

DISEÑO, IMPLEMENTACION Y CALIBRACION DE UN MEDIDOR DIGITAL DE CONFORT TERMICO

Luciano A. Zini, Luis H. Vera, Andrés D. Firman (*)

RESUMEN:

El equipo aquí presentado ha sido desarrollado en el Grupo en Energías Renovables (GER), contiene sensores que le permiten medir una diversidad de variables ambientales (temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica) para, a partir de las mismas, calcular el Índice de Estrés Térmico de personas. Conjuntamente se ha desarrollado un software amigable para la expansión de las capacidades de cálculo del instrumento y para la representación de los datos medidos.

Palabras Clave: Confort Térmico, Instrumentación, Psicometría.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de confort térmico tienen como objetivo analizar y establecer las condiciones necesarias para la evaluación y diseño de un ambiente térmico adecuado para las actividades y ocupación humanas, así como establecer métodos y principios para un detallado análisis térmico de un ambiente.

La importancia del estudio de confort

térmico, está basado principalmente en 3 factores:

a) La satisfacción al sentirse térmicamente confortable;

b) El desempeño humano: diferentes estudios muestran una clara tendencia de que el desconfort causado por calor o frío, reduce el desempeño humano. Las actividades intelectuales, manuales y perceptivas, generalmente presentan un mejor rendimiento cuando son realizadas en una condición de desconfort térmico.

c) La conservación de la energía: debido a la creciente industrialización, las personas de una sociedad moderna realizan principalmente sus actividades en recintos cerrados en grandes ciudades, de esta forma, pasan gran parte de sus vidas en ambientes con climas artificiales (ambientes acondicionados).

Analizando los tres factores antes mencionado, y trasladándolos a las condiciones ambientales existentes en diferentes tipos de edificaciones del nordeste Argentino, en general, se reconoce que presentan un entorno de trabajo térmicamente inadecuado

(*) Grupo en Energías Renovables – GER – FaCENA – UNNE. Av. Libertad 5470, (3400) Corrientes, Argentina.
Mail: lzini@ger-unne.com.ar

debido a las elevadas temperaturas en los meses de verano y a la falta de un acondicionamiento térmico de las edificaciones. En esta condición, el ser humano se encuentra en un escenario de falta de confort o de estrés térmico, situación que compromete la concentración y la capacidad física pudiendo causar accidentes o problemas de salud.

De lo expuesto, es necesario desarrollar un equipo que permita conocer las condiciones y los parámetros relativos al confort térmico de los habitantes de un entorno para que trabajen de forma adecuada y así evitar el consumo innecesario de energía utilizada en climatización.

En el mercado actual de instrumentos nacionales e importados que permitan medir el confort térmico, se observa que los mismos comparten funciones similares: poseen sensores de bulbo seco, bulbo húmedo y de globo, una pantalla para mostrar los datos medidos y funcionan a batería [1]. El equipo desarrollado en el GER, además de presentar estas características, reemplaza el sensor de bulbo húmedo por uno que mide humedad relativa en forma directa, integra un sensor que realiza mediciones de la presión atmosférica (una variable que amplía el rango de aplicación) e incorpora funciones de registro de datos y software para PC.

2. CONFORT TÉRMICO

El confort ocurre cuando la temperatura del cuerpo se mantiene dentro de rangos estrechos, la humedad de la piel es baja y el esfuerzo fisiológico de la regulación de temperatura se reduce al mínimo [2]. Una definición ampliamente aceptada es “El confort térmico es aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico” [3].

2.1 Normativas vigentes.

En la Argentina, la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo (Ley N° 19.587 y su Decreto Reglamentario N° 351/79 con las modificaciones de la Res. N° 295/2003) establece que la higiene y seguridad en el trabajo debe comprender las normas técnicas y medidas sanitarias, precautorias y reglamenta obligaciones relativas a la carga térmica con el objeto de preservar y mantener la integridad psicofísica de los trabajadores y prevenir, reducir, eliminar o aislar los riesgos de los distintos centros o puestos de trabajo; estimular y desarrollar una actitud positiva respecto de la prevención de los accidentes o enfermedades que puedan derivarse de la actividad laboral.

A nivel internacional se toman como criterios de referencia para considerar los efectos de temperatura ambiente en el desempeño de los trabajadores la norma ISO 7243 (1989) y la norma ASHRAE F8 (2001).

2.2 Índices de Estrés Térmico.

El método más exacto para determinar el nivel de estrés térmico de un individuo es a través de la medición de los indicadores fisiológicos de estrés (tasa de transpiración, nivel de deshidratación, temperatura corporal, etc.), estos valores permiten cuantificar los indicadores e identificar la situación térmica [4]. Sin embargo, la medición de estos indicadores es de difícil implementación. Por esta razón, existen otros indicadores que permiten evaluar el nivel de estrés térmico al que está sujeto un trabajador en función de su actividad física (o tasa metabólica) y de las condiciones térmicas del ambiente en el que se encuentra. Estos indicadores son normalmente designados como índices de estrés térmico.

Actualmente, el índice de estrés térmico más utilizado es el *WetBulbGlobeTemperature* o *WBGT*, que puede ser traducido como “Índice de Temperatura de Bulbo Húmedo y de Temperatura de Globo”. Este índice, propuesto en los años 50 por la Marina de Guerra de los EUA, se basa en la medición de dos temperaturas:

Temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}): es la temperatura medida por un termómetro cuyo extremo se encuentra rodeado por un algodón húmedo. La evaporación de la humedad del algodón enfría la región húmeda del termómetro causando que la temperatura medida sea menor que la temperatura del aire. A medida que aumenta la diferencia entre la temperatura del aire y la T_{bh} el potencial de disipación de calor por evaporación es mayor.

Temperatura de globo (T_g): es la temperatura medida por un termómetro colocado en el interior de un globo de cobre de 150 mm de diámetro pintado de negro. El globo, debido a su elevada conductividad térmica, intercambia calor por radiación con las superficies del entorno, y por convección con el aire. De esta forma, el valor registrado por el termómetro es la temperatura media del ambiente en donde se encuentra situado.

Los valores medidos dependen de la temperatura y velocidad del aire, de la humedad relativa del medio y de la temperatura de las superficies envolventes. Estas cuatro variables ambientales son las

que tiene mayor importancia cuando se realiza un balance térmico. De esta forma, es posible encontrar una combinación de los valores de temperatura de globo y temperatura de bulbo húmedo que conduce a la evaluación del comportamiento térmico del cuerpo humano.

El índice *WBGT* es el resultado de esta combinación (Ec. (1)).

$$WBGT = 0,7T_{bh} + 0,3T_g \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

El índice propuesto en la Ec. (1) es utilizado actualmente por la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo para el cálculo del estrés térmico en ambientes interiores, cuando se desea evaluar el confort térmico en ambientes exteriores el efecto de la temperatura ambiente (T_a) debe ser contemplada. De esta forma, la expresión a ser utilizada en estas condiciones es presentada en la Ec. (2).

$$WBGT = 0,7T_{bh} + 0,2T_g + 0,3T_a \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Una vez conocido el valor de *WBGT* es posible, a través de la comparación con valores de referencia, determinar el nivel de estrés térmico en el que se encuentra el trabajador. Si el *WBGT* es superior a los valores indicados en la Tabla 1 será necesario disminuir el tiempo de permanencia en el local de trabajo o crear condiciones que permitan una reducción del índice *WBGT* del local (mediante calefacción, enfriamiento, ventilación, etc).

Tabla 1: Valores máximos recomendados para el índice *WBGT* para un tiempo de exposición de 8 horas (ISO 7243).

Tipo de Actividad	Valor Máximo del <i>WBGT</i> (°C)			
	Trabajador Aclimatado*		Trabajador NO Aclimatado*	
Descanso	33		32	
Trabajo Manual Leve	30		29	
Trabajo Manual Moderado	28		26	
	Aire Parado	Corriente de Aire	Aire Parado	Corriente de Aire
Actividad Física Intensa	25	26	22	23
Actividad Física Muy Intensa	23	25	18	20

* Persona aclimatada: aquella que está adaptada para tener mayor capacidad para tolerar condiciones de estrés térmico.

Con el *WBGT*, y la tasa metabólica (*M*) es posible determinar las condiciones de trabajo de un individuo y evaluar la necesidad de reducir el tiempo expuesto a estas

condiciones; de esta forma se evita la situación de riesgo de estrés térmico. La figura 1 presenta la reducción de la jornada de trabajo acorde al valor de *WBGT* y según *M*:

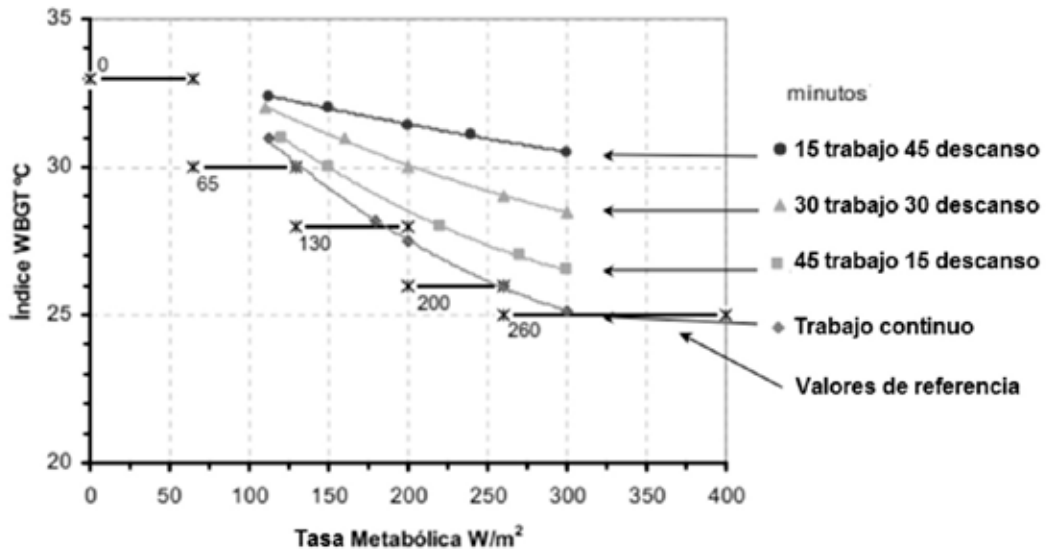


Figura 1. Curva de valores de referencia del índice *WBGT* para ciclos de trabajo/descanso.

3. DETERMINACION DE *Tbh*

A partir de la ecuación del índice *WBGT* se observa que es necesario medir la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura de globo y la temperatura ambiente. La primera medición de temperatura presenta mayor dificultad debido a la necesidad de contar con un recipiente con agua como se mencionó anteriormente (en caso de no cumplirse esta situación los valores de *Tbh* determinados serán erróneos). La norma ASHRAE F06 (2001) y los algoritmos propuestos por Simões[5] permiten calcular la *Tbh* a partir de la humedad relativa del aire.

El aire húmedo es una mezcla binaria cuya presión total (*p*, que en condiciones

normales y al nivel del mar 101325 Pa) es la suma de la presión parcial del aire seco (*pa*) y la presión parcial del vapor de agua (*p_w*). La presión parcial del vapor de agua varía desde cero (aire seco) hasta un máximo (aire saturado) y esta variación depende de la temperatura de la mezcla. Esta presión es aproximadamente la presión de saturación del vapor de agua (*P_{ws}*) a la temperatura en que se encuentra la mezcla. De esta forma, para un determinado valor de temperatura, un parámetro que permite determinar el porcentaje de vapor de agua saturado en la mezcla aire-agua es el valor de las presiones parciales.

La presión de saturación del vapor puede ser a través de la Ec. (3)

$$P_{ws} = e^{\frac{-1.8002104E1}{T} + 1.3914993 - 4.8640239E-2T + 4.1764768E-5T^2 - 1.4452093E-8T^3 + 6.5459673 \ln T}$$

donde *T* = temperatura absoluta del aire [K]

Esta ecuación es válida para temperaturas de 0 a 200 °C, y si se reemplaza el valor de T por el valor de la temperatura ambiente (conocida también como temperatura de bulbo seco, Tbs) se determina la presión de saturación del vapor de agua para Tbs , y utilizando la temperatura de bulbo húmedo se determina el valor presión de saturación del vapor de agua para la Tbh .

La masa total de aire húmedo está formada por una mezcla constituida por la suma de la masa de aire seco y la masa de vapor de agua. Esta última varía de cero hasta un máximo en función de la temperatura y la relación entre las cantidades de estas dos masas es la humedad absoluta (W).

El aire húmedo puede ser considerado una mezcla de gases perfectos independientes, aire seco y vapor de agua, y cada uno obedece la ecuación de estado de los gases perfectos. De esta forma, se puede determinar, a través de la relación de fracciones molares y presiones, el valor de W (Ec. 4).

$$W = 0,62198 \frac{P_w}{P - P_w} \quad (4)$$

donde P = presión total [Pa] y P_w = presión parcial del vapor de agua [Pa]

Para resolver la Ec. (4) es necesario determinar la presión parcial del vapor de agua. Este cálculo se realiza utilizando la humedad relativa (HR), la ecuación de estado de los gases perfectos y la relación entre la fracción molar de cada elemento de la mezcla (Ec. (5)).

$$P_w = HR \cdot P_{ws} \quad (5)$$

Es importante destacar que en condición de saturación W se convierte en W_s (contenido de humedad saturado) y se calcula me-

diante el reemplazo de P_w por P_{ws} .

Para cualquier estado del aire húmedo, existe una temperatura Tbh en la cual el agua líquida evapora en el aire y lo lleva a la saturación. Para los procesos de saturación adiabático a presión constante, el contenido de humedad aumenta de un valor inicial W para un valor W_{stbh} correspondiente a la saturación en la temperatura Tbh . Analizando el proceso descrito y contemplando la conservación de la entalpía a presión constante, se llega a la Ec. (6).

$$W = \frac{(2501 - 2,381Tbh)W_{stbh} - 1,006(Tbs - Tbh)}{2501 + 1,805Tbs - 4,186Tbh} \quad (6)$$

Donde W_{stbh} , es una función de la temperatura Tbh para un valor fijo de presión. De esta forma, el valor de Tbh que satisface la Ec. (6) para determinados valores de W y de P , es la temperatura de bulbo húmedo termodinámico que se deseaba calcular.

La Ec. (6) es utilizada para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo, partiendo de los valores de presión, Tbs y humedad relativa, a través de un proceso iterativo.

4. DESARROLLO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Para desarrollar el sistema de medición se tomó como base los sistemas existentes en el mercado adicionando mejoras al diseño; en el cuerpo principal del equipo se encuentran los componentes electrónicos, la mayoría de los sensores, la pantalla y la batería. Al cuerpo principal se le añade una esfera de cobre pintado de negro que en su interior tiene instalado el sensor de temperatura encargado de medir la Tg . El equipo es completamente digital, la unidad central

de procesamiento es un microcontrolador Atmega 328P [6] al que se le conectan todos los dispositivos.

Para medir temperatura de globose utiliza el termómetro digital DS18B20 [7]: es un sensor que posee una resolución desde 9 a 12 bits. Tiene una precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ en el rango de -10°C a $+ 85^{\circ}\text{C}$ lo que lo hace adecuado para el rango de temperaturas de trabajo (0 a 50°C). Está colocado dentro del globo. Se comunica con el microcontrolador a través del protocolo 1-Wire.

Para medir humedad relativa se emplea el sensor de humedad relativa y temperatura SHT75 [8]: En la medición de humedad relativa tiene una precisión de $\pm 1,8\%$ HR con una resolución de 12bits en un rango entre 10 a 90 %HR. En temperatura, posee una precisión de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ con una resolución de 14bits en un rango de 10 a 40°C . Se comunica con el microcontrolador mediante el protocolo 2-wire. Dicho sensor está ubicado en el interior de una cámara por la que circula aire forzado (a 3 m/s), asegurando una renovación constante del mismo con un *cooler*.

La presión atmosférica se mide con el sensor de presión compensado por temperatura BMP180 [9]. Su rango de detección de presión va desde 300 a 1100 hPa / 9000m a -500m. Su resolución es de hasta 0.03hPa / 0.25m. Su rango de funcionamiento es de -40 a $+ 85^{\circ}\text{C}$, con una exactitud de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura. Se comunica con el microcontrolador mediante I²C.

El equipo funciona con una batería de litio (modelo LG Bl-48th) de celulares disponibles en el mercado. Se incluye un cir-

cuito simple para medir el estado de carga de la misma.

Se diseñó una fuente regulada de tensión a partir del integrado MC34063 [10] que permite adaptar la tensión entregada por la batería (3.7V) a la utilizada por el microcontrolador y los sensores (3.3V).

Además, posee una pantalla LCD que otorga al operario la capacidad de visualizar los datos medidos y calculados. Estos mismos datos, junto con la hora y fecha, se guardan cada 5 minutos en un archivo correspondiente al día de medición dentro de la tarjeta SD.

La fecha y hora se mantienen actualizadas a través de un reloj de tiempo real (RTC) modelo Pcf8563[11], se comunica con el microcontrolador mediante I2C.

Todas las características presentadas le permiten al equipo determinar el valor de *WBGT* de forma autónoma y constante durante 24hs.

Un esquema del circuito desarrollado donde se especifican los componentes descritos y su interconexión se observa en la Figura 2.

4.1 Adquisición de datos.

El equipo realiza una comprobación general de estado, asegurando que la batería posea carga, que todos los sensores estén conectados y que la tarjeta SD se encuentre presente.

Luego realiza la medición de cada sensor, calcula la temperatura de bulbo húme-

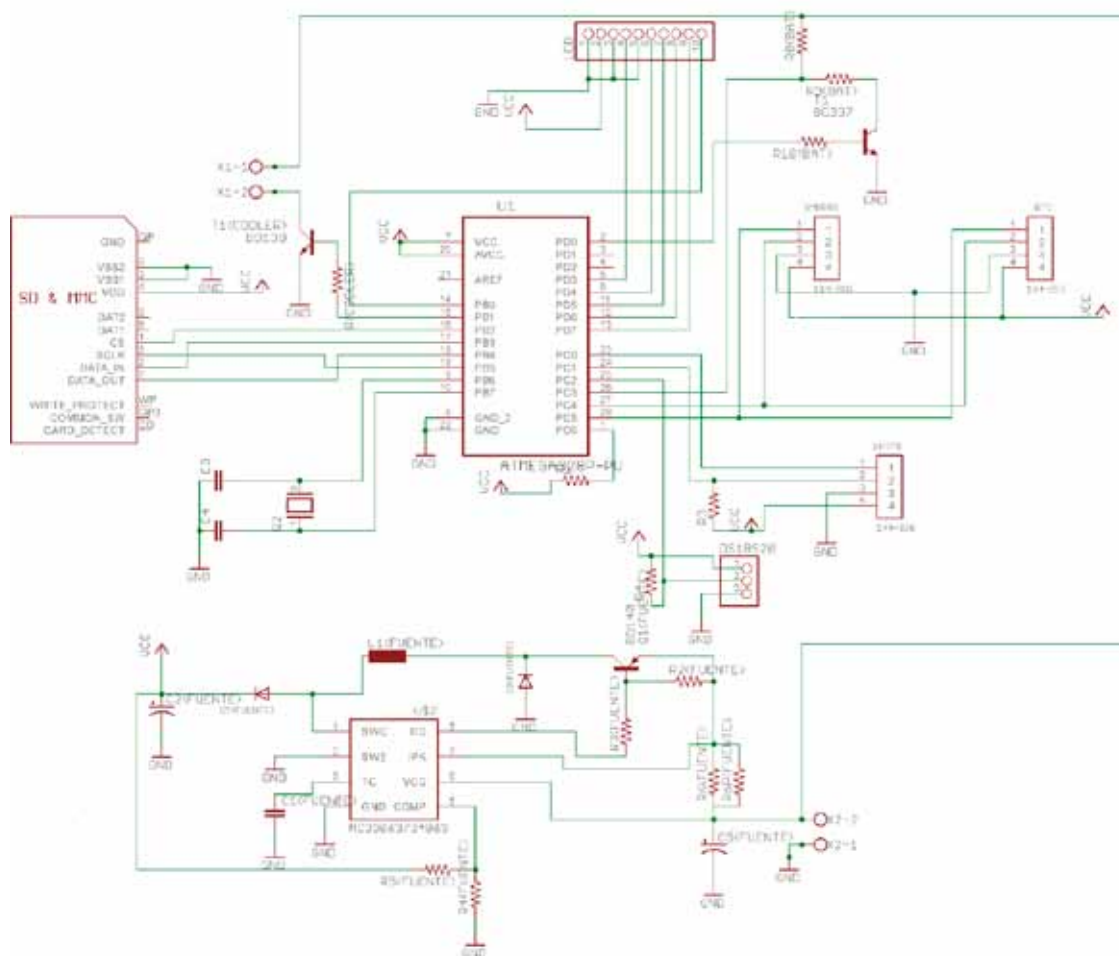


Figura 2. Esquema del circuito desarrollado para implementación del medidor de estrés térmico

do (utiliza las ecuaciones psicrométricas descriptas en el apartado 2. En particular es importante destacar que para calcular la T_{bb} utiliza la $E_c(6)$ que requiere la utilización de métodos numéricos iterativos para resolverla [12]) el procedimiento se repite cada 2 minutos. Consulta la hora y escribe los datos en la tarjeta SD. El paso siguiente es mostrar los datos en el LCD y finalmente entra en modo de bajo consumo esperando 3 minutos para realizar la siguiente medición. El proceso se repite en forma constante cuando el equipo esta encendido.

5. APLICACIÓN DE PC

Los valores medidos pueden ser introducidos dentro de una carta psicrométrica, en donde se presenta gráficamente la información y agrega la posibilidad de realizar cálculos energéticos para, por ejemplo, trasladar un estado característico de ciertas condiciones de humedad y temperatura a una nueva condición de confort.

Se realizó el aplicativo en el lenguaje JAVA, permite leer el archivo de la tarjeta

SD, creado por el equipo, y graficar los valores. La pantalla principal es una tabla en donde se muestran los datos que contiene el archivo elegido luego, hay una pestaña en donde se grafica la carta psicrométrica junto con los datos medidos, finalmente, existe una última pestaña en la que se grafica el valor del índice *WBGT* interior y exterior a

lo largo del tiempo y que presenta el límite de este índice con el fin de informar si el individuo se encuentra en condiciones de estrés térmico.

En la figura 3 se observa una captura de pantalla.

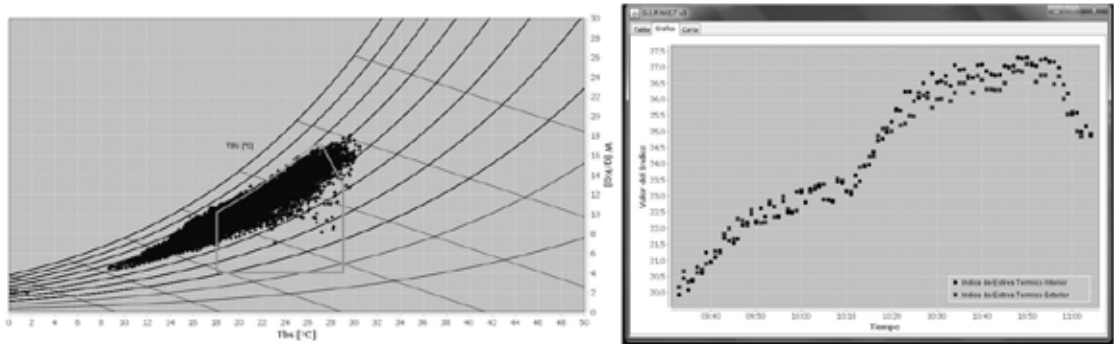


Figura 3. Carta psicrométrica con puntos medidos y variación del índice *WBGT* a lo largo del tiempo

6. RESULTADOS

6.1 Calibración y Contraste

El sensor DS18B20 fue contrastado contra un termómetro Testo 735 con sonda Pt100 calibrada.

El procedimiento constó en sumergir

ambos sensores dentro de un baño térmico controlado electrónicamente, luego se eleva la temperatura del agua y se relevan los puntos elegidos (en donde la temperatura permanece en una condición estable).

En la Figura 4 se observa la curva de respuesta.

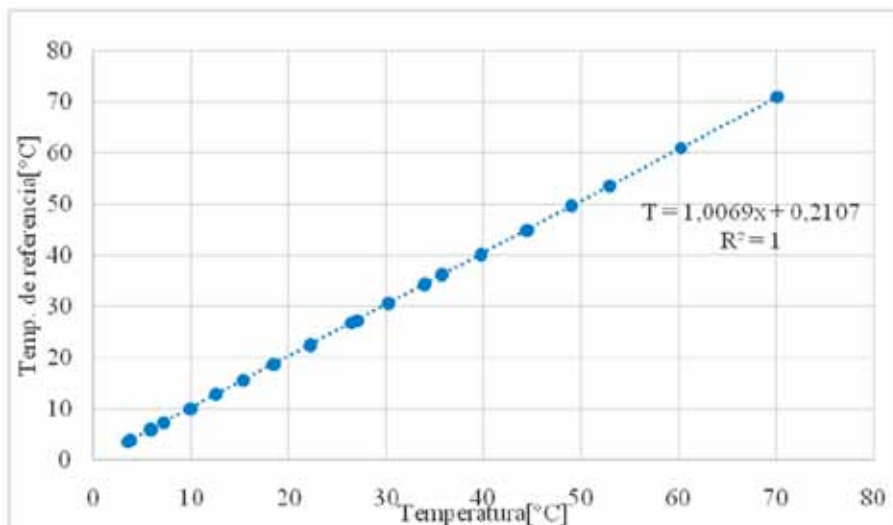


Figura 4

El sensor SHT75 fue contrastado utilizando termómetro Testo 735 con dos termocuplas tipo *K* calibradas. El método utilizado es el de bulbo seco – bulbo húmedo y luego, aplicando las ecuaciones (3), (4), (5) y (6) se obtiene la humedad relativa. En la

Figura 5 se observa la curva de respuesta.

Todos los coeficientes para realizar un ajuste lineal de los sensores se cargaron en el software del microcontrolador.

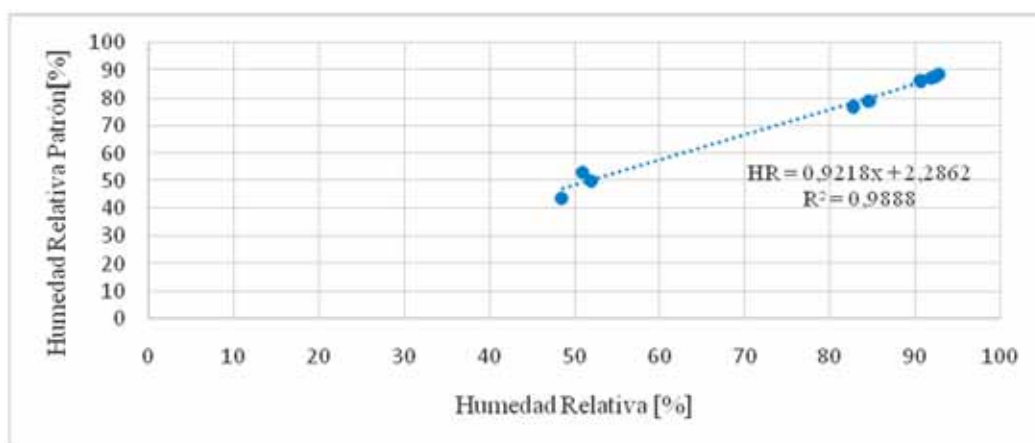


Figura 5

7. CONCLUSION

En este artículo se presentó un medidor digital de confort térmico desarrollado por el Grupo en Energías Renovables (GER) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FaCENA-UNNE). El instrumento desarrollado se realizó con el objetivo de determinar el estrés térmico al que están sometidos los operarios que trabajan en industrias de diferentes rubros en la región nordeste de nuestro país. De esta forma, se proyectó y construyó un instrumento relativamente simple con dispositivos accesibles en el mercado nacional cuya topología permite ampliar sus capacidades de cálculo y medición, de bajo costo, autónomo y que cumple con las normas nacionales.

El sistema desarrollado consta básicamente de un microcontrolador que recibe los valores de temperatura y de humedad relativa, estos valores son utilizados para, a

través de las relaciones psicométricas, calcular la temperatura de bulbo húmedo y seguidamente los índices de estrés térmico interior y exterior. Los valores medidos y calculados son mostrados a través de un *display*. La construcción del medidor es compacta y consta de una esfera hueca de cobre pintada de negro opaco, en cuyo interior se encuentra el sensor de temperatura que mide la temperatura de globo. La temperatura ambiente y la humedad relativa son medidas en un compartimiento dentro del cuerpo del instrumento, que se halla aislada del circuito electrónico, y un *cooler* auxilia a la renovación continua del aire con el ambiente para evitar una medida errónea. El sensor de presión se ubica en la parte lateral expuesto a la superficie, protegido contra elementos externos que puedan dañarlo.

Los sensores instalados en el instrumento fueron contrastados previamente frente a instrumentos calibrados.

Considerando la importancia de la caracterización térmica de los ambientes de trabajo, se presenta al instrumento desarrollado como una posible herramienta para el análisis y futura adaptación infraestructural a las circunstancias bioclimáticas adecuadas para lograr condiciones de confort térmico.

8. REFERENCIAS

- [1] TDA Argentina, http://tdaarg.com.ar/?page_id=103, accedido 08/2015.
- QUEST TECHNOLOGIES QT-32, http://www.siafa.com.ar/instrum_equip/hi_temp_carga.html, accedido 08/2015.
- [2] ASHRAE HVAC Fundamentals – Capítulo 8.
- [3] ASHRAE Standard 55.
- [4] Lamberts R (2002) Conforto Térmico e Stress Térmico Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis.
- [5] Simões Pires, J. R (1999). Fundamentos e Aplicações da Psicrometria. São Paulo.
- [6] Atmel, <http://www.atmel.com/devices/atmega328.aspx>, accedido 05/2015.
- [7] Maxim Integrated, <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/DS18B20.html>, accedido 05/2015.
- [8] Sensirion, <http://www.sensirion.com/en/products/humidity-temperature/humidity-temperature-sensor-sht7x/>, accedido 05/2015
- [9] Bosch, <https://www.adafruit.com/products/1603>, accedido 05/2015.
- [10] ON Semiconductor, <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=MC34063A>, accedido 05/2015.
- [11] NXP, http://www.nxp.com/products/interface_and_connectivity/i2c/i2c_real_time_clocks_rtc/series/PCF8563.html, accedido 05/2015.
- [12] Vera, L., Firman, A., Diaz, M., & Busso, A. DESARROLLO DE UN MEDIDOR DE ESTRES TÉRMICO. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente .Vol. 14, 2010. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184