

# Puesta en Valor de Pirheliómetro TMI MK VI y participación en NPC 2022

Nota Técnica SMN 2024-166

**Julián A. Lell**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Dirección Central de Monitoreo del Clima*

Febrero 2024

### *Información sobre Copyright*

*Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.*

*La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.*

## Resumen

En este documento se detallan las modificaciones realizadas sobre el pirheliómetro TMI MK VI, para su puesta en valor y participación en la intercomparación de pirheliómetros NREL NPC 2022. La actualización del instrumento supuso el reemplazo de la unidad de control por una pequeña caja con resistencias de precisión y conector, eliminándose el amplificador y sus componentes asociados. La medición de la tensión entregada por la termopila, proporcional a la irradiancia recibida por el instrumento, y la medición de su temperatura interna, requerida para su ajuste en precisión por debajo del 0,1 %, es realizada a través de un adquisidor de datos Campbell Scientific modelo CR1000X. En segundo lugar, el documento presenta los resultados correspondientes al NPC-2022 (National Renewable Energy Laboratory Pyrheliometer Comparisons, Solar Radiation Research Laboratory).

## Abstract

This document details the modifications made to the TMI MK VI pyrheliometer, for its enhancement and participation in the intercomparison of NREL NPC 2022 pyrheliometers. The update of the instrument involved the replacement of the control unit with a small box with resistances of precision and connector, eliminating the amplifier and its associated components. The measurement of the voltage delivered by the thermopile, proportional to the irradiance received by the instrument, and the measurement of its internal temperature, required for its precision adjustment below 0.1 %, is carried out through a datalogger Campbell Scientific type CR1000X. Secondly, this document presents the results corresponding to NPC-2022 (National Renewable Energy Laboratory Pyrheliometer Comparisons, Solar Radiation Research Laboratory).

**Palabras clave:** TMI, NPC, pirheliómetro absoluto de cavidad, actualización, puesta en valor.

## Citar como:

Lell, J., 2024: Puesta en valor de pirheliómetro TMI MK VI y participación en NPC 2022. Nota Técnica SMN 2024-166.

# 1. INTRODUCCIÓN

El pirheliómetro TMI MK VI fue adquirido a través de la Embajada Argentina en los Estados Unidos de América en el año 1979, con el fin de ser puesto a disposición de la Fuerza Aérea Argentina. De acuerdo a los estándares de la época, el instrumento fue construido con componentes electrónicos y mecánicos de primera calidad, motivo por el cual los elementos sensores de este instrumento mantienen plena funcionalidad. Sin embargo, algunos de los componentes pertenecientes a la unidad de control, tales como el voltímetro interno (uno de los componentes dedicados a la puesta a punto del equipo), han sufrido una serie de desperfectos que han reducido su precisión y confiabilidad. Por otra parte, el proceso de puesta a punto inicial del instrumento en sí mismo es, y siempre ha sido, susceptible a errores de operación, debido a la gran cantidad de pasos necesarios y a la manipulación de llaves conmutadoras y resistencias variables por parte del usuario. En la presente nota técnica se establece un nuevo esquema de conexión para el sensor TMI MK VI, el cual prescinde de la unidad de control original, a excepción de un conjunto de 4 resistencias de precisión utilizadas para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo. Considerando que un pirheliómetro absoluto de cavidad similar al TMI MK VI tiene un valor de mercado cercano a 40.000 dólares estadounidenses (según estimaciones de especialistas del Laboratorio Nacional de Energías Renovables-NREL, EE.UU.- en octubre de 2022), la recuperación de la plena funcionalidad de este instrumento, alcanzada a través de su modificación y posterior calibración en los Estados Unidos de América, supone una recuperación del patrimonio y capacidades de medición de la radiación solar del Servicio Meteorológico Nacional.

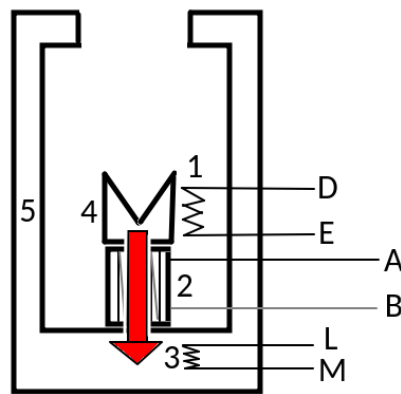
## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Descripción del funcionamiento del dispositivo

El pirheliómetro TMI<sup>2</sup> se encontraba originalmente constituido por un módulo sensor (MK VI) y por una unidad de control (MK I). El módulo sensor contiene tres componentes fundamentales: una termopila, una resistencia calefactora y un termistor; la termopila entrega una diferencia de potencial proporcional a la diferencia de temperatura entre una cavidad cónica de paredes negras (alta absorbanza) y el cuerpo del módulo sensor (cilindro de aluminio de gran masa -gran capacidad calorífica-). De esta forma, cuando la radiación solar ingresa en la cavidad del instrumento se establece un flujo de calor desde dicha cavidad hacia el cuerpo del módulo, dando lugar a un gradiente térmico de acuerdo a la resistencia térmica de la termopila. La conversión de tensión eléctrica entregada por la termopila en el correspondiente valor de irradiancia requería originalmente un ajuste de escala, lo cual se realizaba introduciendo calor en la cavidad de forma eléctrica a través de la resistencia calefactora. La potencia entregada por este calefactor podía calcularse en función de la corriente que circula por él (medición de caída de tensión sobre un resistor en serie con el calefactor) y de la caída de potencial en sus terminales. La no-linealidad de la termopila, así como también la influencia de la temperatura ambiente, es corregida gracias a un tercer componente: un termistor ubicado en el interior del instrumento, térmicamente acoplado al cuerpo del mismo. Este termistor formaba parte del lazo de realimentación negativo de un amplificador operacional ubicado en la unidad de control (se trataba de un componente electrónico estándar que amplificaba la diferencia de potencial entregada por la termopila).

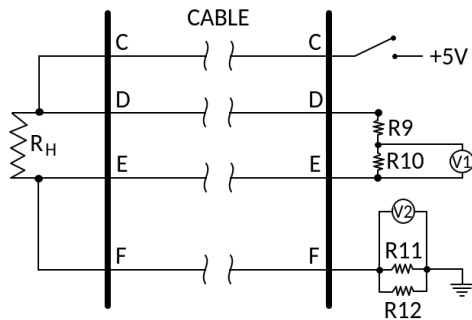
Debido a la forma de funcionamiento original del instrumento, tanto la ganancia del amplificador operacional como así también su valor de *offset* eran ajustados por el operador (mediante resistencias variables de precisión) antes de realizar un conjunto de mediciones; la configuración establecida podía mantenerse fija siempre y cuando las condiciones de trabajo del instrumento no variaran significativamente, dentro de un mismo día. Debido a lo anterior,

la sensibilidad de la termopila, expresada en unidades de  $\mu V/W/m^2$ , no era el elemento a ser calibrado en los procesos de intercomparación de pirheliómetros; por el contrario, el factor de calibración que se obtenía era una constante adimensional que corregía el valor de potencia entregada por la resistencia calefactora. En condiciones ideales, el flujo de calor a través de la termopila debe ser idéntico al producto de la tensión aplicada a la resistencia calefactora y la corriente establecida en ella (cuando el instrumento se encuentra tapado, es decir, sin ingreso de luz); sin embargo, para establecer la corriente y la tensión aplicada sobre la resistencia calefactora es necesario conocer con gran exactitud el valor de cuatro resistencias (dos colocadas en serie, formando un divisor resistivo 1:10, y dos colocadas en paralelo entre sí y en serie con la resistencia calefactora, sobre las cuales se mide una tensión que será proporcional a la corriente circulante). Por lo tanto, una desviación en el valor nominal de estas resistencias (sea una desviación original del componente o un cambio producido por el paso del tiempo) implica un error en el cálculo de la potencia entregada sobre la termopila, y consecuentemente una desviación en la instancia de calibración de irradiancia. Por otra parte, y aún suponiendo que se conoce el valor de las cuatro resistencias de forma exacta, una pequeña parte de la potencia entregada por la resistencia calefactora podría perderse hacia el cuerpo del instrumento de forma directa, sin pasar a través de la termopila (pasaje indicado en la fig. 1 con una flecha de color rojo).

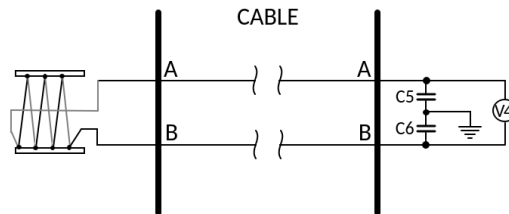


**Figura 1:** Representación esquemática del módulo sensor. 1. Resistencia calefactora ( $\sim 200\Omega$ ), 2) termopila, 3) termistor ( $\sim 300\Omega$ ). 4. Cono receptor de luz. 5. Cuerpo del instrumento. La flecha roja indica la dirección del flujo de calor.

La figura 1 muestra una representación esquemática de la unidad sensora MK VI, dentro de la cual se encuentran la resistencia calefactora(1), la termopila(2) y el termistor(3). Si bien cada componente es representado con dos terminales (D y E para la resistencia calefactora, A y B para la termopila, L y M para el termistor), la resistencia calefactora y el termistor poseen cables adicionales (ver figuras 2 y 4) que permiten medir la caída de potencial con una mayor precisión considerando la longitud del cable de conexión ( $\sim 5m$ ).

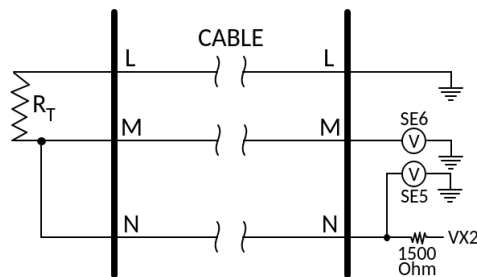


**Figura 2:** Conexión de la resistencia calefactora.  $R_9 = 90k\Omega$ ,  $R_{10} = 10k\Omega$ ,  $R_{11} = 10\Omega$  y  $R_{12} = 4k\Omega$ .  $R_H = 203\Omega$  (aprox.).  $V_1$  y  $V_2$  son puntos de medición de tensión (diferencial).



**Figura 3:** Conexión de la termopila.  $C_5 = C_6 = 0,01pF$ .  $V_4$  es un punto de medición de tensión (diferencial).

Los componentes electrónicos indicados en las figuras 2 y 3 ( $R_9$ ,  $R_{10}$ ,  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $C_5$  y  $C_6$ ) se encontraban en la unidad de control original (MK I) y han sido extraídos de la misma para ser reutilizados en el proceso de actualización del pirheliómetro. De la misma forma, fue necesario extraer de la unidad de control el conector (Bendix PT00A-14-19S); ningún componente adicional es requerido.



**Figura 4:** Conexión del termistor.  $R_T = 389\Omega$  ( $20C$ ),  $\Delta R_T = 0,004\Omega/\Omega \cdot ^\circ C$ .  $V_{X2}$  es una tensión de excitación proporcionada por el datalogger CR1000X.  $SE_5$  y  $SE_6$  son terminales para medición de tensión, utilizados por la función “BrHalf3W” para establecer el valor de  $R_T$ . La resistencia de  $1500\Omega$  es utilizada como referencia para establecer el valor de  $R_T$ , siendo  $R_T = X \cdot 1500\Omega$ , donde  $X = (2 \cdot SE_6 - SE_5)/(V_{X2} - SE_5)$ . La función “BrHalf3W” devuelve el valor  $X$ , por lo cual no se requiere calcular el cociente.

En la figura 4 se muestra cómo debe conectarse el termistor a un adquisidor de datos CR1000X. Utilizando la función “BrHalf3W” (programación del adquisidor en CRBasic) se obtiene una constante proporcional al valor de resistencia del termistor ( $X$ ), siendo la constante de proporcionalidad el valor de una resistencia externa que debe ubicarse sobre la propia bornera del adquisidor. Si bien el valor nominal de este componente es arbitrario, se ha seleccionado una resistencia de  $1500\Omega$ , la cual no debe ser reemplazada y formará parte del pirheliómetro. En caso de requerirse el reemplazo de este componente por rotura o extravío, será necesario recalibrar la respuesta de la termopila en función de la temperatura.



**Figura 5:** Esta caja contiene las resistencias R9, R10, R11 y R12. La función de este nuevo elemento es permitir la conexión de la unidad MK VI (a través de su cable) al adquisidor de datos CR1000X. De esta caja sale un cable de cuatro conductores más malla (alimentación y medición de la resistencia calefactora), un cable de dos conductores y malla (medición del termistor), un cable coaxial (termopila), un cable simple de color negro (tierra para capacitores de la termopila) y un cable simple rojo (alimentación de 5V para la resistencia calefactora, debe conectarse a una salida de 5V de la bornera de la unidad CR1000X<sup>1</sup>, con capacidad para entregar al menos 25mA).



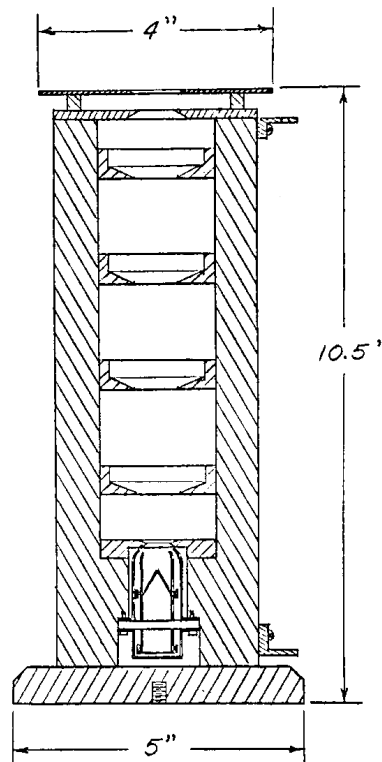
**Figura 6:** Conexión de los cables salientes de la caja de interconexión a la bornera del adquisidor de datos CR1000X. De izquierda a derecha: Diff1: Tensión en resistencia calefactora (V R10)(H - verde, L - gris, malla - tierra) Diff2: Corriente en resistencia calefactora (V R11)(H - azul, L - blanco). VX2: Excitación para medición de termistor, a resistencia de 1500. Malla a tierra. SE5(Diff3) a cable blanco de termistor y resistencia de 1500Ω. SE6(Diff3) a cable azul de termistor. Diff4: Termopila (H - marrón, L - malla) Cable negro independiente - tierra para capacitores.



**Figura 7:** Vista del conector Bendix de 19 vías (ficha hembra, ubicada en el sensor MK VI y en la caja de interconexión). A(+) y B(-): Termopila. C(+) y F(Gnd): Alimentación de resistencia calefactora (5Vdc). D(+) y E(-): Medición de tensión aplicada sobre resistencia calefactora. J y K: Calefactor de unidad (no utilizado). L(Gnd), M y N: Termistor. P: Gnd (no utilizado)

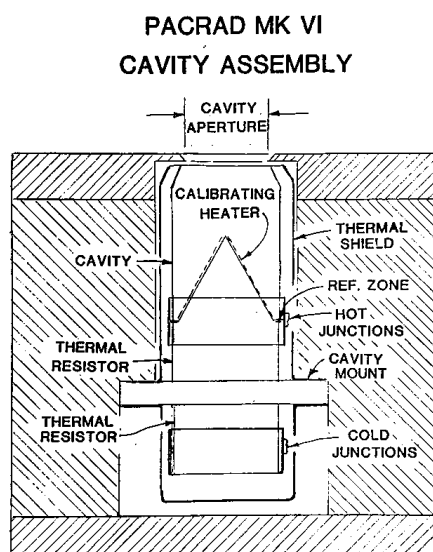
## 2.2. Especificaciones del módulo sensor

Como ya se mencionó, el módulo sensor contiene en su interior una termopila, la cual entrega una tensión (por efecto Peltier) en función del flujo de calor a través de ella; también contiene un termistor (resistencia cuyo valor cambia con la temperatura), y una resistencia calefactora. Los componentes pueden apreciarse en las figuras 8 y 9.



**Figura 8:** Corte longitudinal del módulo sensor. Las dimensiones se expresan en pulgadas.





**Figura 9:** Detalle del elemento sensor y sus componentes.

#### Termopila:

Un extremo de la termopila (cara caliente) recibe el calor producido por la radiación solar (o por la resistencia calefactora), mientras que el otro extremo se fija a las paredes del módulo sensor (el cual posee una capacidad calorífica elevada, de acuerdo a la masa de aluminio que lo compone). La no-linealidad de este componente (tensión producida en función del gradiente térmico) es compensada por el termistor. La termopila está constituida por termocuplas de chromel-constantan.

#### Termistor:

Este elemento posee un valor aproximado de  $400\Omega$  ( $389\Omega$  a  $20^\circ\text{C}$  según el esquemático del circuito), con un coeficiente de variación de  $0,004\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ . Originalmente, el termistor forma parte del circuito de la entrada inversora de un amplificador operacional, permitiendo ajustar automáticamente la ganancia del amplificador en función de los cambios de temperatura. De acuerdo al fabricante, gracias a este componente se alcanza una incerteza de  $\pm 0,1\%$  para el rango de  $-10^\circ\text{C}$  a  $70^\circ\text{C}$ .

#### Resistencia calefactora:

Este resistor tiene un valor de  $203\Omega$ . Cuando se encuentra en uso, se conecta a una fuente de baja tensión ( $5\text{VDC}$ ) en serie con dos resistencias ( $10\Omega$  y  $4k\Omega$ , en paralelo).

#### Elementos adicionales:

El módulo sensor cuenta también con una resistencia calefactora adicional de  $100\Omega$  ( $500\text{mA}$  máx.), la cual no se encuentra en uso, pero podría conectarse para condiciones de temperatura ambiente excepcionales (el manual original del equipo no recomienda su uso).

Comprobación de calibración del sensor usando como referencia la potencia entregada por el calentador interno:

Existen en el interior de la unidad sensora dos elementos susceptibles de ser calibrados: por un lado se encuentra el elemento principal, la termopila; este es el sensor que entrega una tensión eléctrica proporcional a la irradiancia recibida, y por lo tanto cualquier proceso de calibración moderno tendrá como objetivo estipular la sensibilidad de este elemento, expresada en unidades de  $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ . En segundo lugar, se encuentra el elemento calefactor interno (*RH*), originalmente utilizado para la calibración inicial del instrumento; el elemento calefactor se encuentra en el extremo sensible (caliente) de la termopila, y su acoplamiento térmico puede considerarse extremadamente

estable. Entonces, el sistema cuenta con los siguientes parámetros:

$$I = F(T) \cdot \alpha \cdot V \quad (1)$$

Donde  $V$  es la tensión eléctrica entregada por la termopila expresada en  $mV$ ,  $F$  es una función de corrección dependiente de la temperatura (adimensional),  $I$  es el valor de irradiancia indicado por el instrumento en  $W/m^2$  y  $\alpha$  es la constante de calibración, en unidades de  $W/m^2/mV$ . La función  $F(T)$  vale 1 para un valor de temperatura de referencia. En el caso de este dispositivo, el valor de temperatura de referencia es  $22,2^\circ C$ . Es importante destacar que en el NREL Pirheliometer Comparison utilizan un valor de  $F$  constante e igual a 1 para su pirheliómetro TMI de referencia, sin considerar por lo tanto el efecto que la temperatura ambiente produce en la respuesta de la termopila. En el SMN consideramos que el ajuste de ganancia por temperatura (lineal) es una de las características originales del pirheliómetro TMI, y por lo tanto la eliminación de esta característica por parte de los profesionales de NREL constituye una modificación importante sobre la naturaleza del dispositivo. En el SMN hemos decidido conservar la característica original de ajuste por temperatura, empleando para ello la medición de temperatura interna a través del termistor dispuesto en el pirheliómetro para este propósito (ver calibración de corrección por temperatura).

A la hora de establecer una relación entre la potencia eléctrica disipada en el calentador interno y la lectura de irradiancia obtenida, es necesario introducir una nueva constante, a la que llamaremos  $\beta$ :

$$I_{eq} = \beta \cdot P \quad (2)$$

Donde  $P$  es la potencia eléctrica disipada en el calentador interno (efecto Joule), en unidades de  $W$ , e  $I$  es la irradiancia equivalente, en unidades de  $W/m^2$ . Considerando que el área del orificio del sensor es de  $1cm^2$ , y suponiendo que el acoplamiento térmico entre el calentador y la termopila es perfecto (es decir, todo el calor introducido por el calentador circula únicamente a través de la termopila), entonces una primera aproximación para la constante  $\beta$  es:

$$\beta = 10000 \frac{1}{m^2} \quad (3)$$

Considerando este valor para  $\beta$ , y pidiendo  $I = I_{eq}$  cuando se aplica una tensión de  $5V$  sobre la resistencia calefactora, la constante de calibración  $\alpha$  resulta:

$$\alpha = 582,555 \frac{W/m^2}{mV} \quad (4)$$

En el pasado, cuando se utilizaba la unidad de control original del equipo TMI (MK I), el valor  $\beta$  era reajustado en cada proceso de intercomparación. La sensibilidad  $\alpha$ , por otra parte, se ajustaba antes de cada proceso de medición (uso cotidiano), introduciendo una potencia fija dentro de la cavidad mediante el calefactor (con una irradiancia equivalente del orden de  $1200W/m^2$ ) y ajustando la ganancia y *offset* del amplificador operacional (Analog Devices 260K / 261K) para que la lectura de la termopila coincidiera con la irradiancia equivalente, obtenida esta última multiplicando la tensión aplicada al calentador por la corriente circulante por el mismo y por el factor  $\beta$ . Este proceso era conocido como auto-calibración. En la actualidad ya no resulta necesario realizar el procedimiento de auto-calibración anteriormente mencionado, puesto que la termopila se conecta directamente a un adquisidor de datos de última generación (Campbell Scientific CR1000X), el cual no presenta los problemas de desviaciones e inestabilidad de la electrónica original de la década de 1970. Resulta posible entonces, y esto es lo que hace NREL con sus

pirheliómetros TMI, obtener únicamente la sensibilidad  $\alpha$  a partir de la comparación con otros pirheliómetros de referencia. En el SMN optamos por obtener la sensibilidad  $\alpha$  en el NPC, y a partir de ella establecer un nuevo valor para  $\beta$ , de forma tal que coincidan los valores de irradiancia equivalente introducida en la cavidad e irradiancia medida con la termopila. De esta forma, resulta posible comprobar el correcto funcionamiento del equipo durante el tiempo que transcurra hasta el próximo proceso de calibración.

Corrección por temperatura:

La corrección por temperatura del TMI era realizada originalmente por la unidad de control: el termistor que se encuentra dentro del sensor (MK VI) formaba parte del circuito de la entrada inversora de un amplificador operacional (*feedback*). Cuando aumenta la temperatura de la unidad MK VI, la resistencia del termistor se incrementa, y la ganancia del amplificador operacional disminuye proporcionalmente. Actualmente, la temperatura interna se mide utilizando el método de "medio puente a tres cables" (HalfBridge3W) con el adquisidor de datos CR1000X. Para ello se emplea como referencia una resistencia externa  $R_f$  (1500 $\Omega$ ), conectada directamente sobre la bornera del CR1000X; el CR1000X aplica una tensión de excitación ( $V_{X2}$ ) sobre la resistencia  $R_f$  y sobre el termistor (ambos conectados en serie), y establece el valor del termistor comparando la caída de potencial en ambos elementos. El resultado es un número proporcional al valor del termistor, al cual llamaremos "X" (este número, multiplicado por 1500, permite obtener el valor de resistencia del termistor). Una vez obtenido X es posible realizar una calibración para la desviación por temperatura en un rango determinado (el SMN realizó esta calibración para el rango 20°C - 27°C), estableciendo una temperatura arbitraria de anclaje (22, 2°C), de forma tal que  $F(22, 2^\circ\text{C}) = 1$ . El proceso de calibración se realizó variando lentamente la temperatura (en el rango mencionado) durante un lapso de 5 horas; durante el tiempo transcurrido se introdujo calor permanentemente mediante el calentador (RH), con un valor de irradiancia equivalente aproximado de 1185W/m<sup>2</sup>. Es importante considerar que la potencia entregada en forma de calor dentro de la unidad MK VI varía de acuerdo a la temperatura, ya que la resistencia del elemento calefactor cambia (para una tensión eléctrica fija aplicada, se observa una pequeña disminución de la corriente, de acuerdo al aumento de la resistencia del elemento calefactor); sin embargo, este cambio puede ser perfectamente medido, y por lo tanto no afecta al proceso de calibración del ajuste por temperatura. Mediante el proceso anterior se obtuvo la siguiente expresión para la función  $F(X)$ :

$$F(X) = 1 - 0,92(X - 0,258616) \quad (5)$$

Donde  $X$  es el valor entregado por la función BrHalf3W del adquisidor CR1000X, siendo proporcional a la resistencia del termistor. La constante 0,92 es empírica, y se obtiene mediante el proceso de calibración en temperatura (minimizando la integral de  $\partial I_{eq}/\partial T - \partial I/\partial T$ ) en un rango amplio de temperaturas (20°C a 27°C). Un detalle a tener en cuenta es que, a 22, 2°C,  $X = 0,258616$ , y la resistencia del calefactor resulta:

$$R_H(22, 2C) = 0,258616 \cdot 1500\Omega = 387,924\Omega \quad (6)$$

Este valor es muy cercano al especificado por el fabricante (389 $\Omega$  a 20°C). Por otra parte, se puede establecer un valor aproximado para la temperatura interna del sensor MK VI:

$$T = \frac{(X - 0,258616) \cdot 1500\Omega}{400\Omega \cdot 0,004 \frac{\Omega}{\Omega \cdot C}} + 22,2C \quad (7)$$

Este valor de temperatura sirve solo para referencia del usuario, y no necesariamente refleja el valor de la temperatura ambiente, debido a la gran inercia térmica del instrumento. De esta forma, considerando que la medición sin

compensación por temperatura es:

$$I = V \cdot 582,555 \frac{W}{m^2 \cdot mV} \quad (8)$$

La medición con compensación por temperatura es:

$$I = (1 - 0,92(X - 0,258616)) \cdot V \cdot 582,555 \frac{W}{m^2 \cdot mV} \quad (9)$$

Cálculo de la potencia entregada por el termistor:

Para establecer la potencia disipada por la resistencia calefactora es necesario conocer la tensión sobre sus terminales internos (no la aplicada sobre el cable del pirheliómetro) y también la corriente que circula por ella. En la placa TS1 (según su denominación original en la unidad de control, ver figura 10) se encuentran las resistencias  $R9(90k\Omega)$  y  $R10(10k\Omega)$ , las cuales se encuentran en serie entre sí y en paralelo a la resistencia calefactora, formando un divisor resistivo que permite conocer la caída de potencial (1/10) sobre la resistencia calefactora, midiéndose esta caída de potencial sobre  $R10$ . Estas resistencias cumplían originalmente la función de reducir la tensión a medir de forma tal que resultara compatible con el multímetro integrado en la unidad de control (2000A-2 Newport Digital Voltmeter). Si bien este divisor resistivo no resulta imprescindible en la actualidad, se optó por conservarlo, con lo cual el adquisidor CR1000X recibirá en la entrada diferencial correspondiente una tensión cercana a  $500mV$  ( $5V/10$ ); esta tensión es compatible con el rango de  $1000mV$ , que debe declararse en el programa del adquisidor de datos. La lectura de este canal debe multiplicarse por 0,01 para obtener el valor de tensión en  $mV$  aplicado sobre la resistencia calefactora.

$$V = V_{R10} \cdot \frac{R9 + R10}{R10} = 10 \cdot V_{R10} \quad (10)$$

para obtener la tensión en  $V$ .

$$V = 0,01 \cdot V_{R10} \quad (11)$$

para obtener la tensión en  $mV$ .

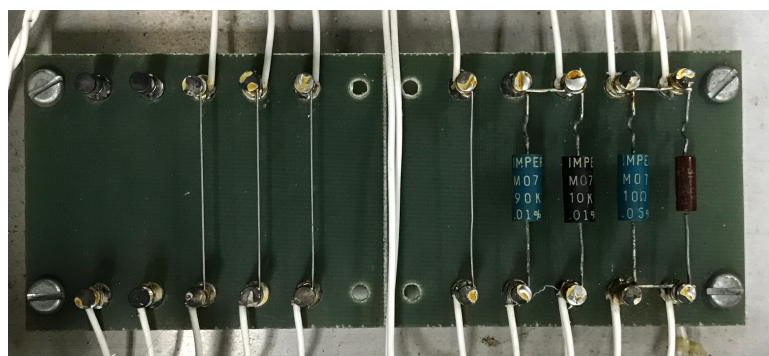
Donde  $V_{R10}$  es la caída de tensión en volts medida sobre la resistencia  $R10$ . Sobre la misma placa se ubican las resistencias  $R11(10\Omega)$  y  $R12(4k\Omega)$ , las cuales están conectadas en serie con la resistencia calefactora y son utilizadas para medir la corriente que circula por la misma (estas resistencias se encuentran conectadas en paralelo entre sí). De esta forma, la corriente sobre la resistencia calefactora es

$$I_{RH} = V_{R11} \cdot \frac{R11 + R12}{R11 \cdot R12} = 1,0025 \cdot V_{R11} \quad (12)$$

Donde  $V_{R11}$  es la caída de tensión medida sobre la resistencia  $R11$ .

De acuerdo al manual original del equipo, la potencia disipada sobre la resistencia calefactora es  $P = C_F \cdot V_{R11} \cdot 10 \cdot V_{R10}$ , donde  $C_F \simeq 1,0025$  (siendo este valor un coeficiente de calibración que podía cambiar de acuerdo al resultado del proceso de intercomparación). Como puede apreciarse de las expresiones para el cálculo de la tensión y la corriente, el coeficiente  $C_F$  está ligado principalmente al valor empírico (no nominal) de las resistencias  $R9$ ,  $R10$ ,  $R11$  y  $R12$ . Con el paso de los años, la variación del valor de estos componentes, junto con pequeñas

alteraciones de la absorbancia de la cavidad del instrumento, podían ser compensadas alterando el valor de la constante  $C_F$ . En la actualidad, el coeficiente  $C_F$  se considera invariable e igual a 1,0025, siendo los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  los que deben ser reajustados en cada proceso de intercomparación.



**Figura 10:** Placa TS1. De izq. a der.: R9, R10, R11 y R12.

En la figura 10 puede apreciarse la placa original de la unidad de control que contiene las resistencias mencionadas en este apartado. La figura 11 muestra el circuito original de la unidad de control MK I (obsoleta).

Originalmente, estando establecido (y permaneciendo estable) el valor de potencia entregada a la cavidad mediante la resistencia calefactora, lo único que debía hacerse era ajustar la ganancia y el *offset* del amplificador operacional de forma tal que la lectura (amplificada) de la termopila igualara a la potencia eléctrica disipada en la resistencia. Este ajuste se realizaba mediante la operación de varias llaves conmutadoras y resistencias variables. Actualmente, el usuario no debe realizar ningún ajuste previo al comienzo de la medición, y solo tendrá en cuenta la sensibilidad  $\alpha$  para establecer el valor correcto de irradiancia. La corrección por temperatura, de acuerdo a la expresión 5, puede ser realizada de forma automática por el adquisidor de datos, en base a la medición realizada sobre el termistor. Como medida de control, es posible introducir una tensión de 5V (disponible en el panel frontal de propio adquisidor) en la resistencia calefactora, de acuerdo al circuito de la figura 2, lo cual permite descartar el mal funcionamiento del pirheliómetro, al observarse que los valores de irradiancia equivalente entregada por la resistencia calefactora y la irradiancia medida por la termopila sean coincidentes.

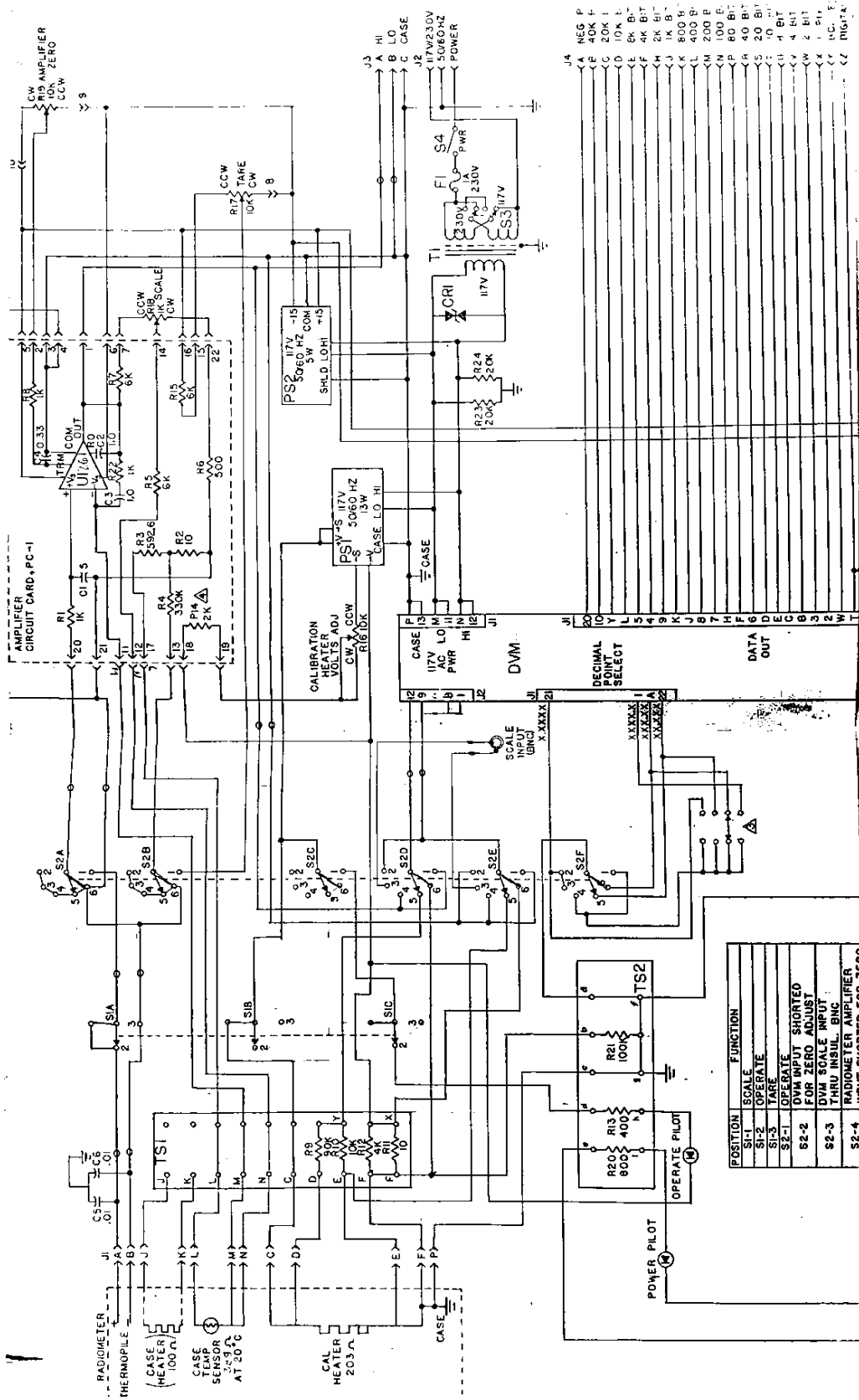


Figura 11: Esquemático original de la unidad de control TMI KM I.

## 2.3. Adquisición de datos

Programa para medición (El detalle de las instrucciones puede consultarse en el manual del adquirente de datos CR1000X):

```
Public PTemp, TCTemp, tmi_v_heater, tmi_i_heater, tmi_termopila
Public termistor, Battvolt, OutStat, Irradiancia, Irrad_heater, LastFileName As String*24
```

```
DataTable (nrel_measurements, 1, -1)
  DataInterval ( 0, 1, Sec, -1)
  TableFile ('CRD: nrelusa ' ,8 , -1 ,300 ,0 , Hr , OutStat , LastFileName )
  Sample (1, PTemp, FP2 )
  FieldNames ('Panel_temp: CR1000X panel temperature')
  Average (1 ,TCTemp, FP2 , False )
  FieldNames ('Air_temp : Air temperature next to CR1000X')
  Average (1, (termistor-0.258616)*1500/(400*0.004 )+22.2, FP2, False)
  FieldNames ( 'TMI_temp : internal temperature')
  Average (1, tmi_termopila*582.26*(1-(termistor-0.258616)*0.92), IEEE4 , False )
  FieldNames ( 'Irradiance_TMI: measured irradiance with temperature correction
  Average (1, tmi_termopila*582.555, IEEE4, False)
  FieldNames ('Raw_Irradiance_TMI: measured irradiance without temperature correction')
  Average (1 , tmi_i_heater*tmi_v_heater*10, IEEE4 , False)
  FieldNames ('Heater_eq_irradiance: heater equivalent irradiance')
  Average (1 , tmi_v_heater, IEEE4, False)
  FieldNames ('Raw_heater_voltage: heater applied voltage')
  Average (1, tmi_i_heater, IEEE4, False)
  FieldNames ('Raw_heater_current: heater current')
EndTable
```

```
BeginProg
  Scan (1, Sec, 0, 0)
  PanelTemp (PTemp, 5 0 )
  'Opcional : medición de la temperatura del aire con una termocupla
  TCDiff (TCTemp, 1, mV200C, 5, TypeT, PTemp, True, 0, 60, 1.0, 0)
  'tensión en el heater (V/10)
  VoltDiff (tmi_v_heater, 1, mV1000, 1, True, 10000, 60, 0.01, 0)
  'I en heater (mA) (I*9,975 Ohm)
  VoltDiff (tmi_i_heater, 1, mV1000, 2, True, 10000, 60, 0.10025, 0)
  'tensión en la termopila
  VoltDiff (tmi_termopila, 1, mV200, 4, True, 10000, 60, 1.0, 0)
  'Med. de termistor interno
  BrHalf3W (termistor, 1, mV200, 5, Vx2, 1, 200, True, 10000, 60, 1.0, 0)
  NextScan
EndProg
```



### 3. RESULTADOS

A continuación se presenta el resultado del proceso de intercomparación realizado en Golden (Denver, CO, EE.UU.), en el año 2022. A partir de las mediciones realizadas ha sido posible calibrar el instrumento; las mediciones realizadas con el mismo, contando con su corrección por temperatura, tuvieron una desviación menor al 0,1 % respecto a lo registrado por el “standard group” de NREL, lo que constituye una muestra de la estabilidad del instrumento, a más de 40 años transcurridos desde su fabricación. En la fig. 12 se presenta una fotografía del instrumento tomada durante el evento referido.



**Figura 12:** Pirheliómetro TMI MK VI, en la intercomparación NPC-2022. El instrumento se encuentra montado sobre un seguidor solar Kipp & Zonen Solys, y al momento de la fotografía se encontraba tapado (registro de offset).

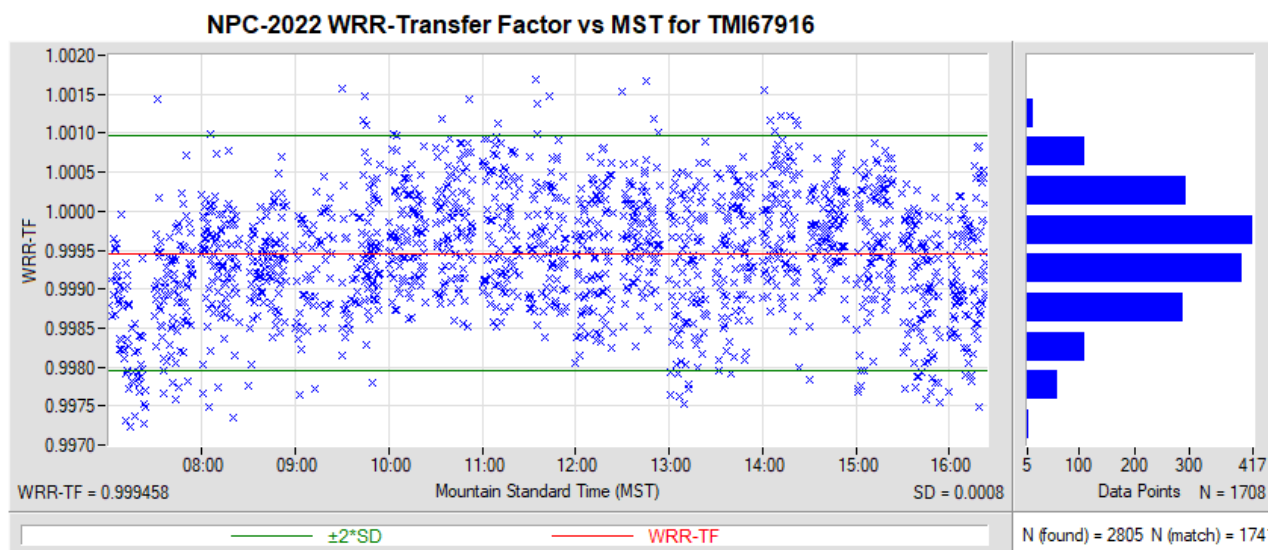
TMI MK VI (sensor) número de serie: 67916

Constantes de calibración antiguas: 1.00711, 1.00406, 1.00082

Constante de calibración actual equivalente(NREL, 2022):  $1.002 = (1.0025 * 0.9995)$



### 3.1. Mediciones realizadas en el NPC 2022



**Figura 13:** Resultado de la intercomparación NPC-2022, obtenida entre los días 25 y 28 de septiembre de 2022.

A partir de los resultados obtenidos en el NPC-2022<sup>3</sup>, presentados en la figura 13, el nuevo valor de la constante  $\alpha$  es:

$$\alpha = 582,555 \frac{W}{m^2 \cdot mV} \cdot WRRTF = 582,555 \frac{W}{m^2 \cdot mV} \cdot (0,9995 \pm 0,0016) = (582,26 \pm 0,94) \frac{W}{m^2 \cdot mV} \quad (13)$$

De la misma forma, el factor de transferencia debe ser aplicado a la constante  $\beta$  para mantener la compatibilidad entre la irradiancia medida por la termopila y la irradiancia equivalente proporcionada por la resistencia calefactora, quedando:

$$\beta = (9995 \pm 16) \frac{1}{m^2} \quad (14)$$

## 4. CONCLUSIONES

Mediante una revisión exhaustiva del manual original del instrumento TMI MK VI (SN.: 67916) y otros documentos técnicos relevantes, se estableció una forma de registrar las señales producidas por este sensor mediante el uso de un adquisidor de datos moderno (Campbell Sci. CR1000X). Se realizó una calibración de la desviación por temperatura para el rango 22-27°C, y se halló la sensibilidad de la termopila del instrumento para una temperatura de referencia de 22,2°C. Con estos parámetros básicos, obtenidos en el Laboratorio de Calibración e Intercomparación de Radiómetros Solares (Observatorio Central Buenos Aires, S.M.N.), se llevó el instrumento a los EE.UU. para participar con él en la intercomparación de pirheliómetros de NREL (NPC); durante los días en los que se desarrolló el evento, el TMI MK VI obtuvo mediciones de irradiancia con discrepancias menores al 0,1 % respecto a los instrumentos de referencia de los EE.UU., lo cual pone de manifiesto la gran estabilidad y sobresaliente calidad de este instrumento, fabricado a finales de la década de 1970.

## AGRADECIMIENTOS

La participación en el evento NPC 2022 fue posible gracias al apoyo e iniciativa del Lic. Fernando Nollas, la Dra. Anahí Lanson (UNLu), el Dr. Elian Wolfram (SMN), el Dr. Raúl Righini (UNLu), la Lic. Rosana Aristegui (UNLu), y el Ing. Juan Cáceres Pacheco (ENARGAS).

El financiamiento para la participación en el NPC 2022 ha sido aportado por el PTB, dependiente del Ministerio Federal de Asuntos Económicos y Acción Climática de la República Federal de Alemania, en el marco de sus acciones para la promoción y el fortalecimiento de las capacidades de medición del recurso solar en Latinoamérica y el Caribe. Se agradece a los miembros de PTB Ann-Kathrin Krekeler, Svenia Pierre, Ana Victoria Huevo Figueroa y Anett Matbadal por las gestiones realizadas para contar con los pasajes, viáticos y demás gastos asociados al evento.

## REFERENCIAS

1. CAMPBELL SCIENTIFIC, 2023: Cr1000x measurement and control datalogger.
2. Kendall, J., 1985: Characterization of the pacrad-type radiometers. Advances in Absolute Radiometry.
3. Reda I., Andreas A., Stoddard M., Kutchenreiter M, Habte A., 2022: Technical Report NREL/TP-1900-84219, National Renewable Energy Laboratory.