ).

**Day type 2:** en esta secuencia el colector deberá trabajar en condiciones de nubosidad variable, pudiéndose realizar a cualquier temperatura de funcionamiento. Para que la capacidad térmica del colector pueda ser determinada correctamente la derivada temporal de la temperatura media del fluido debe exceder el valor  $\pm$

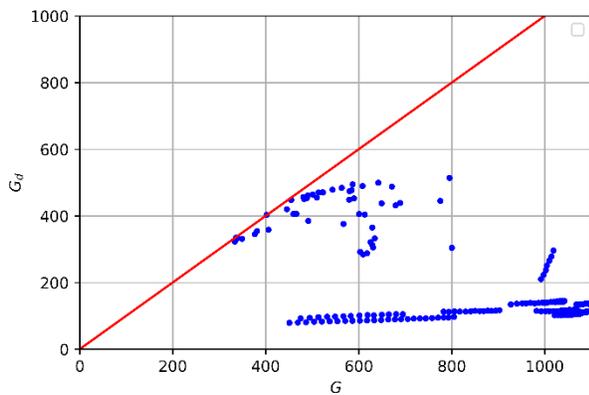
0.005 °C/s. Esta secuencia contribuye a la determinación de la capacidad térmica efectiva ( $a_5$ ) y al modificador por ángulo incidencia para la irradiancia difusa ( $K_d$ ).

**Day type 3:** en esta secuencia el colector debe operar con una temperatura de entrada intermedias y las medidas deben incluir condiciones de cielo claro. Se necesitan al menos dos temperaturas intermedias, por ejemplo,  $T_i$  tal que  $(T_m - T_a) = 20\text{ °C}$  y  $40\text{ °C}$ .

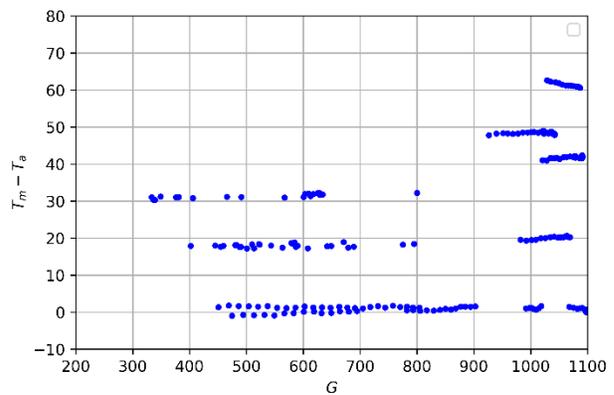
**Day type 4:** en esta secuencia el colector debe operar con una temperatura de entrada alta, por ejemplo,  $T_i$  tal que  $(T_m - T_a) = 60\text{ °C}$ , y las medidas deben incluir condiciones de cielo claro. Las secuencias day type 3 y 4 contribuyen a la determinación de los factores de pérdidas térmicas ( $a_1$  y  $a_2$ ).

*3.2.3. Tratamiento de datos y presentación de resultados*

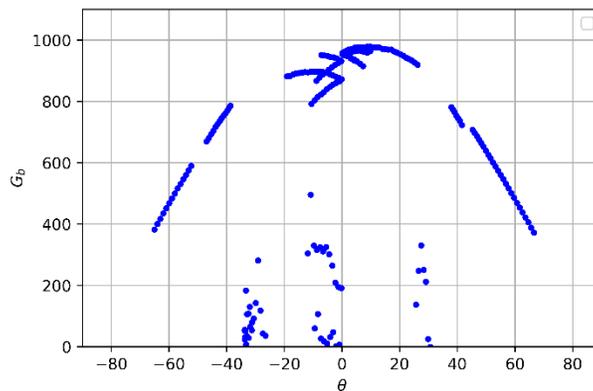
En primer lugar, los datos se deben promediar cada cierto periodo de tiempo, típicamente 5 minutos, y se debe constatar los requisitos de estabilidad especificados en 3.2.1. En segundo lugar, se debe evaluar el si el conjunto de datos reúne la variabilidad suficiente y si se cumplen los requisitos particulares de cada day type. En este sentido, la norma sugiere la realización de las siguientes gráficas: (1)  $G_d$  en función de  $G$ , (2)  $G_d$  en función de  $(T_m - T_a)$ , y (3)  $G_b$  en función de  $\theta$ . La norma además proporciona gráficos típicos contra los cuales comparar. En la Figura 6 se muestran ejemplos para estos gráficos.



(a)  $G_d$  en función de  $G$ .



(b)  $T_m - T_a$  en función de  $G$ .



(c)  $G_b$  en función del ángulo de incidencia  $\vartheta$ .

Figura 6 - Gráficos para evaluar la variabilidad del conjunto de datos.

En la Figura 5a se pueden distinguir las medidas en condiciones de cielo claro de las medidas en condiciones de nubosidad, los datos que siguen cierta regularidad son los asociados a cielo claro. La línea roja en esta figura ( $G=G_d$ ) se utiliza para realizar un control de calidad básico, las medidas de  $G_d$  y  $G$  deben estar debajo de esta línea debido a que  $G_d < G$ . La Figura 5b muestra las diferentes medidas de entrada y la Figura 5c muestra la variabilidad en el ángulo de incidencia, los valores negativos y positivos del ángulo de incidencia corresponden a medidas antes y después del mediodía solar, respectivamente. Un requerimiento importante que se desprende de esta última gráfica es la necesidad de contar con medidas antes y después del mediodía solar en forma aproximadamente simétrica.

Una vez realizada la comprobación de la variabilidad del conjunto de datos, se procede a la identificación de parámetros (determinación de los parámetros característicos). La norma admite dos procedimientos de identificación de parámetros: (1) aproximación por diferencias finitas de la derivada temporal y regresión lineal (2) simulación dinámica y regresión no lineal. Al primero se lo conoce comúnmente como método MRL (Multi Linear Regression). En ambos casos se debe utilizar el modelo dado por la Ec. (11) y el error cuadrático medio de potencia útil como función a minimizar. En Rodríguez-Muñoz (2021) se describe la implementación de ambos métodos de ajustes para un colector de placa plana. A continuación, se describe brevemente la implementación del MLR, por tratarse del método más utilizado.

Para implementar el método MLR se debe asumir una relación para el modificador por ángulo de incidencia, para ejemplificar, se utilizará la relación sugerida por Souka. and Safwat, (1966) para colectores de placa plana:

$$K_b(\theta) = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right). \quad (12)$$

Sustituyendo esta ecuación en la Ecuación (11) se tiene:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_G} = \eta_{0,b} G_b - \eta_{0,b} b_0 \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) G_b + \eta_{0,b} K_d \cdot G_d - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 - a_5 \frac{dT_m}{dt}. \quad (13)$$

Para realizar el ajuste se debe definir como variable dependiente a la energía útil por unidad de área y como 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  $C/A_G$ . La variable  $dT_m/dt$  se estima de la siguiente manera utilizando las medidas experimentales:

$$\frac{dT_m}{dt} \cong \frac{T_m(t + \Delta t) - T_m(t)}{\Delta t}, \quad (14)$$

donde  $\Delta t$  corresponde al tiempo de promediado y  $T_m(t)$  y  $T_m(t + \Delta t)$  corresponden a las medidas experimentales instantáneas al inicio y al final del periodo de promediado, respectivamente.

### 3.3. Conversión de parámetros SST-QDT

Debido a que los laboratorios pueden utilizar una metodología o la otra, por ejemplo, en distintos momentos del año según sean conveniente para minimizar los tiempos de ensayo, resulta de interés poder convertir los parámetros de la Ec. (3) a los parámetros de la Ec. (11). En el anexo B de la norma ISO-9806 (2017) se describe cómo realizar esta conversión, es decir, cómo estimar los parámetros  $\eta_{0,b}$ ,  $K_b(\theta)$  y  $K_d$  a partir de los parámetros  $\eta_{0,hem}$  y  $K_{hem}(\theta)$ .

Para calcular  $K_d$  primero se toma que:

$$K_{hem}(\theta_L, \theta_T) \approx K_b(\theta_L, \theta_L), \quad (15)$$

dado que  $K_{hem}(\theta)$  se determina en condiciones de cielo claro con una fracción difusa baja. Luego, asumiendo que la distribución de la irradiancia difusa es isotrópica,  $K_b(\theta)$  es promediado y normalizado sobre el ángulo sólido visto por el colector, esto es:

$$K_d = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} K_b(\theta, \gamma) \sin \theta \cos \theta d\theta d\gamma}{\int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta d\gamma}, \quad (16)$$

donde  $\theta$  y  $\gamma$  corresponden al ángulo de incidencia y azimut, respectivamente. En las ecuaciones siguientes se muestra como calcular los ángulos  $\theta_L$  y  $\theta_T$  en función de  $\theta$  y  $\gamma$ .

$$\theta_L(\theta, \gamma) = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta \cos \gamma}{\cos \theta} \right), \quad (17)$$

$$\theta_T(\theta, \gamma) = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta \sin \gamma}{\cos \theta} \right). \quad (18)$$

La norma establece que la integral de la Ec. (16) debe realizarse en forma discreta en pasos de  $10^\circ$ , es decir:

$$K_d = \frac{\sum_{0^\circ}^{90^\circ} \sum_{0^\circ}^{90^\circ} K_b(\theta, \gamma) \sin \theta \cos \theta \Delta\theta \Delta\gamma}{\sum_{0^\circ}^{90^\circ} \sum_{0^\circ}^{90^\circ} \sin \theta \cos \theta \Delta\theta \Delta\gamma}. \quad (19)$$

Para colectores con modificadores de ángulo univariados (colectores de placa plana, por ejemplo) el cálculo de  $K_d$  se puede simplificar de la siguiente manera:

$$K_d = \frac{\sum_{0^\circ}^{90^\circ} K_b(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\sum_{0^\circ}^{90^\circ} \sin \theta \cos \theta d\theta}. \quad (20)$$

Una vez estimado  $K_d$ , el parámetro  $\eta_{0,b}$  puede estimarse a partir de la Ec. (10) asumiendo incidencia normal

$$\eta_{0,b} = \frac{\eta_{0,hem}}{0.85 + 0.15K_d}, \quad (21)$$

### 3.4. Presentación general de los resultados del ensayo de desempeño térmico

#### 3.4.1. Parámetros característicos del desempeño térmico del colector

El informe final debe contener una descripción del colector ensayado y se debe especificar con claridad el método de ensayo utilizado; SST o QDT.

Para la presentación de los resultados la norma sigue un único formato independientemente del método de ensayo utilizado. En este sentido, se debe reportar el valor y la incertidumbre de cada uno de los parámetros del modelo siguiendo el formato de la Tabla 2. Los resultados del modificador por ángulo de incidencia se deben reportar según el apartado 3.1.2.

Tabla 2 – Valor e incertidumbre de cada parámetro característico del colector

Parámetro	Valor	Incertidumbre	Unidad
$\eta_{hem}$			-
$\eta_{0,b}$			-
$K_d$			-
$a_1$			$W/m^2.K$
$a_2$			$W/m^2.K^2$
$a_5$ o $C/A_G$			$J/K.m^2$

### 3.4.2. Cálculo de potencia útil bajo condiciones de reporte estándar

En el informe final debe contener la potencia útil producida por el colector bajo distintas condiciones de cielo. La norma define estas condiciones como condiciones de reporte estándar (STR – Standard Reporting Conditions), las condiciones relacionadas a la irradiancia solar se indican en el encabezado de la Tabla 3. El cálculo se realiza utilizando la Ec. (11), asumiendo incidencia normal y estado estacionario, esto es:

$$\dot{Q}_u = A_G \{ \eta_{0,b} \cdot [K_b(\theta) \cdot G_b + K_d \cdot G_d] - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2 \} \quad (22)$$

Si el colector se ensaya de acuerdo al método SST entonces se debe realizar la conversión de parámetros indicada en la sección anterior en forma previa.

Los datos de potencia útil se deben presentar en forma de tabla como se indica en la Tabla 3, y en forma gráfica como se indica en la Figura 7.

Tabla 3 - Potencia producida en Watts para diferentes condiciones de funcionamiento

$T_m - T_a$ en K	Blue sky $G=1000 \text{ W/m}^2$ ( $G_b=850 \text{ W/m}^2$ y $G_d=150 \text{ W/m}^2$ )	Hazy sky $G=700 \text{ W/m}^2$ ( $G_b=440 \text{ W/m}^2$ , $G_d=260 \text{ W/m}^2$ )	Grey sky $G=400 \text{ W/m}^2$ ( $G_b=0 \text{ W/m}^2$ , $G_d=400 \text{ W/m}^2$ )
-10			
0			
10			
20			
30			
...			
Máx. diferencia de temp. ensayada + 30K			

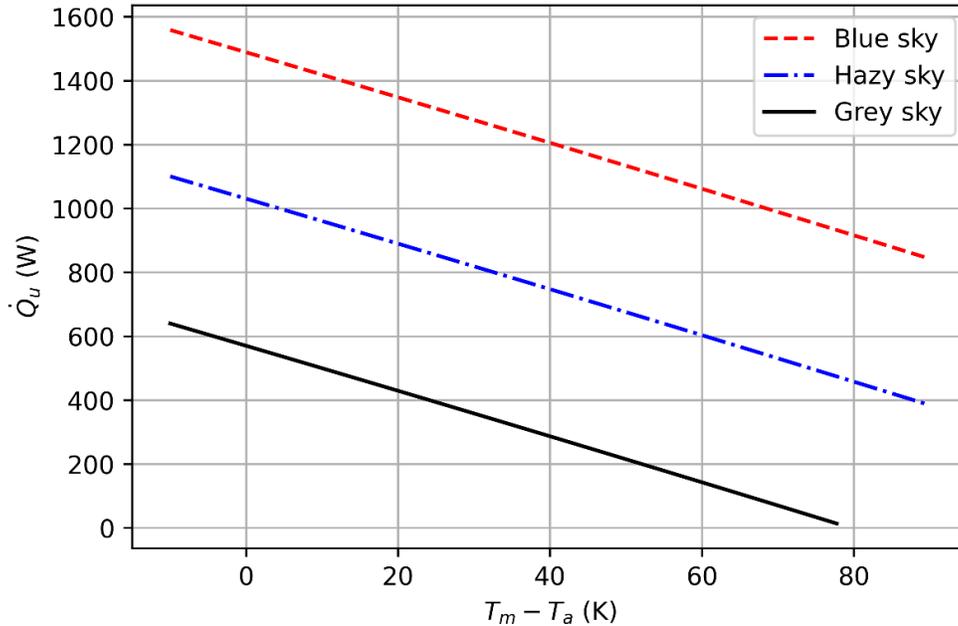


Figura 7 – Potencia útil producida por el colector bajo las condiciones de reporte estándar

## 4. Ensayo de caída de presión

### 4.1 Condiciones de ensayo

Durante las mediciones de ensayo, el caudal de fluido se debe mantener constante dentro de  $\pm 1\%$  del valor nominal y la temperatura de entrada del fluido se debe mantener en  $20 \pm 2$  °C. Además, el colector se debe proteger de la irradiancia solar.

### 4.2 Procedimiento de ensayo

Se deben hacer al menos cinco mediciones a valores igualmente espaciados en el rango de caudal. Los accesorios de unión usados para medir la presión de fluido pueden causar por sí mismos una caída de presión. Se debe hacer una verificación del cero de caída de presión. Para cada punto de operación se deben alcanzar condiciones de estado estacionario por al menos 5 minutos.

### 4.3. Tratamiento de datos y presentación de resultados

Los datos de pérdida de presión se deben presentar en forma de tabla y en forma de figura, ver ejemplos en Tabla 4 y Figura 8. Para la mayoría de los colectores la pérdida de presión en función del caudal volumétrico sigue una relación cuadrática, es decir:

$$\Delta p = a \cdot q + b \cdot q^2 \quad (22)$$

El valor de los parámetros a y b deben derivarse mediante regresión lineal y deber reportarte sen el informe final.

Tabla 4 – Mediciones de pérdida de presión para diferentes caudales

$q$ ( $m^3/s$ )					
$\Delta p$ (Pa)					

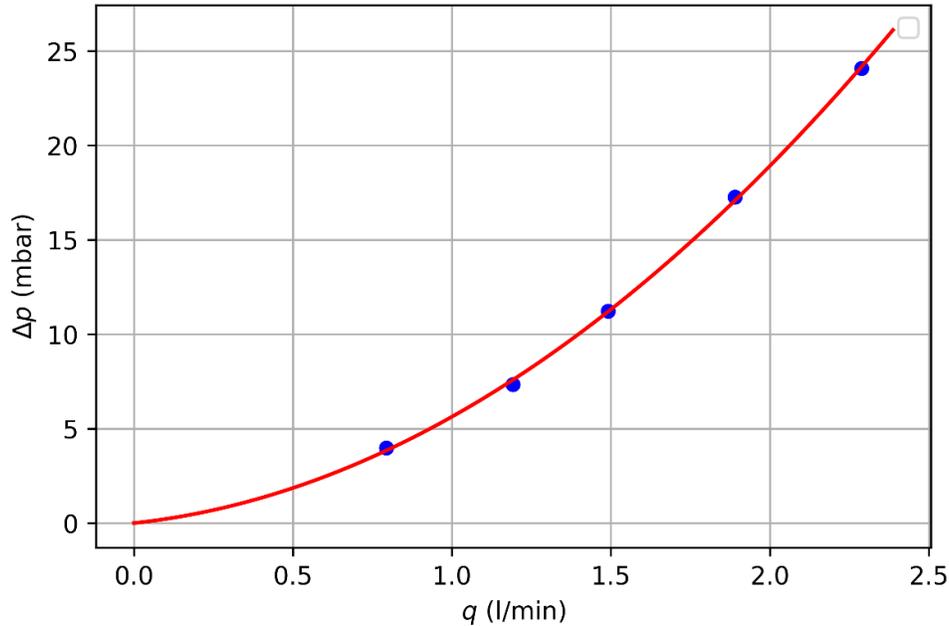


Figura 8 - Curva de pérdida de presión (rojo) y datos experimentales (puntos azules)

## Referencias

ISO-9060 (2018). Solar energy - specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.

ISO-9847 (1992). Solar energy - calibration of \_eld pyranometers by comparison to a reference pyranometer. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.

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

Rodríguez Muñoz, J.M. (2021). *Ensayos de desempeño térmico de colectores solares de placa plana*. Tesis de maestría. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. doi: [10.13140/RG.2.2.23050.18881](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23050.18881).

Souka, A. and Safwat, H. (1966). Determination of the optimum orientations for the double-exposure, at-plate collector and its reflectors. *Solar Energy*, 10(4):170-174. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(66\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(66)90004-1).