

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTROTÉCNIA



**DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA A TRAVÉS
DEL DIAGRAMA PSICROMÉTRICO**

Plan de Trabajo para el Proyecto Integrador Profesional presentado por:

Selva Carolina Cruz

Ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para
acceder al título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Dirección

Director: Ing. Carlos Canal

Codirector: Ing. Pablo Dolber

Neuquén, 07 de Mayo 2026

Copyright © 2026 por S.C. Cruz. Todos los derechos reservados.

No se consigue nada sin esfuerzo. No existen los genios. Sí habrá uno que tiene un poquito más de neuronas que el otro.

Pero si no pone trabajo, esfuerzo, dedicación, sacrificios, no llega a ningún lado.

René G. Favaloro

Dedicatorias y Agradecimientos

Este trabajo se lo dedico a mi familia, mi compañero y mis amigas, que gracias a su apoyo pude avanzar con el estudio de la carrera y este proyecto.

Agradecimiento a mis compañeras y compañeros de estudio y a todos los profesores de la carrera y aquellos que conocí en este proyecto. En especial, a mis tutores quienes, gracias a su propuesta del tema y asesoramiento, hoy se presente este trabajo.

Agradecimiento a la Universidad Nacional del Comahue que me brindo la educación y el espacio para avanzar con la formación de la carrera.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Índice general..... | iv |
| 1 Introducción y Fundamentación..... | 1 |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Revisión bibliográfica..... | 2 |
| 1.3 Fundamentación..... | 3 |
| 1.4 Objetivos..... | 3 |
| 2 Marco Teórico..... | 5 |
| 2.1 Humedad..... | 5 |
| 2.1.1 Definiciones..... | 5 |
| 2.1.2 Teorías utilizadas..... | 6 |
| 2.1.3 Tipos de Medidores de humedad..... | 8 |
| 2.1.4 Características particulares..... | 17 |
| 2.1.5 Ecuaciones..... | 20 |
| 2.2 Elementos del sistema..... | 25 |
| 2.2.1 Sensor de temperatura- RTD termoresistencias variables con la temperatura (resistance temperatura detector)..... | 25 |
| 2.2.2 Elementos electrónicos..... | 28 |
| 2.2.3 Programas..... | 30 |
| 2.3 Definiciones de términos generales utilizados..... | 31 |
| 3 Metodología y Desarrollo..... | 34 |
| 3.1 Metodología..... | 34 |
| 3.2 Desarrollo..... | 36 |
| 3.2.1 Explicación de las diferentes etapas..... | 36 |
| 3.2.2 Herramientas para la verificación del dispositivo medidor de humedad..... | 45 |
| 4 Resultados..... | 47 |
| 5 Conclusiones..... | 52 |
| 5.1 Conclusiones..... | 52 |
| 5.2 Recomendaciones o Trabajos futuros..... | 53 |
| 6 Bibliografía..... | 54 |
| 7 Anexos..... | 57 |
| 7.1 Anexo A: Explicación de la comunicación y programa en MPLAB X..... | 57 |
| 7.2 Anexo B: Líneas de código en el programa de aplicación..... | 63 |
| 7.3 Anexo C: Instrucciones para el usuario..... | 63 |
| 7.4 Anexo D: Ensayo de verificación con sensor de humedad..... | 67 |

Resumen

El conocer los parámetros ambientales del lugar de trabajo, permite saber cómo se encuentra el trabajador en el mismo. Para realizar las mediciones de los parámetros se pueden utilizar instrumentos digitales. La selección de los mismos se basa en la normativa vigente, las características constructivas del mismo, la resolución de los datos entregados, la precisión y el rango, entre otros aspectos.

Este proyecto se enfoca en medir el parámetro de humedad relativa ambiental a través del diagrama Psicrométrico. Se desarrolla un prototipo de laboratorio que permite obtener el parámetro mencionado. Éste se realiza analizando la normativa vigente y los diferentes elementos utilizados. Los resultados obtenidos se comparan con un sensor industrial, para analizar por ejemplo la precisión que presentó el prototipo desarrollado. Los resultados obtenidos cumplieron satisfactoriamente los objetivos propuestos.

Palabras clave: Humedad, psicrométrico y sensor.

Abstract

Knowing the environmental parameters of the workplace allows us to understand the worker's well-being. Digital instruments can be used to measure these parameters; their selection is based on current regulations, their construction characteristics, the resolution of the data provided, accuracy, and range, among other factors.

This project focuses on measuring the ambient relative humidity parameter using the Psychrometric chart. A laboratory prototype was developed to obtain this parameter. This prototype was developed by analyzing current regulations and the different components used. This allows us to compare the results obtained with other types of industrial sensors, for example, by analyzing the accuracy of the developed prototype. The results obtained satisfactorily met the proposed objectives.

Lista de figuras y símbolos

2. Marco Teórico

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Esquema de las principales magnitudes que intervienen en el análisis del balance térmico entre el cuerpo humano y el ambiente. | 2 |
| Figura 2.1: Higrómetro de espejo enfriado DewMaster. | 9 |
| Figura 2.2: Higrómetro e imágenes de sensores. | 10 |
| Figura 2.3: Imagen de higrómetro de elemento de cabello. | 11 |
| Figura 2.4: Muestra de los psicrómetros. Psicrómetro giratorio (lado izquierdo) y psicrómetro Assmann (lado derecho). Fuente: Simões J. y Hernandez A. (2019)..... | 13 |
| Figura 2.5: Carta psicrométrica. Fuente: Norma ISO 7726 Anexo D..... | 21 |
| Figura 2.6: Imagen del diagrama psicrométrico del tipo w x h adoptado. Fuente: Simões, J. y Hernandez A. (2019). | 22 |
| Figura 2.7: Relación entre el valor real de la resistencia y el obtenido por la ecuación 2.9. Fuente: Creus (2010)..... | 26 |
| Figura 2.8: Curva de resistencia relativa de varios metales/temperatura. Fuente: Creus (2010) | 27 |
| Figura 2.9: Imagen del termómetro de resistencia de platino PT100..... | 28 |
| Figura 2.10: Muestra de las placas utilizadas con los módulos MAX31865 y los sensores PT100. | 30 |
| Figura 2.11: Imagen de la interfaz de usuario..... | 31 |

3. Metodología y Desarrollo

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: Esquemático dispositivo medidor de humedad..... | 34 |
| Figura 3.2: Placa experimental que permite conexión entre microcontrolador y módulo MAX31865. | 36 |
| Figura 3.3: Arreglo en el módulo MAX31865(lado izquierdo). Fuente: Adafruit (2025). Muestra de la conexión del sensor de temperatura (lado derecho). | 37 |
| Figura 3.4: Muestra de parte de la programación en MPLAB X realizada para leer el Módulo MAX 31865. | 38 |
| Figura 3.5: Esquemático de la placa experimental..... | 39 |
| Figura 3.6: Muestra de las placas utilizadas, módulos MAX31865 y los sensores. | 39 |
| Figura 3.7: Imagen de la pantalla principal del programa para el usuario. | 40 |
| Figura 3.8: Visualización de las mediciones de temperatura..... | 41 |
| Figura 3.9: Imagen ilustrativa del bloque seco. | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.10: Equipo de referencia (lado izquierdo) y dispositivo desarrollado (lado derecho) | 42 |
| Figura 3.11: Curvas Sensor RTD1 (lado izquierdo) y Curva Sensor RTD2 (lado derecho).... | 42 |
| Figura 3.12: Curva Sensor RTD1 (lado izquierdo) y Curva Sensor RTD2 (lado derecho) luego de las correcciones..... | 43 |
| Figura 3.13: Curva de Error relativo de los dos sensores antes de la corrección (lado izquierdo) y luego de la misma (lado derecho). | 43 |
| Figura 3.14: Muestra del dispositivo medidor de humedad, los soportes utilizados (A), la distribución (B) y la disposición final (lado derecho). | 44 |
| Figura 3.15: Dispositivo medidor de humedad preparado para inicio de mediciones. | 44 |
| Figura 3.16: Muestra de parte de la programación realizada para el cálculo de Humedad Relativa. | 45 |
| Figura 3.17: Gráfico de los valores de humedad y temperatura. | 45 |
| Figura 3.18: Imagen ilustrativa del sensor..... | 46 |
| Figura 4.1: Gráfico de Humedad (curva azul), Temperatura 1 temperatura seca t_a (curva verde) y Temperatura 2 temperatura húmeda t_w (curva amarilla). | 48 |

4. Resultados

| | |
|---|----|
| Figura 4.2: Archivo de texto con los valores de humedad y temperatura de ambos sensores (Temp1=temperatura del aire, Temp2= temperatura húmeda), hora y fecha. | 48 |
| Figura 4.3: Gráfica de Humedad de Dispositivo medidor de humedad (HR DP) y del sensor AHT10 (HR SA). | 50 |
| Figura 4.4: Gráfica de Humedad +/- Incertidumbre para el Dispositivo medidor de humedad (HR DP) y del sensor AHT10 (HR SA). | 50 |

7. Anexos

| | |
|--|----|
| Figura 7.1: Registro de configuración del MAX31865. Fuente: Hoja de datos de fabricante. | 58 |
| Figura 7.2: Descripción del formato de lectura del MAX31865. Fuente: Hoja de datos de fabricante. | 58 |
| Figura 7.3: Descripción del formato de escritura del MAX31865. Fuente: Hoja de datos de fabricante. | 59 |
| Figura 7.4: Descripción del formato de lectura y escritura de más de un byte. Fuente: Hoja de datos de fabricante..... | 59 |
| Figura 7.5: Muestra de las direcciones para acceder a los diferentes registros. Fuente: Hoja de datos de fabricante..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 7.6: Expresión para obtener el valor de resistencia (lado izquierdo). Fuente Hoja de datos del fabricante. Expresión para la temperatura (lado derecho)..... | 60 |
| Figura 7.7: Imagen de pantalla principal del programa realizado..... | 64 |
| Figura 7.8: Pantalla para configurar puerto de conexión..... | 65 |
| Figura 7.9: Pantalla para configurar módulos MAX31865. | 65 |
| Figura 7.10: Pantalla de gráficos de temperatura..... | 67 |
| Figura 7.11: Pantalla de gráficos de temperaturas y humedad | 67 |
| Figura 7.12: Muestra del ensayo de 2 horas, con los valores correspondientes y su gráfica. .. | 68 |
| Figura 7.13: Muestra del ensayo de 3 horas, con los valores correspondientes y su gráfica. .. | 68 |
| Figura 7.14: Muestra de los valores de incertidumbre para los dos ensayos anteriores..... | 69 |
| Figura 7.15:Imagen del Reporte de Calibración para el sensor RTD que indica la temperatura. | 70 |
| Figura 7.16: Imagen del Reporte de Calibración para el sensor RTD que indica la temperatura tw | 70 |

Lista de tablas

2. Marco teórico

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1: Propiedades de algunos sensores de humedad. Fuente: ASHRAE (2021). | 15 |
| Tabla 2.2: Características de medidores de humedad. | 16 |
| Tabla 2.3: Valores máximos de incertidumbre para la humedad relativa obtenida. Fuente: Norma 4505 (1998)-Tabla 1. | 20 |
| Tabla 2.4: Ecuaciones utilizadas. | 25 |

3. Metodología y Desarrollo

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1: Diferentes etapas para el proceso del dispositivo medidor de humedad. | 35 |
| Tabla 3.2: Breve descripción del equipo Bloque seco marca Presys. Fuente: Manual técnico. | 41 |
| Tabla 3.3: Algunas características del sensor AHT10. Fuente: Manual técnico. | 46 |

4. Resultados

| | |
|---|----|
| Tabla 4.1: Estimaciones de valor de humedad relativa para diferentes valores de temperatura. | 47 |
|---|----|

7. Anexos

| | |
|---|----|
| Tabla 7.1: Registro de Configuración con los ajustes para este proyecto. | 58 |
| Tabla 7.2: Descripción de cada acción según cada número. | 60 |
| Tabla 7.3: Pasos para observar los datos de humedad..... | 64 |
| Tabla 7.4: Continuación de la Tabla 7.3..... | 66 |

1 Introducción y Fundamentación

1.1 Introducción

En un ambiente de trabajo es importante conocer las condiciones ambientales donde se encuentra el trabajador. Porque puede ocurrir que la persona este expuesto a ciertas condiciones que pone en riesgo su salud y su productividad al experimentar fatiga que lo pueden llevar a generar errores entre otras cosas. Las mediciones de ciertos parámetros en un recinto de trabajo permiten evaluar la situación. Luego tomar acciones para el bienestar del trabajador y con ello aumentar la productividad.

Uno de los factores que puede afectar al trabajador es la humedad relativa, es por ello que este trabajo está enfocado en el desarrollo de un medidor de humedad. La falta de desarrollos de equipamiento que midan este parámetro, genera una acotada oferta de equipos de origen regional. La implementación de este prototipo se lleva a cabo en la Universidad del Comahue.

Considerando los lineamientos de las normas ISO 7726 y ISO 7243 se propone un prototipo de laboratorio que cumple con las especificaciones dadas. Donde la medición del parámetro humedad relativa se realiza usando el método del diagrama Psicrométrico.

El desarrollo del prototipo obedece a lo especificado en la Norma ISO 7726:1998 *Ergonomía del entorno térmico e instrumentos para medición de parámetros físicos*, la cual nos da la información de los parámetros físicos básicos junto a los métodos de medición y las especificaciones de valores, entre otros. Además, para cada parámetro menciona el método de medición y dentro de los instrumentos de medición se mencionan los principios de la técnica utilizada, sus características y los diferentes tipos de sensores de temperatura. Indicando el rango de medición con la precisión requerida en función de la temperatura para distintos intervalos del rango. (Norma ISO 7726, 1998, p.2)

La norma ISO 7243:2017 *Ergonomía del entorno térmico y evaluación del estrés por calor utilizando el índice TGBH - temperatura de globo y temperatura bulbo húmedo*-proporciona un método del índice de TGBH que usa parámetros derivados a partir de los parámetros básicos, la cual orienta las condiciones constructivas del equipo.

En las normas mencionadas se indican qué parámetros físicos básicos caracterizan un ambiente térmico, estos son: temperatura del aire, temperatura radiante media, humedad absoluta del aire, velocidad del aire y temperatura de superficie. La interacción de estos factores con el cuerpo humano presenta una relación con los elementos en el balance térmico. Esto es, la temperatura

del aire está relacionada con la transferencia de calor por convección del medio y por respiración; la temperatura radiante media con la transferencia de calor por radiación; la velocidad del aire con transferencia de calor por convección y la evaporación por la piel; y la humedad con la pérdida de calor a través de la evaporación por la piel y la respiración. Los parámetros físicos se usan para definir a menudo un índice de comodidad o estrés térmico cuando se establece un balance térmico de una persona ubicada en un ambiente térmico dado. (Norma ISO 7726, 1998, p. 2). En la Figura 1.1 se muestra un esquema de las magnitudes mencionadas y la relación con el cuerpo humano.



Figura 1.1: Esquema de las principales magnitudes que intervienen en el análisis del balance térmico entre el cuerpo humano y el ambiente.

1.2 Revisión bibliográfica

En el trabajo de Romero, P. (2020) se menciona el efecto de diferentes factores de riesgos, entre ellos de la humedad relativa en el ambiente de trabajo, y describe lo siguiente “cuando se presenta demasiada humedad aumenta la probabilidad de contraer enfermedades respiratorias como el asma o la sinusitis e infecciones pulmonares” (p.78).

En cuanto a los estudios previos relacionados con la obtención del parámetro de humedad, mediante el diagrama Psicrométrico y valores de temperaturas, se puede mencionar el trabajo de Albuja, M y Almeida, A. (2020) que realizaron una corrección a ciertos valores de temperaturas, como la temperatura de bulbo húmedo utilizando el método de iteración para estimar este valor. También en el trabajo de Vera, L. et al., (2010) realizan una corrección a ese valor de temperatura por el mismo método y mencionan que esto ocurre en caso donde el sistema no puede ser controlados bajos ciertos requerimientos (p.08.95). Por otro lado, en el estudio que realizó Dias J. (2001) muestra que teniendo en consideración un valor denominado constante del psicrómetro dentro de rango de $6,5 \times 10^{-4}$ a $6,9 \times 10^{-4} (^{\circ}\text{C}^{-1})$ y junto a los valores de las temperaturas medidas corregidas por la calibración de los termómetros, se puede obtener

valores de humedad relativa con hasta 3% de incertidumbre como valor mencionado por el ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, (Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire acondicionado). (p. 29-55)

En este trabajo se fija ese valor denominado coeficiente del psicrómetro como una constante y dentro del rango que menciona Dias J. (2001). También se toman los cuidados necesarios cuando se realizan las mediciones de temperatura, como es la ventilación sobre los sensores y de mantener el depósito de agua lleno, que forma parte del sistema que transmite la temperatura de bulbo húmedo. También se utiliza los valores obtenidos directamente de la medición de los sensores, sin aplicar las correcciones de iteración propuestas por los autores del párrafo anterior.

1.3 Fundamentación

Los equipos de medición portátiles utilizados por el área de Seguridad e Higiene tiene diferentes procedencias y precisiones, los más conocidos tienen renombres de marcas internacionales. Una manera de describir los equipos es por su principio de funcionamiento y el sistema puede ser mecánico, electrónico, eléctrico o un conjunto de estos, para obtener el parámetro a medir. En el punto referido al principio de funcionamiento, es muy importante el respaldo de los fundamentos teóricos y la normativa vigente. Mientras que, para desarrollar el sistema es necesario conocer los elementos disponibles, como funcionan e interactuarán entre ellos para obtener así la variable a medir. Aquí se incluye tanto el hardware y el software que en conjunto completan el sistema. La motivación de este proyecto es obtener experiencia teórica-práctica que permita cuantificar los valores que entregan los sensores utilizados, que permita conocer que precisión se puede alcanzar, que limitaciones se encuentran en el sistema desarrollado y cuán confiable resulta ser. Esta experiencia y la comprensión de los diferentes resultados serviría para aplicarlos en el cálculo de otros parámetros.

1.4 Objetivos

El objetivo fundamental del proyecto es desarrollar un prototipo que permita medir la humedad relativa. En base a ese objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Desarrollo bajo los lineamientos que establece la norma ISO 7726 *Ergonomía del entorno térmico e instrumentos para medición de parámetros físicos*.
- Visualizar los valores de medición en una pantalla para el usuario y entregar un reporte digital con los datos obtenidos.

- Comparar las mediciones del prototipo finalizado con un instrumento que se encuentra en el mercado comercial.

2 Marco Teórico

En este capítulo se explican diferentes conceptos para ayudar a entender el camino que se siguió para alcanzar los objetivos propuestos. Se presentan algunos con una descripción detallada y en otros se da un breve resumen, ya que son temas de índole general y se pueden revisar en la bibliografía de este trabajo.

Este capítulo se compone de tres subcapítulos, el primero se denomina Humedad. En éste se menciona todo lo referido a esta magnitud, es decir, definiciones, teorías utilizadas, tipos de medidores, ciertas características de importancia y por último las ecuaciones que se utiliza en el desarrollo de este trabajo.

El segundo, se denomina Elementos del Sistema. Aquí se hace referencia al Sistema como al dispositivo completo desarrollado en este proyecto, tanto los componentes físicos como los soportes informáticos. Por eso en este apartado se detallan los componentes electrónicos que permiten llevar adelante el dispositivo y los programas informáticos que se utilizan.

El último subcapítulo, titulado Definiciones de términos generales, permite aclarar los términos utilizados a lo largo de este trabajo.

2.1 Humedad

2.1.1 Definiciones

Para tener una noción inicial sobre la definición de Humedad, se remite a diferentes autores. Como son los libros de los autores Simões y Hernandez, Creus y Parsons y el manual de ASHRAE.

Del libro *Instrumentación Industrial* de Creus (2010) se menciona lo referido a humedad en los siguientes párrafos.

Según Creus (2010) define: “humedad relativa. El cociente entre la presión parcial del vapor de agua a una temperatura t_o y la presión total del vapor a saturación y a la misma temperatura t_o . Equivale al porcentaje de humedad” (p.338).

Según Creus (2010) define: “porcentaje de humedad. Cociente multiplicado por 100 entre la cantidad, en kg, del vapor de agua contenido en 1 kg de aire seco y la cantidad, en kg, de vapor de agua contenida en 1 kg de aire seco, si el aire está en condiciones de saturación” (p.338).

Según Creus (2010) define: “humedad absoluta. Cantidad de agua, en kg, por kg de aire seco” (p.338).

2.1.2 Teorías utilizadas

En la Norma ISO 7726 *Ergonomía del entorno térmico- Instrumentos para medición de parámetros físicos*, se presentan definiciones y aplicaciones del concepto de Humedad. A continuación, se muestra la información que proporciona, tanto para humedad absoluta como relativa.

-En la Norma ISO 7726 (1998) menciona que: “la humedad absoluta del aire se toma en cuenta cuando se determina la transferencia del calor por evaporación de la persona. Una alta humedad del aire reduce la evaporación por sudor y constituirá un estrés térmico de la persona” (p.35).

(...) El valor que relaciona la cantidad real del vapor del agua contenido en el aire lo caracteriza la humedad absoluta del ambiente.

Los dos valores que son usualmente usados para caracterizar la humedad absoluta del aire son: razón de humedad y la presión parcial del vapor del agua. (p.35)

- Razón de humedad, W_a , para una muestra dada de aire húmedo, es la proporción de masa de vapor de agua a la masa de aire seco en una muestra.(p.35)

$$W_a = M_v / M_a \quad (2.1)$$

Donde M_v : es la masa de vapor de agua y

M_a : es la masa de aire seco en una muestra dada de aire húmedo.

- Presión parcial, la presión parcial del vapor de agua, p_a , del aire húmedo es la presión que ejercería el vapor de agua si él solo llena el volumen ocupado por el aire húmedo a la misma temperatura.

Estos dos valores (W_a y p_a) están conectados por la relación (asumiendo que es gas ideal)

$$W_a = 0,6220 * \frac{p_a}{(p - p_a)} \quad (2.2)$$

Donde p_a : presión parcial del vapor del agua y

p : es la presión atmosférica total.

En el punto de saturación, estos valores son conocidos como razón de humedad de saturación W_{as} , y presión de saturación o presión de vapor saturado, p_{as} .

La presión de vapor saturado, p_{as} , tiene una relación biunívoca con la temperatura absoluta T de la mezcla de aire húmedo por una relación uno a uno. (p.36)

-En relación a la humedad relativa la Norma ISO 7726 (1998) menciona:

Los valores que da la composición del aire en términos de vapor de agua en relación a la cantidad máxima que puede mantener y una temperatura dada, caracteriza la humedad relativa del ambiente.

La humedad relativa, e , es la razón entre presión parcial de vapor de agua p_a , en aire húmedo y la presión de saturación del vapor de agua p_{as} a una misma temperatura y presión total.

$$e = \frac{p_a}{p_{as}} \quad (2.3)$$

La humedad relativa es a menudo expresada en porcentaje de acuerdo con la siguiente relación:

$$RH = 100 * e \quad (2.4)$$

Con respecto a la transferencia de calor entre una persona y su entorno, la humedad absoluta del aire la cual debe tomarse en cuenta. (p.36)

-En relación a la humedad relativa, otro libro titulado, *Fundamentos e aplicações da PSICROMETRIA* de los autores Simões y Hernandez (2019) también trata este tema, a continuación, se extrae información al respecto.

Simões y Hernandez (2019) menciona:

Naturalmente, la humedad relativa varía entre 0 a 1, y, por eso es habitual proporcionar en términos de porcentaje. Por lo tanto $\emptyset = 0 \%$ está reservado para el aire seco mientras $\emptyset = 100 \%$ indica que el aire húmedo está saturado. (p.49)

-También el autor Parsons (2014) en su libro titulado *Human Thermal Enviroments* menciona:

El parámetro básico es la humedad en el ambiente alrededor del cuerpo, el cual es representativo por la fuerza impulsora de la pérdida de calor por vapor o por transferencia de masa.

El concepto de la presión de vapor saturado es importante. Si una tetera con agua se hierve, o el agua queda en una superficie abierta, el vapor se transferirá de la tetera (o superficie) al aire. El vapor de agua en el aire ejercerá una presión parcial de vapor (P_a). Si el vapor de agua es continuamente transferido al aire, eventualmente la cantidad máxima será alcanzada donde el aire no mantendrá más. La presión de vapor en este punto se denominada presión de vapor saturado. La humedad relativa en este punto será de 100 %. (p.26)

La Norma ISO 7726 establece la diferencia y trata la relación que hay entre la humedad absoluta y relativa. Mientras que los autores Simões y Hernandez; y Parsons aclaran el concepto de la humedad relativa. Este trabajo se guía por los lineamientos de la Norma ISO 7726 y presenta el valor de la humedad relativa como porcentaje.

Uno de los métodos estadísticos que se aplica a este proyecto se llama el Métodos de los cuadrados mínimos. Esto es, una vez desarrollado el prototipo y cuando se encuentre en la instancia de obtener ciertos datos, éstos son tratados con este método.

-Montgomery y Runger (1996) menciona que el método de los cuadrados mínimos es un método con un criterio que se usa para estimar los coeficientes de una curva lineal, que son los valores de pendiente y ordenada al origen. Esto se trata en los modelos de regresión y dicha curva es tal que pasa por los valores de manera que el error sea mínimo. (p.475)

2.1.3 Tipos de Medidores de humedad

Hay que mencionar que el tema de medición y control de la variable humedad es de mucha importancia en diferentes ámbitos industriales. Como es el área de Seguridad e Higiene, en la Agricultura, en Meteorología y en laboratorios. También en el sector de la salud (hospitales), en la conservación y almacenamiento de alimentos, y en ensayos de equipos eléctricos. Existe una gran variedad de equipos que miden humedad en el aire y utilizan diferentes principios de funcionamiento. A continuación, se mencionan algunos medidores y sus características. Esta información se extrae de diferentes documentos o bibliografía.

En la Norma ISO 7726 (1998) se mencionan diferentes tipos de higrómetros:

Higrómetro de punto de rocío- Principio

Condensación del vapor de agua contenido en el aire sobre un espejo enfriado a la temperatura de rocío de la mezcla. (p.38)

En la Figura 2.1 se muestra un equipo higrómetro de espejo enfriado, también denominado higrómetro de punto de rocío.



Figura 2.1: Higrómetro de espejo enfriado DewMaster.
Fuente: Hoja de datos EdgeTech Instruments.

Higrómetro de variación de conductividad eléctrica

- Higrómetro cloruro de litio (para medición de humedad absoluta)-Principio

Determinación de la humedad absoluta mediante la medida de la variación de temperatura debido a la variación en la conductividad eléctrica del sensor.

Las mediciones de humedad usando el higrómetro cloruro de litio se basa en dos fenómenos:

- a) La presión de saturación sobre soluciones salinas higroscópica, y en particular, las soluciones de cloruro de litio, es menor sobre el agua a la misma temperatura.
- b) La conductividad eléctrica de una solución de cloruro de litio es mucho mayor que las sales sólidas. (p.38)

- Higrómetro capacitivo (para medición de humedad relativa)- Principio

Determinación de la humedad relativa por la medición de la variación en la capacidad eléctrica del sensor.

Respecto a estos tipos de medidores, el ASHRAE (2021) American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, (Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire acondicionado) en su manual titulado *Fundamentals*

menciona: “muchas sustancias absorben o pierden humedad con cambio en la humedad relativa y muestran según corresponda cambio en la capacidad o impedancia eléctrica” (p.38.11). Indicando que están los diferentes higrómetros, tipo higrómetro Dunmore, higrómetro electrónico de capa de polímero, higrómetro eléctrico de resina intercambiable iónico, higrómetro electrónico de cerámico porosos basado en impedancia y el sensor capacitivo de óxido de aluminio. (p38.12)

En la Figura 2.2 se muestra un equipo higrómetro con sensor capacitivo y diferentes sensores.



Figura 2.2: Higrómetro e imágenes de sensores.
Fuente: Hoja de datos del fabricante Kimo y Roveti D. (2001)

Continuando con otros tipos de medidores que mencionan la Norma ISO 7726 (1998) se encuentran:

Higrómetro de absorción (tipo cabello) – Principio

Deformación o elongación de cierto material orgánico causado por la tensión superficial de agua líquida en los poros de estos materiales porosos. Determinación de la humedad relativa.

Este tipo de higrómetro debería ser calibrado frecuentemente. (p.38)

En la Figura 2.3 se muestra un equipo higrómetro de absorción.



*Figura 2.3: Imagen de higrómetro de elemento de cabello.
Fuente: Fischer Barometer-Hygrometer (2020).*

Psicrómetro – Principio

Enfriamiento por evaporación de un termómetro húmedo por una corriente de aire.
(p.38)

(...) El psicrómetro consiste de dos termómetros y un dispositivo para asegurar la ventilación de termómetro a una velocidad mínima de aire. El termómetro significa cualquiera sensor de temperatura como termómetro de mercurio, termocupla, sonda de resistencia, etc.

El primer termómetro es un termómetro común que indique la temperatura del aire (t_a). Será referido como temperatura seca de aire en oposición a la temperatura ‘húmedo’ indicado por el segundo termómetro.

Este último consiste de un termómetro rodeado por una mecha húmeda generalmente hecha por malla cerrada de algodón. Al final de la mecha se encuentra un contenedor de agua. El agua es elevada por atracción capilar del contenedor al termómetro y entonces se evapora a una razón dependiente de la humedad de aire. Este resulta en un mayor enfriamiento del termómetro cuanto más seco esté el aire (este enfriamiento está limitado por la transferencia de calor debido a la convección del aire). El termómetro indicado por el termómetro rodeado por la mecha húmeda se refiere como temperatura húmeda (psicrométrica) (t_w).

La temperatura seca y la temperatura húmedo son usados para la determinación de la humedad absoluta del aire. (p.38)

En relación al psicrómetro y a su principio de funcionamiento, el ASHRAE (2021) menciona que el proceso mencionado del psicrómetro es un proceso que depende de la pureza del agua, limpieza de la mecha, la velocidad de ventilación, los efectos de radiación, el tamaño y la precisión de los sensores de temperatura y las propiedades de transporte del gas. (p.38.10)

También en el libro de Simões y Hernandez (2019) se mencionan los tipos de psicrómetros, por un lado, los llamados psicrómetro de honda o giratorio o rotativo y por otro lado el psicrómetro ventilado o de aspiración. Del psicrómetro de honda comenta:

Ese tipo de instrumento es bastante empleado debido a su simplicidad constructiva. Básicamente, él está formado por un par de termómetro de vidrio, bulbo seco y bulbo húmedo, fijados en una base giratoria, como se ilustra en la Figura 2.4. La acción de girar en conjunto provoca un movimiento relativo necesario de aire del entorno a los bulbos de los termómetros, en particular del bulbo húmedo. Los efectos de radiación son sentidos en estos tipos de instrumentos. El psicrómetro rotativo debe ser puesto a girar un número suficiente de veces, hasta que el termómetro de bulbo húmedo alcance un valor mínimo de régimen. Una vez alcanzado ese valor, es necesario que la lectura sea haga rápidamente. (p.211)

Y describe sobre el psicrómetro ventilado lo siguiente:

Este tipo de psicrómetro, también conocido como psicrómetro de Assmann, ambos termómetros son blindados contra la radiación térmica y el aire es forzado a circular por los bulbos con una razonable velocidad. Un ventilador, accionado manualmente por cuerda o eléctricamente por un pequeño motor eléctrico, mueve el aire que pasa a través de los dos tubos que envuelven los termómetros, como se muestra en la Figura 2.4.

En ambientes en el que existen fuentes de radiación térmica intensa (sol, paredes de hornos), este tipo debe ser usado preferentemente al anterior. (p.211)

En la Figura 2.4 se muestra la figura que se menciona en el libro de Simões y Hernandez (2019).

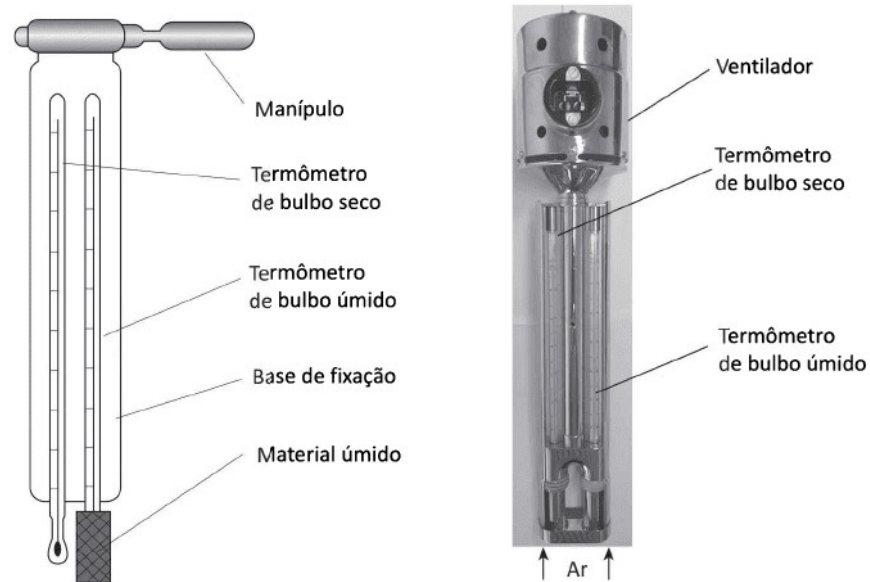


Figura 2.4: Muestra de los psicrómetros. Psicrómetro giratorio (lado izquierdo) y psicrómetro Assmann (lado derecho).
Fuente: Simões J. y Hernandez A. (2019).

Un factor a destacar del medidor tipo psicrómetro es lo referido a los sensores. En relación a ellos, los autores Simões y Hernandez (2019) y el ASHRAE describen:

Simões y Hernandez (2019):

El psicrómetro de termopares es muy empleado en laboratorios en sustitución a los termómetros de vidrio. Es el preferido a los psicrómetros de termómetros de mercurio de vidrio porque sus lecturas pueden ser remotas y por introducir menos perturbaciones en el flujo de aire. En virtud de reducido tamaño de las uniones, velocidades menores de aire también son permitidas (orden del 2 m/s). Además de esto, el uso de mercurio ha sido prohibido (expulsado) de muchos laboratorios por causas de sus efectos nocivos a la salud y el medio ambiente. El elemento sensor puede ser también de termorresistencias, como lo del tipo pt-100. (p. 212)

Según el ASHRAE (2021), aclara “otros sensores de temperatura, como termocuplas y termistores, son también usados y pueden ser adaptados para registrar temperatura o para uso donde un instrumento pequeño es requerido. Sensores de bulbo húmedo de diámetro pequeño opera con velocidades de ventilación baja” (p.38.11).

Retomando la Norma 7726 hace mención a las características de los sensores para los parámetros básicos. Especifica termómetros de expansión, eléctricos y termoanemómetros.

Entre los eléctricos se tienen los termómetros de resistencia variable como resistencia de platino, termistores o termopar.

Entonces para el parámetro de temperatura de aire, indica según este relacionados a ambientes moderados o estrés térmico, un rango de temperatura y una exactitud requerida específica. Para ambientes moderados indica el rango de medición de 10 °C a +40 °C una exactitud requerida de +/- 0,5 °C o deseable de +/- 0,2 °C. Y para ambientes de estrés térmico el rango de medición de -40 °C a +120 °C con una precisión requerida en función de la temperatura para distintos intervalos del rango, en particular para el rango de 0 °C a 50 °C una precisión de +/- 0,5 °C o deseable +/- 0,25°C. (p.8)

También menciona las características de la mecha que cubre el termómetro húmedo, en relación al diámetro es la longitud de la mecha. Mencionando “la mecha húmeda debe extenderse lo suficiente a lo largo del termómetro como para enfriarlo más allá de su parte sensible”. (p.41)

Hasta aquí se mostraron los medidores de humedad mencionando su principio de funcionamiento. La elección de cada uno depende de las necesidades requeridas. A diferencia de los psicrómetros mostrados, se avanza con lo que mencionan los autores de Simões y Hernandez y el ASHRAE sobre la utilización de otros sensores distintos a los termómetros de vidrio. En este trabajo se desarrolla el denominado psicrómetro utilizando sensores de termoresistencia como la pt100. Sin embargo, los sensores adquiridos difieren en ciertas características del indicado en la Norma ISO 7726.

El ASHRAE (2021) también presenta una tabla con las diferentes tolerancias de los medidores de humedad (p.38.10), en la Tabla 2.1 se muestran algunos de interés para este trabajo.

A partir de los manuales y folletos de diferentes equipos medidores de humedad y/o sensores se confecciona la Tabla 2.2. Donde se muestran los modelos de equipos y algunas características.

| Tipo de sensor | Sensor categoría | Método de operación | Rango Aproximado | Algunos usos | Precisión aproximada |
|--|------------------------------|---|----------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Psicrómetro | Enfriamiento por evaporación | Medición de temperatura de bulbo húmedo | 0 a 80 °C | Mediciones, estándar | +/- 3 a +/- 7 % hr |
| Psicrómetro de saturación adiabática | Enfriamiento por evaporación | Medición de temperatura de bulbo húmedo termodinámico | 5 a 30 °C | Mediciones, estándar | +/- 0,2 a +/- 2 % hr |
| Cabello | Mecánico | Cambios dimensionales | 5 a 100% hr | Mediciones, control | +/- 5 % hr |
| Nailon | Mecánico | Cambios dimensionales | 5 a 100% hr | Mediciones, control | +/- 5 % hr |
| Hilo de Dacrón | Mecánico | Cambios dimensionales | 5 a 100% hr | Mediciones | +/- 7 % hr |
| Piel de Goldbeater | Mecánico | Cambios dimensionales | 5 a 100% hr | Mediciones | +/- 7 % hr |
| Materiales celulósicos | Mecánico | Cambios dimensionales | 5 a 100% hr | Mediciones, control | +/- 5 % hr |
| Tipo Dunmore | Eléctrico | Impedancia | 5 a 98% hr a 4 a 60 °C | Mediciones, control | +/- 1,5 % hr |
| Higrómetro electrónico de capa de polímero | Eléctrico | Impedancia o capacitancia | 10 a 100% hr | | +/- 2 a 3 % hr |
| Higrómetro de resina intercambiable iónico | Eléctrico | Impedancia o capacitancia | 10 a 100% hr a -40 a 90 °C | Mediciones, control | +/- 5 % hr |
| Cerámico poroso | Eléctrico | Impedancia o capacitancia | Hasta 200 °C | Mediciones, control | +/- 1 a +/- 1,5 % hr |
| Óxido de aluminio | Eléctrico | Capacitancia | 5 a 100% hr | Mediciones, control | +/- 3 % hr |

Tabla 2.1: Propiedades de algunos sensores de humedad. Fuente: ASHRAE (2021).

| Tipo de medidor/ Marca y Modelo | Sensor categoría | Método de operación | Rango Aproximado | Resolución | Valor de precisión declarada por el fabricante |
|---|--|------------------------------|---|------------|--|
| Psicrómetro digital / AHLBORN FPAD36-3 | Eléctrico- Sensores PT100 | Resistencia | 10 a 100 % hr a 10 a 90 °C y 900 a 1050 mbar | - | +/- 1 % hr |
| Psicrómetro de honda / BACHARACH | Sensores termómetros fabricados en vidrio | Enfriamiento por evaporación | 10 a 100 % hr para -1 a 37 °C | - | +/- 5 % hr |
| Termohigrómetro / KIMO HD110 | Sensor digital (CMOS) | Capacitancia | 5 a 95% hr | 0,1 | (Repetibilidad, linealidad e Histéresis) +/- 1,8 % hr a 15 a 25 °C Incertidumbre de calibración de fábrica +/- 0,88 % hr Deriva por temperatura +/- 0,44 x (T-20) % hr si T < 15°C o T > 25°C |
| Psicrómetro digital / Extech RH300 | - | - | 10 a 90% hr | 0,1 | +/- 3 % hr |
| Psicrómetro con IR / CEM DT-8896 | - | - | 10 a 90% hr Otros | 0,1 | +/- 2 % hr para 10 % a 90 % hr +/- 3 % hr en otros rango |
| Termohigrómetro digital / CM- DT321S | Un solo chip de humedad relativa y el módulo de sensor de temperaturas múltiples que comprende una salida digital calibrada. | - | 0 a 100 % hr | 0,01 | +/- 2 % hr para 25 °C a 20% a 80 % hr +/- 2,5 % hr en otros rangos |
| Higrómetro-Termómetro / Galf TGF-298 | - | - | 10 a 99% hr | 1 | +/- 5 % hr |
| Termohigrómetro con sonda de temperatura / CEM DT-323 | - | - | 10 a 90% hr | | +/- 5 % hr para 40% a 80 % hr +/- 8 % hr para otro |

Tabla 2.2: Características de medidores de humedad.

2.1.4 Características particulares

-Temperatura húmeda t_w

En la parte de descripción de psicrómetro, se menciona que se usa la temperatura seca y la temperatura de húmeda para obtener la presión parcial de vapor de agua o humedad absoluta. Hay que aclarar que existe una diferencia entre la temperatura húmeda obtenido de la forma descrita en el psicrómetro y la temperatura de bulbo húmedo termodinámica, la cual es la que aplica a las ecuaciones de las propiedades del aire húmedo.

En el libro Simões y Hernandez (2019) cuando habla de temperatura húmeda se refiere a la temperatura de bulbo húmedo:

En términos prácticos, la temperatura termodinámica de bulbo húmedo y la temperatura de bulbo húmedo son cercanas para mezcla aire seco y vapor de agua en condiciones ambientales. La primera surge de una condición de equilibrio termodinámico mediante el proceso de saturación adiabática y, por tanto, es una propiedad termodinámica del aire. La segunda temperatura resulta de un proceso de equilibrio dinámico de transferencia simultánea de calor y masa y depende de varios factores, como la velocidad del aire que circula por el psicrómetro, la geometría del bulbo, entre otros. Es precisamente esta proximidad de valores la que permite el uso del psicrómetro para medir la propiedad termodinámica de la temperatura de bulbo húmedo. Sin embargo, errores significativos pueden ocurrir sin tomar los cuidados de uso y operación. (p.60)

Por el contrario, según el ASHRAE (2021) menciona, que debería aplicarse una corrección a la lectura de temperatura de bulbo húmedo obtenido por el psicrómetro, para obtener la temperatura termodinámica de bulbo húmedo. Pero esta corrección conlleva un estudio más detallado y profundo en relación a la mezcla de aire-vapor y también la aplicación de un método iterativo, previo a esto el conocimiento de ciertos parámetros necesarios.

En este trabajo se adhiere a lo mencionado por los autores Simões y Hernandez, utilizando la medición de la temperatura de bulbo húmedo por el psicrómetro para realizar los cálculos correspondientes y estimar la humedad relativa. Asumiendo los cuidados pertinentes para su uso, como es una ventilación apropiada a los sensores, el uso de un recipiente donde contiene el agua monitoreada para que no falte agua destilada, además se consideran que los efectos de radiación térmica son despreciables y por tanto no hay blindaje para ello.

-Calibración de equipo de medición

En relación a la calibración se puede conocer su definición del ASHRAE (2021):

Calibración: (1) es el proceso de comparación de un conjunto discreto de magnitudes o de curva característica de una magnitud que varía continuamente con otro conjunto o curva previamente establecido como estándar. La desviación entre los valores indicados y sus correspondientes valores estándares constituye la corrección (o curva de calibración) para después de eso inferir la magnitud verdadera de la magnitud indicada; (2) es el proceso de ajuste en un instrumento para corregir, reducir o eliminar la desviación definida en (1). (p.38.1)

También para completar la idea, en el libro de Creus se menciona:

Calibración: Ajuste de la salida de un instrumento a valores deseados dentro de una tolerancia especificada para valores particulares de la señal de entrada. (p.755)

Conociendo el concepto de la calibración, se continua con la calibración para el dispositivo desarrollado. Por este motivo se extrae diferentes nociones al respecto de los autores Simões y Hernandez, ASHRAE y la Norma 4505- *Medición de la humedad con un psicrómetro (medición de temperaturas de bulbo húmedo y seco)*.

Simões y Hernandez (2019) mencionan:

La calibración de los instrumentos de humedad puede ser realizada por la exposición del instrumento en un ambiente de temperatura y humedad conocidas y controladas. Las cámaras de calibración existen para este fin. Entretanto, un método menos costoso y que puede ser satisfactorio para muchas situaciones consiste en exponer el instrumento en una cámara cerrada, cuyo aire se mantiene en equilibrio con una solución acuosa saturada de diferentes sales. (p. 218)

ASHRAE (2021) menciona:

Para muchos higrómetros, la necesidad de calibración depende de la precisión requerida, la estabilidad del sensor, y las condiciones a la cual el sensor es sometido. Muchos higrómetros deberían ser calibrados regularmente por exposición a una atmósfera mantenida a humedad y temperatura conocida, o por comparación con higrómetro

estándar. Para una calibración completa usualmente se requiere observación de una sucesión de temperatura y humedad. (p.38.13)

Según la Norma 4505 (1998):

Los termómetros utilizados en un psicrómetro se deben comparar una vez al año a cuatro o más temperatura con la cubierta removida del termómetro de bulbo húmedo. Una vez cada tres meses, los termómetros se deben comparar, con la cubierta removida del termómetro de bulbo húmedo, a la temperatura ambiente del bulbo seco. Las lecturas deben estar de acuerdo con los requisitos (véase numerales 7.1.1 y 12) cuando los instrumentos estén totalmente sumergidos. Para más exactitud, los termómetros se deben calibrar sobre su rango de uso mientras estén totalmente sumergidos. Las correcciones así determinadas se deben aplicar a las lecturas cuando se haga alguna medición. (p.8)

En este trabajo se realiza la comparación de la magnitud de temperatura considerando lo que menciona el ASHRAE y se concuerda con la necesidad de la calibración, ya que es importante conocer el comportamiento del sensor en cuanto a su estabilidad y a las condiciones que puede ser sometido. Sin embargo, como los métodos que nombran Simões y Hernandez, eran complejos de alcanzar, costosos y difíciles de adquirir, se opta por realizar la comparación de los sensores de temperatura como se menciona en la Norma 4505. Para ello se utiliza un equipo adecuado para los sensores utilizados, un calibrador de temperatura tipo bloque seco. En una segunda instancia con el dispositivo terminado se realiza una comparación de la magnitud de humedad con un sensor de humedad.

-Valores de incertidumbre de medida

En relación al término de incertidumbre de medida se puede conocer su significado según lo que se describe en el libro de Creus (2010):

Incertidumbre de la medida (uncertainty). Resultado de una operación de calibración en la que se compara el instrumento a calibrar con un aparato patrón para averiguar si el error se encuentra dentro de los límites dados por el fabricante del instrumento. Como el aparato patrón no permite medir exactamente el valor verdadero (también tiene un error) y, como además en la operación de comparación intervienen diversas fuentes de error, no es posible caracterizar la medida por un único valor, lo que da lugar a la llamada incertidumbre de la medida o incertidumbre (uncertainty). (p.760)

Existen diferentes formas para evaluar y luego estimar el valor de incertidumbre. Como se explica en el documento *Evaluación de datos de Medición- Guía de para la Expresión de la Incertidumbre de Medida* (2008). Por lo denominado la ley de propagación de errores, se plantea la expresión para estimarla. Esa ecuación se extrae del trabajo de Dias (2001) y se presenta en el siguiente subcapítulo.

En la Norma 4505 (1998) se menciona en el apartado con título *12. Precisión y desviación*:

Se estima que la incertidumbre en la humedad relativa obtenida no debe exceder los valores que aparecen en la tabla 1 si el descenso de temperatura y la medida de la temperatura del bulbo seco no exceden los valores de incertidumbre que aparecen en la tabla 1. (p.11)

| Incertidumbre en humedad relativa obtenida, %, hr | Incertidumbre en disminución de temperatura, °C | Incertidumbre en temperatura de bulbo seco, °C |
|--|--|---|
| +/- 4 | +/- 0,3 | +/- 0,2 |
| +/- 3 | +/- 0,2 | +/- 0,2 |
| +/- 2 | +/- 0,1 | +/- 0,6 |
| +/- 5 | +/- 0,3 | +/- 0,6 |
| +/- 4 | +/- 0,2 | +/- 0,6 |
| +/- 3 | +/- 0,1 | +/- 0,6 |

Tabla 2.3: Valores máximos de incertidumbre para la humedad relativa obtenida. Fuente: Norma 4505 (1998)-Tabla 1.

En la Tabla 2.3 se muestran los valores de incertidumbre que muestra la Norma 4505 (1998) correspondiente a un psicrómetro aspirado, para termómetros de vidrio y la palabra *disminución* hace referencia a la temperatura de bulbo húmedo. A pesar de que esto difiere de los termómetros que se utilizan en este trabajo, se consideran estos valores como referencia para los resultados obtenidos en el dispositivo desarrollado mediante la expresión presentada en el siguiente subcapítulo.

2.1.5 Ecuaciones

En este subcapítulo se presentan las diferentes expresiones matemáticas que se utilizan en este trabajo, su fundamento y de donde se extraen.

- Diagrama Psicrométrico

Para describir lo que es un diagrama Psicrométrico, primero se da una definición de Psicrometría, a partir del manual del ASHRAE (2021). Luego se definen diferentes términos para ayudar a entender el diagrama, mencionando los términos que usa el libro de Creus (2010).

Según el ASHRAE (2021) la Psicrometría se define como la ciencia que trata las propiedades termodinámicas del aire húmedo y que estas propiedades se usan para analizar las condiciones y procesos que involucran el aire húmedo. (p.1.1)

Y del libro de Creus (2010) se extraen las definiciones de temperatura seca y temperatura húmeda.

En Creus (2010) se define: “temperatura seca: temperatura del aire medida con un termómetro con el bulbo seco, es decir, en contacto directo con la atmósfera” (p.338).

En Creus (2010) se define: “temperatura húmeda: es la temperatura de equilibrio dinámico alcanzado por una superficie húmeda cuando se la expone al aire. Puede medirse con termómetro cuyo bulbo está en ambiente de saturación, lo que se consigue envolviéndolo con un paño que se mantiene húmedo continuamente (bulbo húmedo)” (p.338).

En la Norma ISO 7726 (1998) define el diagrama o carta Psicrométrica como:

Carta Psicrométrica: es una gráfica donde se agrupan las características principales del aire húmedo. En los ejes coordenados se presenta:

- Eje X, temperatura de aire t_a , expresado en grado Celsius ($^{\circ}C$);
- Eje Y, presión parcial del vapor de agua p_a del aire expresado en kilopascal (kPa);

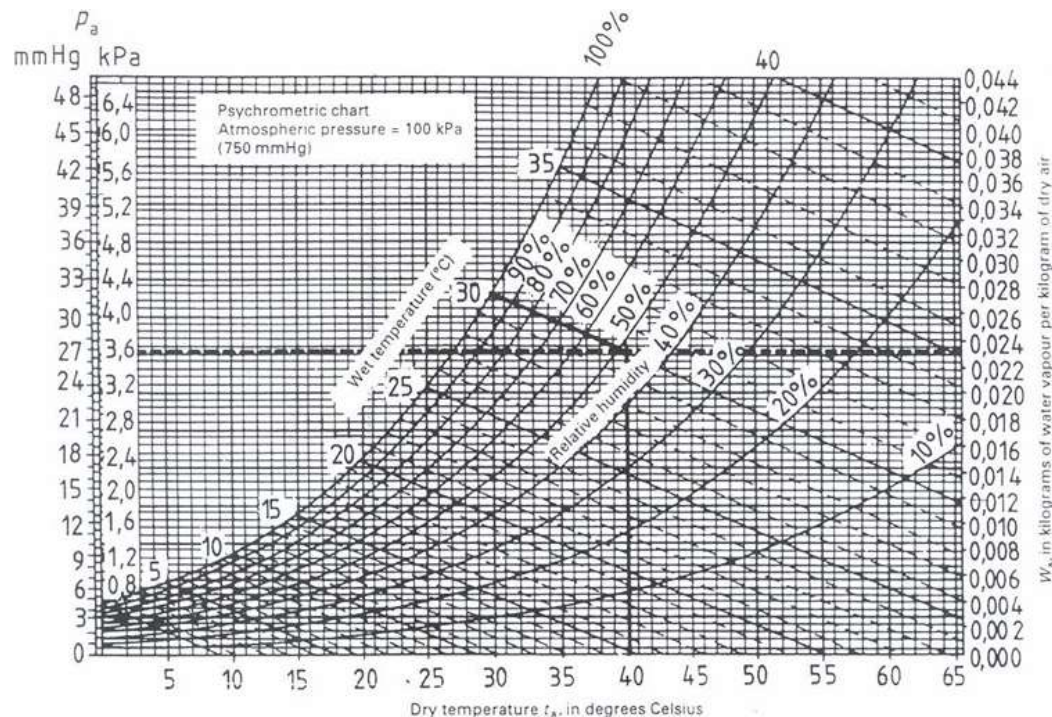


Figura 2.5: Carta psicrométrica. Fuente: Norma ISO 7726 Anexo D.

Las características termo-higrométricas dadas en la carta se refieren a una presión atmosférica de 101,3 kPa. Las mediciones de humedad realizadas a diferentes presiones requieren el uso de cartas destinadas a esas presiones. (p.37)

Esta carta también es llamada diagrama de Mollier y en el mismo se pueden observar otras características de las propiedades del aire húmedo. Como mencionan Simões y Hernandez (2019):

El eje de humedad absoluta está en vertical, es una escala a la derecha del diagrama. Las isolíneas de entalpía específica también son inclinadas en relación a la vertical, pero a un ángulo tal que el aspecto final del diagrama es como si este fuera un diagrama cartesiano del tipo $w \times TBS$ (temperatura de bulbo seco), aunque no lo sea. La demás isolíneas de las otras propiedades psicométricas están también ilustradas en la Figura 2.6. (p.93)

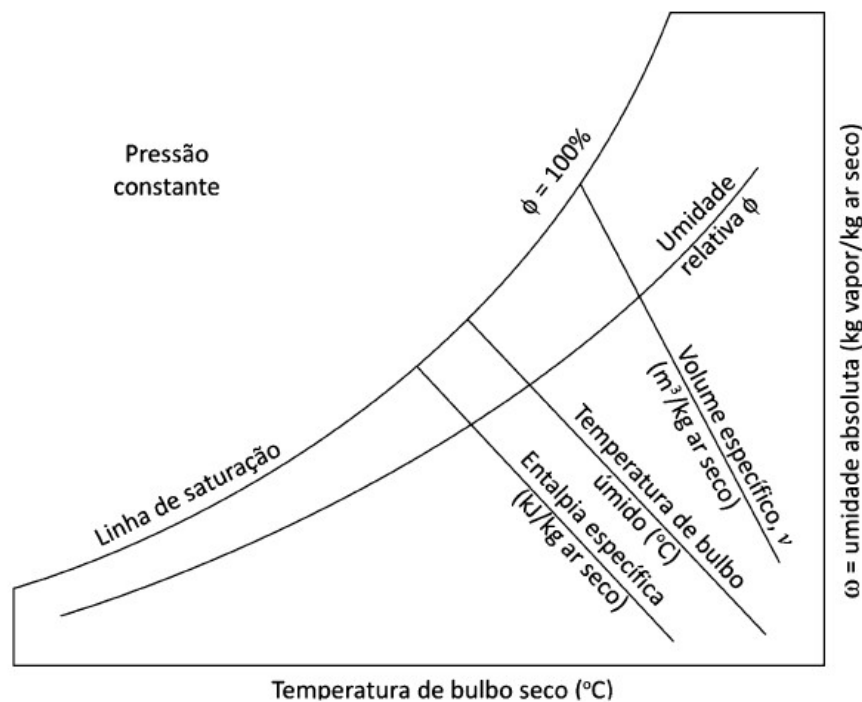


Figura 2.6: Imagen del diagrama psicrométrico del tipo $w \times h$ adoptado. Fuente: Simões, J. y Hernandez A. (2019).

Como este trabajo se realiza bajo los lineamientos de la Norma ISO 7726, se presenta la información que esta proporciona. A continuación, se extrae la información de cómo se obtiene la humedad a partir de la carta Psicrométrica. Y para completar se agrega más información referidos de ciertos valores usados.

-En la Norma ISO 7726 (1998) se indica:

Determinación directa de la humedad absoluta del aire usando una carta Psicrométrica (p.40)

La humedad absoluta del aire, expresado en términos de presión parcial de vapor de agua, está vinculado por la temperatura termodinámica húmeda por la relación de la siguiente forma:

$$p_a = p_{asw} - A * p * (t_a - t_w) \quad (2.5)$$

Donde

p_a : es la presión parcial del vapor de agua en el aire, en las unidades iguales a p_{asw} y p ;

t_a : es la temperatura del aire, en grados Celsius;

t_w : es la temperatura húmeda psicrométrica, en grados Celsius;

p : es la presión atmosférica, en kilopascales;

p_{asw} : es la presión de vapor saturado determinada a la temperatura t_w , en kilopascal y

A : es un coeficiente psicrométrico, en grados Celsius para una potencia de menos uno.

Se recomienda usar $A = 6,67 \times 10^{-4} (\text{°C}^{-1})$.

La expresión puede escribirse como:

$$p_a = p_{asw} - A * p * t_a + A * p * t_w = -A * p * t_a + f(t_w) \quad (2.6)$$

Por lo tanto, en una carta psicrométrica donde se supone un coeficiente psicrométrico A casi constante, la curva de temperatura húmeda es igual a una línea recta paralela con pendiente $(-A * p)$.

La intersección de la temperatura húmeda t_w con la línea recta y la línea recta vertical dibujada a la temperatura del aire t_a da un punto representativo de la humedad del aire considerada.

p_a es entonces leída directamente sobre el eje y. (p.40)

-En relación al valor de la constante psicrométrica A

Simões y Hernandez (2019) mencionan que la constante A de la ecuación (2.5) “es empírica en naturaleza, y existe cierta controversia en cuanto al valor correcto de la constante del psicrómetro A. Los valores normalmente obtenidos por los fabricantes giran en torno de 6×10^{-4} a $7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, más no hay consenso sobre el asunto” (p.213).

Mientras que en la Norma 4505 (1998) menciona “el valor de A se debe escoger en el rango $6,2 \times 10^{-4}$ a $6,9 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. El coeficiente psicrométrico desarrollado por Ferrel, $A= 6,6 \times 10^{-4}$ ($1+0,001515 t_w$), cae dentro de este rango. Si un valor de A ha sido determinado para el diseño particular del psicrómetro y queda en este rango, entonces se debe utilizar. Si un valor ha sido determinado, pero queda por fuera de este rango, entonces se utilizará el valor extremo más aproximado del rango. Si no se ha determinado ningún valor de A, entonces se utiliza el valor desarrollado por Ferrel” (p.10).

Respecto al valor de la constante psicrométrica A, este trabajo utiliza el valor recomendado en la Norma 7726. Note que este valor se encuentra dentro del rango que mencionan Simões y Hernandez y la Norma 4505.

-En relación al valor de incertidumbre

Para estimar el valor de incertidumbre se asume la expresión que presenta Dias (2001) en su trabajo. La cual corresponde a aplicar las derivadas parciales respecto a la temperatura seca t_a y temperatura húmeda t_w de la ecuación de la humedad relativa (Ver Ecuación (2.3) y (2.6)):

$$e = \frac{p_a}{p_{as}} = \frac{-A * p * t_a + f(t_w)}{p_{as}} \quad (2.7)$$

$$u_{HR} = \left[\left(-A * \frac{p}{p_{as}} * u_{ta} \right) + \left(A * \frac{p}{p_{as}} * u_{tw} \right)^2 \right]^{1/2} * 100\% \quad (2.8)$$

Donde

u_{HR} : es la incertidumbre de medida de propagación de la humedad relativa (%);

u_{ta} : es la incertidumbre de medida de la temperatura seca o bulbo seco ($^\circ\text{C}$) y

u_{tw} : es la incertidumbre de medida de la temperatura húmeda o bulbo húmedo ($^\circ\text{C}$).

Las incertidumbres de medida de las temperaturas son las incertidumbres de calibración de los sensores que se usan para obtener esas temperaturas.

-En la Norma ISO 7726 (1998) se muestra que: “Las ecuaciones de conversión más comunes de humedad son resumidas en la tabla D.1” (p.38). De la tabla mencionada, se extraen algunas ecuaciones que se utilizan en este trabajo, ya que corresponden al lineamiento que se adoptó. En la Tabla 2.4 se observan dichas ecuaciones junto a otras para obtener los valores de humedad.

| Parámetro | Ecuación | Unidades |
|---|---|------------------|
| Humedad relativa | $e = \frac{p_a}{p_{as}}$ | % |
| Presión parcial del vapor de agua | $p_a = p_{asw} - A * p * (t_a - t_w)$ | kPa |
| Presión parcial del vapor de agua saturado | $p_{as} = 0,611 * e^{\left(\frac{17,27 * t_a}{t_a + 237,3}\right)}$ | kPa |
| Presión parcial del vapor de agua saturado determinado por la temperatura t_w | $p_{asw} = 0,611 * e^{\left(\frac{17,27 * t_w}{t_w + 237,3}\right)}$ | kPa |
| Valor de la constante psicrométrica | $A = 6,67 * 10^{-4}$ | $^{\circ}C^{-1}$ |
| Presión atmosférica | $p = 100$ | kPa |
| Estimación de la incertidumbre | $\left[\left(-A * \frac{p}{p_{as}} * u_{ta} \right) + \left(A * \frac{p}{p_{as}} * u_{tw} \right) \right]^{1/2} * 100\%$ | % |

Tabla 2.4: Ecuaciones utilizadas.

2.2 Elementos del sistema

En este apartado se describen los diferentes elementos que juntos permiten desarrollar el prototipo del sistema.

2.2.1 Sensor de temperatura- RTD termoresistencias variables con la temperatura (resistance temperatura detector)

Respecto al sensor de temperatura RTD, para entender de qué se trata y cómo funciona, se remite a lo que describe en su libro Creus (2010) en la sección *Termómetros de resistencia*:

La medición de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de la variación de la resistencia en función de la temperatura, que es propia del elemento de detección.

El elemento consiste, usualmente, en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado "coeficiente de temperatura de resistencia" que expresa, a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

La relación entre estos factores puede verse en la siguiente expresión lineal:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot t) \quad (2.9)$$

en la que: R_0 = resistencia en ohmios a 0 °C

R_t = resistencia en ohmios a t °C

α = coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor, entre 0 °C y 100 °C, es de 0,003850 $\Omega / (\Omega / ^\circ\text{C})$ en la Escala Práctica de Temperaturas Internacional (IPTS-68).

Esta relación presenta una diferencia en la resistencia en ohmios entre R_t y la resistencia real de la sonda, según puede verse en la Figura 2.7.

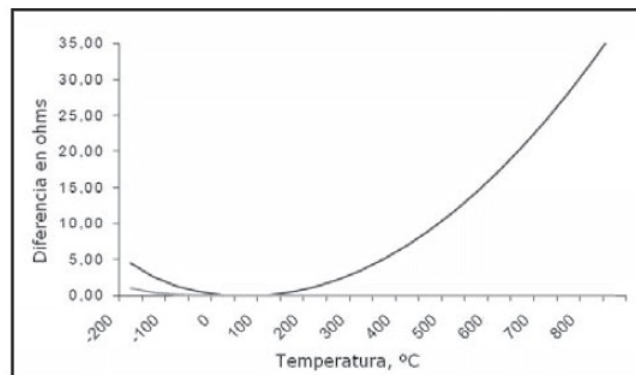


Figura 2.7: Relación entre el valor real de la resistencia y el obtenido por la ecuación 2.9. Fuente: Creus (2010)

Como la relación resistencia-temperatura no es lineal, la ecuación general, según la IEC751, pasa a: (p.240)

$$R_t = R_0 [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3] \quad (2.10)$$

(...) Los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer las siguientes características:

- Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será muy sensible;
- Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada tanto mayor será la variación por grado (mayor sensibilidad);
- Relación lineal resistencia-temperatura;
- Rigidez y ductilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta) y
- Estabilidad de las características durante la vida útil del material. (p.242)

(...) En la Figura 2.8 pueden verse las curvas de resistencia relativa de varios metales en función de la temperatura (platino, cobre, níquel y níquel-hierro).

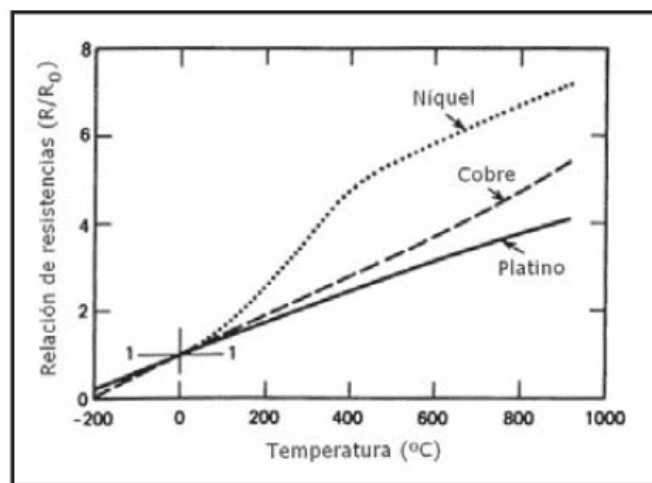


Figura 2.8: Curva de resistencia relativa de varios metales/temperatura. Fuente: Creus (2010)

En general, la sonda de resistencia de platino utilizada en la industria tiene una resistencia de 100 ohm a 0 °C. (p.243)

Los valores temperatura-resistencia para una resistencia de platino PT100 se pueden encontrar tabulados según la norma DIN 43760 (IPTS-68). Hay diferentes presentaciones, las formas de los elementos son de bobina y de película de platino; y existen normas que definen qué tipo de clase y tolerancia posee. (p.243)

En la Norma IEC60751 (2022) *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors (Termómetros industriales de resistencia de platino y sensores de temperatura de platino)* se mencionan, los diferentes tipos de las resistencias de platino (cable o film) y a lo que se denomina termómetro de resistencia de platino, otras características referidas a la clase de tolerancias, el rango de temperatura de validez y la configuración del conexionado de los cables. (Norma IEC 60751,2022)

Debido a las características del termómetro de resistencia de platino tales como su mejor estabilidad y buena linealidad, en este trabajo se usa este tipo de resistencia. Se adquirieron dos de estos elementos, llamados de acá en adelante como sensores de temperatura o sensores RTD, la información sobre ellos es limitada y solo puede mencionarse que presentan una configuración de 3 cables, con diámetro de 4 mm y longitud de sensor 30 mm. Sin embargo, se las adopta debido a su bajo costo y, su tolerancia corresponde a la de mayor tolerancia, denominada clase C según la Norma IEC 60751. En la Figura 2.9 se observa una de las resistencias PT100 utilizada.



Figura 2.9: Imagen del termómetro de resistencia de platino PT100

2.2.2 Elementos electrónicos

En este apartado se describe dos elementos, que son muy importantes y forman el núcleo del dispositivo que se realiza en este trabajo. Estos elementos son circuitos integrados que se disponen cada uno en un chip, los mismos cumplen diferentes funciones y a continuación se da una breve descripción de los mismos.

-Microcontrolador DSPIC 33EP512GP502

Es un microcontrolador dsPIC33E de propósitos generales de la familia de DSC (Controladores digitales de señales) con características de núcleo de 70 MIPS de mayor

velocidad con desempeño excelente. Otras características que sobresalen son: un desempeño superior del ADC, comunicación CAN, CTMU, OpAmp y Generador de periféricos Trigger (PTG) para aplicaciones de alta gama. Estos dispositivos están disponibles en varios formatos y con amplia opción de temperatura (125 °C). (Microchip Technology Inc., 2025)

En la hoja de datos están descritas las operaciones habilitadas en el Set de Instrucciones, los diferentes módulos de interfaz de comunicación (UART, SPI, I2C), y las funciones (por ejemplo, PPS selección de pin periféricos entre otras). (Microchip, 2020)

-Módulo de conversión RTD: MAX31865

Es un convertidor de resistencia a digital optimizado, fácil de usar para detectores de temperatura de resistencia de platino (RTDs). Un resistor externo configura la sensibilidad de la RTD usada y la precisión de la conversión ADC delta-sigma a una proporción del RTD a la resistencia referencia en forma digital. Las entradas al módulo están protegidas contra fallas de sobrevoltaje tan grande como +/- 45 V. Tiene detección programable de RTD, incluye condición de circuito abierto y cortocircuito. (Maxim Integrated Products, Inc., 2015)

En la hoja de datos de Maxim Integrated Products, Inc. se puede obtener información sobre las aplicaciones, beneficios y características, y demás cuestiones para su utilización. Algunos puntos a destacar se mencionan a continuación:

Aplicaciones: Equipos industrial, equipo médicos e instrumentación.

Beneficios y características: Conversión simple de resistencia de platino RTD a valor digital;

Maneja RTD de platino de 100 Ω a 1k Ω (0 °C) (PT100 a PT1000);

Compatible con sensores con conexiones de 2, 3 y 4 hilos;

Compatible con interfaz SPI (Serial Peripheral Interfaz);

Resolución de ADC 15 bits; Resolución Temperatura Nominal 0,03125 °C (varía debido a la no linealidad de la RTD);

Precisión total sobre todas las condiciones de operación: 0,5 °C (0,05% escala completa) máxima;

Entradas Vref diferencial;

Tiempo de conversión 21 ms (máximo);

Protección de entrada +/- 45 V y

Detección de fallas (Elemento RTD abierto, RTD en cortocircuito al voltaje de rango de salida)

Condiciones de operación recomendada: Vdd 3,0 V a 3,6 V

Resistor de referencia $R_{REF} = 350 \Omega$ a $10 \text{ k}\Omega$

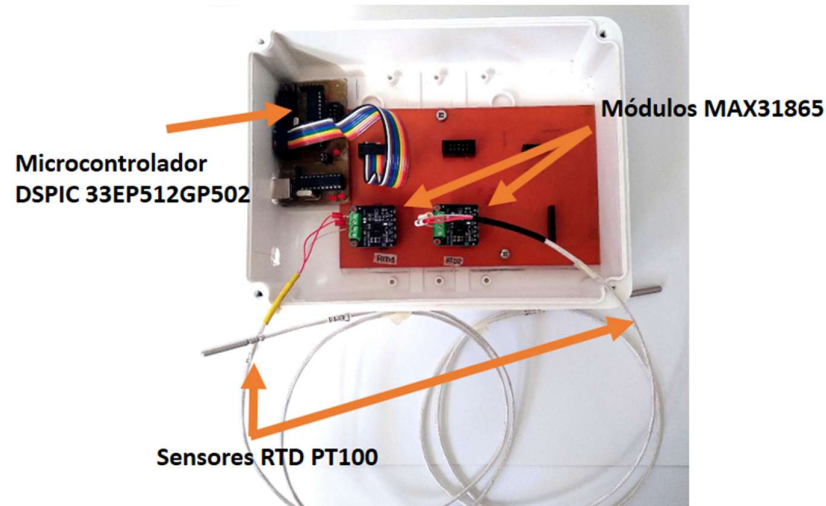


Figura 2.10: Muestra de las placas utilizadas con los módulos MAX31865 y los sensores PT100.

2.2.3 Programas

En este apartado se mencionan los programas utilizados en las diferentes fases del trabajo. Solo se menciona la función que realizan y una información breve del mismo.

Interfaz de usuario

Es una interfaz en la computadora que permite comandar las mediciones de temperatura y humedad. Se realiza mediante un software de aplicación, el cual es un entorno de desarrollo de software ANSI C que permite crear aplicaciones de pruebas y medidas.

En este trabajo se desarrolla para:

- La conexión de puerto;
- Elección de la velocidad de transmisión (se encuentra definida por el microcontrolador, pero hay que seleccionarla);
- Interacción entre el microcontrolador y el módulo MAX 31865 y
- Gestión de datos: toma de datos, cálculos, gráficos y visualización. En la Figura 2.11 se muestra la pantalla principal del programa.

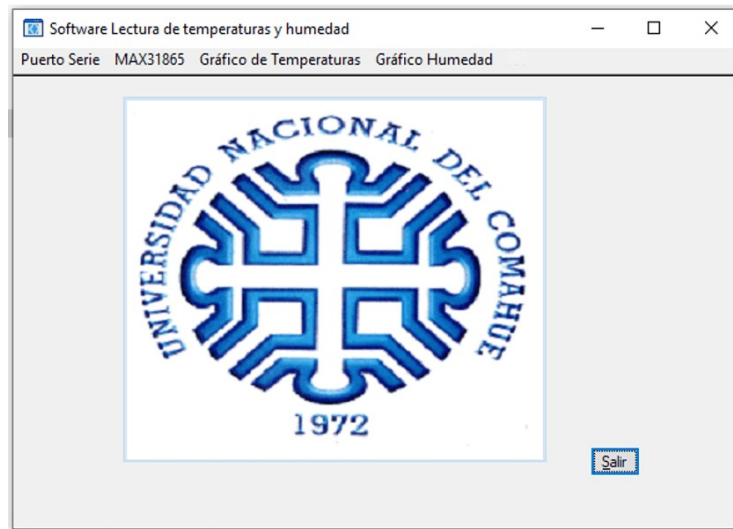


Figura 2.11: Imagen de la interfaz de usuario

Programa MPLAB X IDE v5.50

Este programa permite comunicar el microcontrolador DSPIC33 con el módulo MAX31865 y a su vez con la interfaz del usuario. Mediante la escritura del código para resolver la comunicación con el dispositivo y la visualización en la aplicación del Software que luego son grabadas al microcontrolador. (Microchip Technology Inc., 2025)

Programa KidCad 6.0

Es un programa CAD (**Diseño Asistido por Computadora**) para desarrollar diseños de placas de circuitos impresos. (Licencia Pública General GNU (GPL) versión 3)

2.3 Definiciones de términos generales utilizados

El ASHRAE (2021) menciona que el “aire atmosférico contiene muchos componentes gaseosos, así como vapor de agua y varios contaminantes” (p.1.1).

El ASHRAE (2021) menciona que:

Aire seco existe cuando todo el vapor de agua y los contaminantes son removidos del aire atmosférico. La composición del aire seco es relativamente constante, pero variaciones pequeñas en la cantidad del componente individual ocurre con el tiempo, locación geográfica y altitud. Está compuesto de una mezcla de nitrógeno, oxígeno, bióxido de carbono, hidrógeno y gases raros. (p.1.1)

El ASHRAE (2021) menciona que:

Aire húmedo es una mezcla binaria (dos componentes) de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor de agua en aire húmedo varía de cero (aire seco) a un máximo que depende de la temperatura y presión. La última condición refiere a la saturación, un estado equilibrio neutral entre el aire húmedo y la fase de agua condensada (líquida o sólida). (p.1.1)

El ASHRAE (2021) menciona: “entre las temperaturas de punto triple y crítico del agua, los estados (líquido y vapor) pueden coexistir en equilibrio. Estos estados son llamados líquido saturado y vapor saturado” (p.1.2).

Se define como “evaporación al fenómeno que tiene lugar en la superficie de los líquidos a cualquier temperatura, y consistente en su transformación lenta al estado gaseoso” (Océano, 1999).

Romanelli y Fendrik (2001) mencionan que “la transformación adiabática se distingue porque no hay transferencia del calor entre el sistema y el medio ambiente” (p.455).

Romanelli y Fendrik (2001) definen:

Los gases ideales son gases cuyas moléculas no interactúan entre sí y cuyas partículas se consideran puntuales. Solamente existen en la teoría y deben cumplir la ley de Boyle y Mariotte y las leyes de Charles-Gay Lussac. Pero hay gases de muy baja densidad que asimismo cumplen estas tres leyes. Es decir, $p \cdot V = \text{cte}$; $(V/T) = \text{cte}$; $(p/T) = \text{cte}$. Pero también $(p \cdot V)/T = \text{cte}$ cumple las tres leyes; llamamos a esta **ecuación de los gases ideales**: $(p_1 \cdot V_1)/T_1 = (p_2 \cdot V_2)/T_2$. (p.436)

Romanelli y Fendrik (2001) tratan el tema de temperatura y mencionan:

Podemos decir entonces que la temperatura mide el grado de agitación térmica de las moléculas del cuerpo y que este movimiento está asociado a la energía cinética y se llama **energía térmica**. Por lo tanto, podemos dar una primera definición de la temperatura, como la magnitud que determina si un cuerpo es frío o caliente en una **escala**. (p.429)

Algunas definiciones que menciona Creus (2010):

Campo de medida (range): Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento. Viene expresado estableciendo los dos valores extremos. (p.755)

Exactitud (accuracy). Calidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida. (p.14)

Precisión (precision) es la calidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas. Un instrumento puede tener una pobre exactitud, pero una gran precisión. (p.16)

Escala Práctica de Temperaturas Internacional (IPTS-68): En inglés International Practical Temperature Scale, esta escala fue adoptada en el año 1968 por el Comité Internacional de Pesas y Medidas. Dicha escala consiste en una serie de puntos fijos de referencia y fórmulas de interpolación entre ellos. Actualmente la escala adoptada y que reemplaza a la mencionada es la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90).

3 Metodología y Desarrollo

3.1 Metodología

En el esquema de la Figura 3.1 se muestra en forma general como es la interacción entre los elementos del proyecto. El programa informático nos permite realizar la interacción con el microcontrolador y también la visualización de los valores de humedad relativa. El proyecto consiste de dos sensores de temperatura cada uno conectado a un módulo MAX31865. Son éstos últimos los que se vinculan con el microcontrolador.

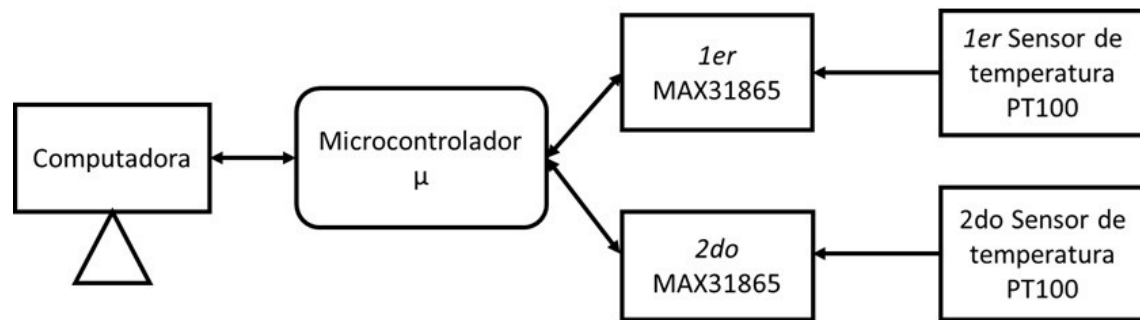


Figura 3.1: Esquemático dispositivo medidor de humedad

El proceso que se lleva a cabo para obtener el dispositivo medidor de humedad, se muestra en la Tabla 3.1. En ella se observa una serie de etapas, en el siguiente subcapítulo se da la explicación detallada de cada una de ellas.

| Etapa | Actividad | Objetivo | Materiales | Evaluación/Prueba o Ensayo |
|-------|--|---|---|--|
| A | Conexiones del Módulo MAX a los sensores y al Microcontrolador μ . | Preparar los elementos necesarios para comenzar a trabajar en conjunto: Microcontrolador μ - Módulo MAX-Sensor. | Manual del μ Manual del Módulo MAX31865 Placa programadora Computadora Programa MPLAB | Verificación de conexiones. |
| B | Programación para la comunicación y medición de temperatura. | Establecer comunicación entre los Módulos MAX con los sensores y | Placa experimental Sensores Cables de conexión | Escribir un registro del Módulo MAX para luego leerlo. Leer registro del Módulo MAX que |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Microcontrolador μ . | | indica conexión con los sensores. |
| C | Desarrollo de la placa experimental. | Obtener una placa para conectar los 2 Módulos MAX31865. | Programa Kicad Elementos para la elaboración de la placa | Ubicar los Módulos MAX y realizar pruebas de comunicación con el Microcontrolador μ . |
| D | Poner en marcha el sistema completo, con los 2 sensores de temperatura conectados y uno de ellos con el depósito necesario. | Hacer funcionar el sistema de 2 Módulos MAX juntos a los sensores y conectar las 2 placas experimentales. | Placas experimentales Elementos para la terminación del dispositivo (Caja estanco, tornillos, taladro, cinta doble faz, cables, etc.) Sensores de temperatura Ventilador de tamaño pequeño | Ensamblar todos los elementos y conectarlos. |
| E | Visualización de temperatura | Desarrollar un programa para obtener y visualizar los valores de temperatura. | Programa de aplicación | Gráficos de los valores de temperatura. |
| F | Comparación con equipo de referencia. | Verificación de los valores de mediciones de temperatura. | Programa de aplicación Equipo de referencia Bloque seco | Comparación de los valores de temperatura con valores del equipo de referencia. |
| G | Aplicación de método Psicrométrico para obtener la humedad relativa. | Obtener valores de humedad relativa. | Programa de aplicación Dispositivo Medidor de Humedad-prototipo | Aplicación del método Psicrométrico |

Tabla 3.1: Diferentes etapas para el proceso del dispositivo medidor de humedad.

3.2 Desarrollo

Para medir la humedad se realizan las mediciones de temperatura que luego son utilizados para estimar el valor de humedad relativa, esto se logra llevando a cabo una serie de etapas como lo muestra la Tabla 3.1.

3.2.1 Explicación de las diferentes etapas

Etapa A: Conexiones iniciales

En la etapa inicial se comienza con los ensayos de conexión y comunicación entre el microcontrolador y el módulo MAX 31865. También los ensayos entre módulo MAX 31865 y el sensor de temperatura.

La comunicación entre el microcontrolador y el módulo MAX31865 es compatible con la denominada comunicación *interfaz SPI*. Para esto se utiliza una placa experimental que mediante los diferentes salidas físicas (puertos) y configuraciones de pines se puede realizar la conexión correspondiente para cada módulo MAX 31865, ver Figura 3.2 (placa desarrollada por la cátedra de Diseño con Microcontroladores). Se procede a configurar los pines correspondientes para la comunicación mencionada, como son los pines de entrada de datos SDI, de salida de datos SDO y reloj CLK junto a los pines que se usan como señal de selección de cada módulo CS. La placa experimental tiene integrada dos cuestiones importantes para el trabajo, una es que permite junto a otro PIC conectar la placa a una computadora por un cable USB y la otra, es un arreglo de pines para conectar a la programadora Pickit3.

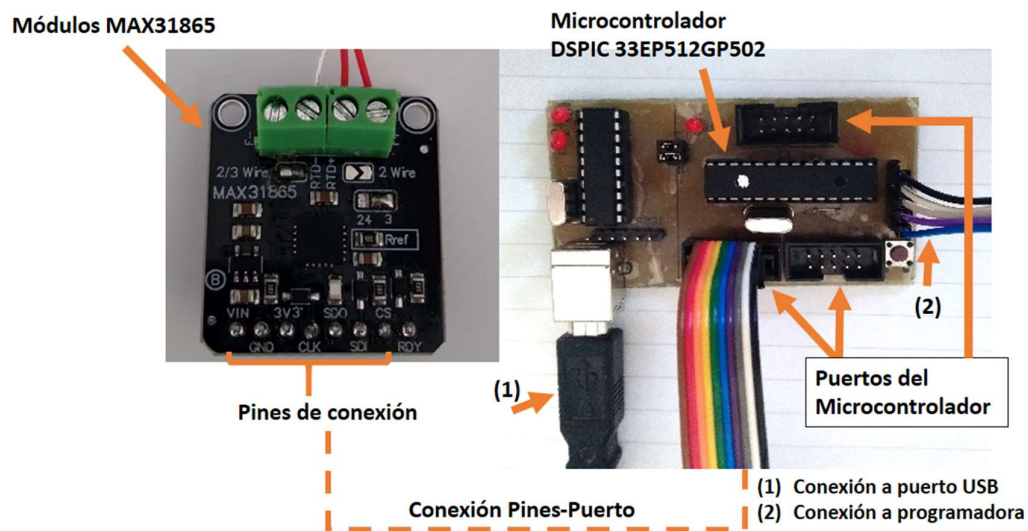


Figura 3.2: Placa experimental que permite conexión entre microcontrolador y módulo MAX31865.

Los sensores de temperatura se conectan a cada módulo MAX31865 según el manual del fabricante. En este caso, como la resistencia RTD PT100 es de 3 hilos se realiza el arreglo dentro de la placa del módulo para esta configuración, como se muestra en la Figura 3.3.

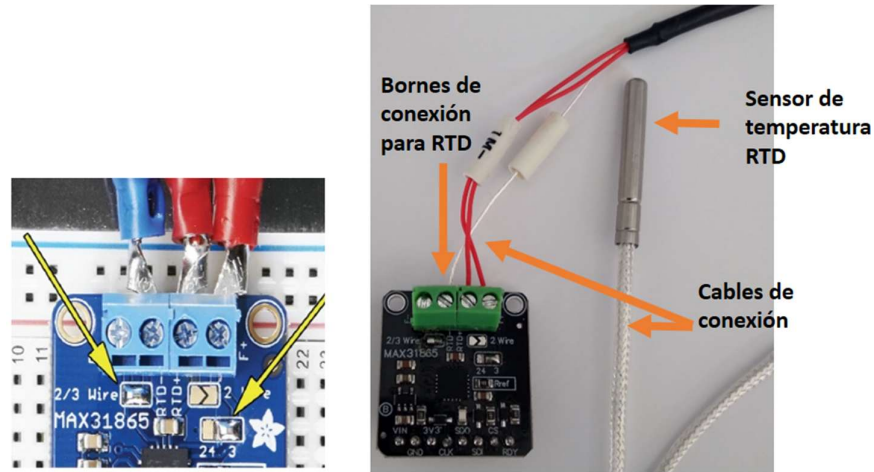


Figura 3.3: Arreglo en el módulo MAX31865 (lado izquierdo). Fuente: Adafruit (2025). Muestra de la conexión del sensor de temperatura (lado derecho).

Etapa B: Programación para la comunicación y medición de temperatura

La utilización del programa MPLAB X IDE v5.50, es para realizar el programa que tiene como objetivo leer los registros del módulo MAX31865, que contiene los valores de resistencia de los sensores RTD. Para esto en el programa desarrollado, se configura el periférico *SPI* y todo lo referido al microcontrolador. Luego, todo referido a la configuración de los módulos MAX31865. Se crean diferentes funciones que permiten detectar con que módulo se interactúa, funciones de lectura y escritura de registros de ese módulo, entre otras.

A continuación, se da una breve explicación de los puntos a considerar para avanzar con la programación del microcontrolador. En el Anexo A se tiene más detalles de los diferentes puntos.

Configurar Microcontrolador DSPIC: Se requiere definir la velocidad de procesamiento de FCY 60MHz y la velocidad de transmisión Baudrate de 19200 bps con la que se trabaja. Lo relacionado a las entradas y salidas (puertos y pines). Y los módulos de las comunicaciones denominadas *UART* y *SPI*.

Configurar módulo MAX31865: Para ello es necesario conocer el mapa de memoria, es decir donde están todos los registros intervinientes en el funcionamiento del MAX. Esto permite

setear los diferentes bits para la configuración de trabajo. Por ejemplo, como se utiliza un sensor de temperatura de 3 hilos, el bit llamado D4 (Ver Anexo A) se le asigna un 1.

Por otro lado, es necesario conocer la forma en que trabaja el módulo MAX31685, con respecto a cómo se lee o se escribe un registro. En el manual del fabricante se puede adquirir esta información. (Ver Anexo A)

Con la descripción de cómo trabajar con los registros del módulo MAX31865, se procede a la programación principal en MPLAB X. Las líneas del código se encuentran en el Anexo A.

En particular en la Figura 3.4 se muestran las líneas del programa, donde el microcontrolador adquiere los valores de los registros de los sensores de temperatura, solicitados al módulo MAX31685.

```

case 0x43: //leo los valores de la PT100
    CS1=0;
    __delay_us(1);
    SPIwrite(0x01);//envio el comando de lectura al Max de la RTD
    VID[0]=SPIread();//Leo RTD MSBs
    VID[1]=SPIread(); // Leo RTD LSBs
    CS1=1;
    __delay_us(10);

```

Figura 3.4: Muestra de parte de la programación en MPLAB X realizada para leer el Módulo MAX 31865.

Etapa C: Desarrollo de la placa experimental

La placa experimental realizada tiene la finalidad de conectar los dos módulos MAX31865 y los sensores RTD PT100. El diseño se realiza con el programa KidCad 6.0, la placa tiene las dimensiones de 16 cm x 10 cm, se implementó la inserción de los módulos mediante zócalos tipo DIP en línea.

La placa contiene zócalos para colocar hasta 3 módulos MAX y otro más para un posible sensor digital de presión, con la finalidad de hacer correcciones por deriva del valor de la presión. En la Figura 3.5 se puede observar el esquemático de la placa final.

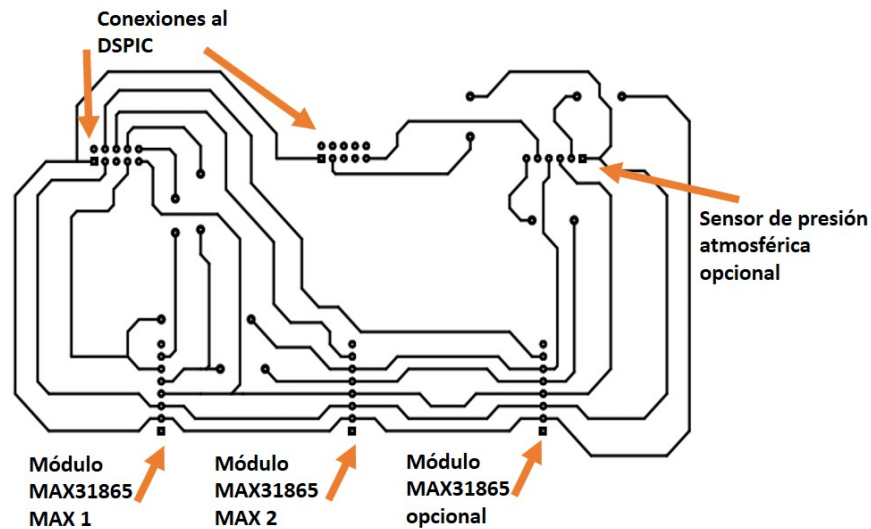


Figura 3.5: Esquemático de la placa experimental

Etapa D: Puesta en marcha del sistema con los 2 sensores conectados

Para utilizar la placa experimental se colocan los dos módulos MAX31865 conectados a sus respectivos sensores RTD PT 100. Esta placa es conectada al DSPIC mediante un cable plano conector de 2 x 5 pines, se ubica en una caja para comenzar con las mediciones. En la Figura 3.6 se puede apreciar lo mencionado, y esta organización de los sensores es como se utiliza en la siguiente etapa.

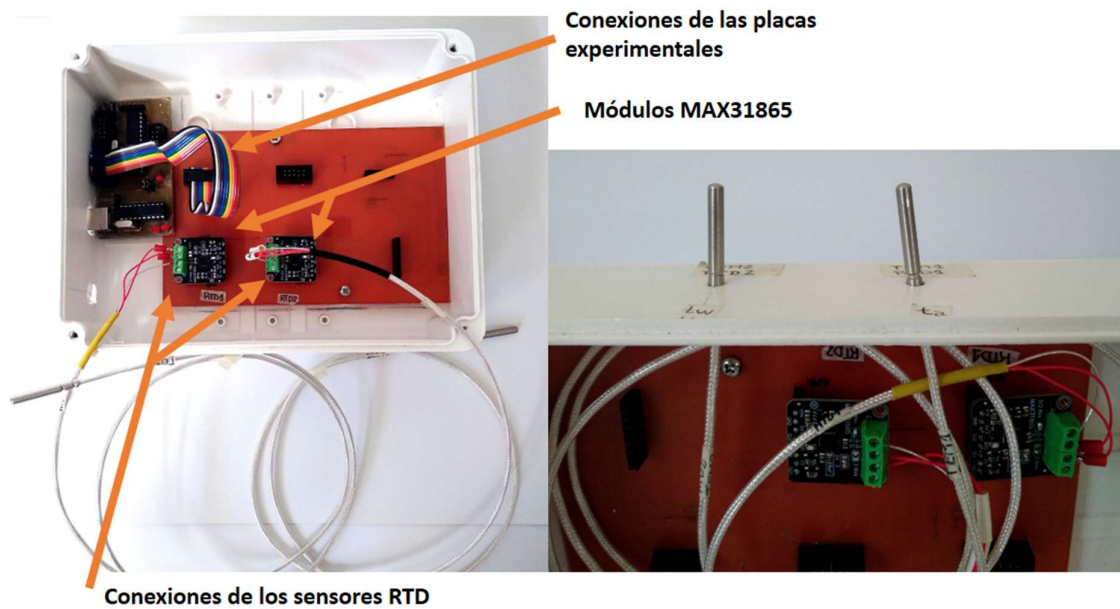


Figura 3.6: Muestra de las placas utilizadas, módulos MAX31865 y los sensores.

Etapa E: Visualización de temperatura

En esta etapa se comienza a realizar las mediciones pertinentes. Para ello la interfaz para el usuario se programa en el software de aplicación. Este permite crear pantallas interactivas, tanto para iniciar las mediciones como la visualización en formato gráfico de las variables a medir. También permite la exportación de dichos datos para su uso posterior, si se lo requiere. Las líneas del código se encuentran en el Anexo B.

Con el sistema completo, es decir con el DSPIC, los dos módulos MAX31865, los dos sensores RTD PT100 y las placas experimentales en conjunto se conecta a una computadora personal y se inicia el ensayo de toma de mediciones.

En la Figura 3.7 se muestra la pantalla principal, donde en la parte superior se encuentra el Menú de opciones, que nos permite acceder a diferentes partes del programa. En el Anexo C se describe los pasos requeridos para realizar las mediciones. Y a modo ilustrativo en la Figura 3.8 se observan las mediciones de temperaturas.

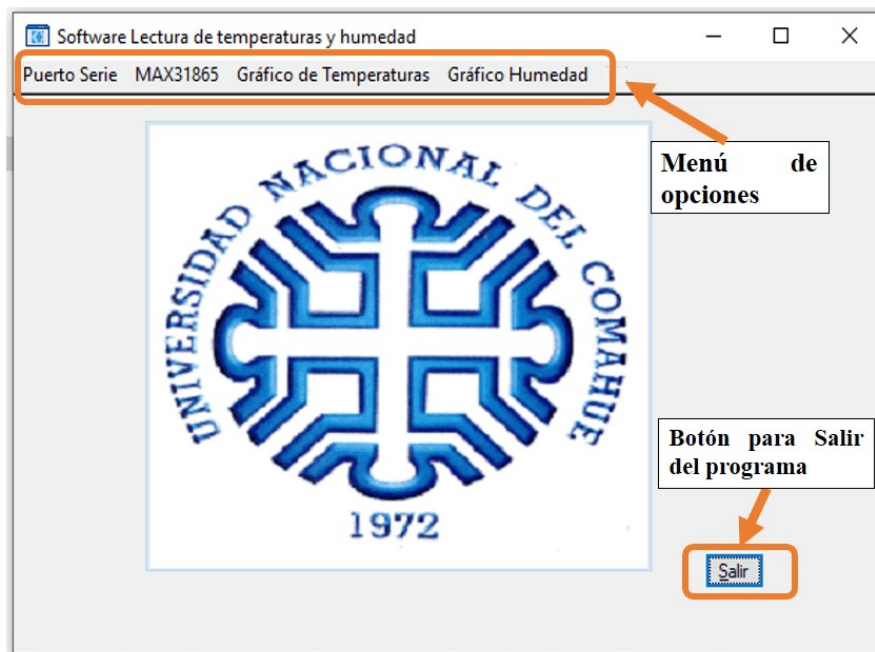


Figura 3.7: Imagen de la pantalla principal del programa para el usuario.

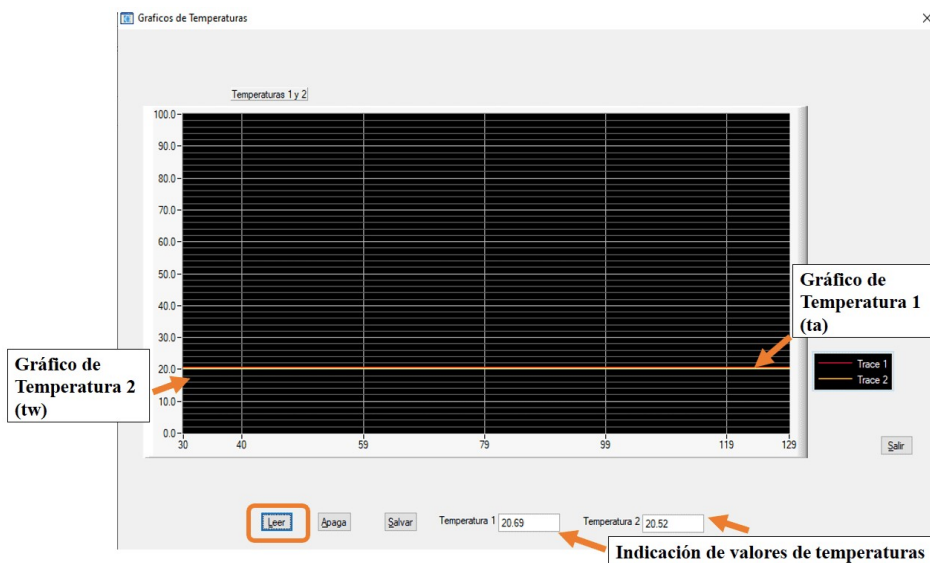


Figura 3.8: Visualización de las mediciones de temperatura.

Etapa F: Comparación con equipo de referencia

Cuando el dispositivo se encuentra preparado para obtener datos de temperaturas se procedió a comparar sus mediciones con un equipo patrón de referencia de temperatura, propiedad de la Facultad de Ingeniería. El cual nos permitió registrar las desviaciones de los valores de temperatura y cuán alejado se encuentra del valor de referencia. En la Tabla 3.2 se da una breve descripción del equipo utilizado.

| | |
|--|--|
| Equipo de referencia | Calibrador tipo baño térmico bloque seco |
| Marca | PRESYS |
| Modelo | 25N-2-IN1P-1N1A-CH |
| Número de serie | 417.03.17. |
| Características (ver manual del equipo): Rango de -25 °C a 155 °C Alimentación: 115 a 230 Vca, 50/60Hz Profundidad de pozo: Ø25.4mm x 124mm Resolución: 0.01 °C Precisión: hasta 0.1 °C Certificado de calibración: R1185.03.17/ R1186.03.17/R1187.03.17 |  |

Figura 3.9: Imagen ilustrativa del bloque seco.

Tabla 3.2: Breve descripción del equipo Bloque seco marca Presys. Fuente: Manual técnico.

Este ensayo consiste en registrar los valores que indica el equipo de referencia y compararlos con el que indica el dispositivo. Esto se realiza en diferentes puntos dentro del rango de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, en una corrida ascendente y luego descendente. En la Figura 3.10 se observa el equipo de referencia con los sensores del dispositivo.

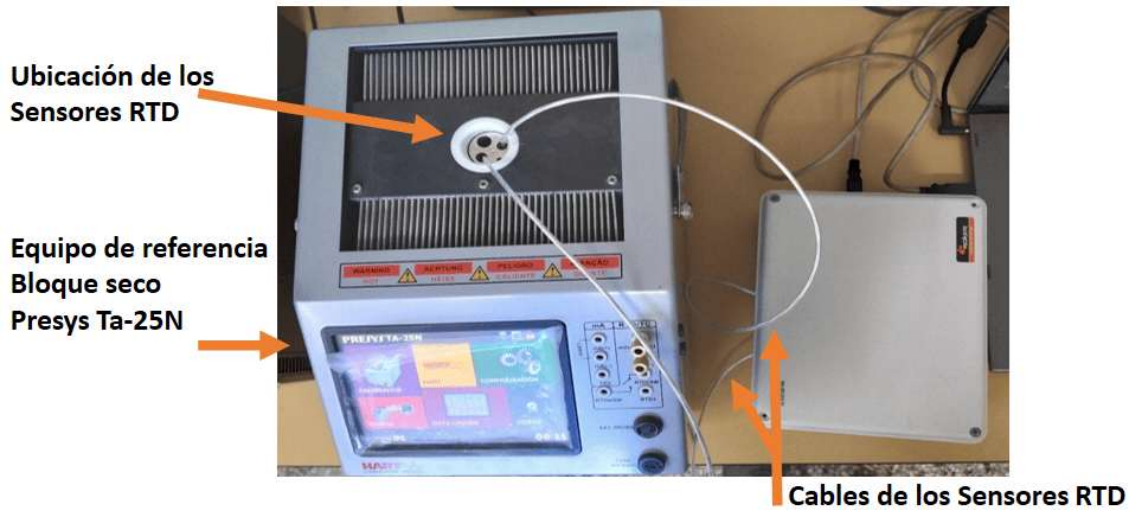


Figura 3.10: Equipo de referencia (lado izquierdo) y dispositivo desarrollado (lado derecho)

Con los valores obtenidos se grafica una curva de valores del sensor RTD1, RTD2 versus el valor de referencia, como se observa en la curva Figura 3.11. A partir de los datos conseguidos y haciendo uso del método de mínimos cuadrados se obtienen los parámetros que más ajustan la recta para minimizar el error entre las mediciones.

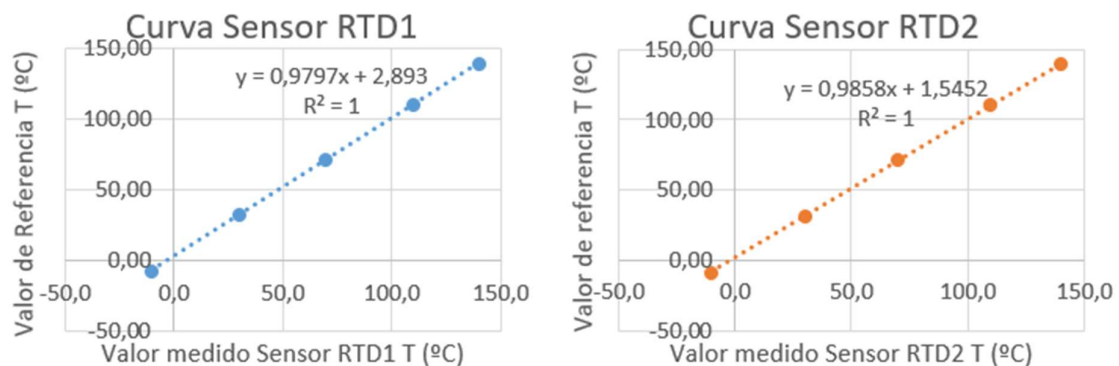


Figura 3.11: Curvas Sensor RTD1 (lado izquierdo) y Curva Sensor RTD2 (lado derecho)

Los parámetros a los que se ajustó la recta que entrega los valores de resistencia son los valores de las pendientes y los de las ordenadas al origen. Estos valores son corregidos en el programa

que nos permite visualizar los valores de temperatura para cada sensor. Luego de esto, se hace el ensayo de comparación nuevamente para ver el impacto de la corrección. En la Figura 3.12 se muestra los gráficos obtenidos.

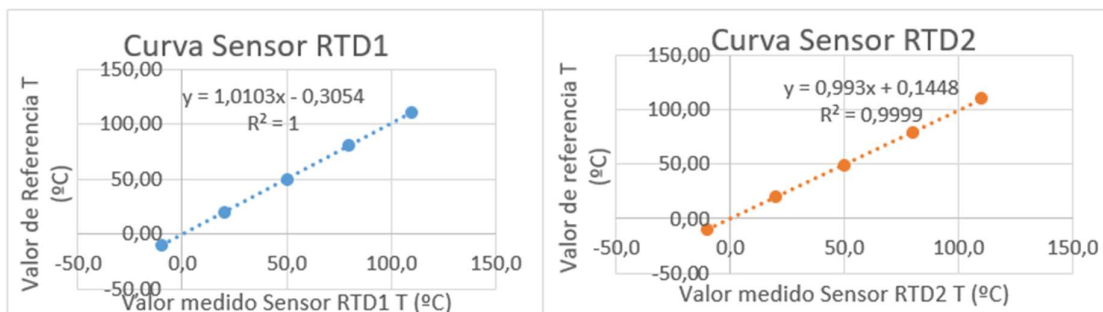


Figura 3.12: Curva Sensor RTD1 (lado izquierdo) y Curva Sensor RTD2 (lado derecho) luego de las correcciones.

En la Figura 3.13 se pueden observar los gráficos de los errores relativos antes y luego de la corrección. Donde los valores antes de la corrección se encuentran en el rango -30 % a 10 %, mientras que luego de la corrección pasa a estar entre -6 % a 4 %.

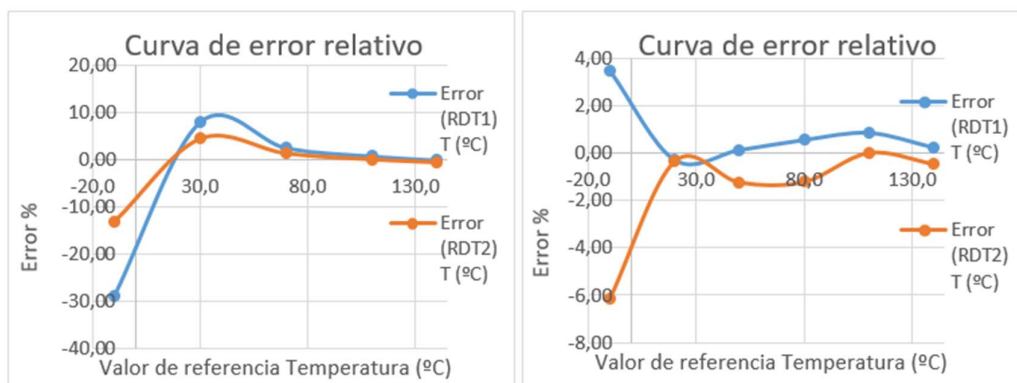


Figura 3.13: Curva de Error relativo de los dos sensores antes de la corrección (lazo izquierdo) y luego de la misma (lazo derecho).

Etapa G: Aplicación de Método Psicrométrico para obtener la humedad relativa

El método Psicrométrico consiste en la utilización de dos sensores de temperatura, ambos sensores se colocan de tal manera que entren en contacto con el aire. Con la particularidad que uno se cubre con una malla de algodón y dentro de un depósito, al cual se le agrega agua destilada. También es necesario que exista una ventilación del aire sobre los sensores, para eso se utiliza un pequeño ventilador. En la Figura 3.14 se observa el dispositivo con la distribución mencionada.



Figura 3.14: Muestra del dispositivo medidor de humedad, los soportes utilizados (A), la distribución (B) y la disposición final (lado derecho).

En la Figura 3.15 se muestra la forma de trabajo para la toma de mediciones. Y utilizando las expresiones que se describen en el subcapítulo de 2.1.5 Ecuaciones, se puede dar comienzo a las mediciones indirectas de los valores de humedad relativa, mediante los valores de los sensores de temperatura y aplicando la ecuación (2.5 y 2.7). A modo de referencia, se muestra parte de la programación donde se calcula la humedad relativa. Como se muestra en la Figura 3.16 (programación) y la Figura 3.17 (gráfico).



Figura 3.15: Dispositivo medidor de humedad preparado para inicio de mediciones.

```

TempH[1]=(Ohms[1]*2.6343) -265.02;// Nueva funcion transferencia
SetCtrlVal (panelHandleChild4, PANEL_4_NUMERIC_12, TempH[1]);
TempH[2]=0; //Humedad
elev1= (17.27*TempH[0])/(TempH[0]+237.3);
elev2= (17.27*TempH[1])/(TempH[1]+237.3);
Pasw=0.611*(exp(elev2)); //
Pas =(0.611*(exp(elev1)))*1000; //
Pa=(Pasw*1000) -(66.7* (TempH[0]-TempH[1]));
HR=100.0*(Pa/Pas);
TempH[2]=HR;
SetCtrlVal (panelHandleChild4, PANEL_4_NUMERIC_13, TempH[2]);// Visualizar Humedad
PlotStripChart (panelHandleChild4, PANEL_4_STRIPCHART, *&TempH, 3, 0, 0, VAL_DOUBLE);

```

Figura 3.16: Muestra de parte de la programación realizada para el cálculo de Humedad Relativa.

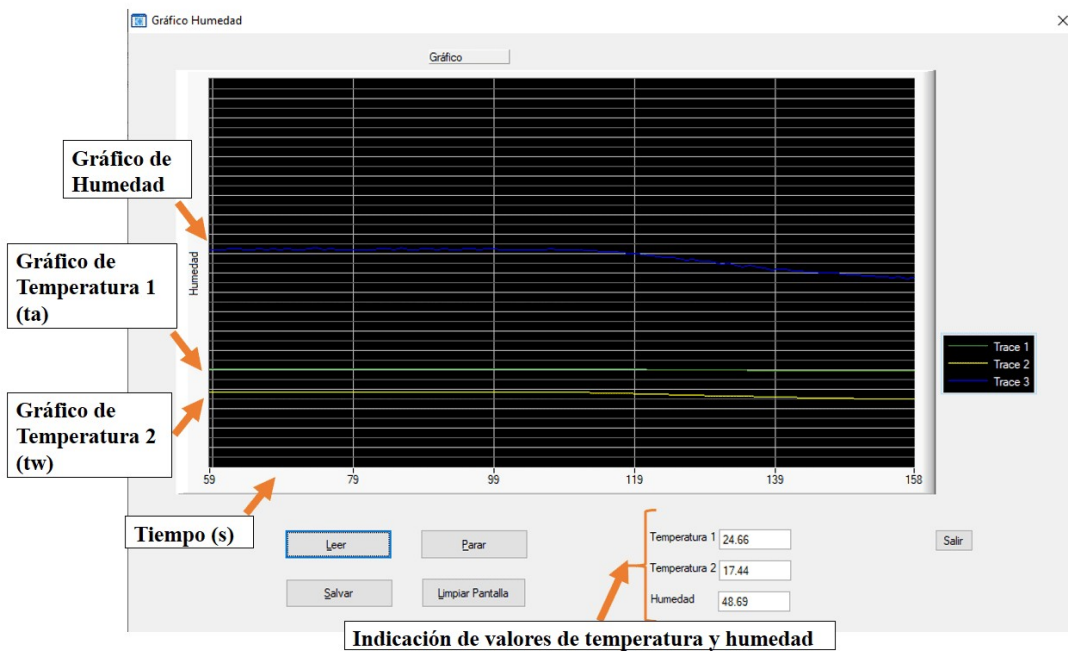


Figura 3.17: Gráfico de los valores de humedad y temperatura.

3.2.2 Herramientas para la verificación del dispositivo medidor de humedad

La verificación del funcionamiento del dispositivo se realiza comparando los valores de humedad relativa indirectos con los valores de humedad del sensor AHT10, que es un sensor de temperatura y humedad, sus características principales se encuentran en Tabla 3.3.


| | |
|--|---|
| Sensor de referencia | AHT10 |
| Marca | ASAIR |
| Modelo | AHT10 |
| Número de serie | 862323 |
| Características (ver manual): Salida digital, Interfaz I2C Sensor de humedad capacitivo MEMS y sensor de temperatura integrado estándar Rango de temperatura -40 °C a 85°C Rango de humedad 0 % a 100 % Alimentación: 3,3 a 5 Vdc Precisión: típica +/- 2 % p/ 20 °C a 80°C Resolución: típica +/- 0,3 °C p/ 10 °C a 60°C Resolución: 0,024 % / 0,01 °C |  <p><i>Figura 3.18: Imagen ilustrativa del sensor</i></p> |

Tabla 3.3: Algunas características del sensor AHT10. Fuente: Manual técnico.

Este ensayo se realiza ubicando al dispositivo medidor de humedad y el sensor en el mismo sector. Las mediciones se efectúan en turnos de 2 horas y 3 horas, en diferentes rangos del día. En el Anexo C se muestran los valores obtenidos, los mismos son discutidos en el capítulo de Resultados.

4 Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir del prototipo finalizado, se describe las mediciones y los diferentes ensayos realizados.

En relación a la determinación y estimación del valor de humedad, en la Tabla 4.1 se puede observar que el dispositivo presenta un error relativo máximo del 0,16% comparado con el cálculo hecho con la calculadora. En la misma tabla se muestra una serie de valores recopilados en diferentes ensayos para analizar el funcionamiento del dispositivo en distintos rangos de temperaturas.

| Temperatura de aire (temperatura de bulbo seco) | Temperatura húmeda (temperatura de bulbo húmedo) | Presión de saturación del vapor de agua determinado por t_w | Presión parcial de vapor de agua | Presión de saturación del vapor de agua en t_a | Humedad Relativa (HR) Estimada | Ensayo del sistema en programa | Error porcentual |
|---|--|---|----------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------|------------------|
| t_a | t_w | p_{asw} | p_a | p_{as} | $HR = \frac{p_a * 100}{p_{as}}$ | HR | % |
| 27,69 | 17,79 | 2,037 | 1,376 | 3,713 | 37,05 | 37,09 | 0,10 |
| 27,41 | 17,44 | 1,993 | 1,328 | 3,653 | 36,35 | 36,37 | 0,05 |
| 20,24 | 15,40 | 1,736 | 1,413 | 2,374 | 60,10 | 60,13 | 0,05 |
| 30,26 | 19,79 | 2,308 | 1,609 | 4,308 | 37,34 | 37,40 | 0,16 |
| 32,38 | 19,10 | 2,211 | 1,325 | 4,859 | 27,26 | 27,29 | 0,11 |
| 21,84 | 14,92 | 1,697 | 1,235 | 2,619 | 47,15 | 47,15 | 0,00 |
| 31,06 | 17,58 | 2,010 | 1,110 | 4,509 | 24,61 | 24,65 | 0,16 |

Tabla 4.1: Estimaciones de valor de humedad relativa para diferentes valores de temperatura.

En relación a visualizar los valores de humedad relativa, se logró con el uso de software específico de aplicación. Se muestran los datos en una pantalla en formato gráfico en tiempo real y los datos almacenados de humedad permiten generar un reporte digital mediante la creación de un archivo en formato texto. Como se muestran en la Figura 4.1 y Figura 4.2.

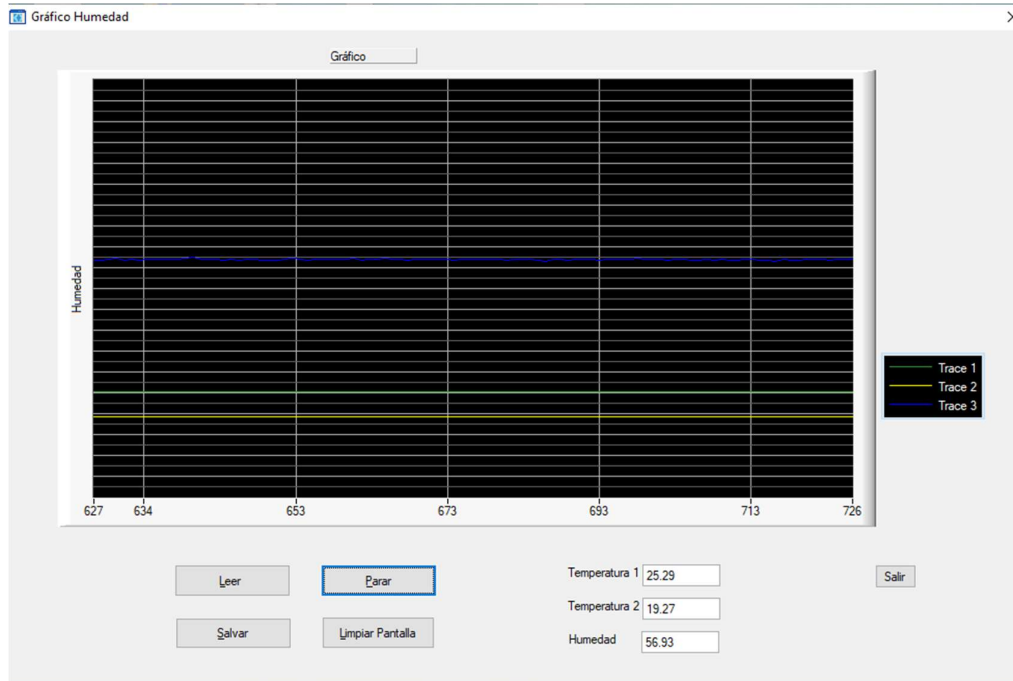


Figura 4.1: Gráfico de Humedad (curva azul), Temperatura 1 temperatura seca ta (curva verde) y Temperatura 2 temperatura húmeda tw (curva amarilla).

| Temp1 | Temp2 | Humedad | Hora |
|----------|----------|----------|----------|
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:24 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:25 |
| 20.52034 | 14.71037 | 53.27476 | 09:58:26 |
| 20.48556 | 14.77951 | 53.98723 | 09:58:27 |
| 20.52034 | 14.71037 | 53.27476 | 09:58:28 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:29 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:30 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:31 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:32 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:33 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:34 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:35 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:36 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:37 |
| 20.52034 | 14.77951 | 53.77553 | 09:58:38 |
| 20.48556 | 14.77951 | 53.98723 | 09:58:39 |
| 20.52034 | 14.74494 | 53.52499 | 09:58:40 |

Figura 4.2: Archivo de texto con los valores de humedad y temperatura de ambos sensores (Temp1=temperatura del aire, Temp2= temperatura húmeda), hora y fecha.

En relación a la comparación de las mediciones con un instrumento a nivel comercial, no se pudo lograr. Tampoco se pudo realizar una calibración del parámetro humedad debido a que, para ello es necesario un equipamiento específico denominado cámara de humedad o un generador de humedad. El cual es un equipamiento costoso y delicado, siendo difícil su acceso. Existen organismos muy importantes del país que cuentan con ese equipamiento y es ajena la

posibilidad de acceder al mismo. El Instituto Nacional de Tecnología Industrial cuenta con este tipo de equipamiento, por ejemplo el generador de humedad marca Thunder Scientific modelo 2500 LT (INTI, 2016), o la organización Centro Regional de Instrumentos de Buenos Aires cuenta con cámara climática marca Aralab modelo Fitoclima ECP75 (SMN, 2021).

A modo comparativo se puede analizar la precisión del dispositivo utilizando el sensor AHT10 el cual no reúne las condiciones mencionadas ya que el mismo no es un instrumento patrón. En el subcapítulo 3.2.2 Herramientas para la verificación del dispositivo medidor de humedad se describe lo realizado y los ensayos mostraron que:

- Dispositivo medidor de humedad presento un error máximo absoluto de 9,9 %HR y;
- Un valor de incertidumbre máxima de 3,88 %HR

En los gráficos de la Figura 4.3 y Figura 4.4 se observan los resultados de los ensayos. En relación a la primera figura se puede mencionar que el dispositivo medidor de humedad responde de manera proporcional constante durante todo el ensayo realizado. Destacando que a medida que los valores de humedad del sensor disminuyen, también lo hace el dispositivo. Otro punto a observar es que la diferencia que se presenta entre los valores de humedad, puede deberse a la temperatura húmeda t_w , ya que la temperatura t_a presenta diferencias menores a 1 °C con respecto a las temperaturas indicadas por el sensor AHT10. Esto es, el efecto de la temperatura t_w en el cálculo de la humedad es significativo y como se indica en el trabajo de Albuja, M. y Almeida, A. (2020) y en el ASHRAE (2021) es necesario aplicarle una corrección a la temperatura húmeda. El indicado por el último autor, la corrección es un camino complejo y por lo tanto es difícil de efectuarlo. Aunque se encontró en el trabajo de Sadeghi, S. et al. (2013) que puede existir una corrección máxima de manera experimental de 0,65 °C a la temperatura húmeda t_w .

Para el cálculo de la estimación de incertidumbre se utiliza la ecuación (2.8). Donde los valores de incertidumbre de los sensores de temperatura t_a (RTD01) y t_w (RTD02), se asumieron como los errores del reporte de calibración a 20°C. Los valores obtenidos se muestran en el Anexo C. Puede observarse en la ecuación (2.8) el peso que tiene el utilizar sensores de mejor precisión.

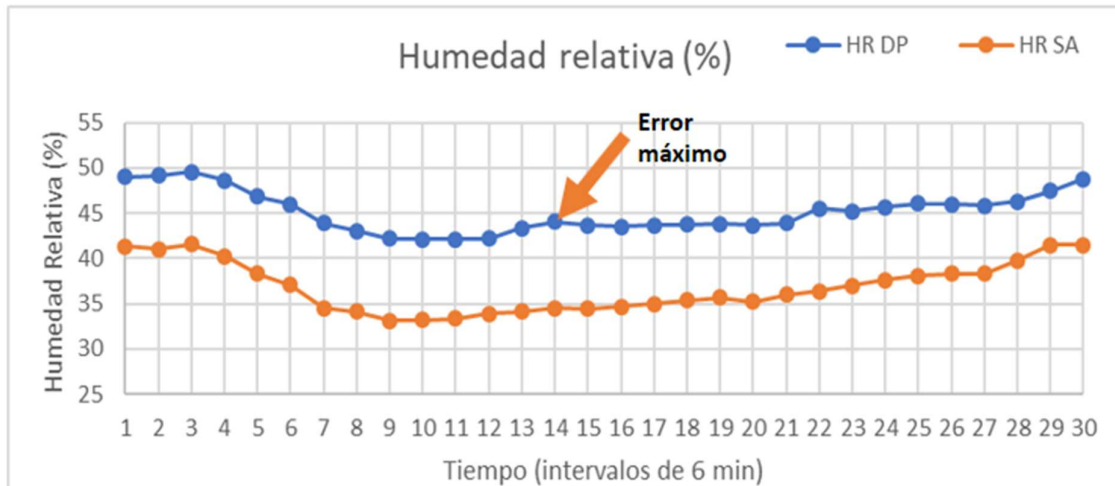


Figura 4.3: Gráfica de Humedad de Dispositivo medidor de humedad (HR DP) y del sensor AHT10 (HR SA).

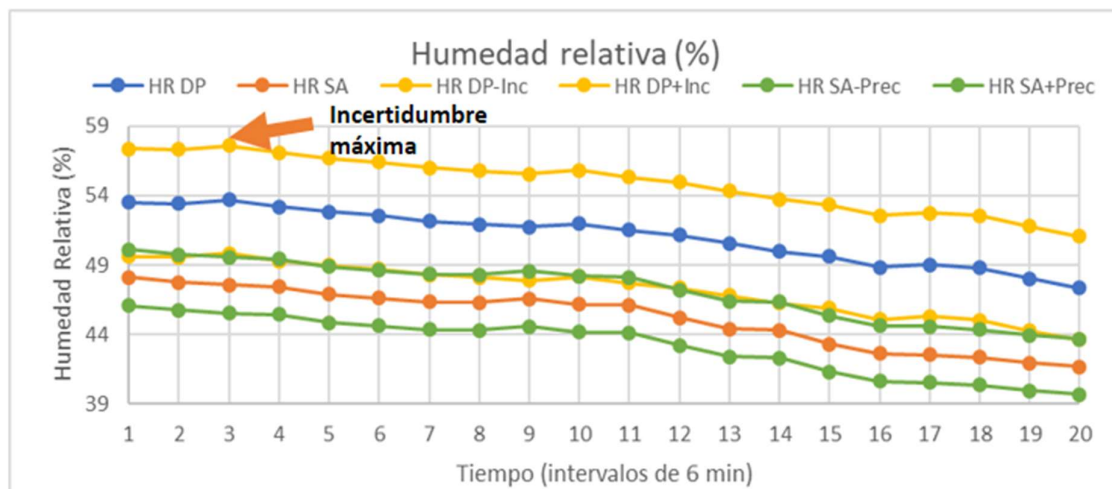


Figura 4.4: Gráfica de Humedad +/- Incertidumbre para el Dispositivo medidor de humedad (HR DP) y del sensor AHT10 (HR SA).

En relación a los diferentes instrumentos que miden humedad relativa, se puede destacar que el dispositivo desarrollado en este trabajo tiene una buena adaptación al lugar de medición y una representación más apropiada de la situación persona-entorno. Comparando el valor de incertidumbre de 3,88% HR con las precisiones que se indican en la Tabla 2.2: Características de medidores de humedad. se tiene que:

- Es menor que el del psicrómetro de honda BACHARACH que presenta una precisión 5 %HR mientras que el resultado se encuentra muy alejado al del psicrómetro digital AHLBORN FPDA36-3 que es de 1%HR, y

- Respecto a los otros medidores, se indica que el valor de incertidumbre del dispositivo es menor que los medidores digitales Graf TGF-298 y CEM DT-323.

También se encuentra la Tabla 2.3: Valores máximos de incertidumbre para la humedad relativa obtenida. Fuente: Norma 4505 (1998)-Tabla 1. donde se puede asumir como valores de referencia para analizar el efecto de las incertidumbres de los sensores. En esa tabla, muestra que para tener una incertidumbre del 4% los sensores tendrían que presentar una incertidumbre de 0,6 °C y 0,2 °C para la temperatura t_a y t_w respectivamente. A pesar que el valor de incertidumbre del sensor utilizado para t_a es de 1,39 °C que supera al mencionado y el del sensor de temperatura t_w es de 0,15 °C, el valor de incertidumbre del dispositivo es de aproximadamente 4%. Esto puede deberse a que los valores de referencia son para sensores tipo termómetros de vidrios.

En relación a los requisitos de la Norma ISO 7726, se puede observar que se respetó la mayoría de los lineamientos del Método Psicrométrico. Como los puntos referidos a:

- La opción de los sensores de temperatura eléctricos;
- Una ventilación de los mismos con una velocidad de 3,5 m/s y el uso de agua destilada;
- La utilización de las expresiones matemáticas para la estimación de la humedad, utilizando el coeficiente psicrométrico indicado. Mencionando que se encuentra dentro de los valores de los autores Simões y Hernandez y la Norma 4505.

Salvo el punto referido a:

- La utilización de termocupla, donde se especifica el diámetro y la longitud de la mecha. El motivo de esto, es porque no se pudo conseguir estos elementos, al contrario de los sensores RTD que fue de fácil acceso. Y en relación a éstos, solo se pudo cumplir con la exactitud requerida en uno de los dos sensores utilizados.

5 Conclusiones

5.1 Conclusiones

Este Proyecto Integrador Profesional cumplió con todos los objetivos propuestos, dando resultados satisfactorios. Como se muestra en los siguientes párrafos, en lo referido a cada uno de ellos.

En respuesta al desarrollo de un prototipo, Medidor de Humedad Relativa, se concluye que se logró obtener lo propuesto. Con ciertas características particulares como la conexión a una computadora para visualizar los datos.

En respuesta a trabajar bajo los lineamientos de la Norma ISO 7726 *Ergonomía del Entorno térmico e instrumentos para la medición de parámetros físicos*, se concluye que se logró entender los diferentes conceptos y su aplicación. Como el tema de la magnitud humedad y el Método Psicrométrico.

En respuesta a visualizar los valores de medición y obtener un reporte digital, se concluye que se alcanzó este objetivo. Mediante el programa elaborado se puede visualizar y almacenar los datos de humedad.

En relación a la comparación con otro instrumento, se concluye que no se pudo realizar, ya que carecíamos de un equipo patrón para la medición de la humedad, si bien el INTI provee un servicio de contraste para certificar la clase del equipo, pero la falta de recursos necesarios no fue posible su realización. Sin embargo, se utilizó la alternativa de comparación con un componente que mide humedad y temperatura, pero no reúne las condiciones para ser un equipo de referencia, solo nos permitió analizar los valores obtenidos por el prototipo en forma relativa.

El desarrollo de este PIP fue muy importante ya que permitió usar nuevos lenguajes de programación, poder confeccionar placas de electrónica, conocer normativa en relación al instrumental en forma general y en lo particular lo referido a la Seguridad e Higiene, utilizar conceptos técnicos aprendidos durante toda la carrera, como en las materias de Técnicas Digitales, Mediciones Eléctricas, Física entre otras. También ver la interacción que existe entre la parte de investigación y su aplicación, posibilitando la creación de herramientas como ser equipos de medición de uso en Laboratorios.

5.2 Recomendaciones o Trabajos futuros

Para el prototipo, analizar la posibilidad de utilizar sensores de temperatura de mejor precisión y que permitan ser calibrados y también usar valores de presión atmosférica mediante el uso de un sensor de presión para ajustar a los valores actuales de presión.

A futuro es posible que la Norma ISO 7726, presente cambios y como consecuencia de esto se tenga que realizar actualizaciones en el prototipo.

En lo factible mejorar la visualización de los gráficos de la lectura de la humedad relativa, mediante el uso de otras herramientas en el programa utilizado o la posibilidad de otro programa.

Lo referido a la comparación con otro instrumento, analizar la posibilidad de comparar con un equipo de referencia de mejor clase y realizar el estudio de la clase de este prototipo.

Es factible dotar al prototipo de una unidad de almacenamiento digital de datos, lo que posibilitaría independizarse de la necesidad de tener una computadora. Se deberá contemplar una batería para su funcionamiento autónomo.

6 Bibliografía

Adafruit, (2025). *MAX31865 RTD PT100 or PT1000 Amplifier*.
<https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/overview>

AHLBORN, (2025). Digital psychrometer, FPAD 36-3 with ALMEMO® D6 plug with integrated atmospheric pressure sensor, for automatic pressure compensation .[*Hojadedatos*]

Aisar (2018). AHT10.[*Technical Manual*]

Albuja, M y Almeida, A. (2020). *Diseño y construcción de un higrómetro digital para altitudes de hasta 3000 metros sobre el nivel del mar para el laboratorio de termodinámica FIM-EPN*. [Trabajo final de grado. Escuela Politécnica Nacional].
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20862>

Aranda N.G., R. Napán Maldonado, y J. García Skabar, (2021). *Optimización de los métodos y procedimientos de calibración de termohigrómetros en el Centro Regional de Instrumentos de Buenos Aires*. Nota Técnica SMN 2021-102

ASHRAE (2021). *ASHRAE Handbook-Fundamentals*. ASHRAE

BACHARACH, (2015). Sling psychrometer Relative Humidity.[*Hoja de datos*]

CEM, (2014).DT-321S DIGITAL HUMIDITY + THERMOMETER.[*Hoja de datos*]

CEM, (2015).DT-323 *Termohigrómetro con sonda de temperatura*.[*Hoja de datos*]

CEM, (2024).DT-8896 Psychrometer with InfraRed Thermometer.[*Hoja de datos*]

Centro Español de Metrología (2008). Evaluación de datos de medición- Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. (#Edición digital 1)

Creus, A. (2010). *Instrumentación industrial*. (#8 ed). Alfaomega Grupo Editor

Dias, J. (2001). *Construção e validação de uma bancada para calibração de sensores para determinação da umidade relativa do ar*. [Trabajo de maestría. Universidad Federal do Rio Grande do Sul]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da UFRGS.
<http://hdl.handle.net/10183/3168>

EdgeTech Instruments, (2024). DewMaster Chilled Mirror Dew/Frost Point Hygrometer.[*Hoja de datos*]

EXTECH, (2019). RH300 Digital Psychrometer.[*Hoja de datos*]

Fischer Barometer-Hygrometer (2020). *Haar-Hygrometer 111.45 »EDITION 2020«*.
<https://fischer-barometer.de/blog/haar-hygrometer-111.45-edition-2020>

Gralf, (2020).MANUAL DEL HIGROMETRO-TERMOMETRO TGF 298.[*Manual de usuario*]

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2016). *Accesorios y modificación de procedimientos para el generador de humedad del INTI*.
<https://www.cenam.mx/sm2016/pdf/1891.pdf>

KIMO INSTRUMENTS, (2014). Thermo-hygrometer HD 110.[*Hojadedatostécnicos*]

Licencia Pública General GNU (GPL) versión 3. KidCad. <https://www.kicad.org/>

Maxim Integrated Products, Inc. (2015). MAX31865.[*Hoja de datos*]

Microchip Technology Inc. (2020). dsPIC33EPXXXGP50X, dsPIC33EPXXXMC20X/50X AND PIC24EPXXXGP/MC20X.[*Hoja de datos*]

Microchip Technology Inc. (2025). dsPIC33EP512GP502. <https://www.microchip.com/en-us/product/dsPIC33EP512GP502>

Microchip Technology Inc. (2025). MPLAB® X Integrated Development Environment (IDE).
<https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/mplab-x-ide>

Montgomery, D. y Runger, G. (1996). *Probabilidad y Estadística aplicadas a la ingeniería*. Mc Graw-Hill/Interamericano de México.

Norma IEC 60751 (2022). *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*.

Norma ISO 7726(1998). *Ergonomía del entorno térmico e instrumentos para medición de parámetros físicos*.

Norma ISO 7243 (2017). *Ergonomía del entorno térmico y evaluación del estrés por calor utilizando el índice TGBH*.

Norma NTC 4505 (1998). *Medición de la humedad con un psicrómetro (medición de temperaturas de bulbo húmedo y seco)*.

Océano (1999). *Diccionario Océano Práctico Lengua Española*. Océano

Parsons, K. (2014). *Human Thermal Enviroments*. Boca Raton.

Presys Instrumentos e Sistemas Ltda, (2015). *Temperature Advanced Calibrators TA-25N / TA-35N / TA-50N*. [Technical Manual]

Romanelli, L. y Fendrik, A. (2001). *Física*. Pearson Prentice Hall.

Romero, P. (2020). *Condiciones generales del medio ambiente de trabajo en L&G sucursal Cipolletti durante el período septiembre 2017- julio 2020. El síndrome del edificio enfermo*. [Trabajo final de grado. Universidad Nacional del Comahue]. Repositorio digital Institucional. <http://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/16648>

Roveti, D. (2001). *CHOOSING A HUMIDITY SENSOR*. <https://www.ohmicinstruments.com/article-choosing-a-humidity-sensor>

Sadeghi, S., Peters, T., Cobos, D., Loescher, H. y Campbell, C. (2013,01,08). *Direct Calculation of Thermodynamic Wet-Bulb Temperature as a Function of Pressure and Elevation*. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, #30 (#8), 1757–1765. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00191.1>

Simões, J. y Hernandez A. (2019). *Fundamentos e aplicações da psicrometria. (#2 ed)*. Edgard Blücher Ltda.

Vera, L., Firman A, Diaz, M y Busso, A. (2010). *Desarrollo de un medidor de estrés térmico*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, #Vol. 14. P. 93-100. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/100277>

7 Anexos

7.1 Anexo A: Explicación de la comunicación y programa en MPLAB X

Para la parte de la programación realizada en MPLAB X IDE v5.50 se consideraron los siguientes puntos:

Relacionado con el Microcontrolador

En la primera parte del programa, se procede a escribir las líneas referidas a las directivas de microcontrolador utilizado.

Luego se configura las entradas y salidas, los módulos de SPI, UART e interrupciones. Después se encuentran las funciones de propósitos específicos para este trabajo.

Se procede a configurar los pines de los puertos correspondientes, los pines de entrada de datos SDI, como el pin RB3 y el de recepción RX como el pin RB8. Los pines de salida de datos SDO como el pin RB6, señal de reloj CLK, RB5 y los pines que se usan como señal de selección para cada módulo MAX31865, CS (chip select) como los pines RB2 y RB4. También se utilizó la función de remapeo de pines que permite este tipo de microcontrolador y es por ello que se remapeo algunos pines. Como pines de salida a los pines RB7, RB5 y RB6 y como entrada RB3 y RB8.

Se define velocidad de procesamiento de FCY 60MHz, la velocidad de transmisión Baudrate de 19200 bps y la configuración del oscilador.

Para la configuración de los módulos de comunicación SPI, UART, interrupciones y selección de pines periférico se considera la información remitida en el manual del microcontrolador en los capítulos correspondientes. La información se encuentra en las secciones:

Sección 7.0 Controlador de Interrupciones

Sección 11.0 Puertos de Entrada/Salida. 11.4 Selección de pines periféricos (PPS)

Sección 18.0 Interfaz periférico serial (SPI)

Sección 20.0 Transmisión Recepción asincrónica universal (UART)

Relacionado con el módulo MAX31865

Configuración del módulo: en el manual del fabricante se describe el registro Configuración, se puede observar en la Figura 7.1. Este registro permite seleccionar el modo de conversión (automática o por flanco del comando 1-shot), habilitar y deshabilitar BIAS pin de voltaje de

salida VBIAS, iniciar la conversión 1-shot, seleccionar la conexión RTD (entre 2, 3 o 4 hilos), iniciar el ciclo completo de detección de fallas, limpiar los registros de fallas de estado y seleccionar frecuencia de corte del filtro. Para este trabajo se configura este registro como se muestra en la Tabla 7.1.

| D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 |
|----------------------------|---|-----------------------------------|--|---|----|--|---|
| VBIAS 1 = ON 0 = OFF | Conversion mode 1 = Auto 0 = Normally off | 1-shot 1 = 1-shot (auto-clear) | 3-wire 1 = 3-wire RTD 0 = 2-wire or 4-wire | Fault Detection Cycle Control (see Table 3) | | Fault Status Clear 1 = Clear (auto-clear) | 50/60Hz filter select 1 = 50Hz 0 = 60Hz |

Figura 7.1: Registro de configuración del MAX31865. Fuente: Hoja de datos de fabricante.

| D7= 1 | D6= 1 | D5 = 1 | D4= 1 | D3= 0 | D2= 0 | D1 = 0 | D0 = 0 |
|----------------|---|-----------------------------------|---------------------------|--|-------|---|---|
| VBIAS 1= ON | Modo de conversión 1= Automático (continuo) | 1-shot 1=1-shot (auto-limpiar) | 3-hilos 1= 3 hilos RTD | Control del ciclo de Falla de Detección (finaliza la detección de falla) | | Limpiar Estado de Falla 1=Clear (auto-limpiar) | 50/60 Hz selección de filtro 1 = 50 Hz |

Tabla 7.1: Registro de Configuración con los ajustes para este proyecto.

Leer registros del módulo: según el manual se describe en la Figura 7.2 como proceder para la lectura. Donde se observa las líneas \overline{CS} línea de selección en estado bajo para esta acción, SCLK señal de clock, SDI señal de datos de entrada con la dirección del registro a leer y SDO la señal de salida con los datos del registro pedido para leer. Considerando que para leer un registro es necesario usar una dirección 0X (hex) donde X corresponde a la dirección del registro correspondiente.

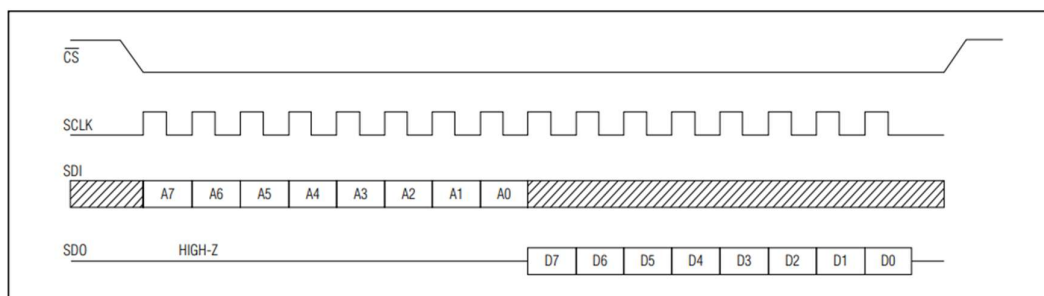


Figura 7.2: Descripción del formato de lectura del MAX31865. Fuente: Hoja de datos de fabricante.

Escribir registro: según manual se describe en la Figura 7.3 como proceder para la escritura. Donde se observa las líneas, \overline{CS} línea de selección en estado bajo para esta acción, SCLK señal de clock y SDI señal de datos de entrada con la dirección del registro a leer seguido del valor a escribir. Considerando que, para escribir en un registro es necesario usar dirección 8X (hex) donde X corresponde la dirección del registro correspondiente.

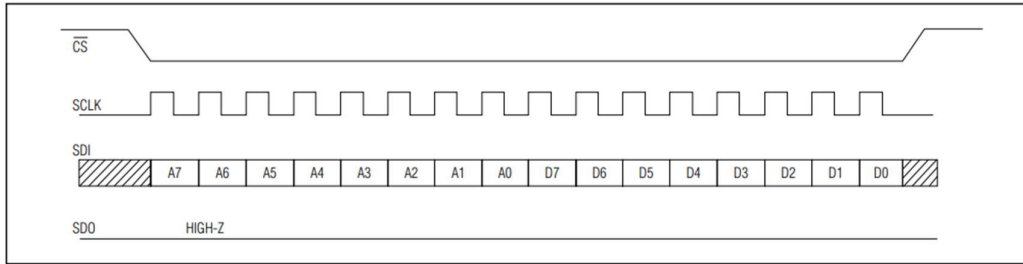


Figura 7.3: Descripción del formato de escritura del MAX31865. Fuente: Hoja de datos de fabricante.

También tiene la posibilidad de lectura y escritura de más de un registro, como se observa en la Figura 7.4.

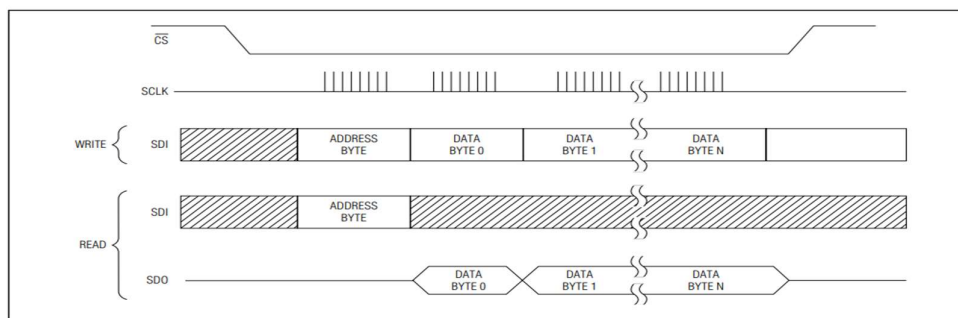


Figura 7.4: Descripción del formato de lectura y escritura de más de un byte. Fuente: Hoja de datos de fabricante.

Se procede en primera instancia a configurar el registro de Configuración haciendo uso de la función de escritura. Luego con la función de lectura se procede a leer los registros de RTD MSBs y RTD LSBs. Con estos valores de resistencia se obtiene los valores de temperaturas. En la Figura 7.5 se tiene las direcciones correspondientes a los registros del módulo MAX31865.

Table 1. Register Addresses and POR State

| REGISTER NAME | READ ADDRESS (HEX) | WRITE ADDRESS (HEX) | POR STATE | READ/WRITE |
|--------------------------|--------------------|---------------------|-----------|------------|
| Configuration | 00h | 80h | 00h | R/W |
| RTD MSBs | 01h | — | 00h | R |
| RTD LSBs | 02h | — | 00h | R |
| High Fault Threshold MSB | 03h | 83h | FFh | R/W |
| High Fault Threshold LSB | 04h | 84h | FFh | R/W |
| Low Fault Threshold MSB | 05h | 85h | 00h | R/W |
| Low Fault Threshold LSB | 06h | 86h | 00h | R/W |
| Fault Status | 07h | — | 00h | R |

Figura 7.5: Muestra de las direcciones para acceder a los diferentes registros. Fuente: Hoja de datos de fabricante.

Cálculo para obtener la temperatura: según manual del fabricante la forma de convertir el dato del registro RTD (MSBs y LSBs) a valores de resistencia en unidades de ohm, es necesario hacer el cálculo de la Figura 7.6. En este trabajo el módulo MAX 31865 ya tiene incorporado

una resistencia de referencia $R_{REF} = 430 \text{ ohm}$. Luego con el valor de resistencia conocido se puede obtener el valor de temperatura por expresión matemática o por tablas.

$$R_{RTD} = (\text{ADC Code} \times R_{REF})/2^{15}$$

ADC Code = 15-bit ADC results from RTD Data registers (01h-02h)

R_{REF} = Resistance of the reference resistor

$$\text{Temperatura} = \text{pendiente} * R_{RTD} + \text{ordenada}$$

Los valores de pendiente y ordenada se obtienen, por dos puntos conocidos y luego de manera experimental

Figura 7.6: Expresión para obtener el valor de resistencia (lado izquierdo). Fuente Hoja de datos del fabricante. Expresión para la temperatura (lado derecho).

Las funciones de propósitos específicos que se utilizan permiten la comunicación entre el programa de aplicación utilizado con el microcontrolador y el módulo MAX31685. De manera que, el microcontrolador pueda, por ejemplo, leer un registro del módulo MAX o escribirlo. Para esto se crea un formato de comunicación dedicado que consiste en tres bytes, donde el primer byte indica recepción o transmisión, segundo dirección a cada módulo MAX y/o ambos y el tercer byte el número de la acción a realizar. Cada número implica desarrollar una acción correspondiente, en la Tabla 7.2 se describen la acción según el número.

| Número de la acción | Descripción de la acción | | |
|-------------------------|---|--|----------------------------------|
| 40 | Escribir en el registro High FaultThreshold MSB que está en la dirección 83h. Seguido a este se tiene colocar el valor a escribir. | | |
| 41 | Escribir en el registro LowFaultThresholdLSB de MAX31865 que está en la dirección 85h. Seguido a este se tiene colocar el valor a escribir. | | |
| 42 | Leer el registro de Configuración de MAX31865 que está en la dirección 00h. | | |
| 43 | Escribir la dirección 01h para leer los registros del sensor RTD MSB/LSB de MAX31865 | | |
| 44 | Escribir el registro Configuración de MAX31865 usando 80h (dirección para escribir este registro). Seguido a este se tiene colocar el valor a escribir. | | |
| Formato de comunicación | FE | 01 o 02 o 03 | Núm. de acción |
| | Byte Inicial de la trama transmitir | Direccionamiento del Módulo MAX1o Max2 o ambos | Cualquier de los núm. (40 al 44) |

Tabla 7.2: Descripción de cada acción según cada número.

Líneas de código en el programa MPLAB

A modo de referencia se adjunta parte del código:

-Del programa principal se muestra parte sobre funciones para la configuración USART, SPI y una función específica como la función escribir el registro de configuración.

```

/*****
//*****Programa principal inicio*****
unsigned int i;
Config1(); // Configuración de USART y mapeo de pines
printf("Prueba\n");
configSPI1(); //Configuro el módulo SPI

//*****Parte de las funciones de específicas *****
case 0x44: //escribir registro configuracióndel MAX 31865
CS1=0; // habilita chip select del MAX1
    __delay_us(1);
SPIwrite(0x80); // se escribe la dirección
SPIwrite(Valor); // se escribe el valor designado
CS1=1; //deshabilita chip select del MAX1
while(U1STAbits.TRMT ==0);
    U1TXREG=0xFE; //
while(U1STAbits.TRMT ==0); //espero buffer TX se encuentre vacio
    U1TXREG=0x01;//
while(U1STAbits.TRMT ==0); //espero buffer TX se encuentre vacio
U1TXREG=0x44; //
    break;
//*****Programa principal*****

/*****Configuration of SPI registers- inicio*****
void configSPI1()
{
    // Disable interrupt
    IFS2bits.SPI2IF = 0; // Clear the Interrupt flag
    IEC2bits.SPI2IE = 0; // Disable the interrupt
    CS1 = 1;
    CS2 = 1;
    //SPI1STAT register configuration
    SPI2STATbits.SPIEN = 0; //Clear SPI enable = 0 during configuration, set it after
    SPI2STATbits.SPISIDL = 0; // don't stop in idle mode
    SPI2STATbits.SPIROV = 0; //Clear Receive overflow flag bit
    //SPI1CON1 register configuration
    SPI2CON1bits.MSTEN = 1; //Master mode
    SPI2CON1bits.DISSCK = 0; //don't disable internal SPI clock
    SPI2CON1bits.DISSDO = 0; //don't disable SDO
    SPI2CON1bits.MODE16 = 0; //char wide transmission
    SPI2CON1bits.SMP = 0; //Input data is sampled at end of data output time
    SPI2CON1bits.CKE = 0; //Load data on low to high transition
    SPI2CON1bits.SSEN = 0; //Disable Slave Select
    SPI2CON1bits.CKP = 0; //Clock is active at high state, idle at low
    SPI2CON1bits.SPRE = 0b000; //Secondary Prescaler 8:1
    SPI2CON1bits.PPRE = 0b00; //Primary Prescaler 64:1
    SPI2STATbits.SPIEN = 1; //SPI enable = 1
    CS1 = 1;
    CS2 = 1; //Set Slave Select
} // Configuration of SPI registers- final
/*****Configuración de USART y mapeo de pines- inicio*****

```

```

void Config1(void)//
{
#define FCY 6000000UL
#define BAUDRATE 19200
#define BRGVAL ((FCY/BAUDRATE)/4) - 1 //con
// Configure Oscillator to operate the device at 60 MHz
// Fosc = Fin * M/(N1 * N2), Fcy = Fosc/2
// Fosc = 8M * 60/(2 * 2) = 60 MHz for 8M input clock
PLLFBD = 58;//78; // M = 60
CLKDIVbits.PLLPOST = 0; // N2 = 2
CLKDIVbits.PLLPRE = 0; // N1 = 2
OSCTUN = 0; // Tune FRC oscillator, if FRC is used
RCONbits.SWDTEN = 0; /* Disable Watch Dog Timer*/
__builtin_write_OSCCONH(0x03); // Initiate Clock Switch to Primary Oscillator with PLL (NOSC =
0b011)
__builtin_write_OSCCONL(0x01);
while(OSCCONbits.COSC != 0b011); // Wait for Clock switch to occur
while(OSCCONbits.LOCK != 1){}; // Wait for PLL to lock
ANSELA=0x0000; // Sin entradas analógicas
ANSELB=0x0000;
TRISBbits.TRISB0=0; // LED_1
//USART
TRISBbits.TRISB8 = 1; // RX
TRISBbits.TRISB7 = 0; // TX
//SPI
TRISBbits.TRISB4 = 0; //CS1
TRISBbits.TRISB2 = 0; //CS2
TRISBbits.TRISB5 = 0; //CLK
TRISBbits.TRISB6 = 0; //SDO
TRISBbits.TRISB3 = 1; //SDI
OSCCON = 0x46; // Command Sequence
OSCCON = 0x57;
OSCCONbits.IOLOCK = 0; // Peripheral pin select is not locked
RPOR2bits.RP39R=0b00001; // UART1_TX -> RP39 Pin16
RPINR18bits.U1RXR = 0b0101000; // UART_RX -> RP40 Pin17
// Set the PINs for SPI2
// Assign SCK2 to RP37 RB5, Pin 5 - OUTPUT
RPOR1bits.RP37R = 0b01001; //0b00111
// Assign SDI2 to RP35, Pin 3 - INPUT RB3
RPINR22bits.SDI2R = 0b100011;
// Assign SDO1 to RP38, SDO RB6 Pin 6 - OUTPUT
RPOR2bits.RP38R = 0b01000;//001000
// termina aca
OSCCON = 0x46; // Command Sequence
OSCCON = 0x57;
OSCCONbits.IOLOCK = 1;// Peripheral pin select is locked
// UART CONFIGURATION
U1MODEbits.PDSEL = 0b00;// 8-bit data, no parity
U1MODEbits.STSEL = 0; // One Stop bit
U1MODEbits.ABAUD = 0;// Auto-Baud DISABLED
U1MODEbits.BRGH = 1;// Low-speed mode
U1BRG = BRGVAL;// Valor inicial para XTPLL=86;
// Baud Rate - 115200 bps
U1MODEbits.USIDL = 0; // Continue module operation in Idle mode
U1MODEbits.IREN = 0;// IrDA® encoder and decoder disabled
U1MODEbits.WAKE = 0; // No wake-up enabled
U1MODEbits.LPBACK = 0;// Loopback mode is disabled
U1MODEbits.URXINV = 0;// U1RX Idle state is '1'
U1STAbits.UTXINV = 0;// UxTX Idle state is ?1?
U1STAbits.OERR = 0;// Clear Overrun Error

```

```

U1STAbits.ADDEN = 0;// Address Detect mode disabled
U1STAbits.UTXBRK = 0;// Sync Break transmission disabled or completed
U1STAbits.UTXISEL0 = 0;
U1STAbits.UTXISEL1 = 1;
IFS0bits.U1TXIF = 0;
IEC0bits.U1TXIE = 0;
U1STAbits.URXISEL = 0;
IFS0bits.U1RXIF = 0;// Limpio la bandera de la interrupción
IEC0bits.U1RXIE = 1;//Habilito la interrupción por recepción RX
U1MODEbits.UEN = 0;// UxTX and UxRX pins are enabled and used;
// UxCTS and UxRTS/BCLK pins controlled by port latches
U1MODEbits.UARTEN = 1;// UART1 is enabled
U1STAbits.UTXEN = 1;// Transmit Enabled
}
// Configuración de USART y mapeo de pines- final
/*****

```

7.2 Anexo B: Líneas de código en el programa de aplicación

A modo de referencia se muestra parte de la programación, el cual consiste en mostrar los valores de temperatura en la pantalla.

```

/*-----*/ Parte del programa
if (datoRX[1]== 0x03)// Sensor MAX1 y MAX2
{
switch(datoRX[2]) //Veo que número de acción llegó
{
case0x43:// leer registro de las resistencias
{
int temp1,temp2;
charstrgtxt [160]={0};
InstallComCallback (comport, 0, notifyCount, eventChar, 0, NULL);
RTD= datoRX[3]<<8;
temp1= RTD + datoRX[4] ;
temp1=temp1>>1; //Temp del Max1
Ohms[0]=(temp1 * 430.0)/32768;
Temp[0]=(Ohms[0]*2.6504) -267.98; // nueva función transferencia
SetCtrlVal (panelHandleChild3, PANEL_3_NUMERIC_11, Temp[0]);//muestra los valores en pantalla
}
}
}
/*-----*/

```

7.3 Anexo C: Instrucciones para el usuario

A continuación, se describe como comenzar la medición y la secuencia requerida.

| Paso | Descripción | Botón asociado / Figura ilustrativa |
|------|---|--|
| 1 | Configurar el puerto de conexión presionando el botón Puerto Serie indicar el Puerto COM y la velocidad de transmisión y luego el botón Abrir Puerto . Queda todo | Puerto Serie Abrir Puerto Indicador de Puerto |

| | | |
|---|---|--|
| | <p>en condiciones adecuadas si el Indicador de Puerto cambia a color rojo.</p> <p>Para dejar atrás esta pantalla se presiona el botón Salir.</p> | <p>Ver Figura 7.7 y Figura 7.8</p> <p>Salir</p> |
| 2 | <p>Ingresar al botón MAX31865, esto permite entrar a la pantalla que se observa en la Figura 7.9 y se configura los módulos MAX31865.</p> <p>Como la medición se realiza de forma automática, es decir, se configura una sola vez para cada módulo. En este caso, se procede a presionar el botón RTD AUT para cada MAX 1 y MAX 2, luego se presiona el botón salir.</p> <p>En esa pantalla se puede visualizar ya los valores en los cuadros Temperatura, presionando los botones Leer RTD. También se puede visualizar el registro Configuración del módulo MAX presionando los botones Leer Registros. Sin embargo, se propone salir de esta pantalla para visualizar los datos en formato gráfico, presionando botón Salir.</p> | <p>MAX31865</p> <p>Ver Figura 7.9</p> <p>RTD AUT</p> <p>Leer RTD</p> <p>Leer Registros</p> <p>Salir</p> |

Tabla 7.3: Pasos para observar los datos de humedad.

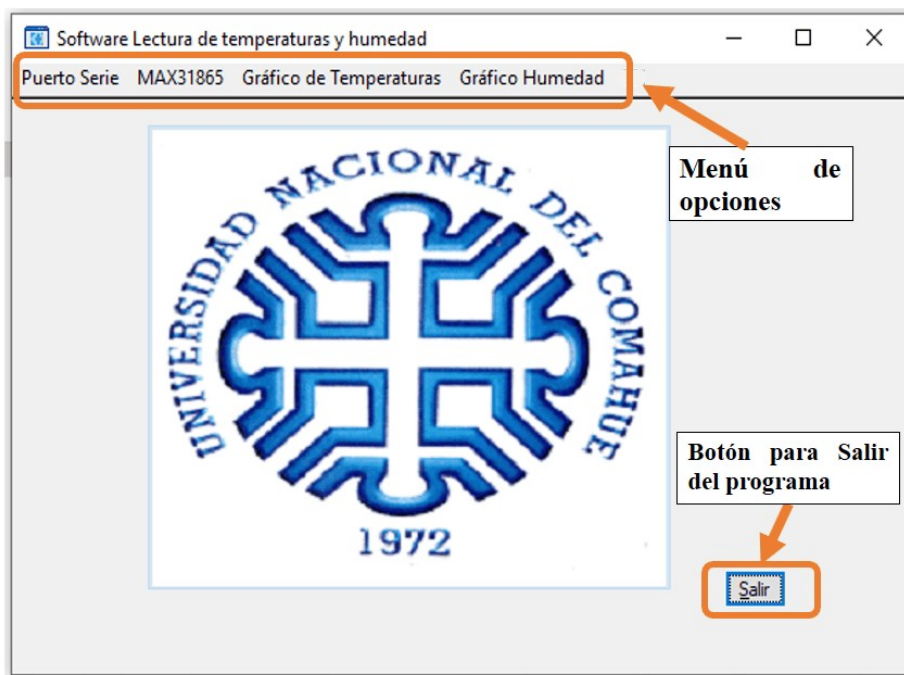


Figura 7.7: Imagen de pantalla principal del programa realizado.



Figura 7.8: Pantalla para configurar puerto de conexión

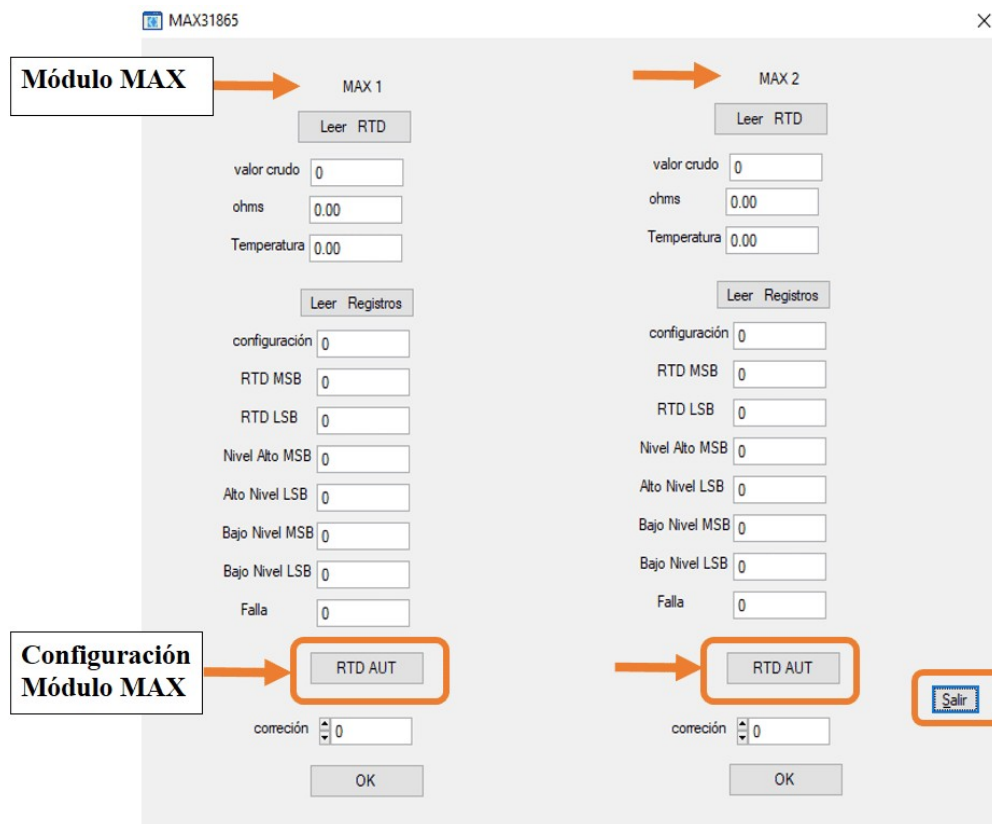


Figura 7.9: Pantalla para configurar módulos MAX31865.

| Paso | Descripción | Botón asociado / Figura ilustrativa |
|------|--|---|
| 3 | <p>Ingresar al botón Gráfico de Temperaturas esto permite visualizar un gráfico de temperatura de los sensores RTD. En la parte de abajo es necesario presionar el botón Leer para dar inicio al gráfico y también se muestran los valores en los cuadros Temperatura 1 y Temperatura 2, como se observa en la Figura 7.10.</p> | <p>Pantalla principal Ver Figura 7.7 y Figura 7.10 Gráfico de Temperaturas Leer Temperatura 1 y Temperatura 2 Salir</p> |
| 4 | <p>Ingresar al botón Gráfico Humedad esto permite visualizar un gráfico de temperatura de los sensores RTD y el valor de la humedad relativa. Aquí hay dos opciones:</p> <p>a- observar los gráficos y valores en pantalla y en ese caso presionar el botón Leer para que inicie el gráfico y observar los valores en los cuadros Temperatura1, Temperatura2 y Humedad.</p> <p>b- guardar los datos de las mediciones, presionar el botón Salvar y crear un archivo txt y luego presionar el botón Leer.</p> <p>El botón Parar es para que se frene las mediciones, el botón Limpiar Pantalla borra los valores del gráfico.</p> | <p>Pantalla principal Ver Figura 7.7 y Figura 7.11 Gráfico Humedad Leer Salvar Parar Limpiar Pantalla</p> |

Tabla 7.4: Continuación de la Tabla 7.3

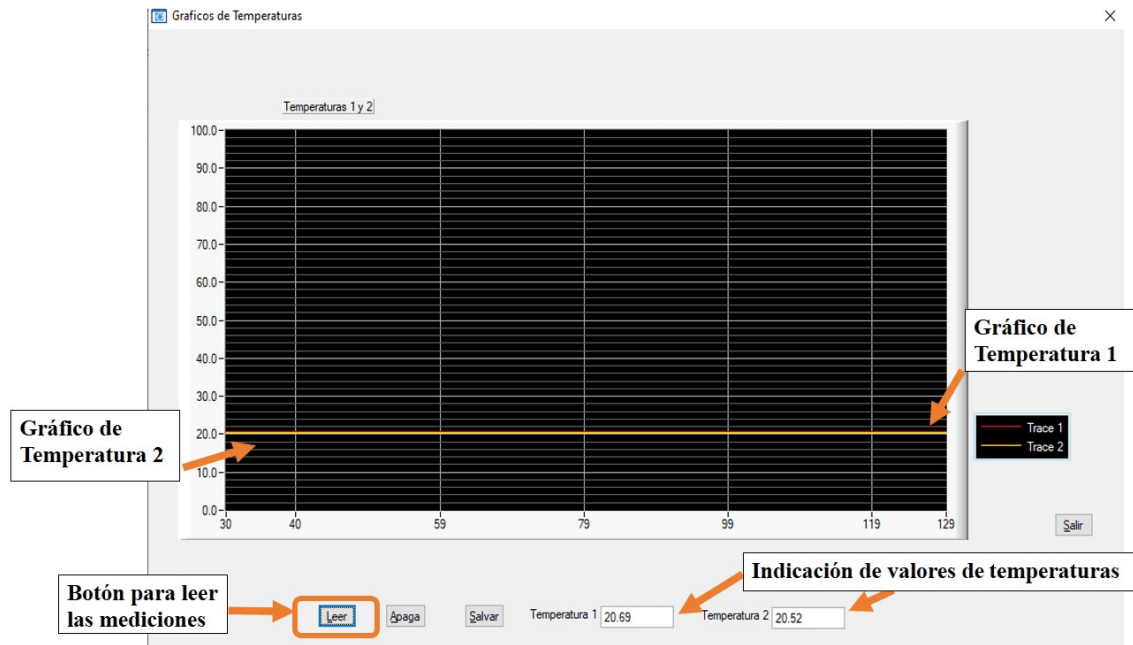


Figura 7.10: Pantalla de gráficos de temperatura

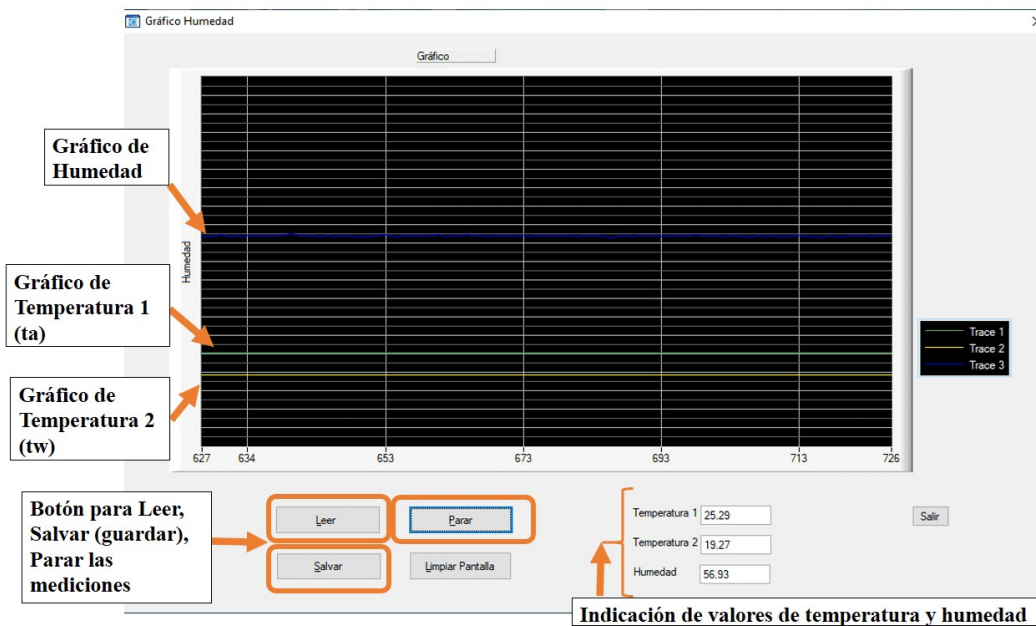


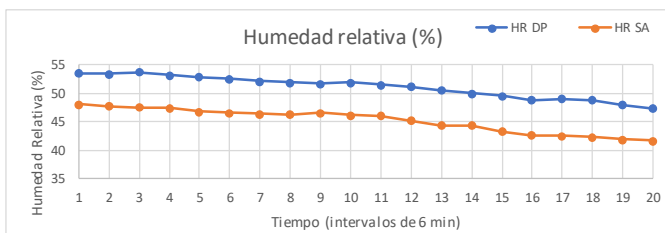
Figura 7.11: Pantalla de gráficos de temperaturas y humedad

7.4 Anexo D: Ensayo de verificación con sensor de humedad

El ensayo consiste en ubicar el dispositivo medidor de humedad junto al sensor AHT10 separado una distancia de 10 cm y contemplando un tiempo de estabilización de 15 minutos, luego de esto se registran los datos. En la Figura 7.12 y Figura 7.13 se muestran los resultados de dos ensayos uno de duración de 2 horas y el otro de 3 horas.

Turno 9:30 h a 12 h Hora de Inicio:10h a 12h Número de mediciones: 20

| Dispositivo psicrómetro AHT10 | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| Mediciones | ta | tw | HR DP | T | HR SA | Diferencia de HR % |
| 1 | 20,49 | 14,71 | 53,49 | 20,01 | 48,1 | 5,4 |
| 2 | 20,45 | 14,68 | 53,44 | 20,01 | 47,76 | 5,7 |
| 3 | 20,45 | 14,71 | 53,7 | 20,07 | 47,56 | 6,1 |
| 4 | 20,45 | 14,64 | 53,19 | 20,03 | 47,44 | 5,8 |
| 5 | 20,58 | 14,71 | 52,85 | 20,18 | 46,88 | 6,0 |
| 6 | 20,55 | 14,64 | 52,56 | 20,43 | 46,64 | 5,9 |
| 7 | 20,62 | 14,64 | 52,15 | 20,33 | 46,36 | 5,8 |
| 8 | 20,66 | 14,64 | 51,94 | 20,24 | 46,32 | 5,6 |
| 9 | 20,69 | 14,64 | 51,73 | 20,32 | 46,59 | 5,1 |
| 10 | 20,69 | 14,68 | 51,98 | 20,27 | 46,19 | 5,8 |
| 11 | 20,72 | 14,64 | 51,53 | 20,33 | 46,12 | 5,4 |
| 12 | 20,83 | 14,68 | 51,16 | 20,52 | 45,21 | 6,0 |
| 13 | 20,94 | 14,68 | 50,56 | 20,6 | 44,42 | 6,1 |
| 14 | 21,07 | 14,71 | 49,99 | 20,7 | 44,34 | 5,7 |
| 15 | 21,15 | 14,71 | 49,6 | 20,84 | 43,34 | 6,3 |
| 16 | 21,11 | 14,57 | 48,83 | 20,72 | 42,65 | 6,2 |
| 17 | 21,07 | 14,57 | 49,03 | 20,45 | 42,57 | 6,5 |
| 18 | 20,9 | 14,39 | 48,81 | 20,17 | 42,36 | 6,5 |
| 19 | 21,04 | 14,39 | 48,03 | 20,26 | 41,95 | 6,1 |
| 20 | 21,08 | 14,33 | 47,35 | 20,27 | 41,68 | 5,7 |
| Promedio de Dif HR | | | | | | 5,9 |



Referencias:

Dispositivo psicrométrico: dispositivo realizado en este proyecto

AHT10: sensor de humedad

Mediciones: número de mediciones realizadas

ta: temperatura seca del dispositivo psicrométrico

tw: temperatura húmeda del dispositivo psicrométrico

HR DP: humedad relativa del dispositivo psicrométrico

T: temperatura del sensor AHT10

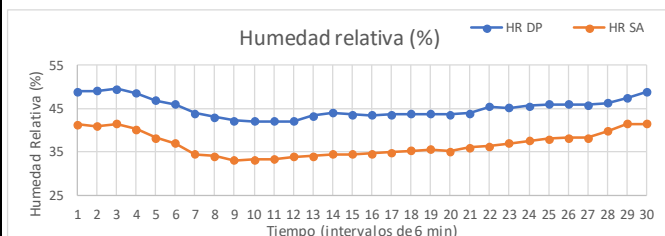
HR SA: humedad relativa del sensor AHT10

Diferencia de HR %: diferencia entre el valor de HR SA y HR DP

Figura 7.12: Muestra del ensayo de 2 horas, con los valores correspondientes y su gráfica.

Turno 18:30 h a 22 h Hora de Inicio:19 h a 22 h Número de mediciones: 30

| Dispositivo psicrómetro AHT10 | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| Mediciones | ta | tw | HR DP | T | HR SA | Diferencia de HR % |
| 1 | 22,05 | 15,37 | 49,03 | 21,42 | 41,33 | 7,7 |
| 2 | 21,94 | 15,3 | 49,14 | 21,34 | 41 | 8,1 |
| 3 | 21,88 | 15,3 | 49,52 | 21,33 | 41,55 | 8,5 |
| 4 | 21,88 | 15,16 | 48,59 | 21,22 | 40,21 | 7,0 |
| 5 | 21,77 | 14,81 | 46,83 | 21,15 | 38,3 | 6,6 |
| 6 | 21,66 | 14,61 | 45,99 | 21,08 | 37,09 | 7,7 |
| 7 | 21,46 | 14,12 | 43,87 | 20,85 | 34,47 | 6,8 |
| 8 | 21,36 | 13,91 | 43,03 | 20,77 | 34,08 | 8,6 |
| 9 | 21,25 | 13,71 | 42,19 | 20,62 | 33,11 | 8,1 |
| 10 | 21,32 | 13,88 | 42,08 | 20,78 | 33,15 | 9,0 |
| 11 | 21,49 | 13,88 | 42,08 | 20,81 | 33,37 | 8,9 |
| 12 | 21,39 | 13,81 | 42,16 | 20,79 | 33,87 | 8,8 |
| 13 | 21,39 | 13,98 | 43,31 | 20,84 | 34,11 | 9,4 |
| 14 | 21,25 | 13,98 | 44,05 | 20,75 | 34,52 | 9,9 |
| 15 | 21,29 | 13,95 | 43,63 | 20,76 | 34,45 | 9,1 |
| 16 | 21,22 | 13,88 | 43,54 | 20,62 | 34,69 | 9,1 |
| 17 | 21,29 | 13,95 | 43,63 | 20,7 | 34,93 | 8,9 |
| 18 | 21,21 | 13,92 | 43,77 | 20,66 | 35,35 | 8,8 |
| 19 | 21,25 | 13,95 | 43,82 | 20,66 | 35,68 | 8,5 |
| 20 | 21,28 | 13,95 | 43,63 | 20,67 | 35,17 | 8,0 |
| 21 | 21,29 | 13,98 | 43,86 | 20,68 | 36,01 | 8,7 |
| 22 | 21,32 | 14,26 | 45,54 | 20,7 | 36,38 | 9,5 |
| 23 | 21,42 | 14,3 | 45,21 | 20,73 | 36,99 | 8,8 |
| 24 | 21,39 | 14,33 | 45,64 | 20,79 | 37,61 | 8,7 |
| 25 | 21,39 | 14,4 | 46,1 | 20,77 | 38,05 | 8,5 |
| 26 | 21,49 | 14,47 | 46,01 | 20,9 | 38,27 | 8,0 |
| 27 | 21,56 | 14,5 | 45,86 | 21,01 | 38,28 | 7,6 |
| 28 | 21,56 | 14,57 | 46,33 | 21,07 | 39,78 | 8,1 |
| 29 | 21,7 | 14,85 | 47,44 | 21,13 | 41,46 | 7,7 |
| 30 | 21,67 | 15,02 | 48,81 | 21,14 | 41,52 | 7,4 |
| Promedio de Dif HR | | | | | | 8,3 |



Referencias:

Dispositivo psicrométrico: dispositivo realizado en este proyecto

AHT10: sensor de humedad

Mediciones: número de mediciones realizadas

ta: temperatura seca del dispositivo psicrométrico

tw: temperatura húmeda del dispositivo psicrométrico

HR DP: humedad relativa del dispositivo psicrométrico

T: temperatura del sensor AHT10

HR SA: humedad relativa del sensor AHT10

Diferencia de HR %: diferencia entre el valor de HR SA y HR DP

Figura 7.13: Muestra del ensayo de 3 horas, con los valores correspondientes y su gráfica.

Estimación de los valores de incertidumbre para los ensayos expuestos:

Para la estimación de los valores de incertidumbre se utiliza la ecuación (2.8) en la Figura 7.14 se muestra los valores para los ensayos mostrados anteriormente. Los valores de incertidumbre de los sensores se asumen como los valores de los errores del Reporte de Calibración emitido por el equipo Presys TN-25N a la temperatura de 20 °C. En las Figura 7.15 y Figura 7.16 se observa la imagen del Reporte de Calibración

| ta | tw | utasen sor | utwse nsor | pas(ta) | uta | utw | ucom | ta | tw | utasen sor | utwse nsor | pas(ta) | uta | utw | ucom |
|-------|-------|---------------|---------------|---------|----------|----------|------|-------|-------|---------------|---------------|---------|-------------------|----------|------|
| 20,49 | 14,71 | 1,39 | 0,15 | 2,41 | 0,001479 | 0,000017 | 3,87 | 22,05 | 15,37 | 1,39 | 0,15 | 2,65 | 0,001221 | 0,000014 | 3,52 |
| 20,45 | 14,68 | 1,39 | 0,15 | 2,41 | 0,001486 | 0,000017 | 3,88 | 21,94 | 15,3 | 1,39 | 0,15 | 2,64 | 0,001238 | 0,000014 | 3,54 |
| 20,45 | 14,71 | 1,39 | 0,15 | 2,41 | 0,001486 | 0,000017 | 3,88 | 21,88 | 15,3 | 1,39 | 0,15 | 2,63 | 0,001247 | 0,000015 | 3,55 |
| 20,45 | 14,64 | 1,39 | 0,15 | 2,41 | 0,001486 | 0,000017 | 3,88 | 21,88 | 15,16 | 1,39 | 0,15 | 2,63 | 0,001247 | 0,000015 | 3,55 |
| 20,58 | 14,71 | 1,39 | 0,15 | 2,42 | 0,001462 | 0,000017 | 3,85 | 21,77 | 14,81 | 1,39 | 0,15 | 2,61 | 0,001264 | 0,000015 | 3,58 |
| 20,55 | 14,64 | 1,39 | 0,15 | 2,42 | 0,001468 | 0,000017 | 3,85 | 21,66 | 14,61 | 1,39 | 0,15 | 2,59 | 0,001281 | 0,000015 | 3,60 |
| 20,62 | 14,64 | 1,39 | 0,15 | 2,43 | 0,001455 | 0,000017 | 3,84 | 21,46 | 14,12 | 1,39 | 0,15 | 2,56 | 0,001313 | 0,000015 | 3,64 |
| 20,66 | 14,64 | 1,39 | 0,15 | 2,44 | 0,001448 | 0,000017 | 3,83 | 21,36 | 13,91 | 1,39 | 0,15 | 2,54 | 0,001329 | 0,000015 | 3,67 |
| 20,69 | 14,64 | 1,39 | 0,15 | 2,44 | 0,001443 | 0,000017 | 3,82 | 21,25 | 13,71 | 1,39 | 0,15 | 2,53 | 0,001347 | 0,000016 | 3,69 |
| 20,69 | 14,68 | 1,39 | 0,15 | 2,44 | 0,001443 | 0,000017 | 3,82 | 21,32 | 13,88 | 1,39 | 0,15 | 2,54 | 0,001335 | 0,000016 | 3,68 |
| 20,72 | 14,64 | 1,39 | 0,15 | 2,45 | 0,001437 | 0,000017 | 3,81 | 21,49 | 13,88 | 1,39 | 0,15 | 2,56 | 0,001308 | 0,000015 | 3,64 |
| 20,83 | 14,68 | 1,39 | 0,15 | 2,46 | 0,001418 | 0,000017 | 3,79 | 21,39 | 13,81 | 1,39 | 0,15 | 2,55 | 0,001324 | 0,000015 | 3,66 |
| 20,94 | 14,68 | 1,39 | 0,15 | 2,48 | 0,001399 | 0,000016 | 3,76 | 21,39 | 13,98 | 1,39 | 0,15 | 2,55 | 0,001324 | 0,000015 | 3,66 |
| 21,07 | 14,71 | 1,39 | 0,15 | 2,50 | 0,001377 | 0,000016 | 3,73 | 21,25 | 13,98 | 1,39 | 0,15 | 2,53 | 0,001347 | 0,000016 | 3,69 |
| 21,15 | 14,71 | 1,39 | 0,15 | 2,51 | 0,001363 | 0,000016 | 3,71 | 21,29 | 13,95 | 1,39 | 0,15 | 2,53 | 0,001340 | 0,000016 | 3,68 |
| 21,11 | 14,57 | 1,39 | 0,15 | 2,50 | 0,001370 | 0,000016 | 3,72 | 21,22 | 13,88 | 1,39 | 0,15 | 2,52 | 0,001352 | 0,000016 | 3,70 |
| 21,07 | 14,57 | 1,39 | 0,15 | 2,50 | 0,001377 | 0,000016 | 3,73 | 21,29 | 13,95 | 1,39 | 0,15 | 2,53 | 0,001340 | 0,000016 | 3,68 |
| 20,9 | 14,39 | 1,39 | 0,15 | 2,47 | 0,001406 | 0,000016 | 3,77 | 21,21 | 13,92 | 1,39 | 0,15 | 2,52 | 0,001353 | 0,000016 | 3,70 |
| 21,04 | 14,39 | 1,39 | 0,15 | 2,49 | 0,001382 | 0,000016 | 3,74 | 21,25 | 13,95 | 1,39 | 0,15 | 2,53 | 0,001347 | 0,000016 | 3,69 |
| 21,08 | 14,33 | 1,39 | 0,15 | 2,50 | 0,001375 | 0,000016 | 3,73 | 21,28 | 13,95 | 1,39 | 0,15 | 2,53 | 0,001342 | 0,000016 | 3,68 |
| | | | | | | | | 21,29 | 13,98 | 1,39 | 0,15 | 2,53 | 0,001340 | 0,000016 | 3,68 |
| | | | | | | | | 21,32 | 14,26 | 1,39 | 0,15 | 2,54 | 0,001335 | 0,000016 | 3,68 |
| | | | | | | | | 21,42 | 14,3 | 1,39 | 0,15 | 2,55 | 0,001319 | 0,000015 | 3,65 |
| | | | | | | | | 21,39 | 14,33 | 1,39 | 0,15 | 2,55 | 0,001324 | 0,000015 | 3,66 |
| | | | | | | | | 21,39 | 14,4 | 1,39 | 0,15 | 2,55 | 0,001324 | 0,000015 | 3,66 |
| | | | | | | | | 21,49 | 14,47 | 1,39 | 0,15 | 2,56 | 0,001308 | 0,000015 | 3,64 |
| | | | | | | | | 21,56 | 14,5 | 1,39 | 0,15 | 2,57 | 0,001297 | 0,000015 | 3,62 |
| | | | | | | | | 21,56 | 14,57 | 1,39 | 0,15 | 2,57 | 0,001297 | 0,000015 | 3,62 |
| | | | | | | | | 21,7 | 14,85 | 1,39 | 0,15 | 2,60 | 0,001275 | 0,000015 | 3,59 |
| | | | | | | | | 21,67 | 15,02 | 1,39 | 0,15 | 2,59 | 0,001279 | 0,000015 | 3,60 |
| | | | | | | | | | | | | | Incertidumbre Máx | | 3,88 |

$$u_{HR} = \left[\left(-A * \frac{p}{p_{as}} * u_{ta} \right) + \left(A * \frac{p}{p_{as}} * u_{tw} \right)^2 \right]^{1/2} * 100\% \quad (2.7)$$

$A = 6,67 \times 10^{-4} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{) coeficiente psicrométrico}$

$p = 100 \text{ (kPa) presión atmosférica}$

Referencias:

ta: temperatura del aire del dispositivo psicrométrico

tw: temperatura húmeda del dispositivo psicrométrico

utasensor: incertidumbre del sensor de la temperatura ta

utwsensor: incertidumbre del sensor de la temperatura tw

pas(ta): presión parcial del vapor del agua de saturación determinada por ta

uta: incertidumbre debido a la componente de la temperatura ta

Figura 7.14: Muestra de los valores de incertidumbre para los dos ensayos anteriores.

REPORTE DE CALIBRACIÓN

| | | | | |
|---|-----------------|------------------------|------------|------------------|
| TAG: RTD01 | | MODELO: T001RTD01 | | |
| NÚMERO DE SERIE: RTD01 | | FABRICANTE: Selva Cruz | | |
| RANGO DE SALIDA -10 A 140 °C (RTD THREE) | | | | |
| RANGO DE ENTRADA: -10 A 140 °C | | | | |
| PATRÓN: | | | | |
| FABRICANTE | NÚMERO DE SERIE | MODELO | PRÓX. CAL. | NUM. DEL CERTIF. |
| PRESYS | 417.03.17 | TA-25N | ---- | ---- |

As-left realizado por: 01

| PUNTO | ESPERADO | OBTENIDO | ERROR | ER. SPAN | PASS/FAIL |
|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| -10.00 °C | -10.00 °C | -7.79 °C | 2.21 °C | 1.473% | Fail |
| 20.01 °C | 20.01 °C | 21.40 °C | 1.39 °C | 0.927% | Pass |
| 50.00 °C | 50.00 °C | 50.97 °C | 0.97 °C | 0.647% | Pass |
| 80.00 °C | 80.00 °C | 80.28 °C | 0.28 °C | 0.187% | Pass |
| 110.00 °C | 110.00 °C | 109.56 °C | -0.44 °C | -0.293% | Pass |
| 140.00 °C | 140.00 °C | 139.77 °C | -0.23 °C | -0.153% | Pass |
| 140.01 °C | 140.01 °C | 139.77 °C | -0.24 °C | -0.160% | Pass |
| 110.00 °C | 110.00 °C | 110.02 °C | 0.02 °C | 0.013% | Pass |
| 80.00 °C | 80.00 °C | 80.63 °C | 0.63 °C | 0.420% | Pass |
| 50.00 °C | 50.00 °C | 51.13 °C | 1.13 °C | 0.753% | Pass |
| 19.99 °C | 19.99 °C | 21.57 °C | 1.58 °C | 1.053% | Fail |
| -10.00 °C | -10.00 °C | -7.54 °C | 2.46 °C | 1.640% | Fail |

Figura 7.15: Imagen del Reporte de Calibración para el sensor RTD que indica la temperatura ta.

REPORTE DE CALIBRACIÓN

| | | | | |
|---|-----------------|------------------------|------------|------------------|
| TAG: T001RTD2 | | MODELO: T001RTD2 | | |
| NÚMERO DE SERIE: T001RTD2 | | FABRICANTE: Selva Cruz | | |
| RANGO DE SALIDA -10 A 140 °C (RTD THREE) | | | | |
| RANGO DE ENTRADA: -10 A 140 °C | | | | |
| PATRÓN: | | | | |
| FABRICANTE | NÚMERO DE SERIE | MODELO | PRÓX. CAL. | NUM. DEL CERTIF. |
| PRESYS | 417.03.17 | TA-25N | ---- | ---- |

As-left realizado por: 01

| PUNTO | ESPERADO | OBTENIDO | ERROR | ER. SPAN | PASS/FAIL |
|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| -10.00 °C | -10.00 °C | -9.58 °C | 0.42 °C | 0.280% | Pass |
| 20.01 °C | 20.01 °C | 19.86 °C | -0.15 °C | -0.100% | Pass |
| 50.00 °C | 50.00 °C | 49.44 °C | -0.56 °C | -0.373% | Pass |
| 80.00 °C | 80.00 °C | 79.14 °C | -0.86 °C | -0.573% | Pass |
| 110.00 °C | 110.00 °C | 108.44 °C | -1.56 °C | -1.040% | Fail |
| 140.00 °C | 140.00 °C | 138.45 °C | -1.55 °C | -1.033% | Fail |
| 140.00 °C | 140.00 °C | 138.46 °C | -1.54 °C | -1.027% | Fail |
| 110.00 °C | 110.00 °C | 108.76 °C | -1.24 °C | -0.827% | Pass |
| 80.00 °C | 80.00 °C | 79.05 °C | -0.95 °C | -0.633% | Pass |
| 50.00 °C | 50.00 °C | 49.45 °C | -0.55 °C | -0.367% | Pass |
| 20.02 °C | 20.02 °C | 19.96 °C | -0.06 °C | -0.040% | Pass |
| -10.00 °C | -10.00 °C | -9.17 °C | 0.83 °C | 0.553% | Pass |

Figura 7.16: Imagen del Reporte de Calibración para el sensor RTD que indica la temperatura tw