



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**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 DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

ALBUJA JARAMILLO LUCIANO MARTÍN
luciano.albuja@epn.edu.ec

ALMEIDA ANSASOY CARLOS ALEXIS
carlos.almeida@epn.edu.ec

DIRECTOR:
ING. ORTEGA LÓPEZ MIGUEL DARÍO, M.Sc.
miguel.ortega@epn.edu.ec

CODIRECTOR:
ING. ZÚÑIGA PUEBLA HUGO FRANCISCO, M.Sc.
hugo.zuniga@epn.edu.ec

Quito, marzo 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **LUCIANO MARTÍN ALBUJA JARAMILLO** y **CARLOS ALEXIS ALMEIDA ANSASOY**, bajo mi supervisión.

Ing. Miguel Ortega, M.Sc.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Hugo Zúñiga, M.Sc.
CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Luciano Martín Albuja Jaramillo y Carlos Alexis Almeida Ansoy**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Luciano Martín Albuja Jaramillo

Carlos Alexis Almeida Ansoy

DEDICATORIA

Luciano Albuja

Este trabajo lo dedico a mi familia que siempre está ahí cuando necesito un consejo y apoyo.

Carlos Almeida

A mi madre Gladys, ya que con todo su apoyo y cariño he llegado a culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mi papito Carlos, que desde el cielo sé que me apoya y me da fuerzas para luchar cada día.

A mis hermanos, Marlon y Jaider, que me han inspirado a ser mejor persona.

A mi hermano mayor Roberth, por ser la persona que me ha ayudado a cumplir este sueño tan grande.

A mi hijita Valentina, que ha sido mi fuerza y mi voluntad para lograr todo lo que me proponga con el fin de darle un mejor futuro.

A mi mujercita hermosa, Mayra, por ser la persona que ha compartido en toda mi etapa universitaria, me ha apoyado y brindado todo su amor.

A mis amigos y familiares que han sido participes con su apoyo y cariño en toda mi vida.

“Todos nuestros sueños pueden hacerse realidad si sólo tenemos el coraje de perseguirlos”

Walt Disney

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres que me brindaron la oportunidad de estudiar y alcanzar una meta más en mi vida. A mis hermanos por ser un apoyo y ser parte de este logro.

También agradezco al ingeniero Miguel Ortega por todo el apoyo y la guía en el transcurso de este proyecto, gracias por sus consejos, el resultado de este proyecto es excelente.

Y por último a Lisbeth Chuquimarca, gracias por el apoyo brindado en el transcurso de la carrera. Siempre hay nuevas cosas que aprender, nunca debes decaer en cualquier cosa que te propongas y por último siempre debes perseverar.

Luciano Albuja

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme otorgado la vida y la maravillosa familia que tengo, por guiarme cada día y brindarme la fuerza para salir siempre adelante.

A mi madre Gladys, ya que con sus valores y consejos he llegado a ser la gran persona que soy hoy en día. Por estar a mi lado en todos los momentos buenos y malos que hemos tenido, y seguir luchando por mantener siempre nuestra familia unida. Deseo que Diosito siempre le vida para que me vea cumplir muchas metas más.

A mi hermano Roberth, por ser, más que un hermano mayor, un padre que me ha brindado todo su apoyo para cumplir esta meta tan importante en mi vida. Sabes que te quiero mucho y gracias por todas tus palabras de apoyo.

A mi hija Valentina, que a pesar de que llego a mi vida cuando estaba muy joven, me ha enseñado a luchar cada día por ser un gran padre. Por brindarme todo su amor y hacerme sonreír cuando los días están más oscuros. Todo lo hago por ti, y para verte feliz toda la vida. Te amo mi pedacito de cielo.

A mi mujercita Mayra, por estar a mi lado en todo momento, por darme una hermosa hija y un gran amor. Gracias por apoyarme y ayudarme a culminar este trabajo. Te amo mucho.

A mis amigos de universidad, con los cuales he compartido buenos y malos momentos, pero siempre han estado ahí para brindarme todo su cariño. Con ustedes he formado una pequeña familia lejos de casa.

A Martín, ya que se ha convertido más que mi compañero de tesis, un amigo muy importante en mi vida, y principalmente un gran apoyo para culminar este trabajo.

Un agradecimiento especial al Ingeniero Miguel Ortega y al Ingeniero Hugo Zúñiga, ya que han compartido sus conocimientos, sus enseñanzas y han sido gran apoyo para la realización de este trabajo.

A todos mis familiares que han sido participes en el transcurso de mi vida. Los quiero mucho.

Carlos Almeida

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Psicometría	3
1.1.1. Cartas psicométricas.....	3
1.1.2. Humedad relativa (hr).....	4
1.1.3. Temperatura de bulbo seco (tbs).....	5
1.1.4. Temperatura de bulbo húmedo (tbh)	5
1.1.5. Temperatura de punto de rocío	6
1.2. Higrómetro	7
1.2.1. Higrómetros mecánicos (por deformación)	7
1.2.2. Higrómetros de bulbo seco y bulbo húmedo.....	8
1.2.3. Higrómetros por condensación	10
1.2.4. Higrómetros de absorción infrarroja.....	10
1.2.5. Higrómetros de sales higroscópicas	11
1.2.6. Higrómetro digital	12
1.3. Arduino y sensores.....	13
1.3.1. ¿Qué es Arduino?	13
1.3.2. Software	14
1.3.3. Tipos de placas Arduino	14
1.3.4. Sensores de humedad y temperatura.....	15
1.3.5. Sensores barométricos.....	17
1.4. Definiciones de error	19
1.5. Ajuste de curvas.....	20
1.5.1. Método numérico directo para ajuste de curvas	20
1.5.2. Herramientas matemáticas para ajuste de curvas	21
2. METODOLOGÍA.....	24

2.1. Verificación del estado de funcionamiento de los termómetros del psicrómetro de flujo continuo (Ps FC)	24
2.2. Verificación del comportamiento de varios higrómetros digitales comerciales a diferentes altitudes.....	25
2.3. Verificación del comportamiento del prototipo de higrómetro digital sin acondicionamiento de señal.....	26
2.3.1. Análisis de selección de materiales electrónicos	26
2.3.2. Materiales del higrómetro digital sin acondicionamiento de señal.....	27
2.3.3. Prototipo electrónico de higrómetro digital sin corrección	31
2.3.4. Análisis de las propiedades psicrométricas del aire con el prototipo de higrómetro digital sin acondicionamiento de señal.....	36
2.4. Análisis de alternativas para la corrección de altitud (A) y humedad relativa (HR) del prototipo sin corrección.....	37
2.4.1. Acondicionamiento y corrección de altitud.....	37
2.4.2. Acondicionamiento y corrección de valores de humedad relativa	40
2.4.3. Análisis de sensibilidad de la humedad relativa respecto a la temperatura de bulbo húmedo.....	42
2.4.4. Ecuación de corrección para los datos preliminares	45
2.5. Implementación de las alternativas de corrección y cálculos de psicrometría en el prototipo.....	52
2.5.1. Código de funcionamiento del higrómetro digital con corrección	53
2.6. Verificación del comportamiento del prototipo con acondicionamiento de señal de 0 a 3040 msnm.....	56
2.7. Higrómetro digital con acondicionamiento	56
2.7.1. Materiales y componentes.....	57
2.7.2. Características físicas y técnicas del higrómetro digital corregido	63
2.7.3. Uso del higrómetro digital fabricado	67
2.7.4. Costo de fabricación del higrómetro digital con corrección	69
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
3.1. Resultados	71
3.1.1. Programa para el cálculo de humedad relativa.....	71
3.1.2. Pruebas de higrómetros digitales comerciales a diferentes altitudes	71
3.1.3. Pruebas del higrómetro digital sin acondicionamiento de señal.....	77
3.1.4. Pruebas del higrómetro digital con acondicionamiento de señal.....	85
3.2. Discusión.....	88
3.2.1. Datos obtenidos con el higrómetro digital sin corrección	88
3.2.2. Datos de humedad relativa del aire analizadas en Tulcán (3040 msnm)	89
3.2.3. Selección de la ecuación adecuada para la corrección de temperatura de bulbo húmedo.....	91

3.2.4. Datos obtenidos con el higrómetro digital con corrección	92
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
4.1. Conclusiones.....	93
4.2. Recomendaciones.....	94
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	97

CONTENIDO DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1. Carta psicrométrica a temperaturas normales y presión barométrica de 101.325 kPa (al nivel del mar).	3
Figura 1.2. Líneas de humedad relativa.	5
Figura 1.3. Líneas de temperatura de bulbo seco.	5
Figura 1.4. Líneas de temperatura de bulbo húmedo.	6
Figura 1.5. Líneas de temperatura de punto de rocío.	6
Figura 1.6. Esquema de funcionamiento de higrómetros mecánicos.	7
Figura 1.7. Higrómetro de cabello humano, FIQ-EPN.	8
Figura 1.8. Esquema de funcionamiento de higrómetros de bulbo seco y bulbo húmedo.	9
Figura 1.9. Higrómetro de bulbo seco y bulbo húmedo (psicrómetro de flujo continuo) de la FIM-EPN.	9
Figura 1.10. Dispositivo empleado para encontrar el punto de rocío.	10
Figura 1.11. Higrómetro de absorción infrarroja.	11
Figura 1.12. Esquema de funcionamiento de un higrómetro de sales higroscópicas.	12
Figura 1.13. Higrómetros digitales del laboratorio de termodinámica de la FIM-EPN.	13
Figura 1.14. Placa Arduino uno básica.	13
Figura 1.15. Software utilizado por Arduino.	14
Figura 1.16. Tipos de placas Arduino.	15
Figura 1.17. Sensor DHT11 y sus pines de conexión.	16
Figura 1.18. Sensor DHT22 y sus pines de conexión.	17
Figura 1.19. Sensor BMP280 para Arduino.	18
Figura 1.20. Sensor BMP180 para Arduino.	19
Figura 1.21. Ajuste de curvas, regresión por mínimos cuadrados.	20
Figura 1.22. Ejemplos de interpolación polinomial: a) de primer grado (lineal) que une dos puntos, b) de segundo grado (cuadrática o parabólica) que une tres puntos y c) de tercer grado (cúbica) que une cuatro puntos.	21
Figura 1.23. Funciones de Excel interconstruidas relacionadas con el ajuste de datos por regresión.	22
Figura 1.24. Ajuste de un modelo logarítmico.	22
Figura 1.25. Algunas funciones de Matlab para implementar interpolación, regresión,	23
Figura 1.26. Ejemplo de ajuste polinomial realizado en Matlab. a. Se observa los valores interpolados linealmente. b. Ajuste polinomial de quinto grado.	23

Capítulo 2

Figura 2.1. Metodología del proyecto.	24
Figura 2.2. Higrómetros digitales utilizados en la toma de datos de este proyecto.	25
Figura 2.3. Sensor AM2302, estructura física.	28

Figura 2.4. Sensor BMP180 estado físico.....	28
Figura 2.5. Pantalla LCD 1602 forma física.....	29
Figura 2.6. Arduino uno forma física.	29
Figura 2.7. Agua desmineralizada.....	30
Figura 2.8. Ventilador 8x8.....	30
Figura 2.9. Cartón pluma.	31
Figura 2.10. Dimensiones de la caja fabricada de cartón pluma.	32
Figura 2.11. Caja de cartón pluma montada en psicrómetro de flujo continuo.	32
Figura 2.12. Ubicación de sensores para el prototipo inicial.....	33
Figura 2.13. Conexión de sensor DTH22 en placa Arduino uno.....	33
Figura 2.14. Conexión de sensor BMP180 en placa Arduino uno.	34
Figura 2.15. Conexiones para el prototipo de higrómetro digital.	34
Figura 2.16. Código para definir librería e inicio de encendido.....	35
Figura 2.17. Código de lectura de sensores.....	36
Figura 2.18. Gráfica de altitudes de referencia y experimentales, ecuación de corrección en altitud.....	39
Figura 2.19. Curva de humedad relativa real vs humedad relativa experimental (higrómetro fabricado).....	41
Figura 2.20. Programa de cálculo de Th.	41
Figura 2.21. Curva de temperatura de bulbo húmedo real vs temperatura de bulbo húmedo experimental (cálculo).....	42
Figura 2.22. Carta psicrométrica para una altitud de 2800 msnm a temperatura normal.	43
Figura 2.23. Ejemplo de cálculo de valores de humedad relativa variando la temperatura de bulbo húmedo.	44
Figura 2.24. Curvas de sensibilidad de humedad relativa por cada grado Celsius de temperatura de bulbo húmedo (%/°C).....	44
Figura 2.25. Gráfica de temperatura de bulbo húmedo real vs experimental, ecuación de corrección Excel.	45
Figura 2.26. Gráfico de ecuación de corrección de temperatura de bulbo húmedo utilizando Matlab.....	51
Figura 2.27. Gráfica de temperatura de bulbo húmedo real vs experimental, ecuación de corrección Matlab.	52
Figura 2.28. Código para la corrección y lectura de altitud.....	53
Figura 2.29. Código del valor de referencia de la temperatura de bulbo húmedo.....	53
Figura 2.30. Código para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo sin la corrección.	54
Figura 2.31. Código para corrección de la temperatura de bulbo húmedo y cálculo de la humedad relativa utilizando la temperatura corregida.....	54
Figura 2.32. Código para plasmar los valores corregidos y no corregidos en el higrómetro fabricado.....	55

Figura 2.33. Códigos mostrados en la pantalla lcd del higrómetro fabricado.....	55
Figura 2.34. Placa Arduino uno utilizada en el higrómetro digital con corrección.	57
Figura 2.35. a) Sensor DHT22 de humedad y temperatura b) Sensor barométrico BMP180.	58
Figura 2.36. Placas o shields de expansión.	58
Figura 2.37. Fuente de alimentación para Arduino uno, batería de 9 voltios.	59
Figura 2.38. Modelo 3D de la carcasa del higrómetro digital con corrección.	60
Figura 2.39. Pantalla LCD Nokia 5110 de Arduino.	62
Figura 2.40. Código elaborado para el encendido de la pantalla Nokia 5110.	63
Figura 2.41. Partes del higrómetro digital.....	63
Figura 2.42. Propiedades mostradas en la pantalla Nokia 5110 del higrómetro digital.	64
Figura 2.43. Parte posterior del higrómetro digital con corrección.....	65
Figura 2.44. Parte superior del higrómetro digital con corrección.....	65
Figura 2.45. Diagrama de flujo del funcionamiento del higrómetro digital fabricado.....	68
Figura 2.46. Metodología desarrollada en el proyecto.....	70

Capítulo 3

Figura 3.1. Hoja de presentación programa para el cálculo de humedad relativa.	71
Figura 3.2. Datos de humedad relativa de los higrómetros digitales (H1, H2 y H3), y psicrómetro de flujo continuo (2806msnm valores reales).	73
Figura 3.3. Datos de humedad relativa del higrómetro digital H4 y del psicrómetro de flujo continuo (2806msnm valores reales).	74
Figura 3.4. Datos de humedad relativa de los higrómetros digitales (H5 y H6), y psicrómetro de flujo continuo (2806msnm valores reales).	76
Figura 3.5. Datos de humedad relativa de higrómetros digitales (H1, H2, H3, H4), y las cartas psicrométricas (72 msnm valores reales).	76
Figura 3.6. Datos de humedad relativa real y experimental sin corrección en Atacames.	78
Figura 3.7. Datos de humedad relativa real y experimental sin acondicionamiento de señal en Santo Domingo.	79
Figura 3.8. Datos de humedad relativa real y experimental sin acondicionamiento en Rocafuerte.	80
Figura 3.9. Datos de humedad relativa real y experimental sin corrección en Quito Centro.	82
Figura 3.10. Datos de humedad relativa real y experimental sin corrección en Quito Sur.	83
Figura 3.11. Datos de humedad relativa real y experimental sin corrección en Tulcán.	84
Figura 3.12. Datos de humedad relativa real y experimental con corrección en Quito Centro.	86
Figura 3.13. Datos de humedad relativa real y experimental con corrección en Tulcán.	87
Figura 3.14. Datos mensuales de humedad relativa para la ciudad de Quito y Tulcán 2012-2014.	90

CONTENIDO DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1.1. Características técnicas de sensor DHT11.....	16
Tabla 1.2. Características técnicas de sensor DHT22.....	17
Tabla 1.3. Características técnicas del sensor BMP280.	18
Tabla 1.4. Características técnicas del sensor BMP180.	19

Capítulo 2

Tabla 2.1. Análisis de selección del microcontrolador Arduino.....	26
Tabla 2.2. Análisis de selección para sensores de humedad y temperatura.	27
Tabla 2.3. Análisis de selección para sensores de altitud.	27
Tabla 2.4. Localidades del Ecuador utilizadas para estudio de propiedades psicrométricas.	37
Tabla 2.5. Cálculo de error porcentual entre datos de altitud con Google Earth (altitud de referencia) y datos de altitud con GIS en msnm.....	38
Tabla 2.6. Tabla de datos corregidos mediante uso de Excel.	40
Tabla 2.7. Ejemplo de cálculo de humedad relativa variando la temperatura de bulbo húmedo.....	43
Tabla 2.8. Factores de la ecuación de corrección (4).....	46
Tabla 2.9. Resultados de los cálculos respectivos para la obtención de la ecuación de corrección.....	47
Tabla 2.10. Resultados de los cálculos para la verificación de la ecuación de corrección.	49
Tabla 2.11. Resultados del cálculo del coeficiente de determinación utilizando varios métodos.....	49
Tabla 2.12. Ecuaciones de Matlab con error promedio en humedad relativa	50
Tabla 2.13. Factores de ecuación de corrección 16.	50
Tabla 2.14. Significado de los códigos mostrados junto al valor de humedad relativa en el higrómetro digital construido.	56
Tabla 2.15. Análisis de selección para el proceso de fabricación de la carcasa del higrómetro digital.	61
Tabla 2.16. Análisis de selección para los materiales de la impresión 3D.....	62
Tabla 2.17. Funcionamiento de los botones del higrómetro digital con corrección.	64
Tabla 2.18. Características técnicas del higrómetro digital con corrección.....	66
Tabla 2.19. Tabla de costos de fabricación del prototipo e higrómetro digital con corrección.	69

Capítulo 3

Tabla 3.1. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H1 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).	72
--	----

Tabla 3.2. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H2 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).	72
Tabla 3.3. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H3 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).	73
Tabla 3.4. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H4 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).	74
Tabla 3.5. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H5 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).	75
Tabla 3.6. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H6 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).	75
Tabla 3.7. Errores porcentuales de humedad relativa de los higrómetros digitales estudiados a 72msnm.....	77
Tabla 3.8. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital construido sin corrección en la ciudad de Atacames (nivel del mar).	78
Tabla 3.9. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Santo Domingo (586 msnm).	79
Tabla 3.10. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Rocafuerte (950 msnm).	80
Tabla 3.11. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Quito Centro (2804 msnm).	81
Tabla 3.12. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Quito Sur (2951 msnm).	82
Tabla 3.13. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Tulcán (3046 msnm).	83
Tabla 3.14. Datos de altitudes de referencia y altitudes obtenidas con el higrómetro digital sin corrección en diferentes localidades del Ecuador.....	84
Tabla 3.15. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital con corrección en la ciudad Quito (2804 msnm).	85
Tabla 3.16. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital corregido en la ciudad de Tulcán (2804 msnm).	86
Tabla 3.17. Datos de altitudes de referencia y altitudes obtenidas con el higrómetro digital con corrección en diferentes localidades del Ecuador.....	87
Tabla 3.18. Resultados del cálculo de error porcentual promedio de humedad relativa con las tres ecuaciones de corrección.	88
Tabla 3.19. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección la ciudad de Tulcán (3046 msnm).	90

RESUMEN

En el presente trabajo se fabrica un higrómetro digital con bajo error porcentual en el valor de humedad relativa, independiente de la altitud (0 a 3000 msnm) utilizando sensores existentes en el mercado ecuatoriano. Se realizan diferentes verificaciones y análisis en varias localidades del Ecuador, suponiendo como base de este trabajo que el error de humedad relativa varia únicamente con la altitud. A pesar de esta suposición se encuentra que la temperatura de bulbo húmedo es la principal propiedad que define la corrección sobre las mediciones. Los resultados de este análisis muestran que el prototipo de higrómetro digital fabricado sin corrección presenta un error porcentual promedio en humedad relativa de 2% a nivel del mar y de 13% a 2800 msnm. Con los datos experimentales de temperatura de bulbo seco y humedad relativa medidos con el higrómetro digital fabricado sin corrección a una altitud definida, se determina la temperatura de bulbo húmedo sin corrección. Una ecuación, independiente de la altitud permite modificar esta temperatura y obtener la temperatura de bulbo húmedo corregida. Los valores de humedad relativa se corrigen con los datos de temperatura de bulbo húmedo corregidos. Cabe indicar que la altitud definida se encuentra a partir de una corrección sobre el dato de altitud medida. Los datos reales referenciales se obtienen con un psicrómetro de flujo continuo y un programa para el cálculo de humedad relativa desarrollado por los proponentes. Los resultados de los valores con corrección muestran una disminución en el error porcentual promedio de humedad relativa de 7% a 2800 msnm. El equipo fabricado permite observar los valores con y sin corrección en una pantalla Nokia lcd 5110, contiene un microcontrolador programable (Arduino uno) y está cubierto por una carcasa de PLA fabricada con el método de impresión 3D.

Palabras clave: Higrómetro, higrómetro digital, humedad relativa, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco.

ABSTRACT

In the present work a digital hygrometer is manufactured reaching, independent of the altitude (0 to 3000 meters above sea level), low percentage error in the relative humidity value, and using existing sensors in the Ecuadorian market. Some verifications and analysis are carried out in several locations in Ecuador assuming, as a basis for this work, that the relative humidity error varies only with altitude. Despite this assumption it is found that the wet bulb temperature is the principal property that defines the appropriate date correction. The results of this analysis show that the prototype digital hygrometer manufactured without correction shows an average percentage error in relative humidity of 2% at sea level and 13% at 2,800 meters above sea level. The wet bulb temperature without correction is determined directly from the dry bulb temperature and relative humidity sensors, it is, from the manufactured hygrometer without correction at a given altitude. A correction equation, independent of altitude, is applied to this temperature, getting the corrected wet bulb temperature. By using the corrected wet bulb temperature and psychrometric equation, the corrected relative humidity is obtained. It should be noted that the given altitude comes from a correction over the measured altitude. Real reference data are obtained with a continuous flow psychrometer and a specific computer program, developed by the authors, for the calculation of relative humidity. The results of the corrected values show a decrease in the average percentage error of relative humidity of 7% at 2800 meters above sea level. The manufactured equipment allows to observe the values with and without correction on a Nokia lcd 5110 screen, contains a programmed microcontroller (Arduino uno) and is covered by a PLA housing manufactured with the 3D printing method.

Keywords: Hygrometer, digital hygrometer, relative humidity, wet bulb temperature, dry bulb temperature.

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.

INTRODUCCIÓN

Las mediciones de los valores de humedad relativa en los últimos años han estado directamente relacionadas con la facilidad de medición, siendo el higrómetro digital el dispositivo de mayor uso para obtener estos valores [1]. Estos medidores al no tener un análisis correspondiente al cambio de altitudes, es decir desde el lugar que fueron fabricados hasta lugares con una altitud superiores a los 1000 msnm, presentan errores en su respectiva medición. Por lo tanto, confiar únicamente en el valor marcado no es muy conveniente, si se desea realizar procesos de producción sensibles al cambio de humedad relativa.

En la actualidad el uso de la humedad relativa en diversos procesos industriales y científicos es de mucha utilidad, debido a que una medición errónea en estos valores afecta indirectamente a la salud de las personas. La característica principal de los higrómetros digitales es obtener los valores de humedad relativa y temperatura ambiente de una manera rápida reduciendo los tiempos de búsqueda de variables que afecten a cualquier proceso, industrial o científico.

Uno de los objetivos de este trabajo es obtener un higrómetro digital que relacione la altitud con la humedad relativa, mediante la utilización de un microcontrolador programable de software abierto con sensores de humedad, temperatura y altitud. El higrómetro fabricado debe presentar un margen de error promedio porcentual bajo en humedad relativa en comparación a otros higrómetros existentes en el mercado ecuatoriano.

Para que el higrómetro digital fabricado presente un bajo margen de error se realiza una corrección al valor de altitud del sensor BMP180, y otra corrección indirecta a la humedad relativa (corrección a la temperatura de bulbo húmedo experimental en función de la real). De esta manera el higrómetro fabricado realiza mediciones con un bajo error porcentual en los valores de humedad relativa para altitudes de hasta 3000 msnm. El higrómetro digital fabricado será propiedad del Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional (FIM-EPN).

Objetivo general

Diseñar y construir un higrómetro digital para altitudes de hasta 3000 msnm para el laboratorio de Termodinámica FIM-EPN.

Objetivos específicos

- Fabricar un higrómetro digital sin acondicionamiento de señal con sensores existentes en el mercado.
- Analizar las propiedades psicrométricas del aire con el dispositivo no acondicionado a diferentes altitudes.
- Realizar el acondicionamiento de señales del higrómetro ya fabricado.
- Analizar las propiedades psicrométricas del aire con el dispositivo corregido a diferentes altitudes.
- Obtener un higrómetro digital corregido y probado con un acabado similar a los instrumentos de carácter comercial.

1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo aborda de manera general los conceptos relacionados con el estudio de las propiedades psicrométricas del aire y los diferentes tipos de higrómetros más utilizados. También se explica los sensores de humedad relativa, temperatura y altitud disponibles en el mercado ecuatoriano que trabajan con la plataforma Arduino.

1.1. Psicrometría

La psicrometría se define como la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire real (aire con contenido de humedad), así como también el efecto que causa la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano. [2]

1.1.1. Cartas psicrométricas

Las cartas psicrométricas son diagramas de doble entrada en las cuales se relacionan varias propiedades del aire, como la humedad relativa, punto de rocío, temperatura, volumen específico, etc. Se utilizan para estudiar el cambio de dichas propiedades termodinámicas con variación de humedad. [3]

Las propiedades especificadas en las cartas psicrométricas se presentan normalmente a la presión atmosférica estándar ($P = 1 \text{ atm}$) [4]. Sin embargo, pocos autores las han desarrollado a presiones menores a la atmosférica, es decir, en lugares de mayor altitud [5]. En la Figura 1.1, se muestra la carta psicrométrica para nivel del mar, es decir a una presión barométrica igual a 101,325 kPa.

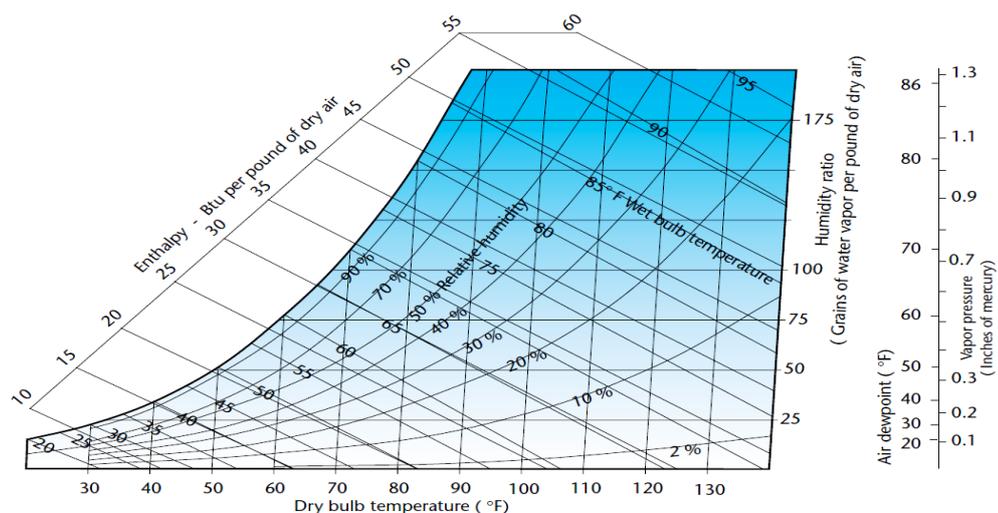


Figura 1.1. Carta psicrométrica a temperaturas normales y presión barométrica de 101.325 kPa (al nivel del mar).

(Fuente: [6])

En una carta psicrométrica se encuentran varias propiedades del aire, a una presión o altitud específica. Las propiedades de mayor importancia para este trabajo son las siguientes:

- Humedad relativa (*hr*).
- Temperatura de bulbo seco (*tbs*).
- Temperatura de bulbo húmedo (*tbh*).
- Temperatura de punto de rocío (*pr*).

1.1.2. Humedad relativa (hr)

Para entender el concepto de humedad relativa, es necesario conocer el significado de humedad absoluta y humedad específica, ya que se estas propiedades se relacionan entre sí.

a) Humedad específica

La humedad específica es la relación entre la masa de vapor de agua contenida en el aire húmedo y la masa total (aire seco y vapor de agua). [2]

b) Humedad absoluta

La humedad absoluta es la masa de vapor de agua por unidad de volumen, es decir, la densidad de vapor de agua. [2]

Por lo tanto, la humedad relativa es la relación entre la presión parcial del vapor de agua contenido en una muestra de aire a la presión y temperatura del punto de rocío, y la presión de agua saturada a la presión y temperatura de bulbo seco. En otras palabras, es la relación entre el contenido de agua de una mezcla respecto al contenido de agua en saturación de la misma mezcla en iguales condiciones de presión y temperatura, este valor es expresado en porcentaje (%) [4].

En las cartas psicrométricas la humedad relativa se muestra con líneas curvas con tendencia creciente de izquierda a derecha, manteniendo siempre un valor constante. Tal como se muestra en la Figura 1.2.

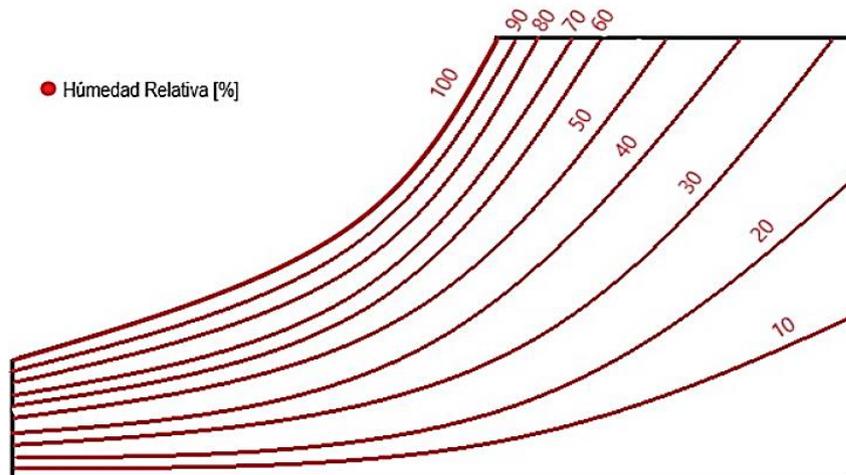


Figura 1.2. Líneas de humedad relativa.

(Fuente: Propia)

1.1.3. Temperatura de bulbo seco (tbs)

Es la temperatura de la mezcla (aire seco y vapor de agua) medida con un termómetro a condiciones atmosféricas propias del lugar, se conoce como temperatura ambiental. [2]

En las cartas psicrométricas la temperatura de bulbo seco se ubica de manera vertical desde la parte inferior hasta la parte superior, manteniendo siempre un valor constante. Tal como se muestra en la Figura 1.3.

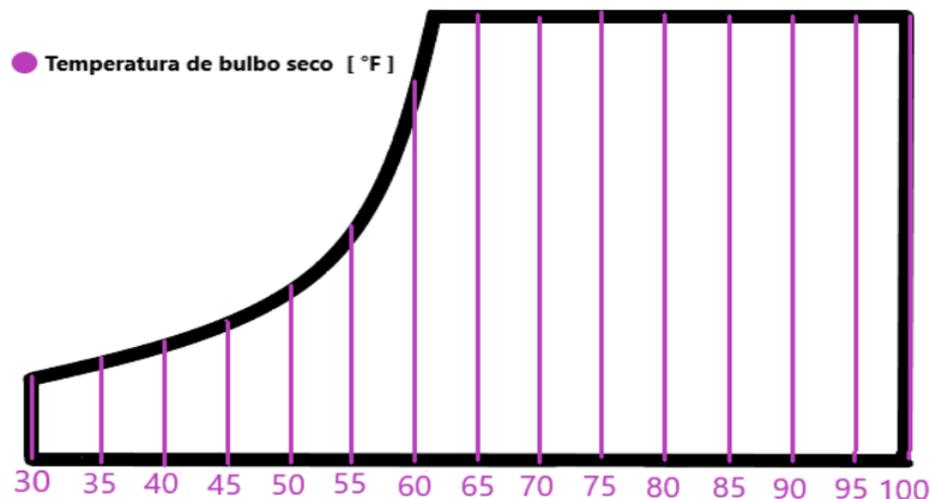


Figura 1.3. Líneas de temperatura de bulbo seco.

(Fuente: Propia)

1.1.4. Temperatura de bulbo húmedo (tbh)

Es la temperatura de saturación adiabática, es decir la temperatura cuando el aire está saturado. Para obtener esta temperatura se utiliza un termómetro ordinario en el cual el

bulbo se encuentra cubierto por un material higroscópico húmedo, con el fin de medir la energía que se desprende por la evaporación del agua (proceso adiabático). [7]

En las cartas psicrométricas la temperatura de bulbo húmedo se ubica de manera inclinada desde la línea curva de saturación hasta la parte inferior, manteniendo siempre un valor constante. Tal como se muestra en la Figura 1.4.

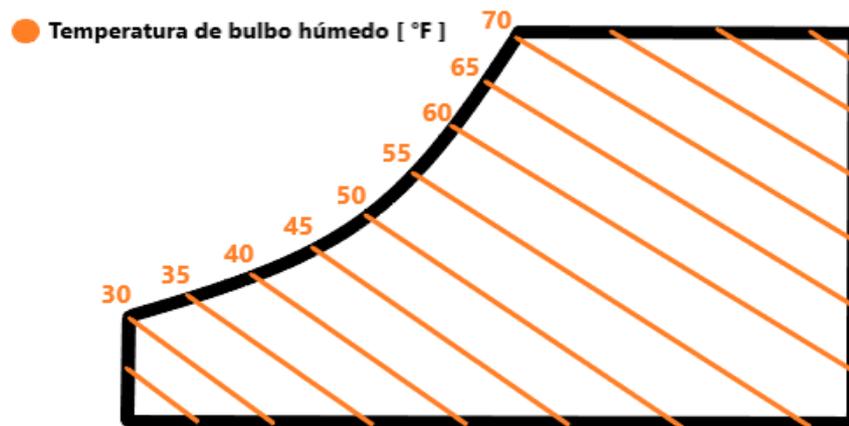


Figura 1.4. Líneas de temperatura de bulbo húmedo.

(Fuente: Propia)

1.1.5. Temperatura de punto de rocío

Es la temperatura en la cual el vapor agua contenido en la mezcla saturada (aire seco y vapor de agua) empieza a condensar. [3]

En las cartas psicrométricas la temperatura del punto de rocío se muestra con líneas horizontales de izquierda a derecha, manteniendo siempre un valor constante. Tal como se muestra en la Figura 1.5.

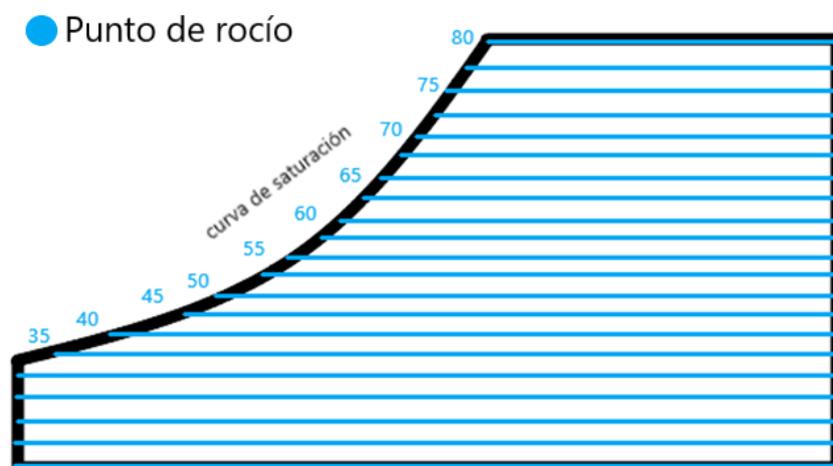


Figura 1.5. Líneas de temperatura de punto de rocío.

(Fuente: Propia)

1.2. Higrómetro

Es un instrumento que mide valores de humedad relativa y temperatura de bulbo seco en el ambiente, su aplicación depende de la altitud en la cual se realice las mediciones [8]. Existen diferentes tipos de higrómetros o sensores de humedad relativa, de los cuales se presentan los más importantes:

1.2.1. Higrómetros mecánicos (por deformación)

Este dispositivo mide la humedad relativa del aire utilizando fibras orgánicas, como por ejemplo cabello humano. Las fibras presentan alta sensibilidad con respecto a la cantidad de agua presente en el aire, por lo cual, si la cantidad de agua en el aire aumenta, estas fibras tienden a alargarse o aumentar de tamaño, y viceversa, si la cantidad de agua en el aire disminuye tienden a acortarse [8].

Para encontrar la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco, los higrómetros utilizan elementos mecánicos y escalas graduadas diseñadas para las diferentes altitudes sobre el nivel del mar. Los mecanismos utilizados no deben presentar mayor complicación en su funcionamiento y deben resistir ambientes corrosivos. El principio de funcionamiento utilizado en los higrómetros mecánicos se muestra en la Figura 1.6.

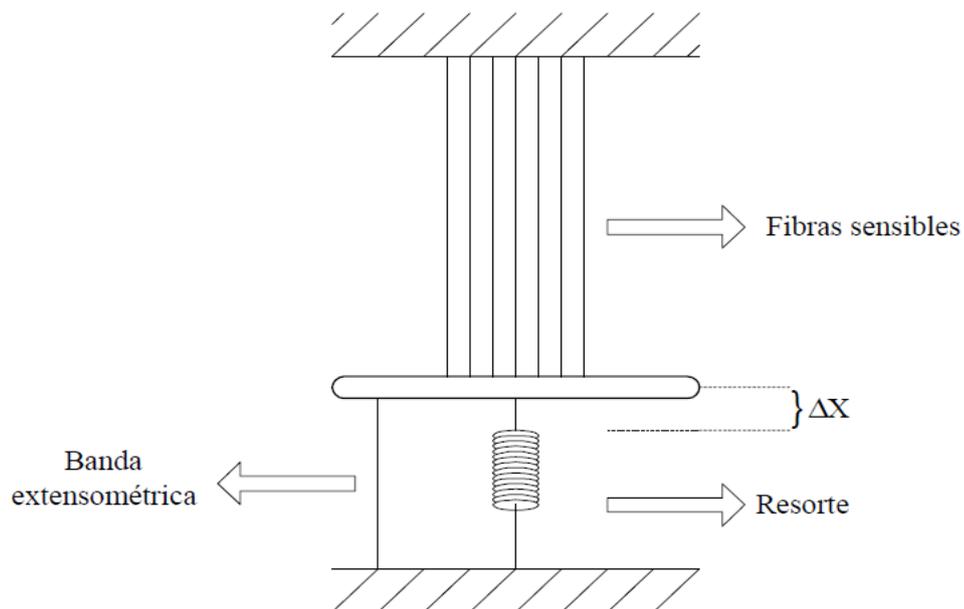


Figura 1.6. Esquema de funcionamiento de higrómetros mecánicos.

(Fuente: [8])

Estos higrómetros tienen un error en su medición de hasta 3% según los datos del fabricante, trabajan en rangos de temperaturas de entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedades relativas entre 15% y 95% [8].

En la Figura 1.7 se observa un higrómetro mecánico que utiliza cabello humano de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional (FIQ-EPN). Este higrómetro utiliza un papel que presenta escalas de tiempo, humedad relativa y temperatura de bulbo seco.

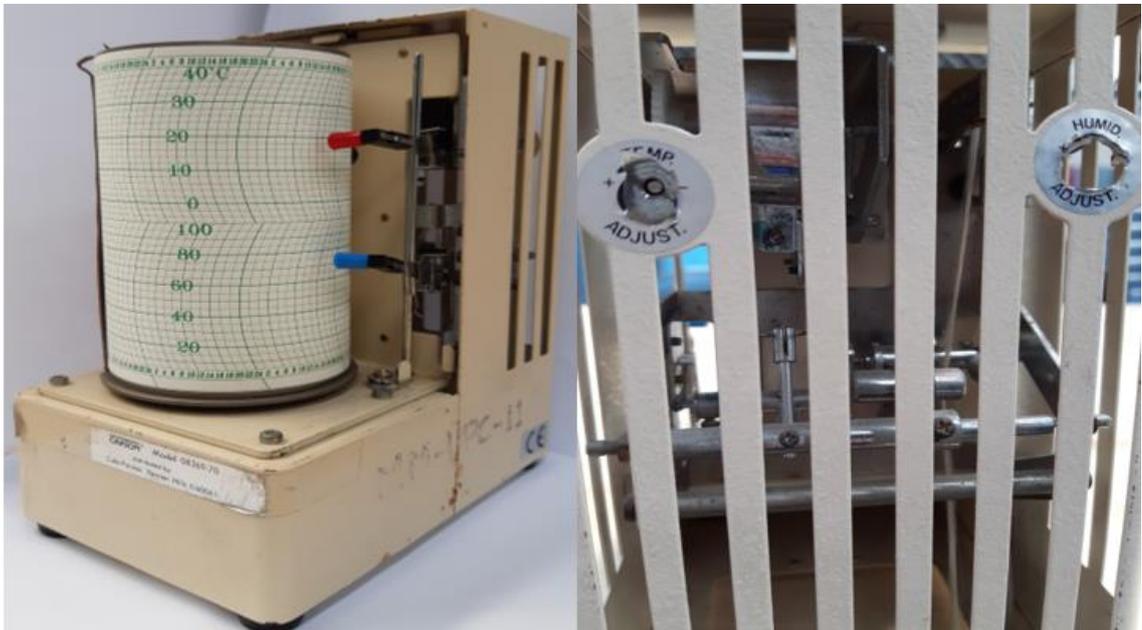


Figura 1.7. Higrómetro de cabello humano, FIQ-EPN.

(Fuente: Propia)

1.2.2. Higrómetros de bulbo seco y bulbo húmedo

Consiste en la utilización de dos termómetros con las mismas escalas y características, de los cuales uno determina la temperatura del medio (temperatura de bulbo seco) y el otro mide la temperatura de evaporación adiabática de agua presente en la superficie (temperatura de bulbo húmedo) ya que se encuentra en contacto con agua desmineralizada mediante la utilización de un material absorbente (algodón). Cuando ya se tiene las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo se recurre a las cartas psicrométricas para determinar principalmente la humedad relativa que se encuentra presente en el ambiente, y determinar si es el caso, las demás propiedades del aire [8].

Los higrómetros de bulbo seco y bulbo húmedo han ido mejorando ya que no se utiliza termómetros comunes, sino se ha optado por utilizar termocuplas o termo-resistencias que calculan la temperatura con alta tasa de confiabilidad. De igual manera, para la temperatura de bulbo húmedo ya no se utiliza algodones o mechas comunes porque se llenan de polvo y no absorben adecuadamente el agua, por lo cual, se está utilizando materiales cerámicos porosos que se encuentran en contacto con el agua y por el fenómeno de capilaridad siempre humedecen al termopar [8].

En la Figura 1.8 se observa el fenómeno empleado por estos higrómetros:

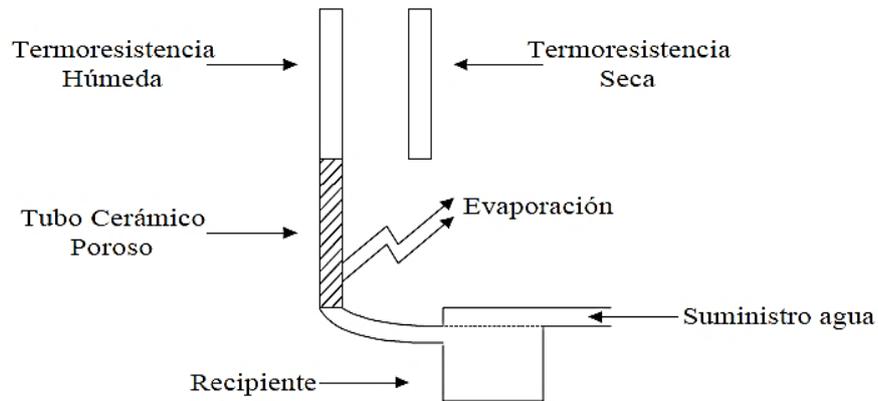


Figura 1.8. Esquema de funcionamiento de higrómetros de bulbo seco y bulbo húmedo.
(Fuente: [8])

Los higrómetros de bulbo seco y bulbo húmedo son capaces de determinar la humedad relativa del ambiente en un rango de 10% a 90% y en temperaturas de entre 0 °C a 90 °C. La humedad calculada tiene un porcentaje de 0.5% de error, por lo cual estos higrómetros son utilizados para calibración de otros equipos. [8]

En la Figura 1.9 se visualiza un higrómetro de bulbo seco y bulbo húmedo (psicrómetro de flujo continuo) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional (FIM-EPN), y ha sido base para la realización de este trabajo.



Figura 1.9. Higrómetro de bulbo seco y bulbo húmedo (psicrómetro de flujo continuo) de la FIM-EPN.

(Fuente: Propia)

1.2.3. Higrómetros por condensación

Estos tipos de higrómetros utilizan como base fundamental el punto de rocío para calcular la humedad relativa del ambiente. Para esto se utiliza una cámara compuesta por una resistencia calefactora, un espejo, un equipo de refrigeración, una fuente luminosa y dos foto-resistencias, en la cual circula una mezcla gaseosa de aire que humedece el espejo y con la utilización de los demás componentes se logra temperar su superficie hasta llegar al punto de rocío. Luego, se mide la temperatura en que se encuentra y utilizando ecuaciones y cartas psicrométricas se determina el valor de la humedad relativa [8].

En la Figura 1.10 se observa el funcionamiento que utiliza la cámara para encontrar el punto de rocío del ambiente y así determinar la humedad relativa del mismo.

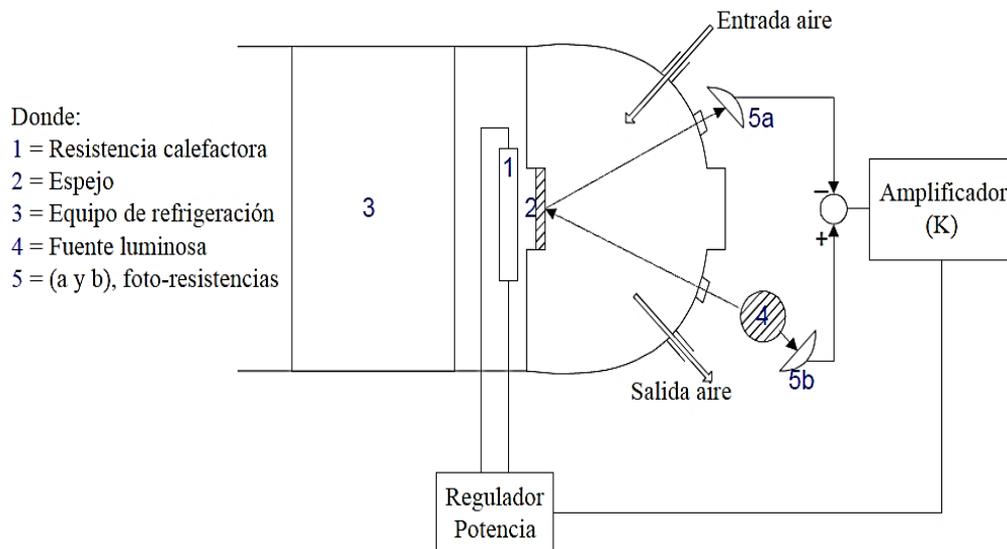


Figura 1.10. Dispositivo empleado para encontrar el punto de rocío.

(Fuente: [8])

Este dispositivo trabaja en rangos de entre $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para encontrar el valor del punto de rocío, y presenta un error de 0.5% igual que el higrómetro de bulbo seco y bulbo húmedo, según el fabricante [8].

1.2.4. Higrómetros de absorción infrarroja

Estos higrómetros utilizan radiación infrarroja para detectar la humedad de ciertos materiales, ya que el agua es capaz de absorber de manera eficiente dicha radiación, es decir, entre más humedad contenga el material más radiación absorberá.

Para determinar la humedad relativa el higrómetro produce un haz de luz infrarroja sobre el material sólido y con la ayuda de una fotocélula se mide la energía reflejada en 2 longitudes de onda. La intensidad de estas dos señales se compara utilizando circuitos

electrónicos obteniéndose una variación que es directamente proporcional a la cantidad de agua que presenta el material. [9]

La Figura 1.11 muestra un higrómetro de absorción infrarroja, utilizado para determinar la humedad presente en ciertos materiales sólidos.



Figura 1.11. Higrómetro de absorción infrarroja.

(Fuente: [6])

Las longitudes de onda que ayudan a determinar la humedad son diferentes para cada material, por lo que utilizando este equipo para una sola aplicación ayudaría que los sensores estén siempre calibrados [9].

1.2.5. Higrómetros de sales higroscópicas

Este higrómetro utiliza como principio de funcionamiento sales higroscópicas por ejemplo cloruro de Litio. Estas sustancias tienen la capacidad de absorber agua presente en el ambiente o en diferentes materiales.

Estos dispositivos están compuestos por un tubo metálico, el cual se encuentra enrollado de tejidos como la fibra de vidrio que a su vez están en contacto con las sales higroscópicas saturadas (cloruro de litio y agua). Mediante la utilización de dos hilos de oro que se envuelven en el tejido de fibra de vidrio y una resistencia limitadora de corriente, se genera una disipación de potencia que evapora el agua salina. Gracias a este fenómeno la temperatura que se obtiene se dispersa por todo el tubo metálico, en donde utilizando una termo-resistencia de platino se conoce su valor. Este valor de temperatura es proporcional a la temperatura de punto de rocío, por lo cual con la ayuda de las cartas psicrométricas se determina la humedad relativa.

En la Figura 1.12 se observa el esquema de funcionamiento que utiliza este higrómetro para encontrar la humedad del ambiente.

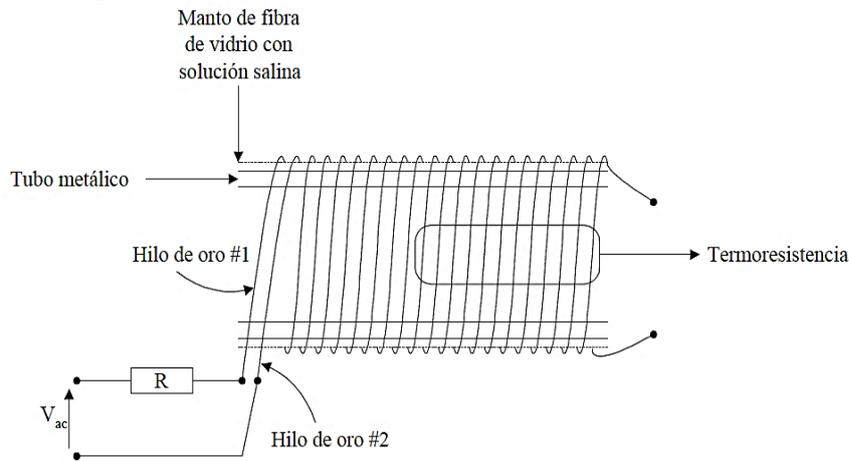


Figura 1.12. Esquema de funcionamiento de un higrómetro de sales higroscópicas.

(Fuente: [8])

Este dispositivo es capaz de medir temperaturas de rocío de entre 0°C a 90°C obteniendo humedades relativas de 15% a 100%. Todos los valores encontrados tienen un margen de error de hasta 0.5% según el fabricante, por lo que se los utiliza mucho en industrias donde se necesita controlar el ambiente para sus diferentes procesos de trabajo. [8]

1.2.6. Higrómetro digital

En la actualidad, se han desarrollado diferentes técnicas de medición de humedad en el ambiente. Los higrómetros digitales son los dispositivos de mayor tecnología, ya que son capaces de medir la humedad relativa en rangos de 10% a 99% en diferentes ambientes con un margen de error de $\pm 5\%$ según los fabricantes. Estos higrómetros se utilizan por diferentes industrias a nivel mundial para controlar la humedad relativa ya que son pequeños y fáciles de instalar. También, pueden medir temperaturas en decimas de grado y guardarlas en memorias internas. [8]

El porcentaje de error de estos higrómetros se cumple únicamente en altitudes de hasta 1000 msnm, ya que, al tomar datos en altitudes mayores, el error aumenta considerablemente. Este análisis se evidencia con más detalle en la sección 2.1 de este documento.

En el laboratorio de termodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional se encuentran dos higrómetros digitales de la marca AMPROVE. Estos dispositivos son capaces de medir la humedad relativa en rangos de entre 10% a 99% en condiciones ambientales de -20°C a 60°C , con errores de hasta $\pm 5\%$ según los fabricantes. Cabe mencionar que el fabricante no considera la presión atmosférica en la información de especificaciones técnicas. Estos higrómetros son utilizados para diferentes

aplicaciones dentro del laboratorio y principalmente para la realización de prácticas y tesis. En la Figura 1.13 se observa los higrómetros mencionados.



Figura 1.13. Higrómetros digitales del laboratorio de termodinámica de la FIM-EPN.

(Fuente: Propia)

El principal problema que lleva al desarrollo de este trabajo es que los higrómetros digitales comerciales no presentan un análisis con relación al cambio de altitud, lo que lleva a una incertidumbre en los valores que se obtienen con estos dispositivos.

1.3. Arduino y sensores

1.3.1. ¿Qué es Arduino?

Es una plataforma de software libre que consta de un microcontrolador re-programable instalada en una placa electrónica. Esta placa contiene entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales las cuales sirven para realizar diferentes conexiones entres sensores y actuadores de manera sencilla [10]. En la Figura 1.14 se observa un Arduino uno, el cual es la placa más sencilla de manipular y trabajar, ya que tiene gran variedad de carpetas y programas de toda la familia Arduino.

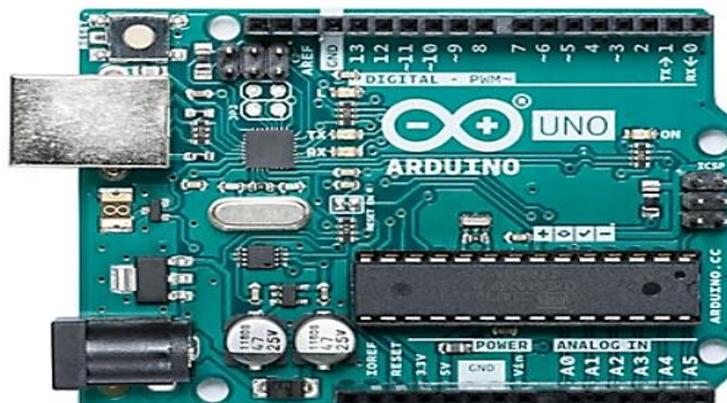


Figura 1.14. Placa Arduino uno básica.

(Fuente: [10])

Estas placas electrónicas utilizadas por Arduino son “Placas de Circuito Impreso” o por sus siglas en ingles PCB (Printed Circuit Board), es decir consta de una serie de circuitos electrónicos internos, que facilitan al usuario el desarrollo de diferentes aplicaciones sin tener que preocuparse de las conexiones del microcontrolador.

1.3.2. Software

El software de Arduino es un “Entorno de Desarrollo Integrado” o por sus siglas en ingles IDE (Integrated Development Environment), es decir es un conjunto de herramientas útiles para programación incorporadas en un programa informático [10].

El IDE de Arduino contiene varias aplicaciones de programación las cuales se han desarrollado en un solo programa, este programa contiene:

- Un editor de Código.
- Un depurador.
- Un compilador.
- Constructor de interfaz gráfica (GUI).

Además, contiene herramientas que facilitan cargar el programa desde el software a la memoria del hardware. En la Figura 1.15 se observa el software utilizado por Arduino.



Figura 1.15. Software utilizado por Arduino.

(Fuente: Propia)

1.3.3. Tipos de placas Arduino

Existen varios modelos de placas Arduino, todos diseñados para diferentes aplicaciones y con características variadas (número de entradas y salidas, tamaño físico, modelo del microcontrolador). A pesar de que tienen diferentes características, comparten cosas en común por ejemplo librerías, documentación ya que los microcontroladores son de la misma familia (Microcontroladores AVR marca Atmel) [10]. En la Figura 1.16 se observa los diferentes tipos de placas Arduino que existen:

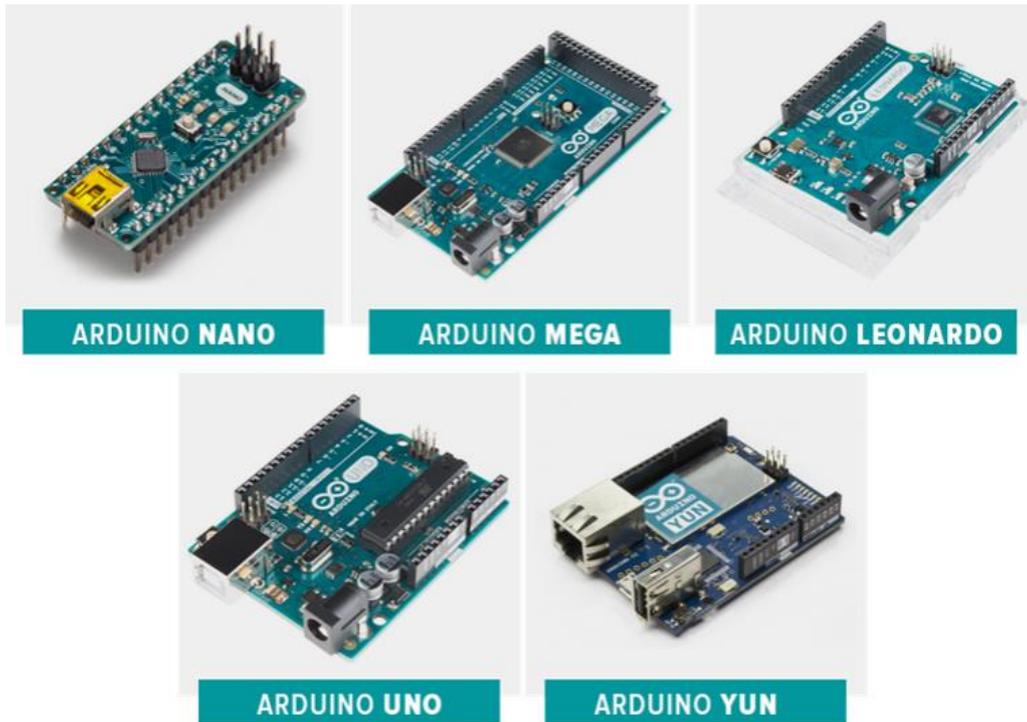


Figura 1.16. Tipos de placas Arduino.

(Fuente: [10])

De las placas Arduino anteriormente mencionadas la utilizada en el desarrollo de este trabajo es la placa Arduino uno, las especificaciones técnicas se observan en el ANEXO IV.

1.3.4. Sensores de humedad y temperatura

Existen varios sensores de humedad y temperatura que trabajan en conjunto con Arduino, pero los más utilizados son los sensores DHT11 y DHT22. Estos sensores brindan resultados óptimos y de manera sencilla, además son fáciles de encontrar en el mercado ecuatoriano. Están compuestos internamente por un sensor de humedad capacitivo y un termistor, contiene un circuito integrado el cual tiene la función de convertir los valores analógicos a digitales, ver ANEXO I.

a) Sensor DHT11

Estos sensores están calibrados y aseguran alta confiabilidad en sus resultados, siempre y cuando no sean utilizados a altitudes superiores a los 1000 msnm, ya que a estas altitudes presentan varios errores en sus mediciones. Están compuestos por un microcontrolador de 8 bits integrado el cual brinda resultados instantáneos. En la Tabla 1.1 se encuentran las características técnicas de funcionamiento según los fabricantes y en la Figura 1.17 se observa el sensor DHT11 con sus pines de conexión.

Tabla 1.1. Características técnicas de sensor DHT11

Alimentación (DC)	3,3 V a 5 V
Corriente máxima	2,5 mA
Precisión de Humedad	+/- 5%
Precisión de Temperatura	+/- 2°C
Rango de Humedad	20% a 90%
Rango de Temperatura	0°C a 50°C
Velocidad de muestreo	1Hz
Dimensiones (mm)	15,5 x 12 x 5,5

(Fuente: [11])

A pesar de que cuenta con buenas características de funcionamiento y es económico, tiene como desventaja que las mediciones resultantes son enteras, es decir no muestra decimales, debido que su resolución es de 1°C para temperatura y 1% para humedad relativa.



Figura 1.17. Sensor DHT11 y sus pines de conexión.

(Fuente: [11])

b) Sensor DHT22

Estos sensores al igual que el sensor DHT11 presenta gran confiabilidad y estabilidad en la recolección de datos de humedad y temperatura, pero de igual manera hasta altitudes no mayores de 1000 msnm. El sensor de humedad capacitivo y el termistor se encuentran conectados a un microcontrolador de 8 bits y los valores resultantes son digitales. En la Tabla 1.2 se observa las características técnicas dadas por el fabricante y en la Figura 1.18 el sensor DHT22 con sus respectivos pines de conexión.

Tabla 1.2. Características técnicas de sensor DHT22.

Alimentación (DC)	3,3 V a 5 V
Corriente máxima	2,5 mA
Precisión de Humedad	+/- 5%
Precisión de Temperatura	+/- 0,5°C
Rango de Humedad	0% a 100%
Rango de Temperatura	-40°C a 125°C
Velocidad de muestreo	0,5Hz
Dimensiones (mm)	15,1 x 25 x 7,7

(Fuente: [11])

De acuerdo con estas características, este sensor es más preciso que el sensor DHT11, además, cuenta con un mayor rango de medición. Principalmente este sensor es utilizado con mayor frecuencia porque cuenta con una resolución en su medición de 0,1 para humedad relativa y temperatura, es decir, los resultados finales contienen decimales, lo que hace que sean más precisos.

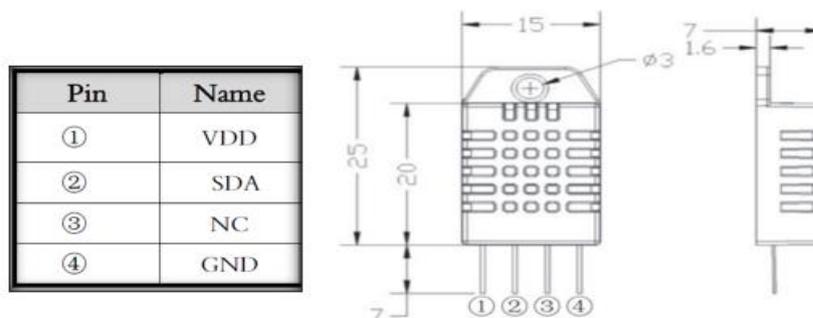


Figura 1.18. Sensor DHT22 y sus pines de conexión.

(Fuente: [11])

1.3.5. Sensores barométricos

Los sensores barométricos se basan en la tecnología avanzada de los sensores de presión piezoresistivas de Bosh, tienen alta precisión y buena estabilidad en la toma de datos. Existen gran variedad de sensores, de los cuales los más funcionales y que trabajan eficientemente con Arduino son el BMP280 y BMP180, además, se los encuentra fácilmente en el mercado ecuatoriano.

a) Sensor BMP280

Es un sensor de presión barométrica digital, el cual se caracteriza por su alta precisión en el cálculo de presión y altitud (no mayores a 1000 msnm), además este sensor es capaz de medir la temperatura ambiente y la humedad relativa. Esta diseñado principalmente para trabajos móviles debido a que es pequeño y tiene bajo consumo de energía. En la Tabla 1.3 se observan varias características técnicas y en la Figura 1.19 se encuentra el sensor con sus pines de conexión.

Tabla 1.3. Características técnicas del sensor BMP280.

Alimentación (DC)	3,65 V a 6 V
Precisión en altitud	+/- 1 m
Precisión de presión	+/- 0,12 hPa
Rango de presión	300-1100 hPa
Precisión de humedad	+/- 3%
Rango de temperatura	-40°C a 85°C
Precisión de temperatura	+/- 1 °C

(Fuente: [11])

A pesar de que cuenta con varias características buenas de funcionamiento su costo es elevado y como se ha mencionado anteriormente los valores de precisión que muestra el fabricante son únicamente para localidades con altitudes no mayores a 1000 msnm.



Figura 1.19. Sensor BMP280 para Arduino.

(Fuente: [10])

b) Sensor BMP180

Es un sensor de presión barométrica digital, el cual se usa principalmente como altímetro ya que es capaz de medir la presión atmosférica en función de la altura en la que se encuentre, además de la temperatura ambiente. En la Tabla 1.4 se observan varias las características técnicas.

Tabla 1.4. Características técnicas del sensor BMP180.

Alimentación (DC)	3,65 V a 6 V
Precisión en altitud	+/- 0,1 m
Precisión de presión	+/- 0,01 hPa
Rango de presión	300-1100 hPa
Rango de temperatura	-40°C a 85°C
Precisión de temperatura	+/- 2 °C

(Fuente: [11])

Este sensor también consta de un regulador de 3.3V incorporado que permite un correcto funcionamiento a partir de una fuente de 5 V, también consta de un sistema de Ultra-bajo consumo de energía (0.5uA a 1 Hz). En la Figura 1.20 se observa el sensor con sus pines de conexión.

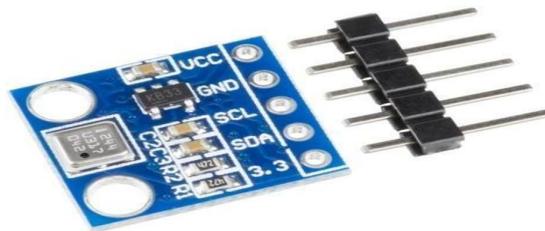


Figura 1.20. Sensor BMP180 para Arduino.

(Fuente: [10])

1.4. Definiciones de error

Los errores surgen debido al uso de aproximaciones de operaciones matemáticas exactas. Estos errores son de truncamiento (representan resultados matemáticos exactos con el uso de aproximaciones) y de redondeo (aproximar valores con un límite de cifras significativas a un valor exacto) [12]. Para estos se presentan dos clasificaciones para cálculos matemáticos.

a) Error Absoluto

Es la diferencia entre el valor real y el valor experimental.

$$\text{Error Absoluto} = \text{Valor Real} - \text{Valor Experimental}$$

b) Error Relativo

Es la relación entre el error absoluto y el valor real.

$$\text{Error Relativo} = \frac{\text{Error Absoluto}}{\text{Valor Real}}$$

Este error relativo se puede multiplicar por 100% para expresarlo como porcentaje y se denota como error porcentual.

$$\text{Error Relativo Porcentual} = \frac{\text{Error Absoluto}}{\text{Valor Real}} * 100\%$$

1.5. Ajuste de curvas

El ajuste de curvas consiste en obtener una función matemática $f(x)$ a partir de N número de puntos, con el fin de que esta función sea más simple para ajustar dichos valores. En este trabajo se utilizan dos maneras para ajustar las curvas, la primera utilizando los métodos numéricos directamente y la segunda utilizando herramientas matemáticas que tienen la rutina del método numérico para el ajuste de curvas, estos son:

1.5.1. Método numérico directo para ajuste de curvas

a) Regresión por mínimos cuadrados

La regresión por mínimos cuadrados se utiliza cuando se tiene un grado significativo de error en los valores obtenidos, con el fin de encontrar una sola curva que represente la tendencia de los datos graficados [12]. En la Figura 1.21 se observa un ejemplo de regresión lineal por mínimos cuadrados.

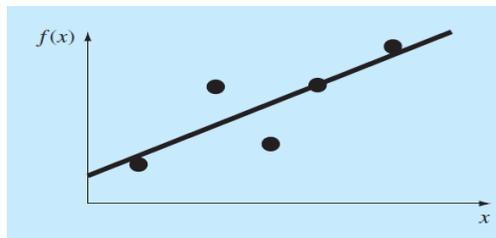


Figura 1.21. Ajuste de curvas, regresión por mínimos cuadrados.

(Fuente: [12])

La aproximación por mínimos cuadrados más simple que se utiliza es ajustar a los puntos obtenidos en una línea recta, para lo cual se tiene la siguiente ecuación:

$$y = a_0 + a_1x + e$$

Donde a_0 y a_1 son coeficientes que representan la intersección con el eje y y e representa el error entre los valores reales y los experimentales. Para ajustar de mejor manera la línea se minimiza la suma de los errores de los datos [12].

Con los valores calculados se procede a realizar una validación o cuantificación del error para la regresión lineal. Se calcula el valor de r que representa el coeficiente de correlación, es decir, si este coeficiente se acerca a 1 garantiza que los datos de la ecuación son adecuados, mientras que si se acercan a 0 la ecuación encontrada es ineficiente y el ajuste no sería válido.

b) Interpolación

Este método se utiliza cuando los valores graficados aseguran un porcentaje de error pequeño, es decir que son muy precisos, con lo cual se grafica una curva que pase por todos los puntos de forma directa [12]. El procedimiento más adecuado es la interpolación polinomial, es decir hallar un polinomio de grado n que se ajuste al número de puntos de la gráfica, en la Figura 1.22 se observa una imagen con varios ejemplos de interpolación polinomial.

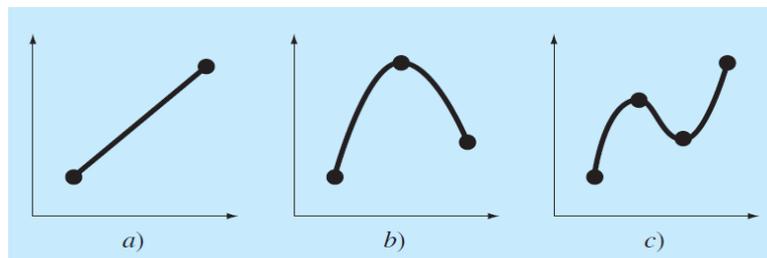


Figura 1.22. Ejemplos de interpolación polinomial: a) de primer grado (lineal) que une dos puntos, b) de segundo grado (cuadrática o parabólica) que une tres puntos y c) de tercer grado (cúbica) que une cuatro puntos.

(Fuente: [12])

1.5.2. Herramientas matemáticas para ajuste de curvas

Estos programas utilizan las ecuaciones del método manual, por lo cual existen varias bibliotecas y paquetes de software que ayudan con el ajuste de curvas, de los cuales los más utilizados son el Excel y el Matlab.

a) Excel

Excel es una hoja de cálculo fabricada por Microsoft Inc. Es un tipo de software matemático computarizado que permiten realizar operaciones en renglones y columnas de datos. Cuenta con varias funciones numéricas interconstruidas para resolver ecuaciones, ajustes

de curvas y optimización. Además, incluye un lenguaje macro (VBA) para realizar cálculos numéricos y consta de herramientas para la visualización de gráficos, diagramas con los cuales se complementan los análisis numéricos [12].

Excel brinda varias funciones para el ajuste curvas, de las cuales la función más útil es el análisis de regresión por mínimos cuadrados, además existen varias funciones interconstruidas para el método de regresión, las cuales se las observa en la Figura 1.23.

Función	Descripción
FORECAST	Da un valor junto con una tendencia lineal
GROWTH	Da valores junto con una tendencia exponencial
INTERCEPT	Da la intersección de la recta de regresión lineal
LINEST	Da los parámetros de una tendencia lineal
LOGEST	Da los parámetros de una tendencia exponencial
SLOPE	Da la pendiente de la recta de regresión lineal
TREND	Da valores junto con una tendencia lineal

Figura 1.23. Funciones de Excel interconstruidas relacionadas con el ajuste de datos por regresión.

(Fuente: [12])

A parte de las funciones interconstruidas existen comandos muy utilizados para el ajuste de curvas, los más utilizados son el Trendline y el Data Analysis Toolpack. Estos comandos permiten obtener varias tendencias en una gráfica, pueden ser ajustes polinomiales, logarítmicos, exponenciales, y de potencia [12].

En la Figura 1.24 se observa un ejemplo de ajuste por regresión con un modelo logarítmico.

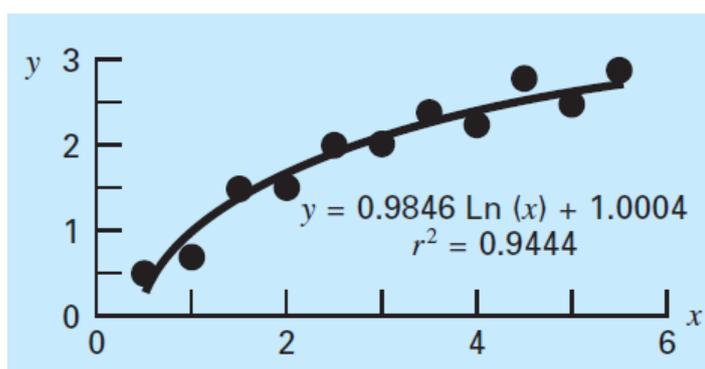


Figura 1.24. Ajuste de un modelo logarítmico.

(Fuente: [12])

De igual manera se calcula el coeficiente de determinación para verificar que la función obtenida sea la adecuada. Para funciones no lineales se utiliza la herramienta Solver de Excel la cual minimiza de manera directa los residuos entre los valores experimentales y los reales.

b) Matlab

Matlab es una software fabricado por Mathworks Inc., fundada por los analistas numéricos Cleve Moler y John N. Little. Cuenta con varias funciones matemáticas de resolución de matrices, funciones numéricas, cálculos simbólicos y herramientas para visualización de gráficos [12]. Para el ajuste de curvas Matlab tiene varias funciones preconstruidas las cuales se las observa en la Figura 1.25.

Función	Descripción
polyfit	Ajusta polinomios a datos
interp1	Interpolación 1-D (tabla 1-D)
interp2	Interpolación 2-D (tabla 2-D)
spline	Interpolación de datos con segmentaria cúbica
fft	Transformada discreta de Fourier

Figura 1.25. Algunas funciones de Matlab para implementar interpolación, regresión, segmentarias y TRF.

(Fuente: [12])

En la Figura 1.26 se observa un ejemplo de ajuste polinomial de un n valores de datos realizado en Matlab.

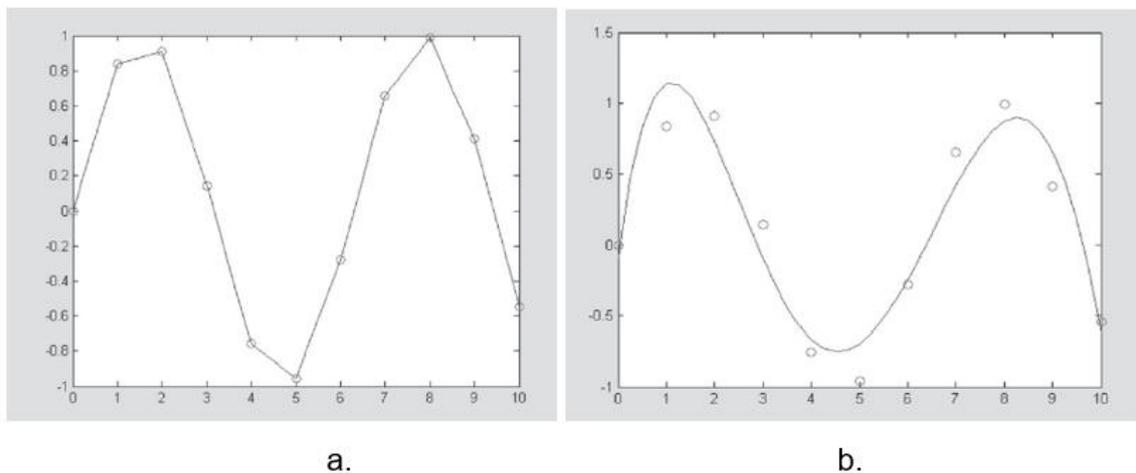


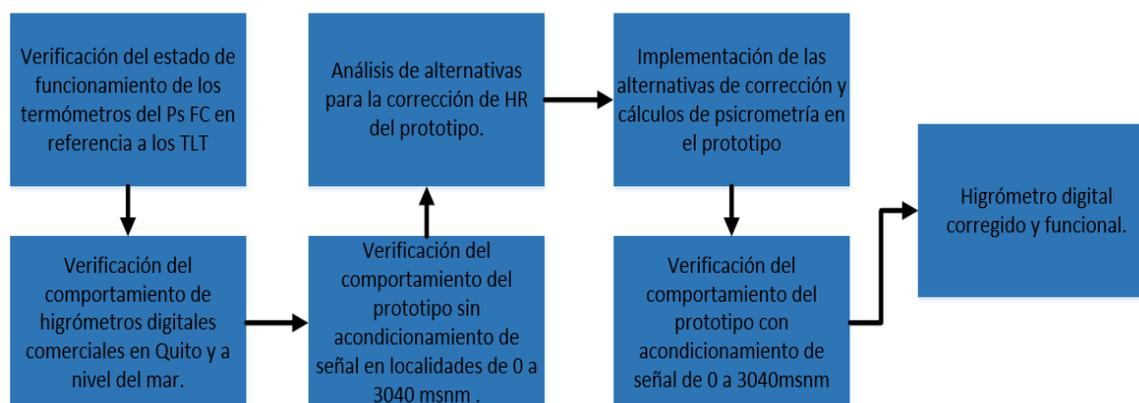
Figura 1.26. Ejemplo de ajuste polinomial realizado en Matlab. a. Se observa los valores interpolados linealmente. b. Ajuste polinomial de quito grado.

(Fuente: [12])

Matlab a diferencia del Excel incluye herramientas de ajuste curvas básico y cajas de herramientas donde se realizan operaciones estadísticas especializadas. La caja de herramientas para ajuste de curvas contiene una interfaz gráfica que ajusta los datos sin necesidad de usar solo polinomios, por ejemplo, transformada discreta de Fourier e interpolación de datos con segmentaria cúbica [12].

2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detalla la evaluación de los higrómetros digitales presentes en el mercado a nivel del mar y a 2800 msnm, tomando como referencia el psicrómetro de flujo continuo (Ps FC, ver Figura 1.9) del laboratorio de termodinámica de la FIM-EPN. También, se muestra el proceso de fabricación del higrómetro digital para altitudes de entre 0 y 3000 (msnm) con corrección, es decir un higrómetro capaz de obtener valores de humedad relativa, temperatura y altitud con bajo error porcentual. Este proceso de fabricación implica varias tomas de datos de propiedades psicrométricas (humedad relativa, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, altitud) en diferentes altitudes, y posteriormente la corrección de señal del higrómetro digital construido. En la Figura 2.1 se observa un diagrama de flujo de las actividades desarrolladas en este trabajo, el diagrama completo se observa en la Figura 2.46, p. 70.



Abreviatura	Significado	Unidades
HR	Humedad relativa	%
A	Altitud	msnm
TLT	Termómetro del Laboratorio de Termodinámica apreciación 1/20	°C
Ps SC	Psicrómetro de flujo continuo	

Figura 2.1. Metodología del proyecto.

(Fuente: Propia)

2.1. Verificación del estado de funcionamiento de los termómetros del psicrómetro de flujo continuo (Ps FC)

Para garantizar que los valores obtenidos con el psicrómetro de flujo continuo (Ps FC, ver Figura 1.9) sean óptimos, se realiza una verificación a los termómetros de mercurio. Para lo cual se compara las mediciones de temperaturas en un rango de 20 a 30 °C de los termómetros del Ps FC con los valores de un termómetro de mercurio de apreciación 1/20 °C (TLT). Se obtiene como resultado que la incertidumbre en la medición de los

termómetros de mercurio del psicrómetro de flujo continuo es de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, valor que se encuentra dentro del rango de aceptación de la norma ASTM E337-15 [13].

2.2. Verificación del comportamiento de varios higrómetros digitales comerciales a diferentes altitudes

El problema presente durante la medición de humedad relativa con higrómetros digitales en altitudes superiores a los 1000 msnm es que no consideran la altitud como factor influyente en estas mediciones. Este problema se ha evidenciado por el personal del laboratorio de termodinámica de la FIM-EPN desde hace más de 20 años, cabe mencionar que el 51% de cabeceras cantonales del Ecuador se encuentran ubicadas en altitudes superiores a los 1000msnm [14].

Para confirmar dicho problema y sustentar la necesidad de este proyecto se realiza mediciones de humedad relativa y temperatura de bulbo seco a higrómetros digitales comerciales existentes en la EPN. Por lo cual, se usa la temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo (psicrómetro de flujo continuo) y las cartas psicrométricas como los valores reales referenciales para este proyecto, debido a que son confiables, fáciles de usar y excelentes para verificar la exactitud de diferentes instrumentos.

Los dispositivos utilizados para el análisis previo a la realización del prototipo de higrómetro digital sin corrección se especifican con las siguientes abreviaturas (H1, H2, H3, H4, H5, H6), donde H1 y H2 pertenecen al laboratorio de termodinámica de la FIM-EPN, H3 pertenece a la Facultad de Ingeniería Química de la EPN, H4 pertenece al laboratorio de fluidos de la FIM-EPN, y por último H5 y H6 pertenece al LAEV (laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones) de la FIM-EPN. Estos higrómetros se los observa en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Higrómetros digitales utilizados en la toma de datos de este proyecto.

(Fuente: Propia)

Las mediciones son realizadas en dos altitudes diferentes, una a nivel del mar en la que se espera que los higrómetros funcionen adecuadamente, y otra a una altitud de 2806 msnm

(Quito) en las que se verifica un funcionamiento con errores considerables. En estas dos altitudes se comparan los valores de humedad relativa (HR) y la temperatura de bulbo seco (TBS) de cada uno de los higrómetros digitales, con los resultados obtenidos en las cartas psicrométricas (CP). Los resultados de esta verificación se observan en la sección 3.1.2, pp. 71-77.

Cabe señalar que las propiedades psicrométricas son muy importantes para una infinidad de procesos industriales y científicos, un margen de error alto presentaría una afectación importante. El error en la medición de la humedad relativa se ha venido cometiendo de manera no intencionada desde que se introdujeron los psicrómetros digitales al mercado.

2.3. Verificación del comportamiento del prototipo de higrómetro digital sin acondicionamiento de señal

En esta sección se analizan los materiales a utilizar durante la fabricación del higrómetro digital sin acondicionamiento de señal. También los materiales usados para obtener los valores reales de humedad relativa con el psicrómetro de flujo continuo. Además, se analiza las propiedades psicrométricas del aire (temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y humedad relativa) y altitud utilizando el prototipo de higrómetro digital sin corrección a diferentes altitudes.

2.3.1. Análisis de selección de materiales electrónicos

Existen varios tipos de placas Arduino y sensores los cuales se describieron en el capítulo 1, por lo cual se realiza un análisis de selección para las diferentes placas Arduino, sensores de humedad y temperatura y los sensores barométricos presentes en el mercado ecuatoriano. Con este análisis se define cuáles serían los adecuados para la construcción del prototipo de higrómetro digital sin acondicionamiento de señal. Para el análisis se utilizaron valores que varían de 1 a 5 en donde, 5 es el valor óptimo para la característica evaluada, y 1 es el valor más bajo. En la Tabla 2.1 se observa el análisis realizado para la selección de la placa Arduino adecuada.

Tabla 2.1. Análisis de selección del microcontrolador Arduino.

	Tamaño	Precio	Puertos	Alimentación	Total
Arduino Uno	4	4	4	4	16
Arduino Mega	2	1	5	5	13
Arduino Nano	5	5	2	3	15

(Fuente: Propia)

Con este análisis se determina que el Arduino uno cumple con los requerimientos necesarios para el presente trabajo.

En la Tabla 2.2 se observa el análisis para la selección del sensor de humedad relativa y temperatura.

Tabla 2.2. Análisis de selección para sensores de humedad y temperatura.

	Tamaño	Precio	Precisión	Apreciación	Confiabilidad	Estabilidad	Total
DHT22	4	4	5	5	4	4	26
DHT11	4	5	4	3	3	3	22

(Fuente: Propia)

Con el análisis realizado en la Tabla 2.2 se determina que el sensor DHT22 es la mejor opción y cumple con las características necesarias para la realización de este trabajo.

En la Tabla 2.3 se observa el análisis de selección del sensor barométrico.

Tabla 2.3. Análisis de selección para sensores de altitud.

	Tamaño	Precio	Precisión	Apreciación	Confiabilidad	Estabilidad	Total
BMP180	5	5	3	5	4	3	25
BMP280	5	2	4	3	3	3	20

(Fuente: Propia)

Con el análisis de la Tabla 2.3 se determina que el sensor BMP180 cumple con las especificaciones necesarias para el presente trabajo. Después de realizar esta selección en la placa Arduino y en los sensores se procede a la construcción del prototipo de higrómetro digital sin acondicionamiento de señal con la ayuda de otros materiales que se mencionan a continuación.

2.3.2. Materiales del higrómetro digital sin acondicionamiento de señal

En este apartado se detallan los materiales elegidos para el montaje del prototipo de higrómetro digital sin corrección, y también los elementos electrónicos seleccionados anteriormente.

a) Sensor de humedad

El sensor AM 2302 (DHT22) permite obtener las propiedades psicométricas del aire (humedad relativa, temperatura de bulbo seco). En la Figura 2.3 se muestra el sensor AM 2302 en su forma física.



Figura 2.3. Sensor AM2302, estructura física.

(Fuente: Propia)

Este sensor presenta 4 pines de conexión, de los cuales uno se anula debido a que no presenta variación en las mediciones si es o no conectado. Por lo tanto, se utilizará los 3 pines restantes los cuales se especifican en el ANEXO I y se ilustra en el apartado 4.1 de ese anexo.

b) Sensor de Altitud

El sensor de altitud BMP 180, que se muestra en la Figura 2.4, permite obtener la altitud del lugar donde se realice las respectivas mediciones tomando en cuenta como referencia los 0 msnm. Las características del sensor, los rangos de medición y funcionamiento se muestran en el ANEXO II.



Figura 2.4. Sensor BMP180 estado físico.

(Fuente: Propia)

Cabe mencionar que el sensor de altitud no censa presión atmosférica directamente, por lo cual, para la determinación de la presión atmosférica se trabaja en base a la ecuación (1) [4]. Esta ecuación al estar en función de la altitud permite obtener la presión atmosférica propia del lugar donde se encuentre el sensor y este valor es utilizado para la mayoría de los cálculos que se explicados en este proyecto.

$$P = 101325 * (1 - 2.25577 * 10^{-5} * A)^{5.2559} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

P: Presión barométrica [Pa]

A: Altitud [m]

c) Pantalla de cristal líquido 1602

La Figura 2.5 muestra la pantalla en la cual se trabaja para obtener los valores de humedad relativa, temperatura de bulbo seco (temperatura ambiente), altitud y presión atmosférica sin corrección.

Esta pantalla presenta un potenciómetro que permite variar el contraste y nitidez de los resultados, además incluye botones los cuales facilitan su funcionamiento. La pantalla permite una conexión directa al Arduino, es decir cuenta con pines que están distribuidos de igual manera que los sockets de la placa Arduino uno, esto facilita su programación. Las especificaciones de esta pantalla se muestran con detalle en el ANEXO III.



Figura 2.5. Pantalla LCD 1602 forma física.

(Fuente: Propia)

d) Arduino Uno (microcontrolador ATmega328P)

Para obtener datos de manera digital y analógica se utilizará una placa Arduino uno, ya que es de fácil programación y de un costo relativamente bajo, su forma física se muestra en la Figura 2.6. Los datos de operación y esquema de la placa se encuentran detallados en el ANEXO IV.

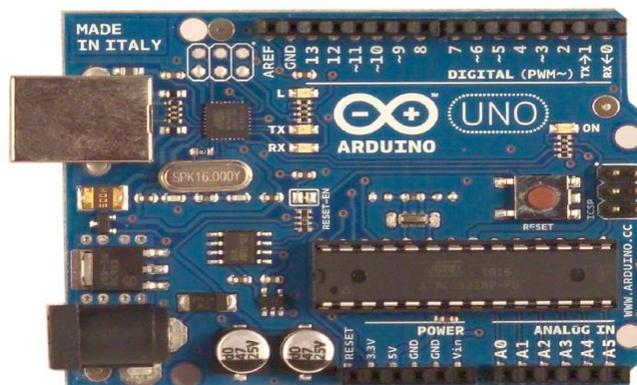


Figura 2.6. Arduino uno forma física.

(Fuente: Propia)

e) Agua desmineralizada

Para obtener los datos de humedad relativa reales es necesario conocer el valor de la temperatura de bulbo húmedo utilizando un material higroscópico y agua. Como el agua presenta altas cantidades de solidos se utiliza agua desmineralizada para evitar que los minerales sedimenten alrededor del bulbo de termómetro de mercurio. El agua utilizada se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.7. Agua desmineralizada.

(Fuente: propia)

f) Ventilador 8x8

Para reducir el tiempo de estabilización de los bulbos del psicrómetro de flujo continuo se usa un ventilador de 8x8 cm² que produce una velocidad del viento de entre 0.5 a 0.9 m/s. Este trabaja con un voltaje constante de 5 v y un flujo de corriente de 0.11 [A], la forma física de este ventilador se muestra en la Figura 2.8. Este flujo es únicamente usado para reducir el tiempo la estabilización de los bulbos y de los sensores.



Figura 2.8. Ventilador 8x8.

(Fuente: Propia)

g) Cartón pluma

El cartón pluma es usado para fabricar la caja que evita que la radiación solar llegue directamente a los bulbos del psicrómetro de flujo continuo, además facilita la redirección del flujo de aire generado por el ventilador. Este cartón está formado por 2 materiales, uno es un polímero y el otro es cartón común. Como presenta una baja conductividad térmica no afecta directamente en las mediciones de temperaturas. La forma física del cartón pluma se muestra en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Cartón pluma.

(Fuente: Propia)

2.3.3. Prototipo electrónico de higrómetro digital sin corrección

a) Construcción de caja de cartón pluma

Para la fabricación del prototipo electrónico de higrómetro digital sin corrección se utilizan los materiales mencionados en la sección 2.3.2, los cuales se colocan en una caja fabricada de cartón pluma. Esta caja se realiza con el fin de lograr que los sensores se encuentren en las mismas condiciones de temperatura de los bulbos del psicrómetro de flujo continuo. El diseño y las dimensiones de la caja se observan en la Figura 2.10.

En la parte superior de la caja del cartón pluma se encuentra un agujero rectangular cubierto por plástico transparente. Este permite visualizar la cantidad de agua desmineralizada que se encuentra bajo el termómetro de bulbo húmedo. También, consta de dos agujeros circulares en los cuales se colocan los sensores de humedad y temperatura DHT22 y el sensor de presión y altitud BMP180. En la parte posterior de la caja se encuentra ubicado el ventilador de 8x8 cm el cual genera el flujo de aire para reducir los tiempos de estabilización de los bulbos y los sensores. La Figura 2.11 muestra la construcción final de la caja montada en el psicrómetro de flujo continuo.

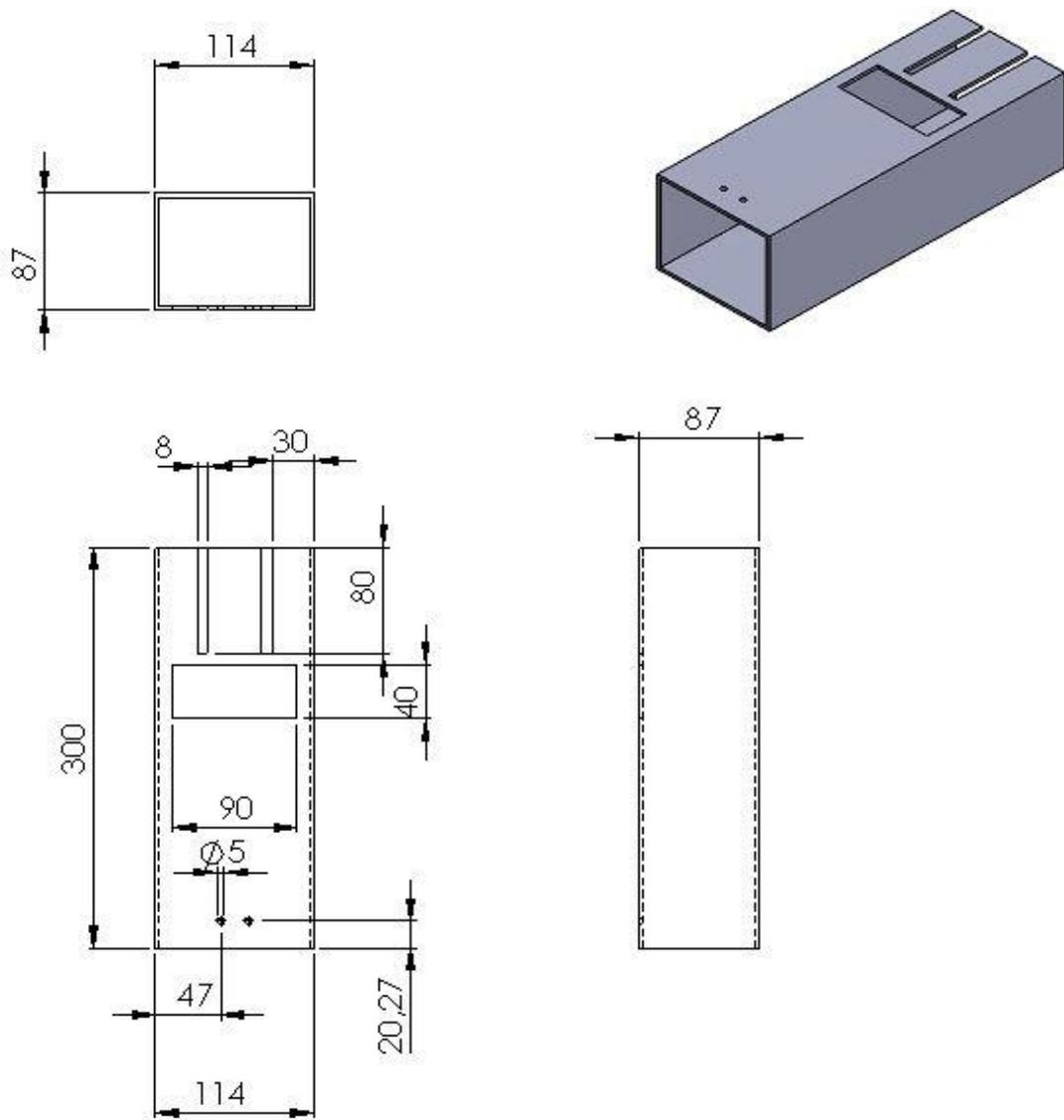


Figura 2.10. Dimensiones de la caja fabricada de cartón pluma.

(Fuente: Propia)



Figura 2.11. Caja de cartón pluma montada en psicrómetro de flujo continuo.

(Fuente: Propia)

b) Instalación de sensores en la caja de cartón pluma y conexión en placa Arduino uno.

El sensor de humedad se ubica junto al sensor de altitud dentro de la caja de cartón pluma. Debido a la distribución de los sensores en la caja, el flujo de aire generado por el ventilador llega antes a los sensores y luego a los bulbos. Esto evita que la humedad del material higroscópico modifique las lecturas de humedad relativa y temperatura del sensor DHT22. La ubicación de los sensores en la caja se observa en la Figura 2.12.

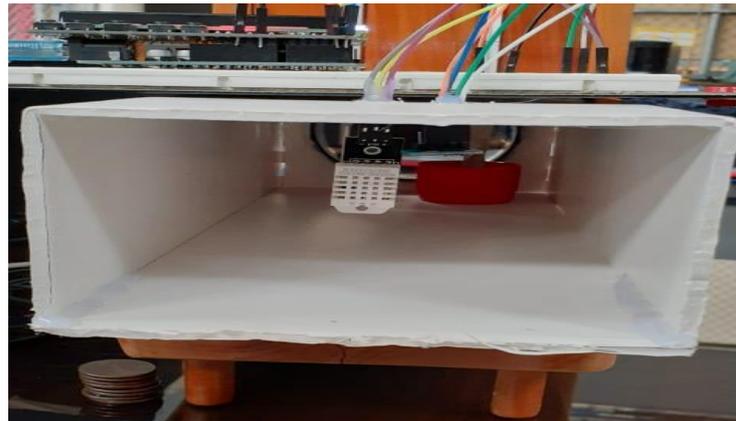


Figura 2.12. Ubicación de sensores para el prototipo inicial.

(Fuente: Propia)

El pin bidireccional del sensor DHT22 se conecta a la entrada digital (n°3) del microcontrolador como se muestra en la Figura 2.13, este puerto permite la lectura de la temperatura y humedad relativa del aire. Además, el sensor requiere una entrada de voltaje continuo en un rango de 3.3 a 5.5 Voltios, para una adecuada medición. Si, el voltaje se encuentra fuera de este rango puede presentar interferencia en las mediciones, por lo tanto, el valor de alimentación para el sensor es de 5 voltios.

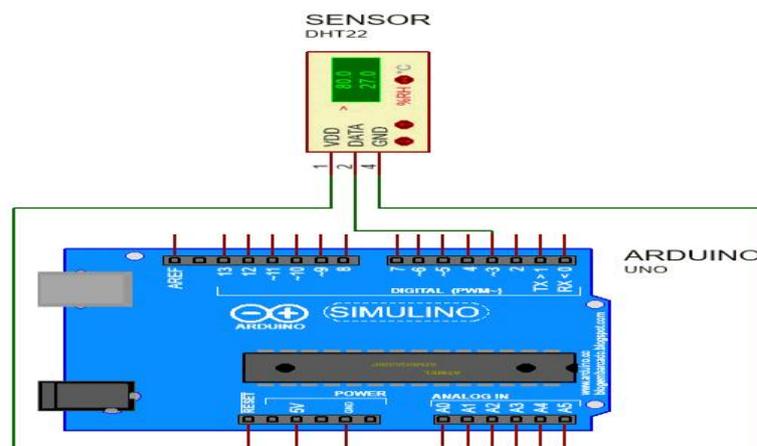


Figura 2.13. Conexión de sensor DTH22 en placa Arduino uno.

(Fuente: Propia)

El sensor BMP180 trabaja con dos entradas de voltaje, una de 3.3 V y otra de 5 V para su funcionamiento, por lo tanto, se utiliza 5 V al igual que el sensor DHT22, también tiene una conexión a tierra para protección de saltos de corriente. Este sensor tiene salidas SDA Y SDL que van conectados a la placa Arduino en las entradas análogas A4 y A5 respectivamente como se observa en la Figura 2.14.

En la Figura 2.14 se visualiza las conexiones del sensor BMP180 con la placa Arduino uno.

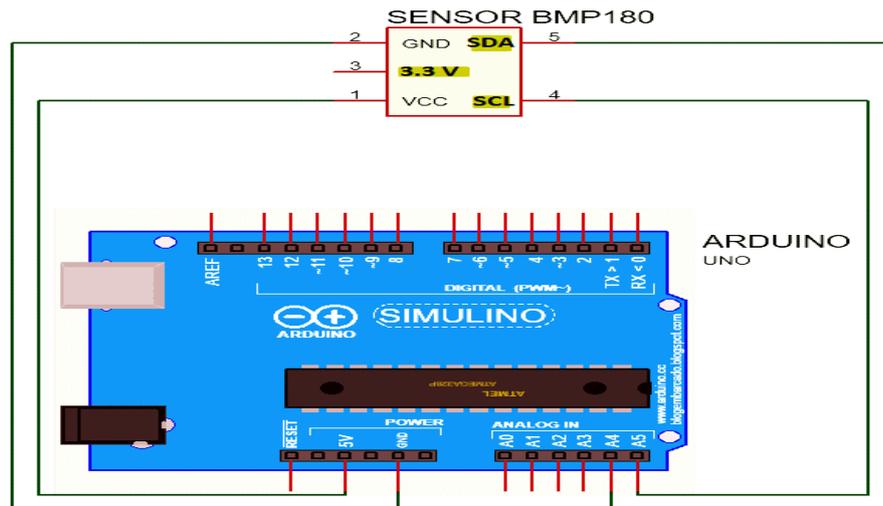


Figura 2.14. Conexión de sensor BMP180 en placa Arduino uno.

(Fuente: Propia)

Los valores censados se muestran en una pantalla de cristal líquido 1602, ubicada en la parte superior de la caja, conectada a la placa Arduino, tal como se muestra en la Figura 2.15. Cuando se enciende la pantalla se muestra la humedad relativa sin corrección junto con la temperatura ambiental. También, presionando el botón “down” se observa la altitud y presión atmosférica.

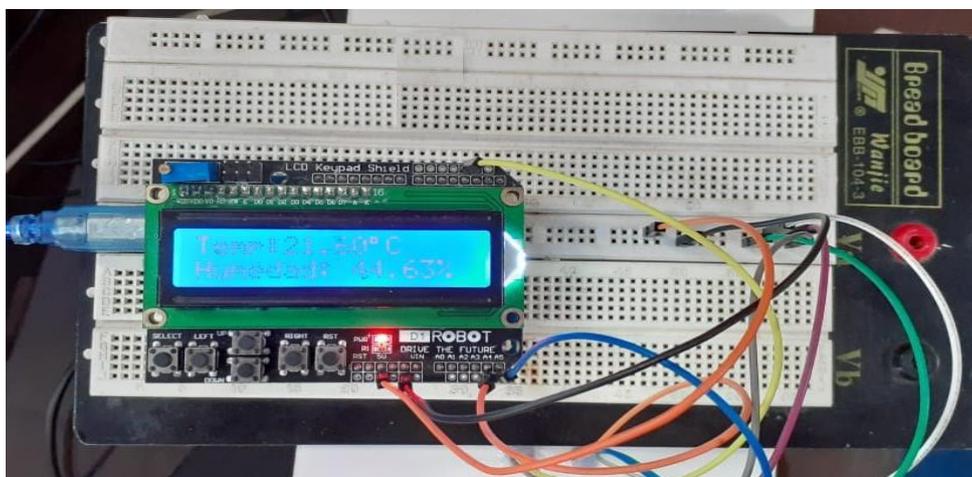


Figura 2.15. Conexiones para el prototipo de higrómetro digital.

(Fuente: Propia)

c) Código para el prototipo de higrómetro digital sin corrección

En este apartado, luego de realizadas las conexiones en la placa Arduino uno, se explica el código que ejecuta la placa Arduino para la medición con los sensores DHT22 y BMP180, este código se realiza en el programa IDE de la empresa Arduino.

```
// LIBRERIAS

#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BMP085.h>
#include "DHT.h"
#include <LiquidCrystal.h>
#include <SFE_BMP180.h>
#include <Wire.h>
Adafruit_BMP085 bmp;

SFE_BMP180 pressure;

// DEFINICIÓN DE VARIABLES

float p0;

#define DHTPIN 3 // Pin bidireccional del sensor de humedad DHT22

#define DHTTYPE DHT22 // SENSOR UTILIZADO

DHT dht(3, DHT22);
LiquidCrystal lcd(8,9,4,5,6,7); // ENTRADAS DIGITALES PARA LA PANTALLA 1602
int boton=0;
void setup(void) {
  lcd.begin(16, 2); // COORDENADAS DE LECTURA DE DATOS EN PANTALLA
  lcd.print("Lectura de Sensores");
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
  bmp.begin();
  p0=101365;// PRESIÓN DE REFERENCIA A NIVEL DEL MAR
}
```

Figura 2.16. Código para definir librería e inicio de encendido.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.16 se especifican las librerías utilizadas para el correcto funcionamiento de los sensores DHT22 y BMP180, así como también, el código para inicio de la pantalla LCD1602.

Al inicio se define p0 como variable flotante, esta variable define la presión de referencia para el sensor de altitud. Al colocar p0 con un valor de 101365 [Pa] se considera como valor de referencia 0 [msnm].

```
void loop() {  
  
  // LECTURA DE BOTONES DE PANTALLA.  
  
  int valor=analogRead(boton);  
  Serial.println(valor);  
  delay(400);  
  
  // DEFINICIÓN DE VARIABLES  
  float Hr, P, T, base1, base2, A;  
  
  Hr = dht.readHumidity();  
  T = dht.readTemperature();  
  A = ((bmp.readAltitude(p0)) * 1.0957) - 96.4;  
  base1=10;  
  base2= 1 - (2.25577 * pow(base1, -5)) * A;  
  P = (101.325 * (pow(base2, 5.2559)) * 1000) / 100;  
  delay(50);  
}
```

Figura 2.17. Código de lectura de sensores.

(Fuente: Propia)

Las variables involucradas en este código son la humedad relativa (Hr), temperatura (T), presión (P) y altitud (A). Estas variables están representadas como punto flotante (FLOATES) para que los resultados presenten decimales. El código para obtener los valores de los sensores se observa en la Figura 2.17.

2.3.4. Análisis de las propiedades psicrométricas del aire con el prototipo de higrómetro digital sin acondicionamiento de señal

Las propiedades psicrométricas del aire analizadas en este apartado son la humedad relativa, temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo, estas propiedades varían dependiendo del lugar de análisis, también se calcula los valores de altitud. Utilizando el prototipo electrónico de higrómetro digital construido el cual se menciona en la sección 2.3.3, pp. 31-36, se realizan mediciones en varias localidades del Ecuador con respecto a humedad relativa y temperatura ambiente.

Tabla 2.4. Localidades del Ecuador utilizadas para estudio de propiedades psicrométricas.

LOCALIDADES	ALTITU DE REFERENCIA (msnm)
Atacames (Esmeraldas)	0 msnm
Santo Domingo (Santo domingo)	580 msnm
Rocafuerte (Imbabura)	950 msnm
Quito Centro (Pichincha)	2800 msnm
Quito Sur (Pichincha)	2950 msnm
Tulcán (Carchi)	3040 msnm

(Fuente: Propia)

Los datos de altitudes de las localidades analizadas se obtienen de Google Earth, estos datos se aprecian en la Tabla 2.4 y varían desde los 0 msnm hasta los 3040 msnm.

En cada lugar, se toman datos de valores reales (psicrómetro de flujo continuo) y de valores experimentales (prototipo electrónico de higrómetro digital sin corrección), con el fin de conocer los errores presentes en altitud y humedad relativa. Estas mediciones se las realiza cada 20 minutos en el transcurso del día. Las tablas y gráficas obtenidas se observan en la sección 3.1.3, pp. 77-84, en las cuales se evidencia los errores en valores de altitud y humedad relativa.

2.4. Análisis de alternativas para la corrección de altitud (A) y humedad relativa (HR) del prototipo sin corrección

En esta sección se analizan las alternativas para la corrección del prototipo de higrómetro digital utilizando los resultados obtenidos de las propiedades psicrométricas del aire a diferentes altitudes (ver sección 3.1.3, pp. 77-84). La corrección se realiza a los valores de humedad relativa y altitud, debido a que presentan mayor error porcentual en sus mediciones.

2.4.1. Acondicionamiento y corrección de altitud

Para realizar la corrección en altitud se considera como altitud cercana a la real a los datos satelitales de Google Earth (altitud de referencia). Estos valores son comparados con datos satelitales del GIS (Geographic Information System) para varias localidades del país, con el objetivo de verificar el error que presenta Google Earth en relación con la altitud. Con esta verificación se tiene que los datos son confiables para el desarrollo del presente trabajo, estos valores se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Cálculo de error porcentual entre datos de altitud con Google Earth (altitud de referencia) y datos de altitud con GIS en msnm.

XLONGITUD	XLATITUD	Altitud con GIS	Altitud Google Earth	Error	XLONGITUD	XLATITUD	Altitud con GIS	Altitud Google Earth	Error
-78,826912	-0,561996	2846	2831	0,53%	-78,811844	0,213959	1085	1076	0,83%
-78,826912	-0,554474	2444,34	2528	3,42%	-78,811844	0,244095	780	772	1,03%
-78,826912	-0,546936	2254	2260	0,27%	-78,796776	-0,50927	2995	2973	0,73%
-78,826912	-0,539406	2031	2049	0,89%	-78,77417	-0,501732	3023	3005	0,60%
-78,826912	-0,531868	2025	1996	1,43%	-78,314621	-0,561996	4168	4172	0,10%
-78,826912	-0,524338	1887	1910	1,22%	-78,299553	0,100952	3879	3883	0,10%
-78,826912	-0,5168	1827	1852	1,37%	-78,299553	0,131088	3939	3934	0,13%
-78,826912	-0,50927	1973	1960	0,66%	-78,826912	0,251625	831	823	0,96%
-78,826912	-0,494202	2018	2006	0,59%	-78,826912	0,259163	953	952	0,10%
-78,826912	-0,441467	2090	2079	0,53%	-78,826912	0,266685	1133	1130	0,26%
-78,826912	-0,396271	1583	1586	0,19%	-78,826912	0,304367	1244	1251	0,56%
-78,826912	-0,373665	1335	1334	0,07%	-78,819374	-0,418861	1994	1983	0,55%
-78,826912	-0,335999	1504	1512	0,53%	-78,819374	-0,411339	1765	1767	0,11%
-78,826912	-0,23806	1887	1893	0,32%	-78,819374	-0,403793	1632	1633	0,06%
-78,826912	0,349564	1767	1769	0,11%	-78,819374	-0,396271	1656	1658	0,12%
								Promedio	0,61%

(Fuente: Propia)

El error porcentual promedio que presenta Google Earth en la altitud es de 0,61%, por lo cual se consideran validos los datos que presenta esta plataforma.

En la Tabla 3.14 del capítulo 3, p. 84, se observan los datos de altitud de referencia vs los calculados, con estos valores se calcula la ecuación de corrección en altitud.

La ecuación de corrección en altitud se obtiene mediante el uso de Matlab, el cual permite realizar un gráfico con los datos de referencia (Google Earth) y los datos experimentales de la altitud medida en las diferentes localidades del Ecuador. Como resultado se obtiene una ecuación lineal que permite la corrección del sensor BMP180 en relación con la altitud. En la Figura 2.18 se muestra el gráfico de la altitud de referencia respecto a las altitudes experimentales.

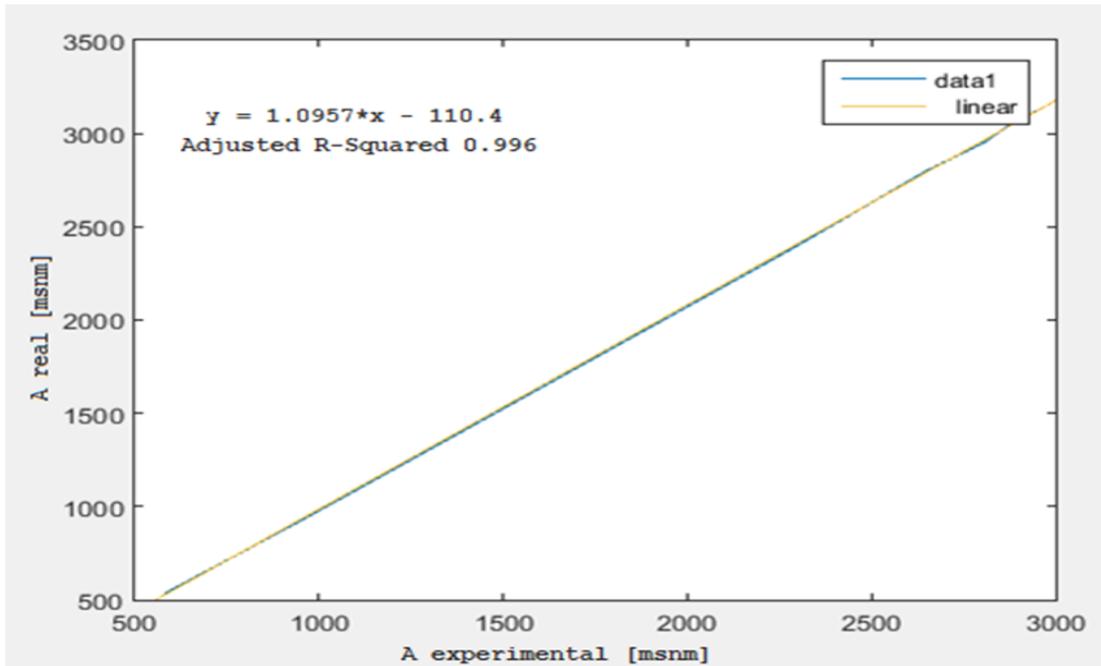


Figura 2.18. Gráfica de altitudes de referencia y experimentales, ecuación de corrección en altitud.
(Fuente: Propia)

Con esta gráfica se obtiene la ecuación lineal, la cual permite determinar los valores de altitud corregida en el higrómetro digital para localidades superiores a los 1000 msnm, se la observa en la ecuación (2):

$$A_{corr} = (1,0957 * A_{medida} - 110,4) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

A_{corr} : Altitud corregida.

A_{medida} : Altitud experimental (prototipo de higrómetro digital).

La ecuación de corrección (3) representa a los valores de altitudes menores a los 1000msnm, se obtiene a partir de la ecuación (2) con el método de prueba y error.

$$A_{corr1} = (1,0006 * A_{medida1} - 22) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

A_{corr1} : Altitud corregida.

$A_{medida1}$: Altitud experimental (prototipo de higrómetro digital).

Con las ecuaciones (2) y (3) se realiza una verificación de corrección, para esto se utiliza Excel como herramienta de cálculo, obteniendo así, resultados óptimos y reduciendo el error considerablemente.

Los valores que se muestran en Tabla 2.6 se obtienen a partir de la ecuación (2) y (3). Los datos de altitudes superiores a los 1000 msnm son corregidos con la ecuación (2), mientras que los datos de altitudes menores a los 1000 msnm son corregidos con la ecuación (3). Con el uso de estas dos ecuaciones se reduce el error porcentual promedio de altitud a 1,2 %.

Tabla 2.6. Tabla de datos corregidos mediante uso de Excel.

Lugar	Altitud Real [msnm]	Altitud obtenida [msnm]	Altitud Corregida [msnm]	Diferencia [msnm]	Error [%]
Teleférico Quito	3123	2949,2	3121,04	1,96	0,1%
Tulcán	3046	2874,98	3039,72	6,28	0,2%
Quito Sur	2950	2805	2963,04	13,04	0,4%
Quito EPN	2806	2654,64	2798,29	7,71	0,3%
Quito CCICEV	2804	2652,54	2795,99	8,01	0,3%
Tumbaco	2365	2268,88	2375,61	10,61	0,4%
Rocafuerte	950	975	953,59	3,58	0,4%
Santo Domingo	531	577,72	556,07	25,07	4,7%
Atacames	22	43,12	21,15	0,85	3,9%
				PROMEDIO	1,2%

(Fuente: Propia)

2.4.2. Acondicionamiento y corrección de valores de humedad relativa

En esta sección se representan las ecuaciones de corrección de humedad relativa para el higrómetro digital fabricado, así como también el análisis realizado para obtener dichas ecuaciones.

Para realizar la corrección se parte del gráfico de una línea recta con el universo de datos experimentales (temperatura de bulbo húmedo y humedad relativa) obtenidos sin corrección en las diferentes localidades que se muestran en la Tabla 2.4, p. 37. En la Figura 2.19 se observa los valores de humedad relativa experimental y humedad relativa real de todas las localidades analizadas (ver Tabla 2.11) graficados en una línea recta. La cantidad de los valores contenidos por la línea recta son reducidos, por lo tanto, la complejidad al realizar la corrección a los valores de humedad relativa es elevada y no se recomienda realizar la corrección directamente a los datos de humedad relativa.

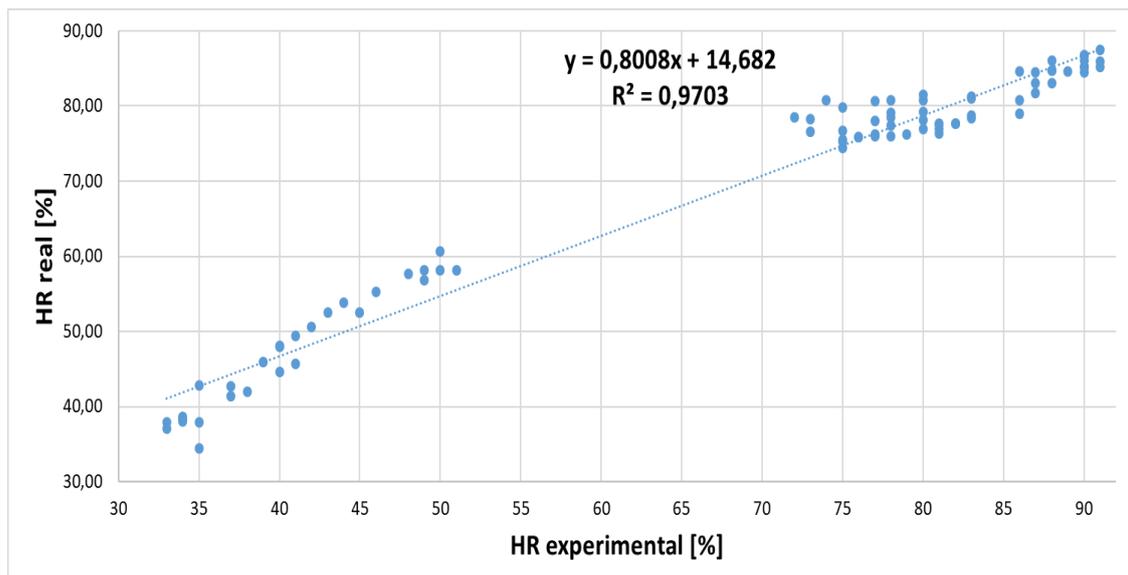


Figura 2.19. Curva de humedad relativa real vs humedad relativa experimental (higrómetro fabricado)

(Fuente: Propia)

Con los resultados de la Figura 2.19 se considera la opción de corregir los valores de temperatura de bulbo húmedo debido a que la temperatura de bulbo seco no presenta errores porcentuales promedios elevados (ver sección 3.1.3, pp. 77-84).

Para calcular la temperatura de bulbo húmedo experimental se elabora un programa en macros Excel a partir de la temperatura ambiente, humedad relativa y la altitud del higrómetro digital fabricado. Para analizar y validar los resultados de este programa se compara la temperatura de bulbo húmedo real (psicrómetro de flujo continuo) y la temperatura de bulbo húmedo calculada con el programa en Excel, con lo cual se determina que el error es de 0,0001%. En la Figura 2.20 se observa el programa de cálculo de temperatura de bulbo húmedo realizado en Excel.

Altitud	Presión	Ts	HR	Th
2804	71873,5776	23	0,32	12,035
Modificar	No Modificar	Modificar	Modificar (no en %)	Resultado

Cálculo

Figura 2.20. Programa de cálculo de Th.

(Fuente: Propia)

El programa es elaborado siguiendo el procedimiento que se especifica en el libro ASRHAE Fundamental Handbook, estos pasos se especifican más a detalle en el anexo V.

En la Figura 2.21 se observa los valores de temperatura de bulbo húmedo real y experimental graficados de todas las localidades analizadas (ver Tabla 2.4, p. 37) en una línea recta. Como se visualiza la cantidad de valores que están contenidos por la línea recta es elevada o son valores cercanos a la tendencia de la gráfica, por lo tanto, la complejidad al realizar esta corrección es menor en comparación a la corrección por humedad relativa (ver Figura 2.19).

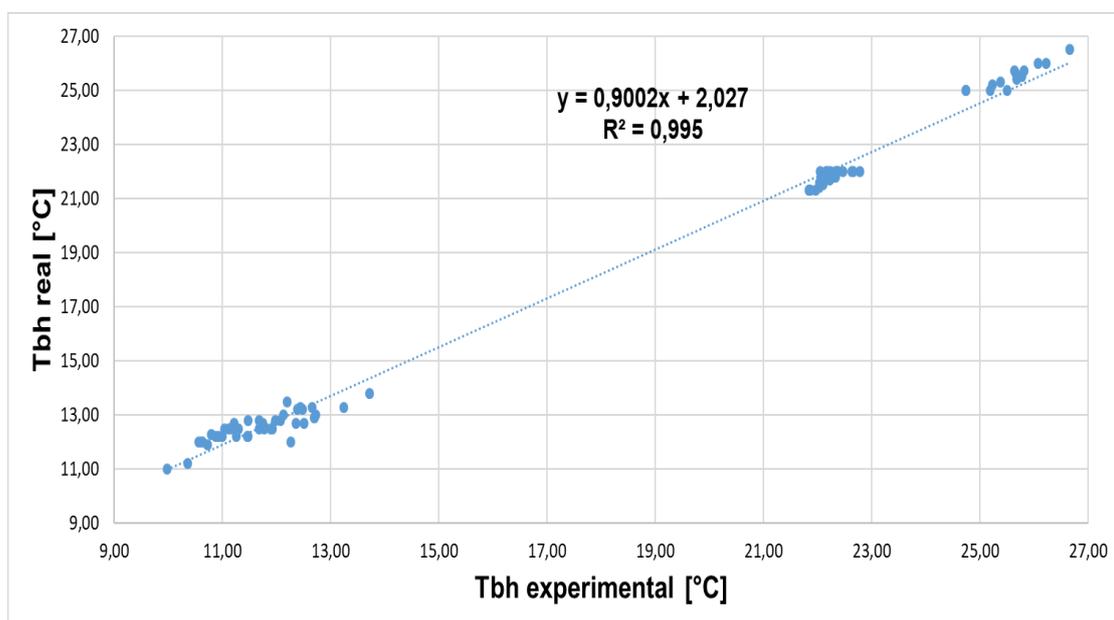


Figura 2.21. Curva de temperatura de bulbo húmedo real vs temperatura de bulbo húmedo experimental (cálculo)

(Fuente: Propia)

2.4.3. Análisis de sensibilidad de la humedad relativa respecto a la temperatura de bulbo húmedo

Para garantizar la corrección que se menciona en el apartado 2.4.2. sea el adecuada, se realiza un análisis de sensibilidad a la humedad relativa variando la temperatura de bulbo húmedo. Para lo cual se utilizan las cartas psicrométricas [5], específicamente la carta G2 que está diseñada para 2800 msnm a una temperatura normal, tal como se observa en la Figura 2.22.

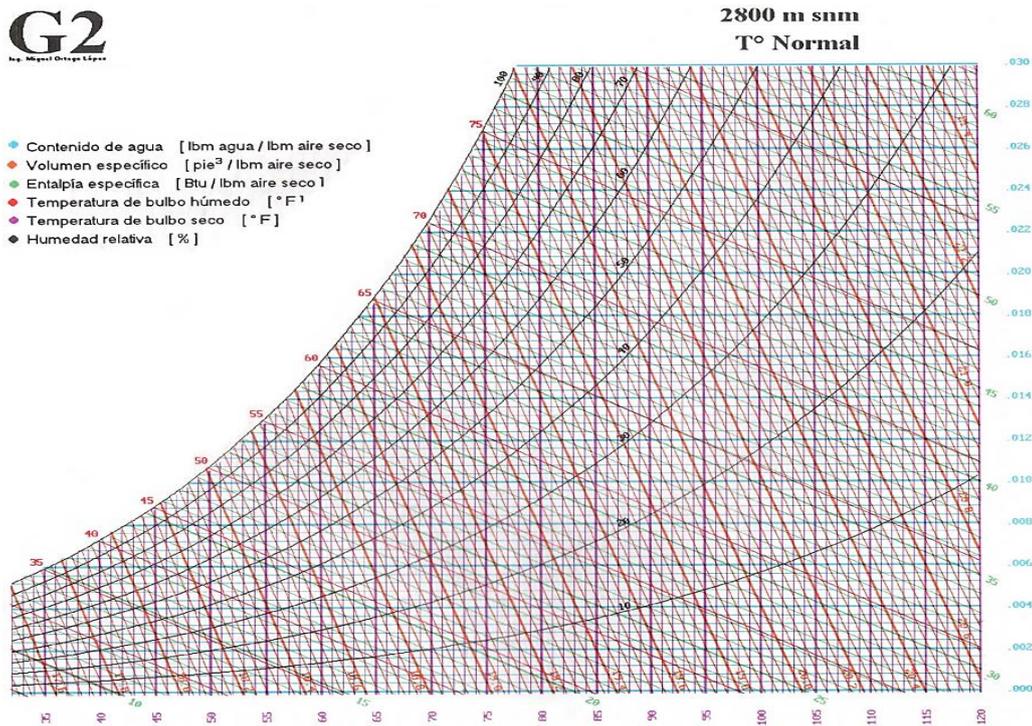


Figura 2.22. Carta psicrométrica para una altitud de 2800 msnm a temperatura normal.

(Fuente: [5])

Al variar la temperatura de bulbo húmedo se obtienen curvas de sensibilidad de humedad relativa (en %/°C), las cuales se distribuyen de manera constante de abajo hacia arriba en la carta psicrométrica tal como se observa en la Figura 2.24. Estas curvas de variación de humedad relativa se obtienen al variar la temperatura de bulbo húmedo mientras que la temperatura de bulbo seco se mantiene constante, ver ejemplo de cálculo de la Tabla 2.7. y en la Figura 2.23. Cabe señalar que este análisis se realiza de manera teórica con el fin de estimar la variación de la humedad relativa en relación con la temperatura de bulbo húmedo.

Tabla 2.7. Ejemplo de cálculo de humedad relativa variando la temperatura de bulbo húmedo.

TBS (°C)	THB(°C)	TBS (°F)	TBH (°F)	%HR	DIFERENCIA
46,11	13,33	115,00	56	0,19	1,56
46,11	14,44	115,00	58	1,82	1,63
46,11	15,56	115,00	60	3,55	1,73
46,11	16,67	115,00	62	5,33	1,78
46,11	17,78	115,00	64	7,21	1,88
46,11	18,89	115,00	66	9,19	1,98
46,11	20,00	115,00	68	11,21	2,02
46,11	21,11	115,00	70	13,36	2,15
46,11	22,22	115,00	72	15,6	2,24
46,11	23,33	115,00	74	17,95	2,35
46,11	24,44	115,00	76	20,41	2,46

(Fuente: Propia)

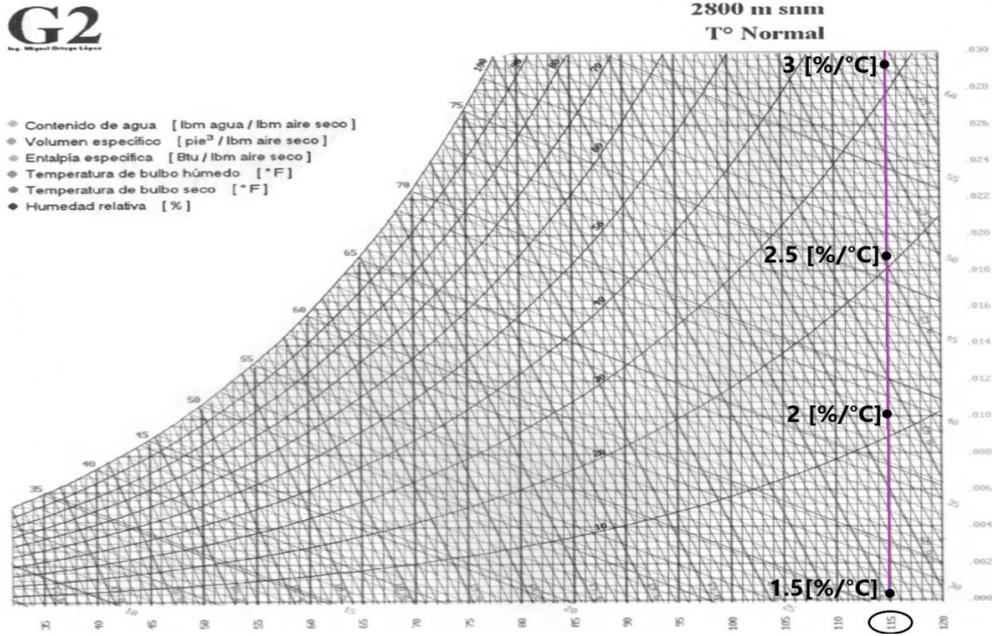


Figura 2.23. Ejemplo de cálculo de valores de humedad relativa variando la temperatura de bulbo húmedo.
(Fuente: [5], realización: Propia)

Las diferencias de los valores de humedad relativa por cada grado Celsius de temperatura de bulbo húmedo varía entre 1.5 (%/°C) y 14 (%/°C) para esta carta psicrométrica.

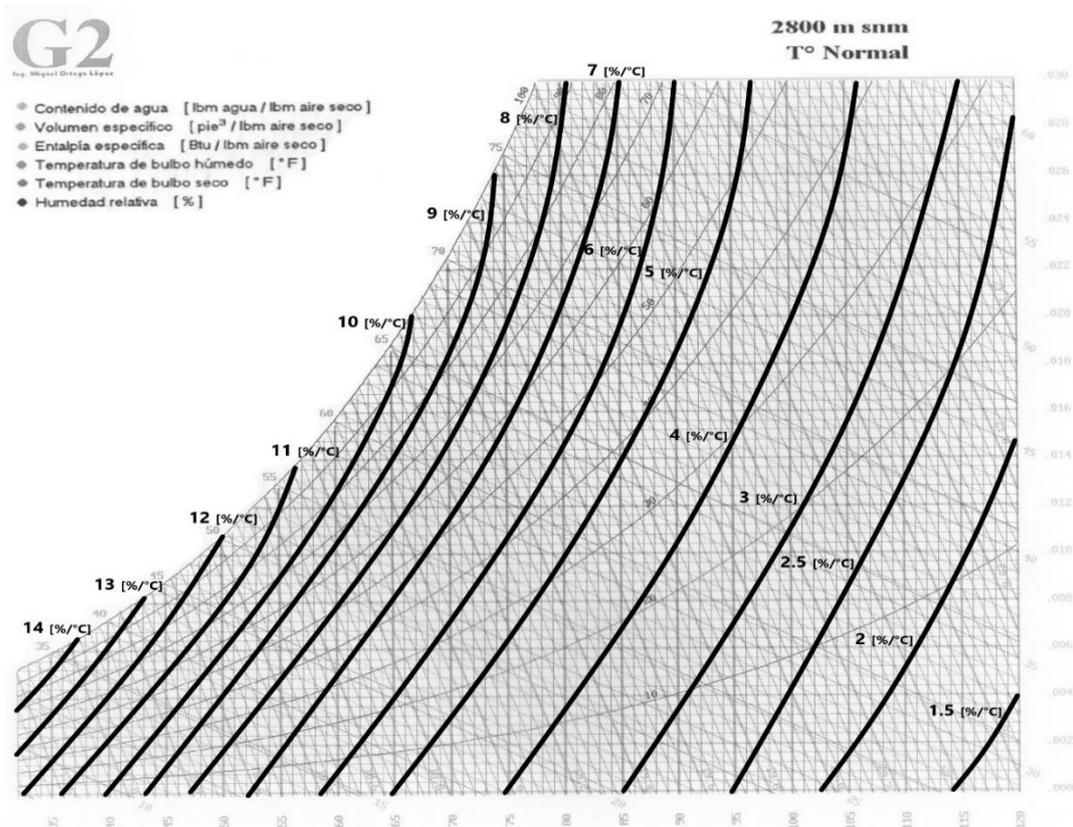


Figura 2.24. Curvas de sensibilidad de humedad relativa por cada grado Celsius de temperatura de bulbo húmedo (%/°C).
(Fuente: [5], realización: Propia)

Por el análisis de la sección 2.4.3, p. 42-45, y el resultado de la Figura 2.21 se realiza una corrección directamente a la temperatura de bulbo húmedo para obtener los valores de humedad relativa corregidos.

2.4.4. Ecuación de corrección para los datos preliminares

Para realizar la corrección a la temperatura de bulbo húmedo, se realiza un análisis con tres métodos diferentes, estos son:

- Excel.
- Regresión lineal con mínimos cuadrados.
- Programación en Matlab.

a) Uso de Excel

Con los datos obtenidos a partir del higrómetro digital sin corrección (ver sección 3.1.3, pp. 77-84), se obtiene la ecuación de corrección utilizando Excel.

La ecuación de corrección que se obtiene con este análisis se muestra en la Figura 2.25. Para verificar la confiabilidad de esta ecuación se obtiene el coeficiente de determinación R^2 .

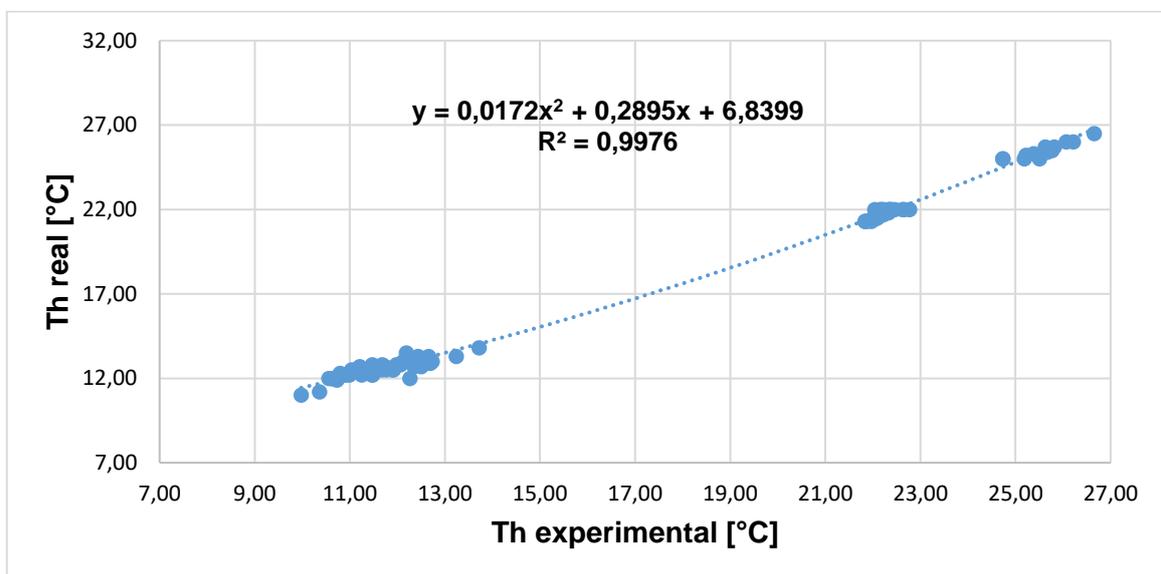


Figura 2.25. Gráfica de temperatura de bulbo húmedo real vs experimental, ecuación de corrección Excel.

(Fuente: Propia)

Mediante Excel se obtiene la ecuación de corrección (4) que corrige los valores de temperatura de bulbo húmedo.

$$Th_{corr} = D(1) * Th^2 + D(2) * Th + D(3) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

Th_{corr} : Temperatura de bulbo húmedo corregida

Th : Temperatura de bulbo húmedo experimental

D(i): i=1,2,3 factores de la ecuación de corrección.

En la Tabla 2.8 se definen los coeficientes para la ecuación de corrección (4).

Tabla 2.8. Factores de la ecuación de corrección (4)

Factor	Valor
D(1)	0,0172
D(2)	0,2895
D(3)	6,8399

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 2.25 el valor del coeficiente de determinación es cercano a 1, por lo tanto, los resultados son confiables. El error presente en la humedad relativa varía según el área de análisis que se muestra en la Figura 2.24. Cabe señalar que el Excel utiliza las medias de los datos graficados para obtener el coeficiente de determinación, este valor se determina utilizando la ecuación (15), p. 57 [15].

b) Uso de mínimos cuadrados

Para realizar este análisis se trabaja con los datos de temperatura de bulbo húmedo que se obtienen con el higrómetro digital fabricado y con el psicrómetro de flujo continuo, en la cual se realiza un ajuste lineal. Las ecuaciones utilizadas se obtienen del libro de métodos numéricos para ingenieros de Steven Chapra [12].

Para obtener la ecuación de corrección utilizando una regresión lineal por mínimos cuadrados, se calcula la pendiente de la línea recta usando la ecuación (5). Esta ecuación usa los datos de temperatura de bulbo húmedo reales y experimentales que se muestran en la sección 3.1.3, pp. 77-84.

$$a_1 = \frac{n * \sum x_i y_i - \sum x_i * \sum y_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

n : Número de datos.

y_i : Valores de temperatura de bulbo húmedo reales

x_i : Valores de temperatura de bulbo húmedo experimentales

a_1 : Pendiente de la línea recta

Luego de obtener la pendiente de la línea recta, se calcula el punto de intersección de la línea con el eje y, para esto se usa la ecuación (7). Esta ecuación utiliza las medias de los valores reales y experimentales de la temperatura de bulbo húmedo, los valores de las medias se determinan usando la ecuación (6).

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}, \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

\bar{y} : Es la media de los valores reales de temperatura de bulbo húmedo

\bar{x} : Es la media de los valores experimentales de temperatura de bulbo húmedo

$$a_0 = \bar{y} - a_1 * \bar{x} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

a_0 : Intersección de la recta con el eje y

En la Tabla 2.9 se muestran los resultados para obtener la ecuación de corrección (9).

Tabla 2.9. Resultados de los cálculos respectivos para la obtención de la ecuación de corrección.

n	$\sum x_i * y_i$	$\sum x_i^2$	$\sum y_i$	$\sum x_i$	a_1	a_0	\bar{x}	\bar{y}
84	28838,354	28725,81322	1470,193	1493,7	0,90017369	2,02703495	17,78214286	17,50229762

(Fuente: Propia)

La ecuación (8) representa la función lineal por mínimos cuadrados.

$$y = a_0 + a_1 x \quad (\text{Ec. 8})$$

Por lo tanto, la ecuación de corrección para el higrómetro digital fabricado utilizando regresión lineal por mínimos cuadrados es:

$$Th_{corr} = 0.90017369 * Th + 2,02703495 \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

Th_{corr} : Temperatura de bulbo húmedo corregida

Th: Es la temperatura de bulbo húmedo experimental

- **Cuantificación del error para la regresión lineal calculada:**

Al realizar la regresión por mínimos cuadrados, se presenta una línea recta que no necesariamente pasa por todos los datos de las mediciones de temperatura de bulbo húmedo [12]. Para realizar la cuantificación del error de la ecuación (9), se parte de los coeficientes calculados usando las ecuaciones (10) y (11) respectivamente. Con los coeficientes se procede al cálculo de la desviación estándar usando la ecuación (12).

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Ec. 10})$$

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

S_r, S_t : Coeficientes calculados a partir de temperatura de bulbo húmedo.

$$S_y = \sqrt{\frac{S_t}{n-1}} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

S_y : Es la desviación estándar.

La ecuación (13) permite calcular el error estándar:

$$S_{\frac{y}{x}} = \sqrt{\frac{S_r}{n-2}} \quad (\text{Ec.13})$$

Donde:

$S_{\frac{y}{x}}$: Es el error estándar estimado.

La ecuación (14) permite calcular el coeficiente de determinación con el cual se verifica la confiabilidad de la ecuación de corrección (9).

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

r^2 : Coeficiente de determinación

r : Coeficiente de correlación

En la Tabla 2.10 se observan los resultados del análisis de verificación de error para la ecuación de corrección (9).

Tabla 2.10. Resultados de los cálculos para la verificación de la ecuación de corrección.

S_y	$\frac{S_y}{x}$	S_t	S_r	r^2	r
5,555769522	1,213361844	2994,057774	141,3357085	0,952794595	0,976111979

(Fuente: Propia)

El coeficiente de determinación que se muestra en la Tabla 2.10 es cercano a 1, por lo tanto, la confiabilidad utilizando esta ecuación es aceptable.

El coeficiente de determinación para las ecuaciones de corrección (4) y (9) se observa en la Tabla 2.11. Además, se Excel utiliza la ecuación (15) para calcular el coeficiente de determinación [15].

$$r^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

x_i : Valores reales de la temperatura de bulbo húmedo.

y_i : Valores experimentales de la temperatura de bulbo húmedo.

\bar{y} : Es la media de los valores reales de temperatura de bulbo húmedo

\bar{x} : Es la media de los valores experimentales de temperatura de bulbo húmedo

r^2 : Coeficiente de determinación

Tabla 2.11. Resultados del cálculo del coeficiente de determinación utilizando varios métodos.

Mínimos cuadrados cálculo manual	Usando la ecuación (15)	Programación de Excel
0,9527946	0,99750328	0,99501279

(Fuente: Propia)

c) Uso de Matlab

Utilizando programación en Matlab se realiza el gráfico de los datos ordenados de temperaturas de bulbo húmedo reales y experimentales. A partir del gráfico de datos se obtienen 5 ecuaciones, en las cuales se varía el grado (ecuación lineal hasta una ecuación de 5to grado) ver Figura 2.26. El gráfico de la ecuación que contenga la mayor cantidad de datos medidos en su trayecto proporciona los valores más cercanos a los reales, es decir se reduce el error en la humedad relativa.

Tabla 2.12. Ecuaciones de Matlab con error promedio en humedad relativa

Grado	Ecuación	Error [%]
Lineal	$0,9063x + 2,0294$	4,296
cuadrática	$0,012057x^2 + 0,46889x + 5,4943$	3,121
cubica	$0,00062534x^3 - 0,02281x^2 + 1,0901x + 1,9972$	3,144
4th	$0,00022243x^4 - 0,015459x^3 + 0,3967x^2 - 3,5693x + 20,642$	3,211
5th	$-6,81138 * 10^{-5}x^5 + 0,0063888x^4 - 0,23327x^3 + 4,1441x^2 - 34,935x + 122,81$	3,144

(Fuente: Propia)

Para analizar el error porcentual promedio de humedad relativa con los datos corregidos se utilizan los coeficientes de cada ecuación, los resultados del cálculo del error se observan en la Tabla 2.12.

Con el análisis planteado, al observar las curvas de la Figura 2.26, la ecuación que contiene la mayor cantidad de datos reales y experimentales de temperatura de bulbo húmedo es la de 5to grado, además esta ecuación presenta un error promedio de humedad relativa corregida igual a 3,144%. Por estas dos razones se elige la ecuación (16) de 5to grado para realizar la corrección en temperatura de bulbo húmedo.

$$Th_{corr} = (Ar(1) * t^5 + Ar(2) * t^4 + Ar(3) * t^3 + Ar(4) * t^2 + Ar(5) * t + Ar(6)) \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

$Ar(i)$: Son los coeficientes de la ecuación de corrección, $i=1,2,\dots,6$

Th_{corr} : Temperatura de bulbo húmedo corregido

t : Temperatura de bulbo húmedo sin corrección.

En la Tabla 2.13 se observan los coeficientes de la ecuación de corrección (16).

Tabla 2.13. Factores de ecuación de corrección 16.

Constante	Valor
Ar(1)	-6,8138E-05
Ar(2)	0,0063888
Ar(3)	-0,23327
Ar(4)	4,1441
Ar(5)	-34,935
Ar(6)	122,81

(Fuente: Propia)

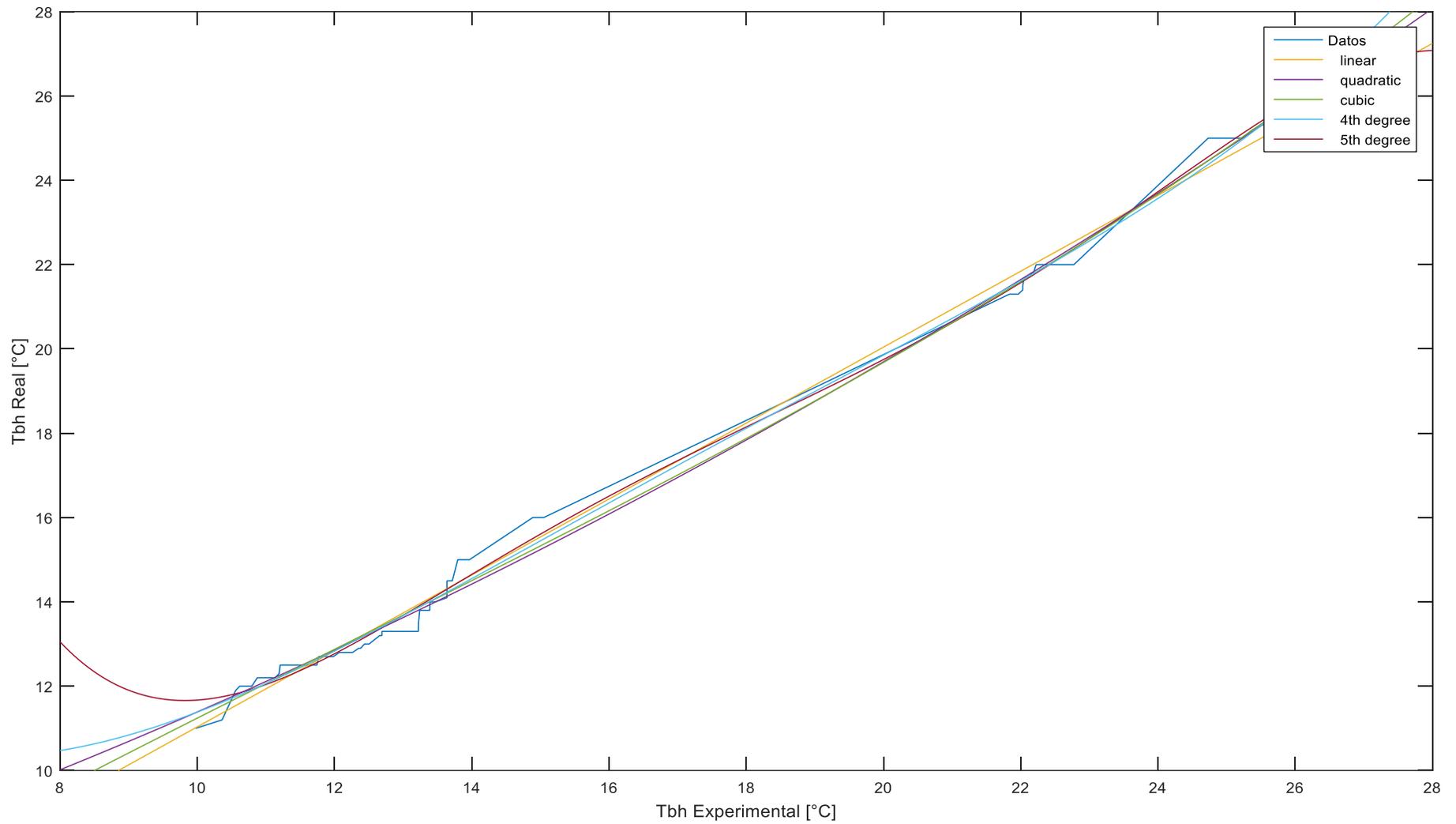


Figura 2.26. Gráfico de ecuación de corrección de temperatura de bulbo húmedo utilizando Matlab.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.27 se observa el valor del coeficiente de determinación obtenido a partir de la ecuación (16) mediante Matlab.

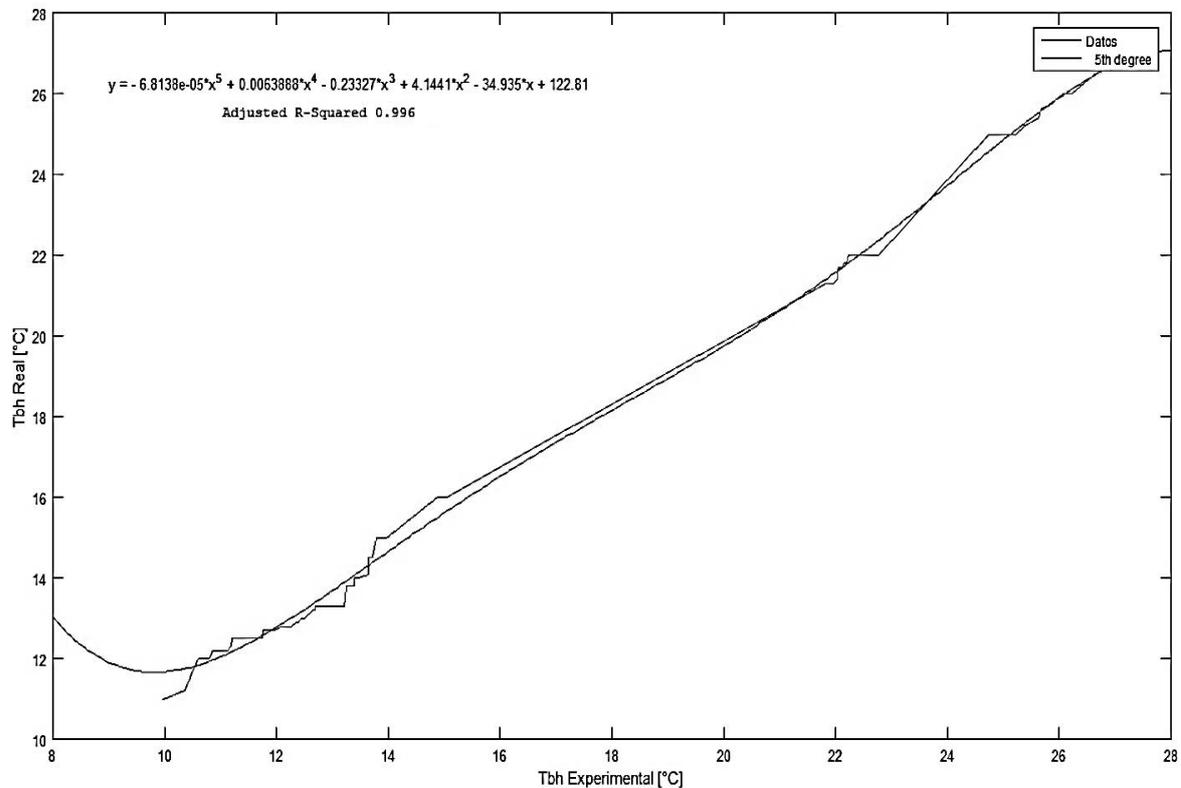


Figura 2.27. Gráfica de temperatura de bulbo húmedo real vs experimental, ecuación de corrección Matlab.

(Fuente: Propia)

d) Selección de la ecuación de corrección

Al evaluar los resultados con las ecuaciones de corrección, se tiene que la mejor opción entre las tres ecuaciones es la calculada con programación en Matlab. Con la ecuación (16) se reduce el porcentaje de error en la humedad relativa en varias localidades del Ecuador con altitudes mayores a los 2000 msnm. Los resultados de los errores porcentuales promedios al utilizar estas ecuaciones se encuentran en la Tabla 3.18 del capítulo 3, p. 88.

2.5. Implementación de las alternativas de corrección y cálculos de psicrometría en el prototipo

En esta sección se trata la programación realizada para la corrección de los datos del higrómetro digital fabricado, así como también la programación para presentar los datos en una pantalla LCD.

2.5.1. Código de funcionamiento del higrómetro digital con corrección

A partir de las ecuaciones obtenidas en la sección 2.4.4, pp. 45-52, se realiza un ajuste a la programación del higrómetro digital sin corrección.

Primero se realiza una corrección en altitud con las ecuaciones (2) y (3). En la Figura 2.28 se muestra el código para la lectura y corrección de altitud.

```
Hr = dht.readHumidity();
Ts=dht.readTemperature();
Asc=(bmp.readAltitude(p0));
if (Asc<1000)
{
  A = ((bmp.readAltitude(p0)*1.0006)-22);
}
if (Asc>1001)
{
  A = ((bmp.readAltitude(p0)*1.0957)-110.4);
}
base2= 1-(2.25577*pow(10,-5))*A;
P =(101.325*(pow(base2,5.2559))*1000);
delay(100);
```

Figura 2.28. Código para la corrección y lectura de altitud.

(Fuente: Propia)

Para encontrar el valor de humedad relativa corregido, se parte de los valores medidos de temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo sin corrección, de los cuales se calcula una diferencia. Esta diferencia permite determinar la temperatura de bulbo húmedo de referencia, en la Figura 2.29 y la Figura 2.30 se observa el código de programación para este cálculo.

```
////////////////////////////////////
//                               Valor estimado inicial de                               //
//                               Temperatura de bulbo húmedo                               //
////////////////////////////////////
x1 = -0.0000000038738 * (pow(A, 3)) + 0.000016017 * (pow(A,2)) - 0.013677 * (A) + 5.6301;
ts = Ts + 273.15;
thl = ts - x1;
diff = 100;
Hrt=Hr/100;
```

Figura 2.29. Código del valor de referencia de la temperatura de bulbo húmedo.

(Fuente: Propia)

```

////////////////////////////////////
//                               Cálculo de lateperatura de           //
//                               bulbo húmedo                         //
////////////////////////////////////
do{
    th2 = th1-0.001;
    HR2 = HRT(ts, th2, P);
    HR1 = HRT(ts, th1, P);
    diff = Hrt - HR1;
    thnuevo = th1 + ((th2 - th1) / (HR2 - HR1)) * (Hrt - HR1);
    th1 = thnuevo;
}while(abs(diff) > 0.01);
thl=thl-273.15;

```

Figura 2.30. Código para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo sin la corrección.

(Fuente: Propia)

Utilizando la ecuación (16), p. 50, se elabora el código que corrige la temperatura de bulbo húmedo, y a partir de estos valores de encuentra la humedad relativa corregida para varias altitudes. En la Figura 2.31 se observa el código de corrección para la temperatura de bulbo húmedo y humedad relativa.

```

// Condición para corrección de la temperatura de bulbo húmedo
if (A<500)
{
    thcor=thl;
}
if (A>501)
{
    //Ecuación de corrección de la humedad relativa
thcor =(-0.000068138*pow(thl,5) + 0.0063888*pow(thl,4) - 0.23327*pow(thl,3) + 4.1441* pow(thl,2) - 34.935* thl + 122.81);
}
thcorr=thcor+273.15;
Hrcorr=(HRT(ts, thcorr, P))*100;// Cálculo de la humedad relativa utilizando thcorr

```

Figura 2.31. Código para corrección de la temperatura de bulbo húmedo y cálculo de la humedad relativa utilizando la temperatura corregida.

(Fuente: Propia)

Para demostrar que el higrómetro digital realiza las correcciones a los valores mostrados en la pantalla, se programa un código que permite visualizar los datos con corrección y sin corrección, esta programación se observa en la Figura 2.32. Para variar estos dos valores se debe presionar el pulsador uno del higrómetro digital fabricado.

```

if (pg==1){
disp.clrScr();
disp.setFont (SmallFont);
disp.print ("%", 65, 5);
disp.print ("C", 65, 22);
disp.setFont (MediumNumbers);
disp.print (humF, 0, 0);
disp.print (tempF, 0, 17);
disp.setFont (TinyFont);
disp.print ("ALTITUD", 0, 35);
disp.print ("MSNM", 18, 43);
disp.print ("TBHUM", 52, 35);
disp.print (thcorF, 50, 43);
disp.print (altF, 0, 43);
disp.print ("C", 72, 43);
if (A>1000){
disp.print ("B2", 73, 13);
}
else{
disp.print ("A3", 73, 13);
}
disp.update();
delay(200);
disp.clrScr();
}

if (pg==2)
{
disp.clrScr();
disp.setFont (SmallFont);
disp.print ("%", 65, 5);
disp.print ("C", 65, 22);
disp.setFont (MediumNumbers);
disp.print (humFsc, 0, 0);
disp.print (tempFsc, 0, 17);
disp.setFont (TinyFont);
disp.print ("ALTITUD", 0, 35);
disp.print ("MSNM", 18, 43);
disp.print ("TBHUM", 52, 35);
disp.print (altFsc, 0, 43);
disp.print (thcorFsc, 50, 43);
disp.print ("C", 72, 43);
disp.print ("A0", 77, 13);
disp.update();
delay(200);
disp.clrScr();
}
}
}

```

Figura 2.32. Código para plasmar los valores corregidos y no corregidos en el higrometro fabricado.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.33 se observa los diferentes códigos que se muestran en la pantalla lcd Nokia 5110 para diferentes ambientes y diferentes localidades.

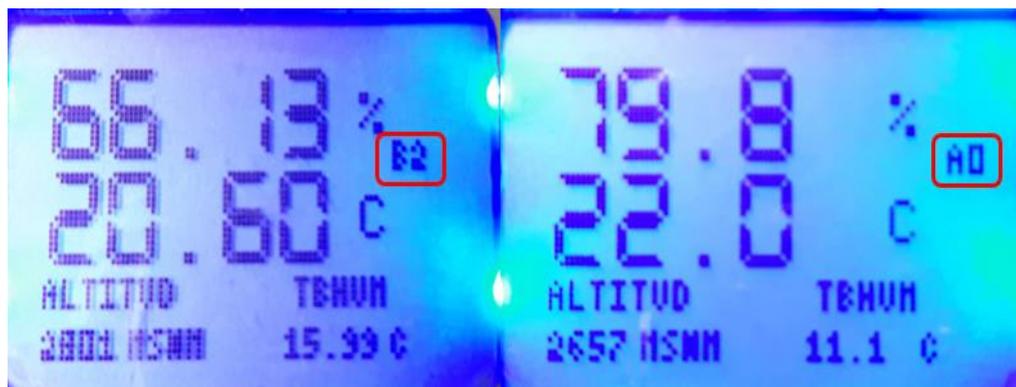


Figura 2.33. Códigos mostrados en la pantalla lcd del higrómetro fabricado.

(Fuente: Propia)

Estos códigos varían dependiendo del lugar de medición, en la Tabla 2.14 se detallan los códigos mencionados.

Tabla 2.14. Significado de los códigos mostrados junto al valor de humedad relativa en el higrómetro digital construido.

X	Y	Código de Medición	Significado	Lugar de medición
A	0	A0	Sin corrección en altitud y humedad relativa.	En cualquier localidad
B	2	B2	Corrección en humedad relativa con ecuación (16) p. 58 y en altitud con ecuación (2) p. 48.	En localidades mayores a 1000 msnm
A	3	A3	Sin corrección en humedad relativa y con corrección en altitud con ecuación (3) p.48.	En localidades menores a los 1000 msnm
X: Relaciona la humedad relativa Y: Relaciona altitud				

(Fuente: Propia)

2.6. Verificación del comportamiento del prototipo con acondicionamiento de señal de 0 a 3040 msnm

En este apartado se realiza la verificación del funcionamiento del higrómetro digital fabricado, es decir se toman datos reales con el psicrómetro de flujo continuo (temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco) y datos experimentales con el higrómetro digital con acondicionamiento de señal (temperatura ambiental, humedad relativa y altitud). Estas propiedades se toman a dos altitudes Quito (2800msnm) y Tulcán (3040msnm).

Las mediciones se las realiza cada 20 minutos en el transcurso del día, para la ciudad de Quito se tomaron un total de 13 datos y para la ciudad de Tulcán se tomaron un total de 17 datos. Con estos valores (reales y experimentales) se calcula el error porcentual promedio tanto en humedad relativa como en temperatura de bulbo seco. Las tablas y gráficas obtenidas se observan en las secciones 3.1.4, pp. 85-88.

2.7. Higrómetro digital con acondicionamiento

En esta sección se detallan los materiales utilizados para la fabricación y presentación final del higrómetro digital con corrección. Además, se especifican todas las partes, funcionamiento de botones, características principales y programación.

2.7.1. Materiales y componentes

Para la construcción del higrómetro digital con corrección se utilizan diferentes materiales, estos se dividen en componentes internos (microcontrolador, sensores, placas de conexión) y componentes externos (material base de la carcasa, pantalla, botones).

a) Componentes Internos

Los componentes internos utilizados para el higrómetro digital con corrección son similares a los utilizados en el prototipo electrónico sin corrección. Además, se agregaron dos placas o shields de expansión para aumentar el número de conexiones de voltaje y tierra, y una batería de 9 V. para el funcionamiento de todo el higrómetro digital. A continuación, se detallan los componentes internos.

➤ Microcontrolador Arduino Uno:

Para el funcionamiento del higrómetro digital se utiliza un microcontrolador Arduino uno, en el cual están conectados todos los componentes del dispositivo mediante cables de conexión. Este microcontrolador es la base fundamental del dispositivo ya que contiene toda la programación de funcionamiento. La placa Arduino uno se encuentra ubicado en la parte central de la carcasa y está conectado a una batería de 9 voltios para su encendido. En la Figura 2.34 se observa la placa Arduino uno utilizada en el higrómetro digital con corrección.

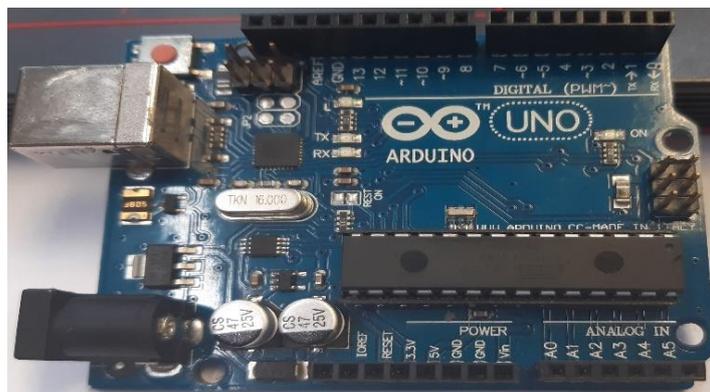


Figura 2.34. Placa Arduino uno utilizada en el higrómetro digital con corrección.

(Fuente: Propia)

➤ Sensores barométrico y de humedad y temperatura

Para obtener los valores de humedad relativa y temperatura de bulbo seco se utiliza el sensor DTH22. El cual se encuentra ubicado en la parte superior del higrómetro con entradas de aire. Para obtener los valores de altitud sobre nivel del mar se utiliza el sensor BMP180 el cual se posiciona dentro del higrómetro junto a la placa Arduino uno. Estos

sensores se seleccionan por que cumplen con las especificaciones necesarias para el correcto funcionamiento del higrómetro digital. Las tablas del análisis de selección de los sensores se las observa en la sección 2.3.1, pp. 26-27. En la Figura 2.35 se observa los sensores mencionados.

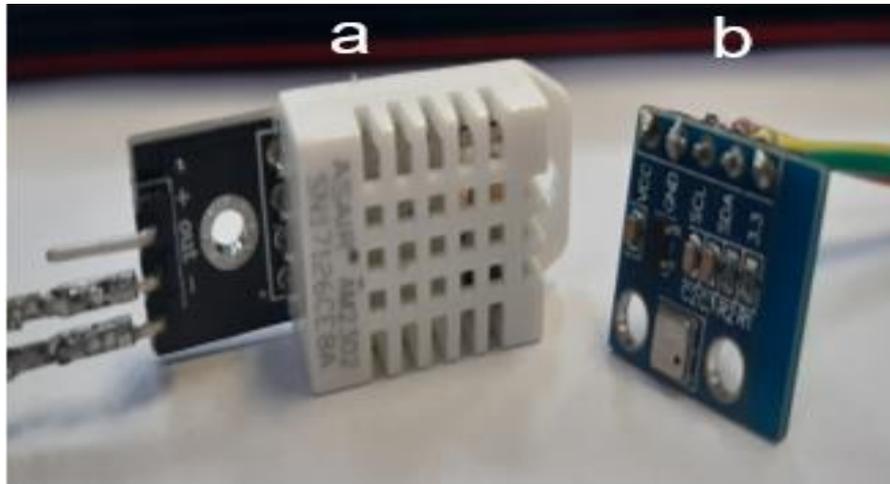


Figura 2.35. a) Sensor DHT22 de humedad y temperatura b) Sensor barométrico BMP180.
(Fuente: Propia)

➤ Placas o shields de expansión

Para la conexión de la pantalla y los botones se utiliza dos placas o shields de expansión, los cuales se conectan directamente en la placa Arduino uno. Estas placas se utilizan con el fin de aumentar las salidas de voltaje y las conexiones a tierra. En la Figura 2.36 se observan las placas conectadas al Arduino uno.

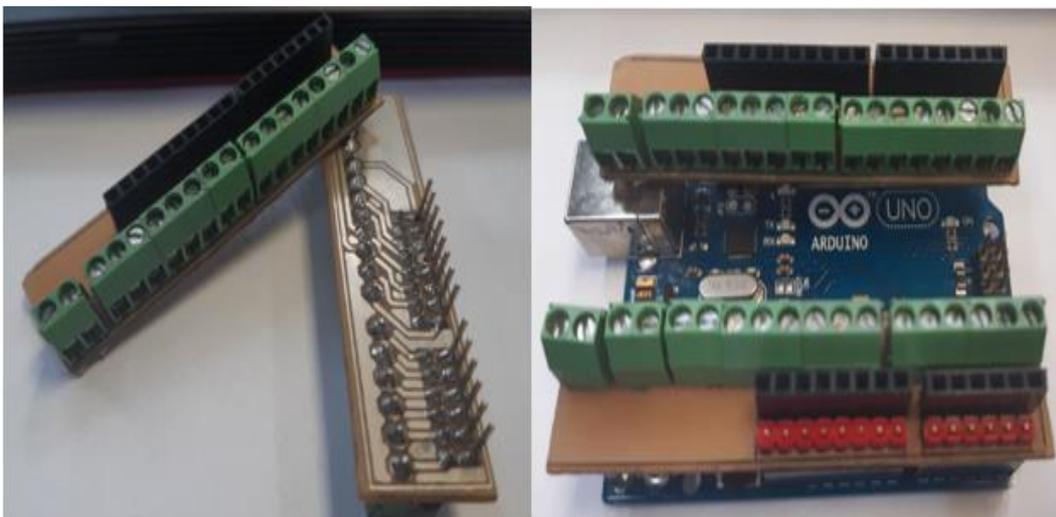


Figura 2.36. Placas o shields de expansión.
(Fuente: Propia)

➤ Fuente de alimentación

Como fuente de alimentación para el Arduino uno se utiliza una batería de 9 voltios la cual se encuentra posicionada en la parte posterior del higrómetro digital. Se encuentra conectada al interruptor (ON-OFF) y al Arduino uno mediante un socket para baterías. En la Figura 2.37 se observa la batería utilizada con el socket de conexión.



Figura 2.37. Fuente de alimentación para Arduino uno, batería de 9 voltios.

(Fuente: Propia)

b) Componentes externos

Los componentes externos del higrómetro digital con corrección son la carcasa, pulsadores, interruptor y la pantalla lcd, los cuales se mencionan a continuación:

➤ Carcasa del higrómetro digital con corrección

Los componentes del higrómetro digital se encuentran distribuidos en una carcasa de plástico, la cual fue diseñada de manera ergonómica para un funcionamiento adecuado. Antes de elegir el proceso de fabricación y el material a utilizar, se diseña el modelo del higrómetro digital en un software de modelado 3D. El modelo final está conformado por 4 partes, con el fin de facilitar el montaje y desmontaje.

La parte principal de la carcasa es donde se ubica el sensor de humedad y temperatura, ya que debe estar expuesto constantemente al ambiente. En la Figura 2.38 se observa el diseño final del higrómetro digital, y en el Anexo VIII se encuentran los planos de cada parte con sus respectivas medidas.



Figura 2.38. Modelo 3D de la carcasa del higrómetro digital con corrección.

(Fuente: Propia)

Para elegir el proceso de fabricación de la carcasa se realiza un análisis de selección el cual se muestra en la Tabla 2.15. Las calificaciones de las características de cada proceso de fabricación se miden de 1 a 5, donde 5 es el valor más alto y 1 es el valor más bajo. Para el análisis de selección se toman en cuenta varias características, estas son:

- **Precio:** Se analiza el valor unitario de fabricación de la carcasa del higrómetro digital.
- **Acabado superficial:** Se analiza la rugosidad y los detalles que resulta de la fabricación con uno de estos procesos.
- **Complejidad:** se refiere, a la dificultad que requiere el equipo para lograr obtener una pieza, es decir si es necesario obtener códigos para fabricación, y la capacidad que debe tener el operario del equipo para lograr fabricar una pieza.
- **Disponibilidad:** se refiere al tiempo y la accesibilidad para fabricar una sola pieza mediante uno de los procesos.
- **Materiales:** se refiere a la variedad de materiales que se pueden utilizar para fabricar con uno de estos procesos, además contiene la variedad de colores y la facilidad de conseguir dichos materiales.

Tabla 2.15. Análisis de selección para el proceso de fabricación de la carcasa del higrómetro digital.

	Precio	Acabado	Complejidad	Disponibilidad	Materiales	Total
Arranque de viruta (maquina CNC)	4	3	3	5	3	18
Impresión 3d	4	4	5	5	5	23
Moldeo por inyección plástica	1	5	4	1	3	15

(Fuente: Propia)

Con el análisis de la Tabla 2.15, se elige la impresión 3D como método de fabricación ya que cumple con los requerimientos necesarios para este trabajo.

El proceso de impresión 3D utiliza varios filamentos, los más utilizados en el mercado son PLA, ABS y PETG.

Los filamentos ABS son materiales de bases petroquímicas, es decir no son amigables con el medio ambiente, ya que emiten gases nocivos al ser procesados. Este tipo de filamento no se usa en lugares pequeños y sin ventilación, una gran ventaja es sus altas propiedades térmicas [16].

Los filamentos PLA son de bases naturales, es decir, no emiten gases nocivos al ser procesados y son amigables con el medio ambiente. Este tipo de filamentos presenta una mayor variedad de colores, la desventaja son sus bajas propiedades térmicas (a partir de los 50 °C presenta una reducción en las propiedades mecánicas) [16].

Los filamentos PETG son los materiales plástico más utilizado en el mundo, entre uno de sus productos se tiene a las botellas plásticas. Es un filamento que presenta propiedades mecánicas y térmicas altas y al ser un material brillante se observa claramente cualquier rayón en la superficie [16].

Para evaluar las características de los materiales utilizados en la impresión 3D, se utiliza una numeración de 1 a 5 donde el valor optimo es 5 y el mínimo valor es 1.

Tabla 2.16. Análisis de selección para los materiales de la impresión 3D.

	Propiedades mecánicas	Propiedades térmicas	Costos	Acabado superficial	Ecológico	Total
PLA	4	3	4	5	5	21
ABS	5	4	3	5	1	18
PETG	5	5	4	5	1	20

(Fuente: Propia)

Con el análisis que se encuentra en la Tabla 2.15 y la Tabla 2.16, se fabrica la carcasa para el higrómetro digital corregido mediante la utilización de impresión 3D y con filamento PLA.

➤ Lcd Nokia 5110

En la Figura 2.39 se presenta una pantalla de cristal líquido de 48x84 pixeles, utilizada para mostrar los valores con corrección y sin corrección de humedad relativa, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, altitud. Para la presentación final de higrómetro fabricado se utiliza esta pantalla, debido a que presenta mejores prestaciones que la pantalla de 16x2 pixeles utilizada en el prototipo de higrómetro digital sin corrección. Las características eléctricas de funcionamiento se detallan en el ANEXO VI, cabe mencionar que esta pantalla presenta una luz interna que permite observar los valores en la noche.

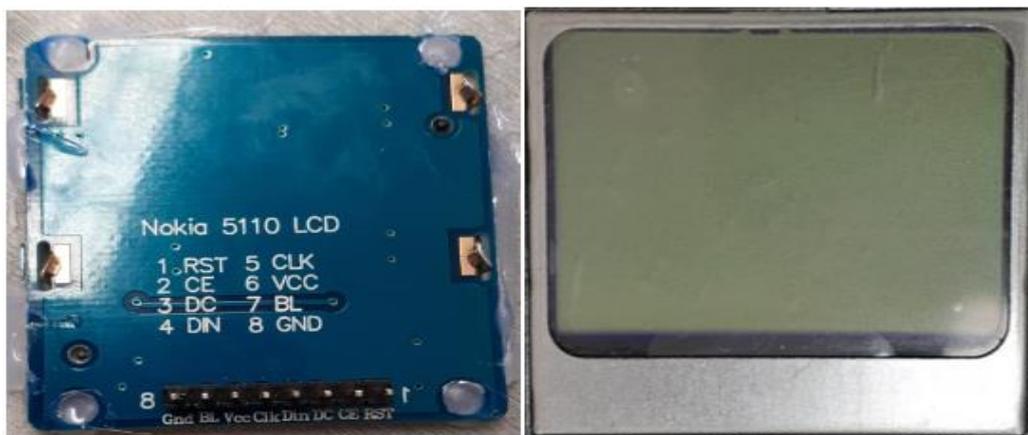


Figura 2.39. Pantalla LCD Nokia 5110 de Arduino.

(Fuente: Propia)

Cuando se enciende el higrómetro digital en la pantalla aparece un código de inicio, el cual dura 3 segundos. En la Figura 2.40 se observa la programación para el código de inicio.

```

disp.setFont(SmallFont);
disp.print("LDT-EPN", CENTER, 5);
disp.print("HIGROMETRO", 14, 20);
disp.print("ALBUJA", CENTER, 30);
disp.print("ALMEIDA", CENTER, 40);
disp.update();
delay(3000); // Esta presentación dura 3 segundos
disp.clrScr(); // borramos el contenido de la pantalla

```

Figura 2.40. Código elaborado para el encendido de la pantalla Nokia 5110.

(Fuente: Propia)

2.7.2. Características físicas y técnicas del higrómetro digital corregido

a) Partes del equipo y características físicas

El higrómetro digital con corrección está formado de tres secciones principales, estas se ubican de tal manera que conforman un equipo ergonómico, ligero y fácil de utilizar, ver Figura 2.41.



Figura 2.41. Partes del higrómetro digital.

(Fuente: Propia)

➤ Sección frontal:

En la parte frontal del higrómetro digital con corrección se encuentra ubicado la pantalla lcd Nokia 5110, en la cual se visualiza los valores de humedad relativa, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y altitud. Estas propiedades se encuentran distribuidas

de tal manera que la humedad relativa y la temperatura ambiente se las observe con más relevancia. En la Figura 2.42 se observa los valores de las propiedades antes mencionadas en la pantalla LCD Nokia 5110.

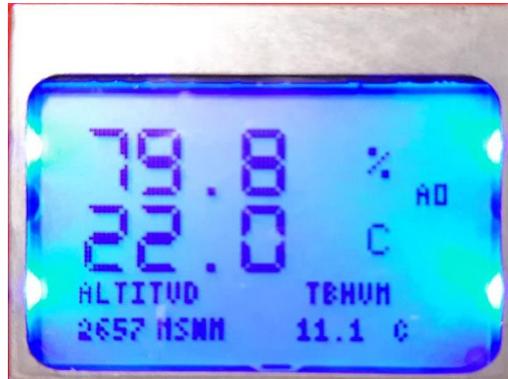


Figura 2.42. Propiedades mostradas en la pantalla Nokia 5110 del higrómetro digital.

(Fuente: Propia)

En la parte del frente se encuentran tres pulsadores y un interruptor en la parte lateral, la funcionalidad de cada uno se describe en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17. Funcionamiento de los botones del higrómetro digital con corrección.

Pulsador	Función	Imagen
1	Este pulsador permite cambiar los valores con corrección a valores sin corrección y viceversa.	
2	Este pulsador permite variar el contraste de la pantalla, se tiene 3 variaciones de contraste (60, 65 y 70).	
3	Este pulsador permite encender y apagar el led interno de la pantalla, para observar los valores en la noche.	
Interruptor	Mediante el interruptor se enciende y se apaga el higrómetro digital.	

(Fuente: Propia)

➤ Sección posterior

En la parte posterior de higrómetro digital con corrección se ubican tres agujeros, en los cuales se insertan tres tornillos de sujeción de manera que la unión con la parte frontal sea la adecuada y soporte cargas externas. También se ubica la cavidad donde se inserta la

batería de 9 V cubierta por una tapa sujetada con dos tornillos pequeños. En la Figura 2.43 se observa la parte posterior del equipo.



Figura 2.43. Parte posterior del higrómetro digital con corrección.

(Fuente: Propia)

➤ **Parte superior**

En la parte superior se encuentra ubicada la cubierta del sensor DHT22. Como el sensor debe estar en contacto con el aire se fabrica una tapa con entradas de aire, las cuales están distribuidas uniformemente en toda la superficie (ocho entradas laterales y una superior). En la Figura 2.44 se observa la cubierta del higrómetro digital corregido.

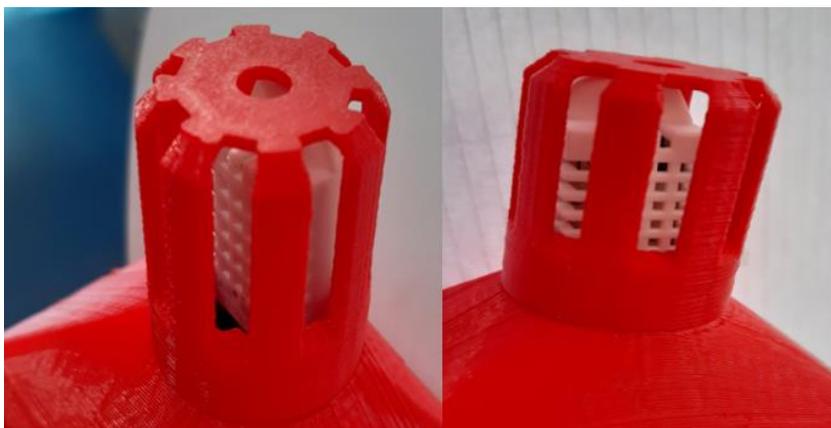


Figura 2.44. Parte superior del higrómetro digital con corrección.

(Fuente: Propia)

➤ Características físicas

Las características físicas del higrómetro digital con corrección son:

- Peso: 300 gr ó 0.30 Kg
- Volumen: 122467,53 milímetros cúbicos
- Color: rojo brillante
- Material: PLA (Ácido Poliláctico)
- Densidad másica: $0,00245 \text{ gr/mm}^3$

b) Características técnicas del higrómetro digital con corrección

El higrómetro digital con corrección tiene varias características técnicas, se conforman entre eléctricas, de operación y precisión. En la Tabla 2.18 se observan estas características.

Tabla 2.18. Características técnicas del higrómetro digital con corrección.

Parámetros	Símbolo	min	typ	max	Unidad
Voltaje de operación	V_{DD}	6	9	12	V
Consumo de Energía	I_{DDlow}		100		μA
	I_{DDstd}		500		mA
	I_{DDhigh}		640		mA
Humedad Relativa	Resolución		0,01		%HR
	Rango	0		100	%HR
	Exactitud		± 6		%HR
Temperatura	Resolución		0,1		$^{\circ}C$
	Rango*	10		30	$^{\circ}C$
	Exactitud		± 2		$^{\circ}C$
Altitud	Resolución		1,0		msnm
	Rango	0		3000	msnm
	Exactitud		± 20		msnm

*Temperatura sin correcciones de $-40^{\circ}C$ a $50^{\circ}C$.

(Fuente: Propia)

2.7.3. Uso del higrómetro digital fabricado

Para el correcto funcionamiento del higrómetro digital con corrección se deben seguir los siguientes pasos:

1. Encender el equipo: Para encender el equipo se debe presionar el interruptor que se encuentra en la parte lateral derecha hacia abajo.
2. Encendido de pantalla: Para visualizar los valores se debe esperar aproximadamente 5 segundos después de presionar el interruptor de encendido.
3. Funcionamiento de pulsadores: El pulsador uno permite cambiar los valores de las propiedades psicrométricas con corrección a valores sin corrección y viceversa. Con el pulsador dos se varía el contraste de la pantalla y con el pulsador tres se enciende una luz led para visualizar los datos en la noche. Para retornar los valores a su estado inicial se debe presionar los pulsadores nuevamente.
4. Luego de realizar las respectivas mediciones se debe apagar el equipo para ahorro de energía, para esto se presiona el interruptor que se encuentra en la parte lateral derecha hacia arriba.

Este funcionamiento se explica más detalladamente en el diagrama de flujo que se encuentra en la Figura 2.45.

a) Advertencias de uso:

- El sensor de humedad relativa del higrómetro digital debe estar expuesto a flujos de aire, por lo que no se recomienda ponerlo en contacto directo e indirecto con agua.
- No se debe presionar los tres pulsadores al mismo tiempo, ya que esto genera cortos y dañar el equipo.
- Para reducir el tiempo de respuesta del higrómetro digital se recomienda ponerlo en contacto con flujos de aire de entre 0.5 y 1 m/s.
- Si el higrómetro después de presionar el interruptor de encendido no muestra valores en la pantalla, quiere decir que la batería esta baja, por lo cual se la debe cambiar.

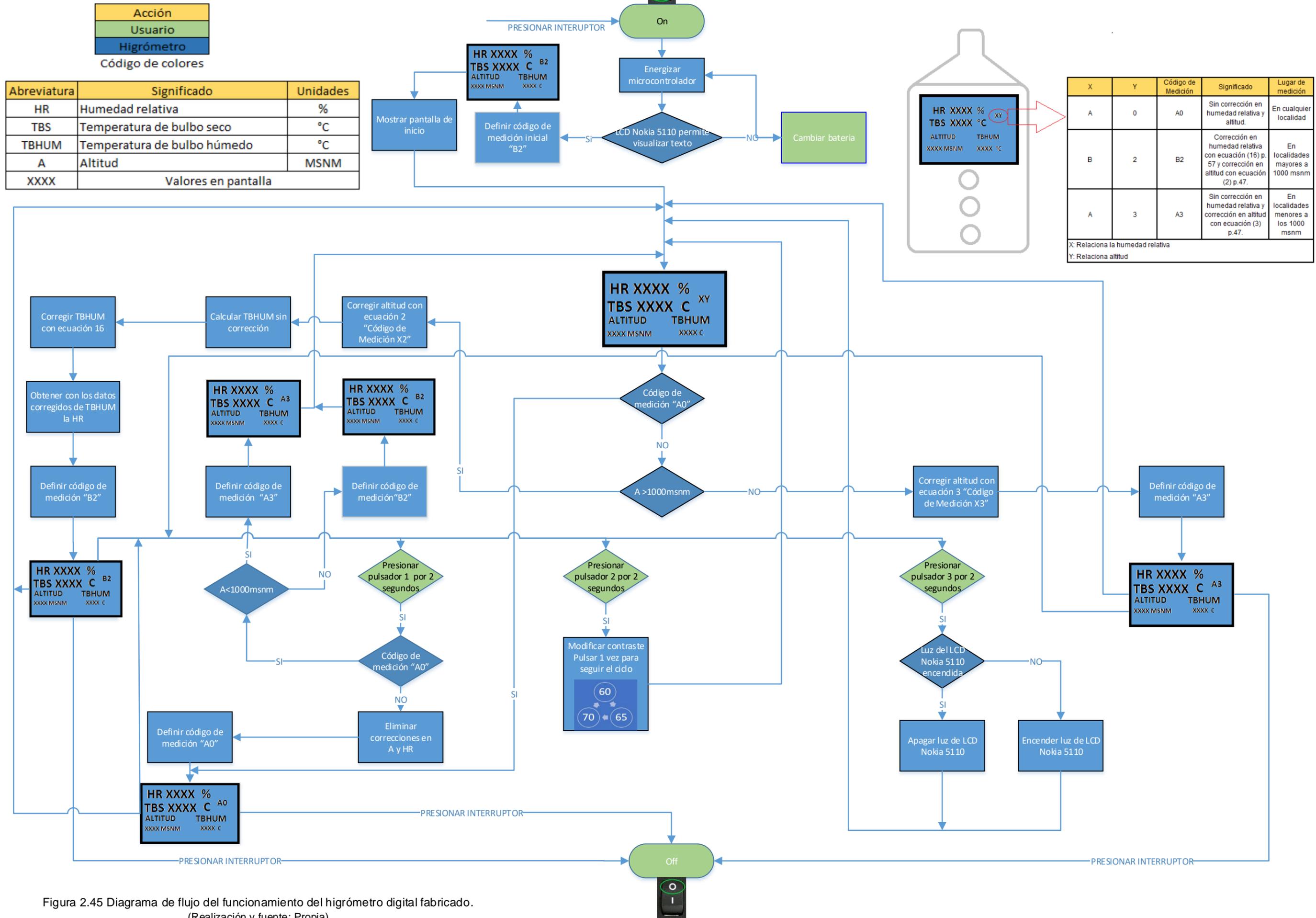


Figura 2.45 Diagrama de flujo del funcionamiento del higrómetro digital fabricado.
(Realización y fuente: Propia)

2.7.4. Costo de fabricación del higrómetro digital con corrección

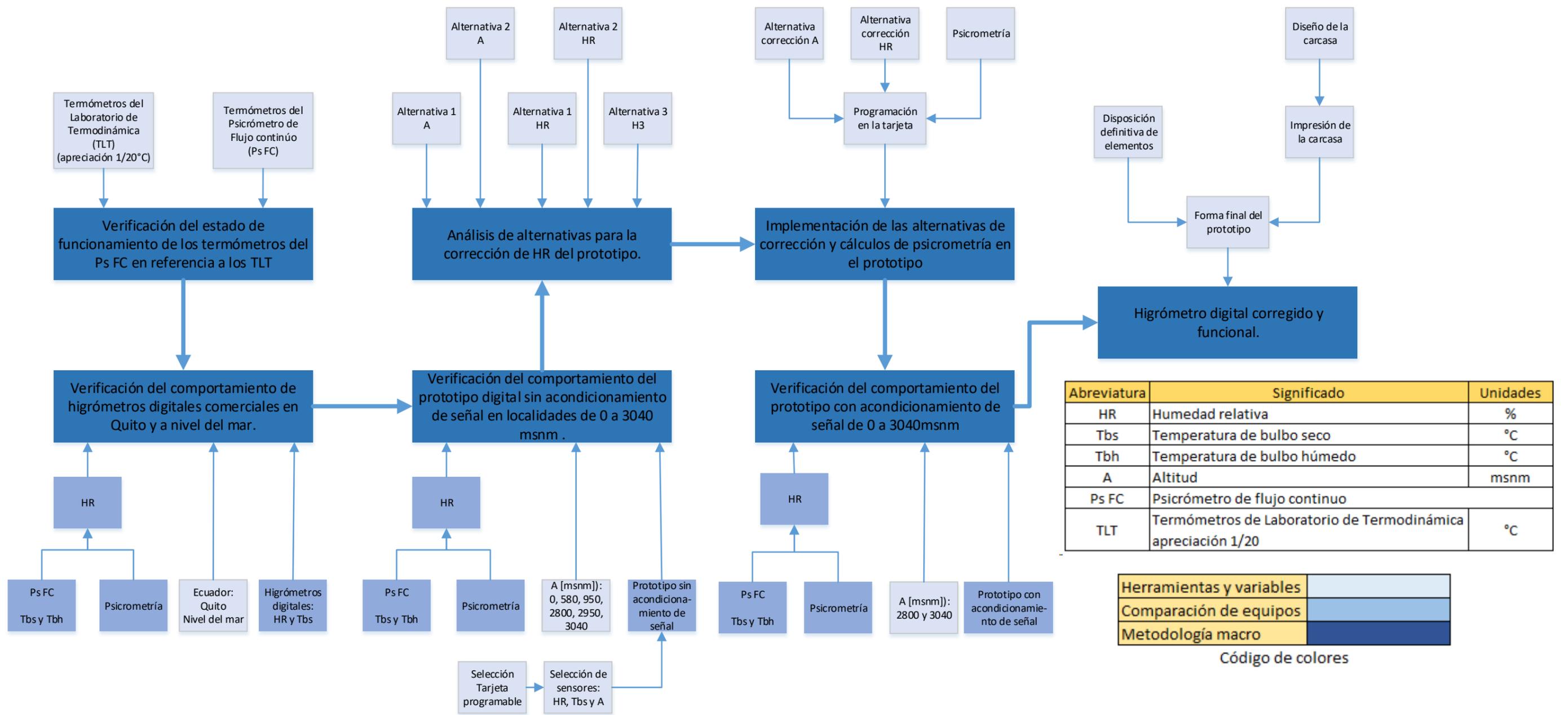
El costo de fabricación del higrómetro digital con corrección tiene un valor de \$101,70 únicamente considerando materiales de la Tabla 2.19.

Tabla 2.19. Tabla de costos de fabricación del prototipo e higrómetro digital con corrección.

Prototipo electrónico sin corrección		Higrómetro Digital LTD-EPN001	
Elemento	Precio [\$]	Elemento	Precio [\$]
Arduino uno* (ver Figura 2.6)	18,70	Precio de los accesorios sin acondicionamiento*, sin LCD 16X2 y sin tarjeta ProtoBoard	43,70
Cables de conexión* (ver Figura 2.15)	3,00		
Sensor DHT22* (ver Figura 2.3)	7,00		
Sensor BMP180* (ver Figura 2.4)	15,00		
ProtoBoard (ver Figura 2.15)	6,00	Placa de expansión (ver Figura 2.36)	12,00
Display 1602 (ver Figura 2.5)	7,00	Batería 9 V (ver Figura 3.37)	4,00
Total	56,70	Impresión 3D (ver Figura 2.38)	30,00
		LCD 5110 (ver Figura 2.39)	7,00
		Elementos de Soldadura (Cautín, estaño y crema de soldar)	5,00
		Total	101,70

(Fuente: Propia)

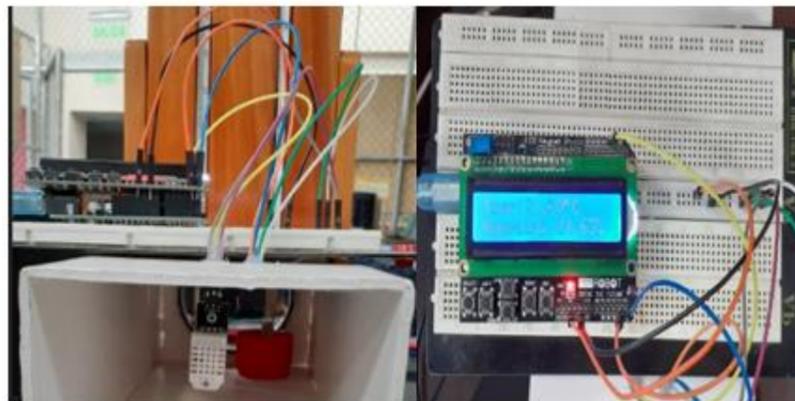
El desarrollo de la metodología descrita en el capítulo 2 se detalla en el diagrama que se observa en la Figura 2.46.



Psicrómetro de Flujo continuo Ps FC



Higrómetros digitales comerciales



Prototipo sin acondicionamiento



Higrómetro digital con acondicionamiento

Figura 2.46 Metodología desarrollada en el proyecto. (Realización y fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se encuentran los resultados de todas las mediciones de las propiedades psicrométricas del aire realizadas en diferentes localidades del Ecuador, con higrómetros comerciales, con el higrómetro digital fabricado sin corrección y con corrección, así como también su respectivo análisis. Además, se detalla el desarrollo de un programa para reducir los errores humanos en mediciones de humedad relativa con cartas psicrométricas y un estudio de condiciones ambientales entre Tulcán y Quito.

3.1. Resultados

3.1.1. Programa para el cálculo de humedad relativa

Para evitar que los valores reales de humedad relativa obtenidos con el psicrómetro de flujo continuo presenten errores humanos (lectura de las cartas psicrométricas) se realiza un programa con macros en Excel. Esta programación utiliza las ecuaciones del ASHRAE Fundamentals Handbook [4], las cuales se observan en el ANEXO VII.

El programa utiliza la temperatura de bulbo seco (Tbs) en [°C], la temperatura de bulbo húmedo (Tbh) en [°C] y la altitud en [msnm] para determinar el porcentaje de humedad relativa con precisión y exactitud. Para validar los datos de esta programación se compara con el programa utilizado para obtener las cartas psicrométricas en varias altitudes del Ecuador [5]. Esta comparación da como resultado un porcentaje de error bajo, por lo cual el programa cumple con el objetivo de reducir los errores de medición. La presentación de este programa se observa en la Figura 3.1.

Tbs [°C]	Tbh [°C]	Altitud [msnm]	Presión [Pa]	HR %
21,1	17,2	2886	71130,768	71,30223
Llenar este campo	Llenar este campo	Llenar este campo	Calcular	

Figura 3.1. Hoja de presentación programa para el cálculo de humedad relativa.

(Fuente: Propia)

3.1.2. Pruebas de higrómetros digitales comerciales a diferentes altitudes

En la Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3, se observan los resultados de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro (H1), higrómetro (H2), e higrómetro (H3) respectivamente, respecto a los valores encontrados en las cartas psicrométricas a una altitud de 2806 msnm (EPN-Quito). También, se visualiza los errores calculados entre

dichas propiedades. Cabe mencionar que los errores calculados en este trabajo son errores porcentuales (ver sección 1.4, pp. 19-20).

Tabla 3.1. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H1 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).

N° MEDICIÓN	TBS (°C) H1	%HR H1	TBS (°C) CP	%HR CP	% ERROR TBS	% ERROR HR
1	22,5	49,6	22	70	2%	29%
2	22,8	46,5	22	60	4%	23%
3	28,2	33,3	27	48	4%	31%
4	26,3	39,4	25	54	5%	27%
5	23,4	48,2	23	58	2%	17%
6	15,8	77,7	15,5	85	2%	9%
7	20,8	57,2	20	70	4%	18%
8	25,5	41	25	51	2%	20%
9	23,1	49,6	22	60	5%	17%
10	16,2	74,6	16	83	1%	10%
11	20,8	59,3	20	65	4%	9%
12	21,6	47,5	21	68	3%	30%
13	15,7	74,1	15,5	81	1%	9%
14	23,2	47,9	22,5	68	3%	30%
15	23,8	38,1	23	51	3%	25%
16	20	49,1	19	63	5%	22%
PROMEDIO					3%	20%

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H2 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).

N° MEDICIÓN	TBS (°C) H2	%HR H2	TBS (°C) CP	%HR CP	% ERROR TBS	% ERROR HR
1	23,2	50,8	22	70	5%	27%
2	23,1	49,5	22	60	5%	18%
3	27,8	34,7	27	48	3%	28%
4	26,2	40,7	25	54	5%	25%
5	23,2	49,3	23	58	1%	15%
6	15,7	77,4	15,5	85	1%	9%
7	20,5	57,4	20	70	3%	18%
8	26,1	40	25	51	4%	22%
9	22,5	49,6	22	60	2%	17%
10	16,1	76,5	16	83	1%	8%
11	20,8	58,5	20	65	4%	10%
12	22,1	48,23	21	68	5%	29%
13	15,7	75,4	15,5	81	1%	7%
14	23,4	47,4	22,5	68	4%	30%
15	23,9	38,4	23	51	4%	25%
16	19,6	51,8	19	63	3%	18%
PROMEDIO					3%	19%

(Fuente: Propia)

Tabla 3.3. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H3 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).

N° MEDICIÓN	TBS (°C) H3	%HR H3	TBS (°C) CP	%HR CP	% ERROR TBS	% ERROR HR
1	22,5	48,3	22	70	2%	31%
2	22,85	43,8	22	60	4%	27%
3	27,67	31,3	27	48	2%	35%
4	26,12	36,4	25	54	4%	33%
5	23,59	44	23	58	3%	24%
6	16,03	74,4	15,5	85	3%	12%
7	21,11	52,9	20	70	6%	24%
8	25,85	36,5	25	51	3%	28%
9	22,8	45,3	22	60	4%	25%
10	16,56	71,1	16	83	3%	14%
11	20,95	54,4	20	65	5%	16%
12	21,58	42,2	21	68	3%	38%
13	16,2	74,4	15,5	81	5%	8%
14	23,59	44,4	22,5	68	5%	35%
15	23,45	32,6	23	51	2%	36%
16	20,02	46,1	19	63	5%	27%
PROMEDIO					4%	26%

(Fuente: Propia)

Las mediciones de los tres higrómetros (H1, H2, H3) presentan errores considerables únicamente en valores de humedad relativa (HR), mientras que en los valores de temperatura de bulbo seco (TBS) se encuentra dentro de las características técnicas de cada equipo. En la Figura 3.2 se observan los valores de humedad relativa de los tres higrómetros digitales y del psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm.

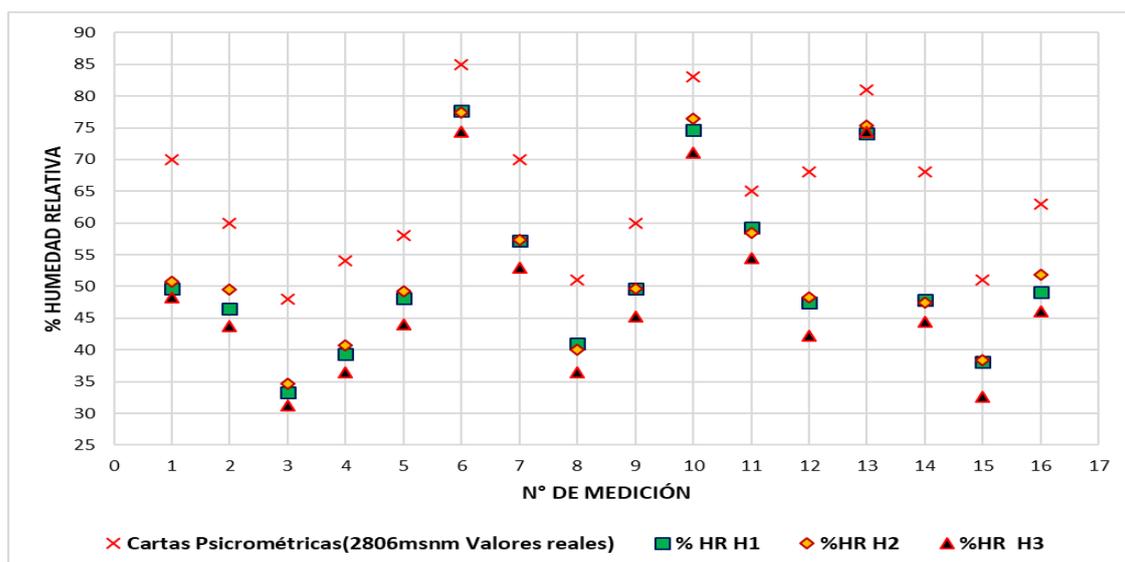


Figura 3.2. Datos de humedad relativa de los higrómetros digitales (H1, H2 y H3), y psicrómetro de flujo continuo (2806msnm valores reales).

(Fuente: propia)

En la Tabla 3.4 se observan los resultados de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital del laboratorio de fluidos (H4), respecto a los valores encontrados en las cartas psicrométricas a una altitud de 2806 msnm. De igual manera, se visualiza los errores porcentuales calculados entre dichas propiedades.

Tabla 3.4. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H4 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).

N° MEDICIÓN	TBS (°C) H4	%HR H4	TBS (°C) CP	%HR CP	% ERROR TBS	% ERROR HR
1	26,4	33,2	25,8	37,74	2%	12%
2	26	33,1	25,1	39,86	4%	17%
3	24,4	36,4	23,2	45,55	5%	20%
4	23,4	42,1	22,2	51,29	5%	18%
5	22,9	41,7	22	52,27	4%	20%
6	22,2	43,3	21	54,32	6%	20%
7	21,2	43,4	20,2	54,16	5%	20%
8	20,6	45,2	19,8	54,4	4%	17%
9	20	45,1	19,2	55,74	4%	19%
10	19,2	46,9	18,8	56,66	2%	17%
11	19,1	47,4	18,8	55,34	2%	14%
PROMEDIO					4%	18%

(Fuente: Propia)

Las mediciones de este higrómetro muestran errores en la humedad relativa (HR), mientras que en la temperatura de bulbo seco (TBS) no tiene mayores complicaciones. En la Figura 3.3 se muestran los valores de humedad relativa del higrómetro digital (H4) y del psicrómetro de flujo continuo.

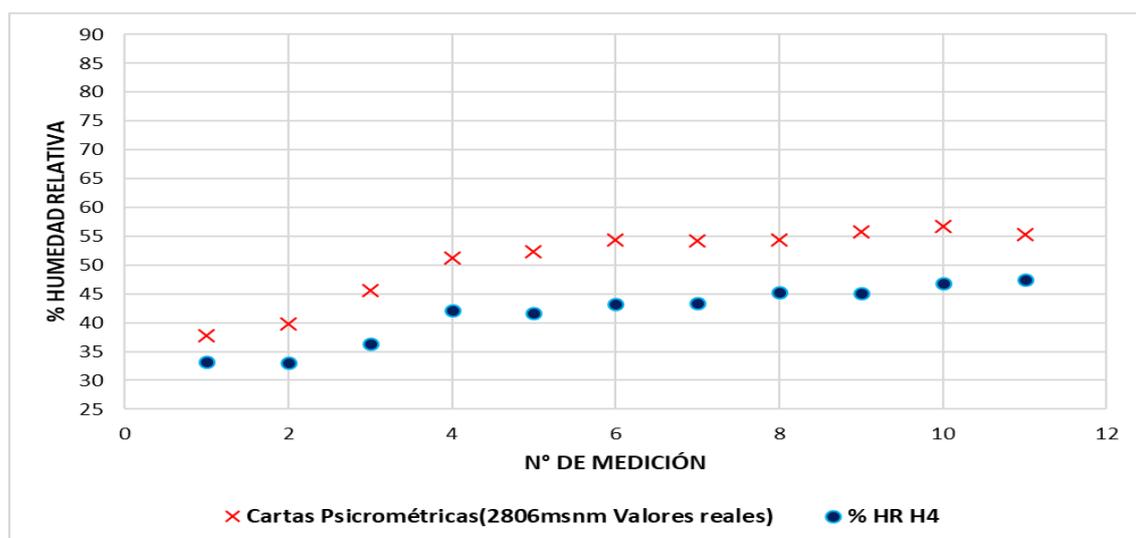


Figura 3.3. Datos de humedad relativa del higrómetro digital H4 y del psicrómetro de flujo continuo (2806msnm valores reales).

(Fuente: propia)

Los higrómetros digitales (H5 y H6) pertenecientes al LAEV, fueron analizados en el mismo instante y bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa. En la Tabla 3.5 y en la Tabla 3.6 se observan los resultados de la humedad relativa (HR) y temperatura de bulbo seco (TBS) de los higrómetros digitales, respecto a los valores tomados con el psicrómetro de flujo continuo. Además, se visualiza el error porcentual calculado para ambas propiedades.

Tabla 3.5. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H5 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).

N° MEDICIÓN	TBS (°C) H5	%HR H5	TBS (°C) CP	%HR CP	% ERROR TBS	% ERROR HR
1	17,5	63,3	17	81	3%	22%
2	17,6	60,3	17	75	4%	20%
3	18,5	59,2	18	65	3%	9%
4	19,1	58	19	70	1%	17%
5	19,8	58,3	20	69	1%	16%
6	20,8	57,8	20	69	4%	16%
7	21,9	54,4	21	68	4%	20%
8	23,5	51,3	23	59	2%	13%
9	25,2	46,1	24	60	5%	23%
10	24,9	41,6	24	55	4%	24%
PROMEDIO					3%	18%

(Fuente: Propia)

Tabla 3.6. Datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del higrómetro digital H6 y el psicrómetro de flujo continuo a 2806 msnm (Quito).

N° MEDICIÓN	TBS (°C) H6	%HR H6	TBS (°C) CP	%HR CP	% ERROR TBS	% ERROR HR
1	17,8	64,9	17	81	5%	20%
2	18	61,7	17	75	6%	18%
3	18,3	59,5	18	65	2%	8%
4	19,1	57,8	19	70	1%	17%
5	19,9	58,4	20	69	1%	15%
6	20,7	58,5	20	69	4%	15%
7	21,5	55,6	21	68	2%	18%
8	22,8	53	23	59	1%	10%
9	24,1	48,4	24	60	0%	19%
10	24,7	44,2	24	55	3%	20%
PROMEDIO					2%	16%

(Fuente: Propia)

Las mediciones de los dos higrómetros (H5 y H6) presentan un error considerable en los valores de humedad relativa, mientras que en los valores de temperatura de bulbo seco se encuentran dentro del margen de las especificaciones técnicas del fabricante. En la Figura

3.4 observa los datos de humedad relativa de ambos higrómetros digitales y del psicrómetro de flujo continuo medidos a 2806 msnm (EPN-QUITO).

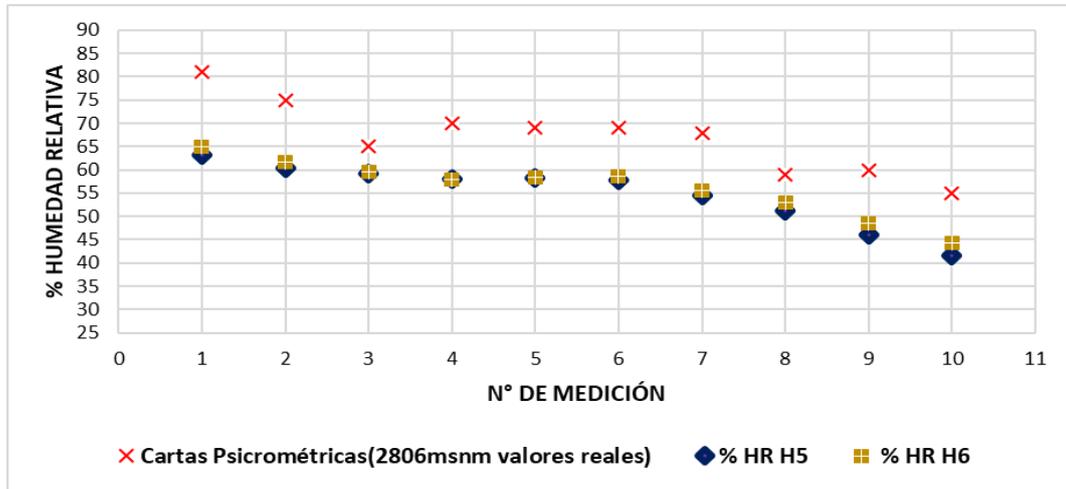


Figura 3.4. Datos de humedad relativa de los higrómetros digitales (H5 y H6), y psicrómetro de flujo continuo (2806msnm valores reales).

(Fuente: propia)

El análisis de humedad relativa y temperatura de bulbo seco también se lo realiza a nivel del mar, pero únicamente se utiliza 4 higrómetros digitales (H1, H2, H3, H4), debido a que los higrómetros digitales H5 y H6 se usan diariamente en el LAEV. Los valores de humedad relativa de los cuatro higrómetros digitales y del psicrómetro de flujo continuo se los observa en la Figura 3.5. De manera que el error porcentual calculado se encuentra dentro de las especificaciones técnicas de cada fabricante, estos errores se los observa en la Tabla 3.7.

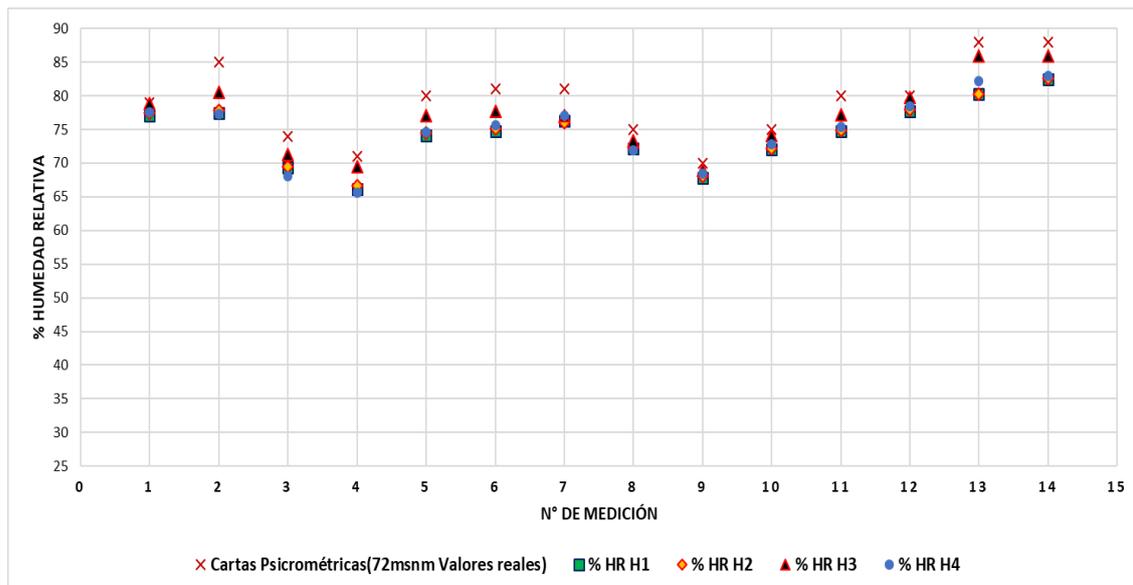


Figura 3.5. Datos de humedad relativa de higrómetros digitales (H1, H2, H3, H4), y las cartas psicrométricas (72 msnm valores reales).

(Fuente propia)

Tabla 3.7. Errores porcentuales de humedad relativa de los higrómetros digitales estudiados a 72msnm.

N° DE MEDICIÓN	% Error H1	% Error H2	% Error H3	% Error H4
1	3%	3%	0%	2%
2	9%	9%	5%	9%
3	6%	6%	4%	8%
4	7%	7%	2%	8%
5	7%	7%	4%	7%
6	8%	8%	4%	7%
7	6%	6%	5%	5%
8	4%	4%	2%	4%
9	3%	3%	2%	2%
10	4%	4%	1%	3%
11	7%	7%	4%	6%
12	3%	3%	0%	2%
13	9%	9%	2%	7%
14	6%	6%	2%	6%
Promedio	6%	6%	3%	5%

(Fuente: propia)

3.1.3. Pruebas del higrómetro digital sin acondicionamiento de señal

a) Valores obtenidos para altitudes hasta los 1000 msnm

Las propiedades psicrométricas analizadas con el higrómetro de flujo continuo son la temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo húmedo (TBH) y la humedad relativa real (HRR), mientras que con el higrómetro digital sin corrección se analiza únicamente la humedad relativa sin corrección (HRSC).

El higrómetro digital sin corrección se evalúa en 3 localidades menores a los 1000 msnm. Las mediciones a nivel del mar se las realiza en la ciudad de Atacames, los valores de las propiedades psicrométricas anteriormente mencionadas se las observa en la Tabla 3.8. De igual manera, se observa el error porcentual calculado entre los valores de humedad relativa experimental y real (psicrómetro de flujo continuo).

Tabla 3.8. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital construido sin corrección en la ciudad de Atacames (nivel del mar).

MEDICIÓN	TBS (°C)	TBH (°C)	HRR [%]	HRSC [%]	ERROR [%]
1	30	26,5	76,219	79	3,65
2	29,5	26	75,998	78	2,63
3	29,5	26	75,998	77	1,32
4	29,2	25,7	75,863	76	0,18
5	29,2	25,6	75,22	75	0,29
6	29	25,3	74,484	75	0,69
7	29,2	25,7	75,863	76	0,18
8	28,5	25	75,539	75	0,71
9	28,3	25	76,76	75	2,29
10	28,2	25	77,378	78	0,80
11	28,1	25	78,001	77	1,28
12	28,6	25,2	76,239	77	1,00
13	28,5	25,4	78,17	80	2,34
14	28,8	25,5	76,982	80	3,92
15	28,8	25,5	76,982	81	5,22
16	28,8	26	80,284	82	2,14
17	28,2	25	77,378	80	3,39
			PROMEDIO		1,89

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Tabla 3.8, las mediciones a nivel del mar no presentan mayores complicaciones, ya que el error porcentual promedio en humedad relativa es de 1,89%. Este valor se encuentra dentro de las especificaciones técnicas del fabricante. Los valores de humedad relativa real y humedad relativa calculada sin corrección se observan en la Figura 3.6.

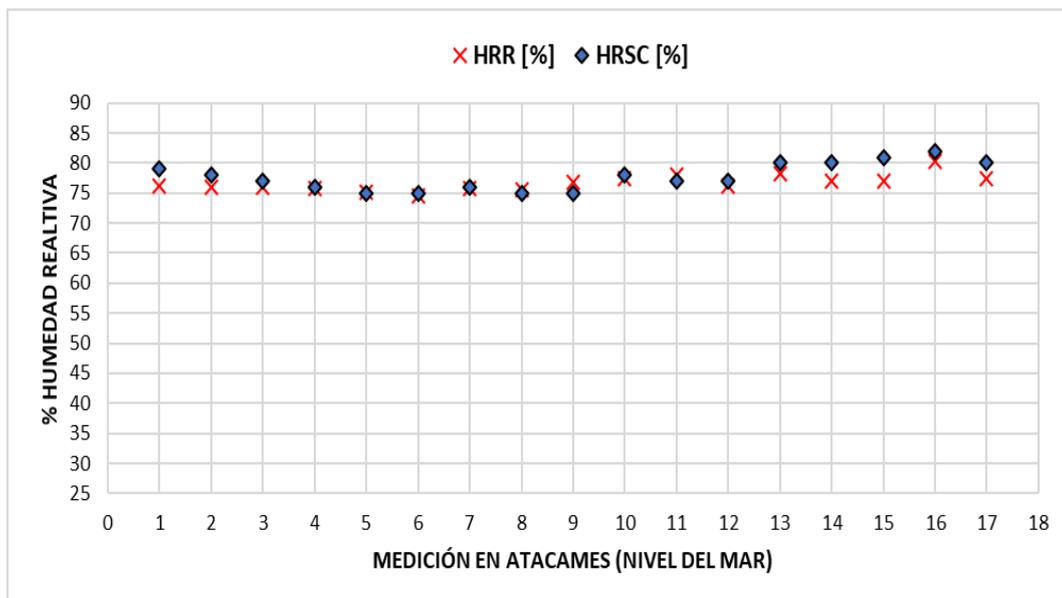


Figura 3.6. Datos de humedad relativa real y experimental sin corrección en Atacames.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.9 se observa los valores de las propiedades psicrométricas del aire analizadas en la ciudad de Santo Domingo con el psicrómetro de flujo continuo y con el higrómetro digital sin corrección.

Tabla 3.9. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Santo Domingo (586 msnm).

MEDICIÓN	TBS (°C)	TBH (°C)	HRR [%]	HRSC [%]	ERROR [%]
1	25	22	77,689	82	5,55
2	24,5	22	81,033	83	2,43
3	25	22	77,689	82	5,55
4	25	22	77,689	81	4,26
5	24,8	21,8	77,596	81	4,39
6	24,9	21,8	76,941	81	5,28
7	25	21,8	76,291	81	6,17
8	24,9	22	78,347	83	5,94
9	24,8	22	79,01	86	8,85
10	24,4	22	81,719	87	6,46
11	24,2	22	83,107	88	5,89
12	24	22	84,518	87	2,94
13	24	21,5	80,831	86	6,39
14	24	21,8	83,035	87	4,78
15	24,1	22	83,81	85	1,42
16	24,1	21,9	83,071	87	4,73
17	24	22	84,519	87	2,94
				PROMEDIO	4,94

(Fuente: Propia)

El error porcentual calculado entre la humedad relativa real y la experimental en la ciudad de Santo Domingo es de 4,94%, este valor se encuentra dentro de las especificaciones técnicas del fabricante. En la Figura 3.7 se observa como varia la humedad relativa experimental con respecto a la real.

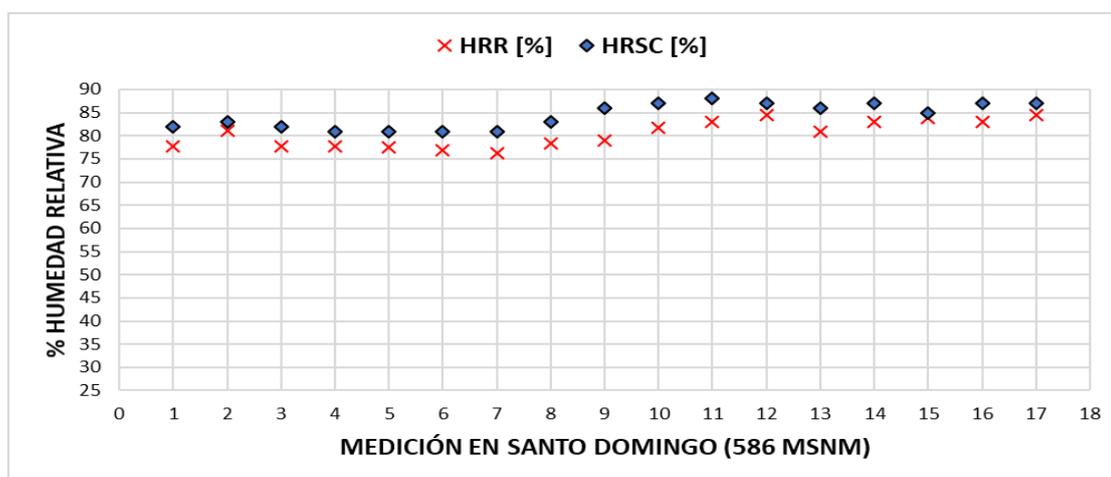


Figura 3.7. Datos de humedad relativa real y experimental sin acondicionamiento de señal en Santo Domingo.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.10 se observa los valores de las propiedades psicrométricas del aire analizadas en el recinto de Rocafuerte (Esmeraldas) con el psicrómetro de flujo continuo y con el higrómetro digital sin corrección.

Tabla 3.10. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Rocafuerte (950 msnm).

MEDICIÓN	TBS (°C)	TBH (°C)	HRR [%]	HRSC [%]	ERROR [%]
1	24	22	84,71	88	3,88
2	24	22	84,71	88	3,88
3	23,7	21,7	84,61	89	5,19
4	23,5	21,7	86,04	90	4,60
5	23,4	21,7	86,76	90	3,73
6	23,4	21,8	87,52	91	3,98
7	23,2	21,3	85,2	91	6,81
8	23,1	21,3	85,92	91	5,91
9	23,8	21,8	84,65	86	1,59
10	23,3	21,6	86,74	90	3,76
11	23,4	21,4	84,52	90	6,48
12	23,2	21,3	85,2	90	5,63
13	23,5	21,7	86	88	2,33
14	23,2	21,3	85,2	90	5,63
				PROMEDIO	4,53

(Fuente: Propia)

El error porcentual calculado entre la humedad relativa real y la experimental en Rocafuerte es de 4,53%, este valor no es alto y aún se encuentra dentro de las especificaciones técnicas del fabricante. En la Figura 3.8 se observa como varia la humedad relativa experimental con respecto a la real.

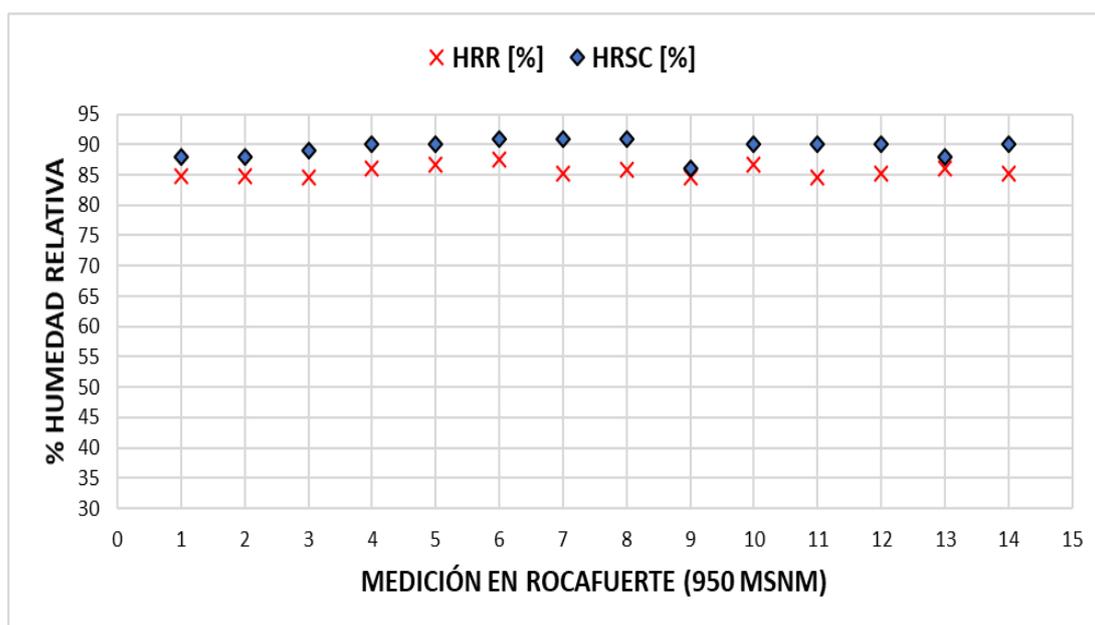


Figura 3.8. Datos de humedad relativa real y experimental sin acondicionamiento en Rocafuerte.

(Fuente: Propia)

Los valores que se obtienen mediante el prototipo de higrómetro digital sin corrección en las localidades menores a 1000 msnm presentan errores relativamente bajos (dentro de las especificaciones técnicas de los proponentes del proyecto). Por lo cual, se considera anular la corrección en humedad relativa para estas altitudes.

b) Valores obtenidos para altitudes mayores a 2000 msnm

El higrómetro digital sin corrección se avalúa en localidades con altitudes superiores a los 2000 msnm. Las propiedades psicrométricas del aire analizadas son la temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo húmedo (TBH), humedad relativa real (HRR) con el psicrómetro de flujo continuo y la humedad relativa sin corrección del higrómetro digital (HRSC), de igual manera se calcula el porcentaje de error entre estas humedades.

En el laboratorio de termodinámica de la FIM-EPN se obtienen los valores de las propiedades psicrométricas de aire anteriormente descritas, el cual se encuentra a 2804 msnm, los resultados se muestran en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Quito Centro (2804 msnm).

MEDICIÓN	TBS (°C)	TBH (°C)	HRR [%]	HRSC [%]	ERROR [%]
1	18	11	47,926	40	16,54
2	18,9	11,2	44,621	40	10,36
3	19,5	11,9	45,97	39	15,16
4	21,5	12,8	41,969	38	9,46
5	21,2	12,7	42,73	37	13,41
6	21,9	13	41,346	37	10,51
7	21,5	12,2	38,66	34	12,05
8	21,9	12,2	37,024	33	10,87
9	22,2	13,5	42,799	35	18,22
10	23	13,2	37,896	35	7,64
11	23	13,3	38,416	34	11,50
12	23,1	13,3	38,019	34	10,57
13	23	13,2	37,896	33	12,92
14	23	13	36,865	32	13,20
15	22,8	12,8	36,613	30	18,06
16	22,8	13,2	38,691	31	19,88
				PROMEDIO	13,15

(Fuente: Propia)

El error porcentual promedio de humedad relativa medido a esta altitud (2804 msnm) es de 13,15%, este valor se encuentra fuera de las especificaciones técnicas del fabricante. La variación de la humedad relativa real respecto a la experimental sin corrección se la observa en la Figura 3.9.

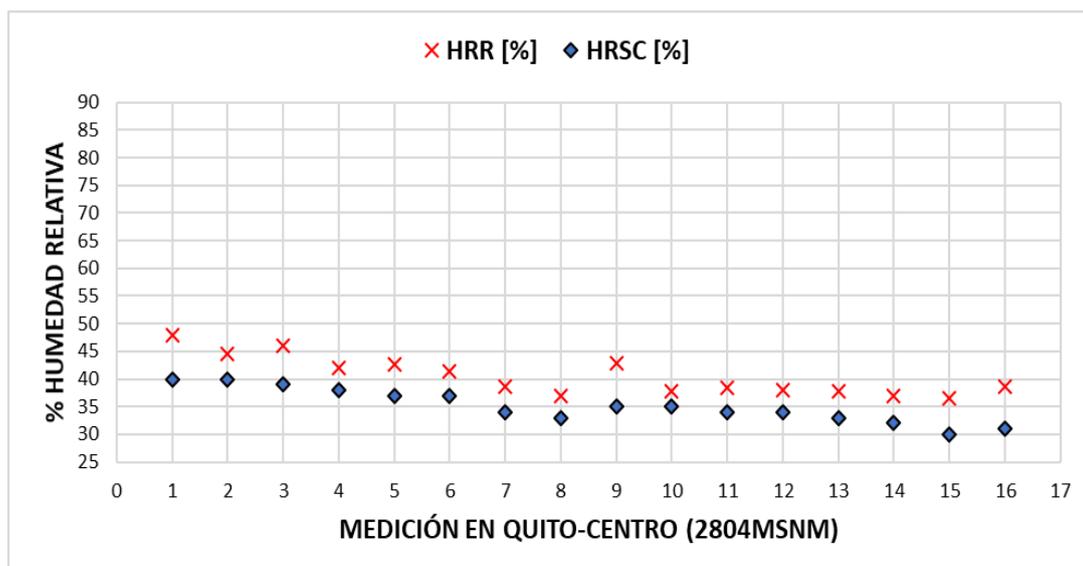


Figura 3.9. Datos de humedad relativa real y experimental sin corrección en Quito Centro.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.12 se observa los valores de las propiedades del aire analizadas con el psicrómetro de flujo continuo y con el higrómetro digital sin corrección en una altitud de 2951 msnm (Quito-SUR).

Tabla 3.12. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Quito Sur (2951 msnm).

MEDICIÓN	TBS (°C)	TBH (°C)	HRR [%]	HRSC [%]	ERROR [%]
1	18	12,5	58,143	49	15,73
2	17	12	60,679	50	17,60
3	17,5	12	57,657	48	16,75
4	18	12,3	56,786	49	13,71
5	18	12,5	58,143	50	14,01
6	18	12,5	58,143	51	12,29
7	18,5	12,5	55,282	46	16,79
8	19	12	49,383	41	16,98
9	19,5	12,2	48,09	40	16,82
10	20	12,2	45,653	41	10,19
11	19	12,2	50,642	42	17,06
12	19	12,5	52,549	43	18,17
13	19	12,7	53,834	44	18,27
14	19	12,5	52,549	45	14,37
15	19	13	55,779	45	19,32
16	19	13	55,779	45	19,32
17	19	12,5	52,549	46	12,46
PROMEDIO					15,87

(Fuente: Propia)

El error porcentual promedio de humedad relativa medido a esta altitud (2951 msnm) es de 15,87%, este valor se encuentra fuera de las especificaciones técnicas del fabricante. La variación de la humedad relativa real respecto a la experimental sin corrección se la observa en la Figura 3.10.

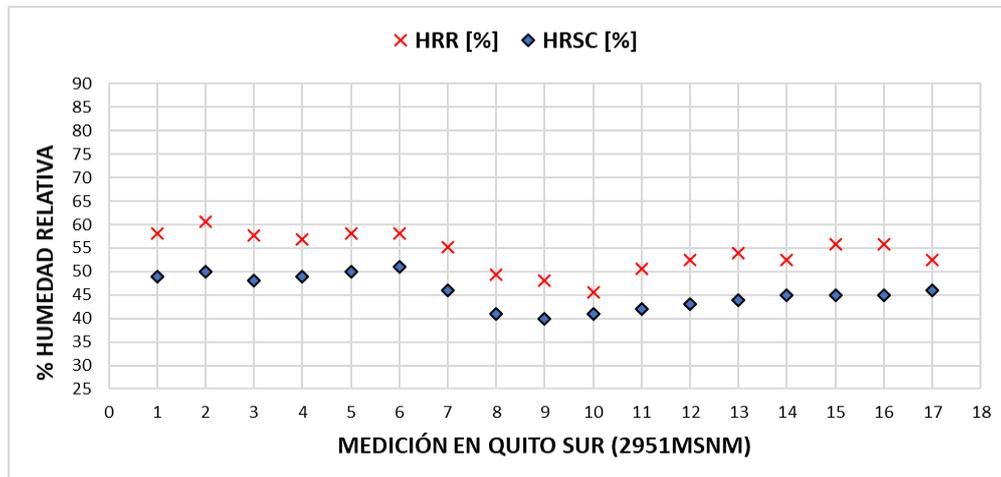


Figura 3.10. Datos de humedad relativa real y experimental sin corrección en Quito Sur.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.13 se observa los valores de las propiedades del aire analizadas con el psicrómetro de flujo continuo y con el higrómetro digital sin corrección en una altitud de 3046 msnm (Tulcán).

Tabla 3.13. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección en la ciudad de Tulcán (3046 msnm).

Medición	TBS (°C)	TBH (°C)	HRR [%]	HRSC [%]	ERROR (%)
1	15,3	12,8	78,53	72	8,32%
2	15	12,5	78,26	73	6,72%
3	14,9	12,2	76,55	73	4,64%
4	14,8	12,5	79,82	75	6,04%
5	15	12,8	80,76	74	8,37%
6	15	12,8	80,76	78	3,42%
7	15,1	12,7	79,14	78	1,44%
8	14,7	12,5	80,61	77	4,48%
9	14,8	12,7	81,51	80	1,85%
10	15,1	12,9	80,81	80	1,00%
11	15,5	13	78,53	78	0,67%
12	15,3	12,9	79,24	80	0,96%
13	15,8	13,3	78,68	83	5,49%
14	16	13,8	81,22	83	2,19%
15	16,1	14	82,08	81	1,32%
16	15,8	13,1	77,07	80	3,80%
17	16	13,8	81,22	83	2,19%
			PROMEDIO		3,70%

(Fuente: Propia)

El error porcentual promedio de humedad relativa medido a 3046 msnm es de 3,70%, este valor se encuentra dentro de las especificaciones técnicas del fabricante. La variación de la humedad relativa real respecto a la experimental sin corrección se la observa en la Figura 3.11.

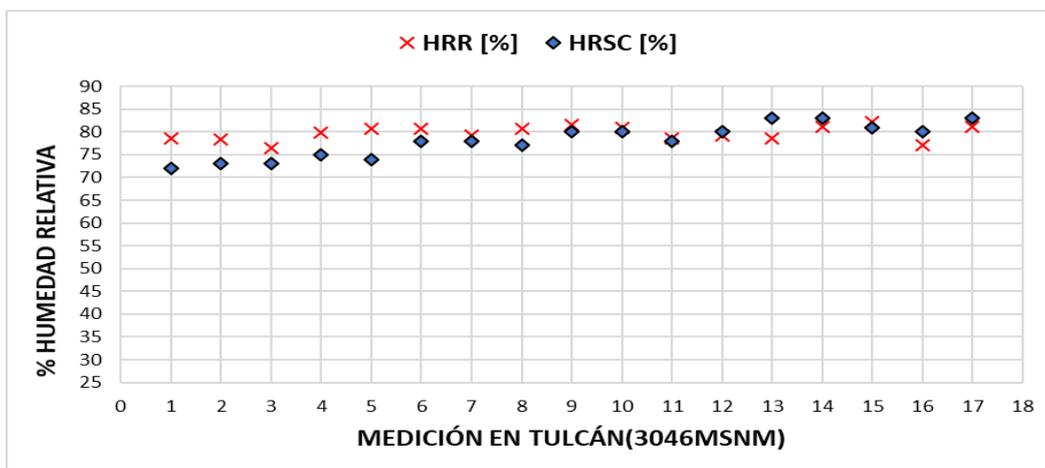


Figura 3.11. Datos de humedad relativa real y experimental sin corrección en Tulcán.
(Fuente: Propia)

Para el caso de la medición de altitud, los resultados se presentan en la Tabla 3.14, en la cual se muestra el valor de altitud obtenida con el higrómetro sin corrección y la altitud de referencia obtenida del Google Earth tal como se especifica en el sección 2.3.4, pp. 36-37. También se observa el error porcentual calculado entre estos valores.

Tabla 3.14. Datos de altitudes de referencia y altitudes obtenidas con el higrómetro digital sin corrección en diferentes localidades del Ecuador.

Lugar	Altitud de Referencia [msnm]	Altitud Sensor BMP180 [msnm]	Error
Teleférico Quito	3123	2949	6%
Tulcán	3046	2874	6%
Quito Sur	2950	2805	5%
Quito EPN	2806	2654	5%
Quito CCICEV	2804	2652	5%
Tumbaco	2365	2268	4%
Rocafuerte	950	975	3%
Santo Domingo	531	577	9%
Atacames	22	43	96%
PROMEDIO			15,4 %

(Fuente: propia)

3.1.4. Pruebas del higrómetro digital con acondicionamiento de señal

En esta sección se muestran los resultados de las mediciones de humedad relativa con el higrómetro digital corregido, estas mediciones se realizan en diferentes altitudes.

Las propiedades analizadas son la temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo húmedo (TBH), humedad relativa real (HRR) con el psicrómetro de flujo continuo, y la humedad relativa con corrección del higrómetro digital (HRCC). Además, se obtiene el porcentaje de error entre las humedades relativas.

El higrómetro digital con corrección se analiza en altitudes superiores a los 2000 msnm. En la Tabla 3.15 se observa los valores de las propiedades psicrométricas analizadas a una altitud de 2804 msnm (Quito-Centro).

Tabla 3.15. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital con corrección en la ciudad Quito (2804 msnm).

MEDICIÓN	TBS [°C]	TBH [°C]	HRR [%]	HRCC [%]	ERROR [%]
1	28,2	17,5	39,39	39,78	0,99
2	27,9	17	38,18	36,89	3,38
3	27,2	16,5	38,34	36,35	5,19
4	25,2	15	38,5	36,34	5,61
5	24,2	14,8	41,37	40,35	2,47
6	23,2	13,9	40,74	38,53	5,42
7	23	13,8	41,04	37,8	7,89
8	22	13,5	43,67	40,06	8,27
9	21,7	13,2	43,33	42,2	2,61
10	21,2	13,2	45,59	42,63	6,49
11	20,8	12,9	45,71	42,39	7,26
12	20,1	12,7	47,88	45,87	4,20
13	20	13	50,22	47,83	4,76
				PROMEDIO	4,96

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Tabla 3.15 el error porcentual promedio de humedad relativa calculado en la ciudad de Quito (2804 msnm) es de 4,96%. Este valor es bajo comparado con los resultados de la Tabla 3.11 el cual es de 13,15%.

En la Figura 3.12 se observa la variación que existe entre la humedad relativa real y la humedad relativa experimental con el higrómetro digital corregido.

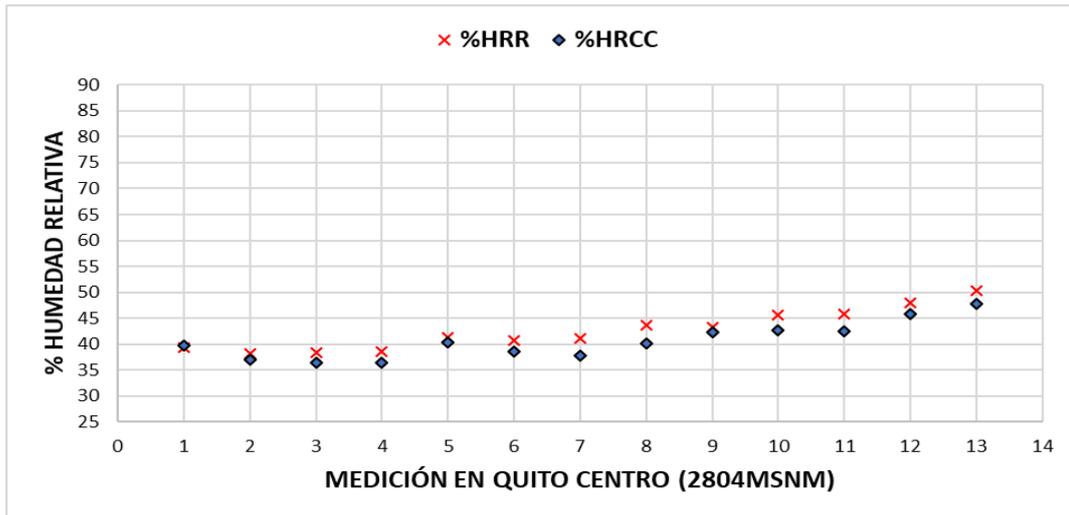


Figura 3.12. Datos de humedad relativa real y experimental con corrección en Quito Centro.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.16 se observa los valores de las propiedades del aire analizadas con el psicrómetro de flujo continuo y con el higrómetro digital corregido en una altitud de 3046 msnm (Tulcán).

Tabla 3.16. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital corregido en la ciudad de Tulcán (2804 msnm).

MEDICIÓN	TBS [°C]	TBH [°C]	HRR [%]	HRCC [%]	ERROR [%]
1	17,8	13,1	63,53	64,71	1,86
2	17,9	13,1	62,91	63,9	1,57
3	18	13,1	62,3	63,83	2,46
4	18,4	13,4	61,95	62,43	0,77
5	17,5	13,4	67,59	67,96	0,55
6	17,6	13,5	67,67	68,11	0,65
7	18,1	13,6	65,18	66,04	1,32
8	18,8	14,1	64,34	65,49	1,79
9	19	14,3	64,5	65,52	1,58
10	19,1	14,4	64,58	65,85	1,97
11	19,2	14,4	63,97	65,83	2,91
12	19,1	14,8	67,34	66,54	1,19
13	18,7	13,8	62,89	60,62	3,61
14	17	12,8	66,48	65,64	1,26
15	17,7	13,8	69,19	70,47	1,85
16	17,9	14	69,33	70,99	2,39
17	18	14,1	69,41	72,13	3,92
				PROMEDIO	1,86

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Tabla 3.16 el error porcentual promedio en humedad relativa calculado en la ciudad de Tulcán (3046 msnm) es de 1,86%. Este valor es bajo comparado con los resultados de la Tabla 3.13 el cual es 3,70%.

En la Figura 3.13 se observa la variación que existe entre la humedad relativa real y la humedad relativa experimental con el higrómetro digital con corrección de señal.

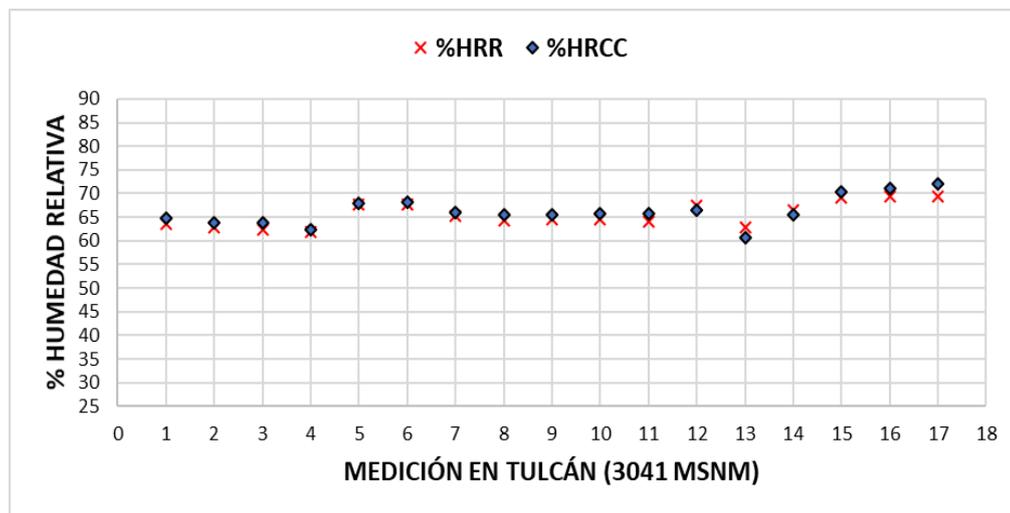


Figura 3.13. Datos de humedad relativa real y experimental con corrección en Tulcán.

(Fuente: Propia)

Para el caso de la medición de altitud, los resultados se muestran en la Tabla 3.17, en la cual se observa los valores de altitudes obtenidas con el higrómetro digital con corrección. Estos valores se reducen considerablemente respecto a los valores calculados en la Tabla 3.14, ya que se tiene una reducción en el error porcentual promedio de 15,4% sin corrección a 1,2% con corrección.

Tabla 3.17. Datos de altitudes de referencia y altitudes obtenidas con el higrómetro digital con corrección en diferentes localidades del Ecuador.

Localidad	Altitud Real [msnm]	Altitud Corregida	Error
Tulcán	3046	3039	0,2%
Quito Sur	2950	2963	0,4%
Quito EPN	2806	2798	0,3%
Quito CCICEV	2804	2795	0,3%
		PROMEDIO	0,3%

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.18 se encuentra los resultados finales del porcentaje de error porcentual promedio de humedad relativa utilizando las tres ecuaciones (4), (9) y (16).

Tabla 3.18. Resultados del cálculo de error porcentual promedio de humedad relativa con las tres ecuaciones de corrección.

	Matlab	Mínimos Cuadrados	Excel
Error en Humedad relativa	3,14%	4,06%	2,87%

(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

3.2.1. Datos obtenidos con el higrómetro digital sin corrección

Para obtener los valores de referencia en altitud se utilizan los datos satelitales de Google Earth en las localidades analizadas. Con el fin de garantizar que estos datos sean adecuados para la corrección del higrómetro digital se realiza una verificación en donde se comparan las altitudes de varias localidades del Ecuador obtenidas de Google Earth con los datos satelitales del GIS (Geographic Information System). De esta verificación se obtiene que Google Earth presenta un error porcentual promedio de 0,61%. Los valores de este análisis se observan en la Tabla 2.5, p. 38.

La altitud experimental de los lugares analizados presenta varios errores al comparar con los valores de Google Earth (altitud de referencia), donde se obtiene un error porcentual promedio de 15,4%, tal como se observa en la Tabla 3.14, p. 84.

Las mediciones de varias propiedades psicrométricas del aire se las realiza en diferentes localidades del Ecuador, las cuales van desde los 0 msnm hasta los 3040 msnm. Los resultados de estas mediciones en localidades menores a los 1000 msnm se observan en la Tabla 3.8, la Tabla 3.9 y la Tabla 3.10 (ver pp. 78-80). En las cuales se visualiza que la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa de cada lugar se encuentra dentro de las especificaciones técnicas de los fabricantes del higrómetro digital.

El error porcentual promedio que presenta la humedad relativa en la ciudad de Atacames (nivel del mar) es de 1,89%, mientras que en las ciudades de Santo Domingo (586 msnm) y Rocafuerte (950 msnm) tienen un promedio de 4,94% y 4,53% respectivamente. Estos valores se encuentran dentro del rango especificado por los proponentes del proyecto (Ver Tabla 2.18, p. 66).

La diferencia entre los errores promedios de humedad relativa de las localidades menores a los 1000 msnm está directamente relacionada con la temperatura de bulbo húmedo. Esta temperatura en la ciudad de Atacames se encuentra entre 25 y 26 °C, en cambio para las

localidades de Santo Domingo y Rocafuerte el rango se encuentra entre 21 y 22 °C. Esto se justifica con el análisis de sensibilidad que se realiza en la sección 2.4.3, pp. 42-45.

Los resultados de las propiedades psicrométricas del aire medidos con el higrómetro digital sin corrección en altitudes superiores a los 2000 msnm se observan en la Tabla 3.11, la Tabla 3.12 y la Tabla 3.13 (ver pp. 81-83). Estas mediciones muestran un elevado error porcentual promedio en los valores de humedad relativa y se encuentran fuera las especificaciones técnicas del higrómetro digital.

El error porcentual promedio que presenta la humedad relativa en la ciudad de Quito centro (2804 msnm) es de 13,15% y para Quito sur (2951 msnm) es de 15,87%. Estos valores son elevados en comparación con el error porcentual promedio que se obtiene en la ciudad de Tulcán (3046 msnm) que es de 3,70%, a pesar de que la ciudad de Tulcán se encuentra a una altitud más elevada a la de Quito. Esto se debe a que las condiciones ambientales de estas ciudades son diferentes, con esto se evidencia que la altitud no es la única causante de errores de humedad relativa, sino también el ambiente mismo del lugar. Para asegurar que esta aseveración es correcta se realiza un análisis variando las condiciones ambientales de Tulcán con resistencias eléctricas, estos resultados se observan en la sección 3.2.2.

3.2.2. Datos de humedad relativa del aire analizadas en Tulcán (3040 msnm)

En la Tabla 3.13 se observa que el error porcentual promedio de humedad relativa en Tulcán es de 3,7%, este es menor en relación con las localidades superiores a 2000 msnm. Esto se debe a que las condiciones ambientales (humedad relativa y temperatura) son diferentes, es decir, los valores de humedad relativa en Tulcán son mayores que los de Quito.

Para justificar esta variación se grafica la humedad relativa de tres años consecutivos de estas dos localidades como se observa en la Figura 3.14. Los datos son obtenidos de los anuarios meteorológicos del INAMHI específicos para cada año. Como se observa en la Figura 3.14, la diferencia promedio en humedad relativa que se encuentra entre estas dos localidades varía entre 14% y 18%, siendo los valores en Tulcán más elevados durante todo el año. Además, los valores de humedad relativa en Tulcán se encuentran fuera del rango de confort humano (40-70%) según ASRHAE.

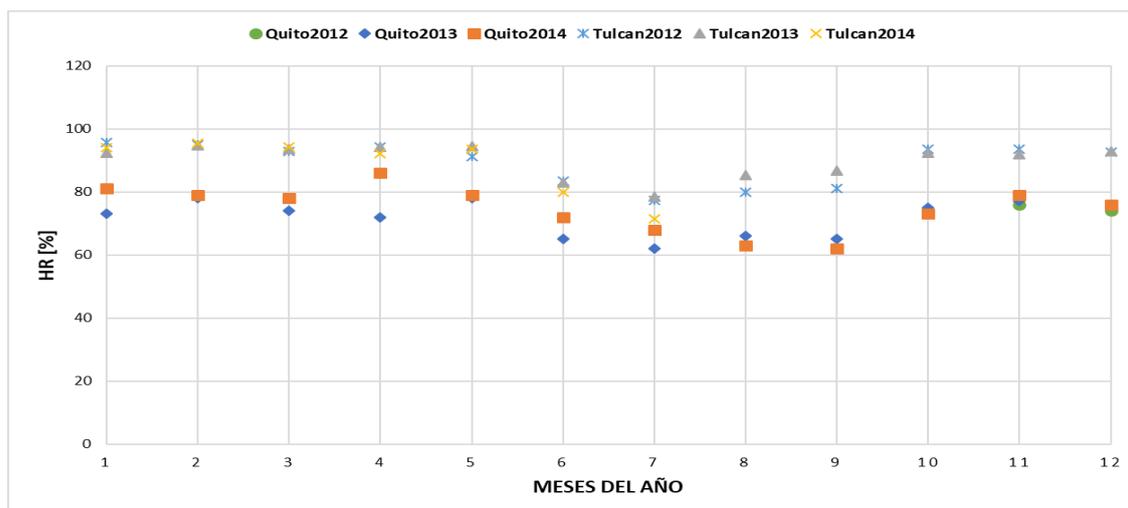


Figura 3.14. Datos mensuales de humedad relativa para la ciudad de Quito y Tulcán 2012-2014.

(Fuente: [17], realización: Propia)

Con el fin de comparar los errores de humedad relativa en Tulcán se realiza un análisis variando la cantidad de humedad y temperatura mediante resistencia eléctricas, hasta alcanzar un ambiente similar al de la ciudad de Quito. En la Tabla 3.19 se observa los datos que se obtienen con este análisis.

Tabla 3.19. Valores de varias propiedades psicrométricas del aire con el psicrómetro de flujo continuo y el higrómetro digital sin corrección la ciudad de Tulcán (3046 msnm).

Medición	TBS (°C)	TBH (°C)	HR valores reales [%]	% HR Psicrómetro 1	T °C Psicrómetro 1	ERROR (%)
1	23	14	42,53	50	20,4	17,56%
2	22,5	13,8	43,57	49	20,6	12,46%
3	23	14,1	43,06	50	20,7	16,12%
4	23,5	14,5	43,08	49	21,2	13,74%
5	22,9	14,3	44,55	51	20,7	14,48%
6	22,5	13	44,66	52	20,5	16,44%
7	22,5	14,5	47,41	52	20,5	9,68%
8	22,8	14,5	46,07	51	20,4	10,70%
9	22,5	14	44,66	52	20,2	16,44%
10	23	15	47,93	54	20,3	12,66%
11	23	14,1	43,06	52	20,5	20,76%
12	24	15	43,63	50	21,3	14,60%
13	24,5	16	46,74	52	22	11,25%
14	25	16	44,66	51	22,4	14,20%
15	22	15	52,62	63	18,7	19,73%
16	19	14	62,54	70	17,7	11,93%
					PROMEDIO	14,55%

(Fuente: Propia)

Al comparar los datos de la Tabla 3.13, p. 83, con los datos de la Tabla 3.19 de la ciudad de Tulcán, se observa un gran cambio, el error porcentual promedio en humedad relativa del higrómetro digital sin corrección presenta un incremento del 3,7% al 14,55%. Con esto se verifica que el incremento de error de humedad relativa no solo depende de la altitud, sino también del ambiente en el que se encuentre.

3.2.3. Selección de la ecuación adecuada para la corrección de temperatura de bulbo húmedo

Los valores de humedad relativa real y experimental mostrados en la Figura 2.19, p.41, muestran una distribución de los datos de manera desordenada. La ecuación que representa esta curva tiene un coeficiente de determinación de 0,9703, este resultado indica que si es aceptable esta ecuación de corrección. Pero después de demostrar que la altitud ya no es la única causante del error de humedad relativa mostrado en la sección 3.2.2 y analizando los valores del análisis de sensibilidad de la humedad relativa (ver sección 2.4.3 pp. 42-45) se procede a corregir los valores de temperatura de bulbo húmedo.

Para encontrar los valores de temperatura de bulbo húmedo a partir del sensor DHT22 se realiza un programa en macros Excel en cual se ingresa el valor de humedad relativa y la temperatura ambiente (ver Figura 2.20, p. 41). Con los datos obtenidos de temperaturas de bulbo húmedo experimentales y reales se realiza una gráfica y se encuentra que los datos tienen una distribución lineal (ver Figura 2.21 p. 42). Esta gráfica presenta un coeficiente de determinación de 0,995 el cual es mayor que el obtenido con humedades relativas.

Para encontrar la ecuación de corrección, se analiza los datos por tres métodos diferentes, obteniendo tres ecuaciones. Para seleccionar una de las tres ecuaciones, se consideran dos valores, el primero es el coeficiente de determinación (el más cercano a uno es la ecuación más eficiente) y el segundo es el cálculo del error en humedad relativa al corregir los valores obtenidos sin corrección. Este último valor se lo observa en la Tabla 3.18, p. 88.

La ecuación más eficiente con estos resultados es la que se obtiene mediante el Excel (ecuación 4), para corroborar dicha eficiencia se realizaron mediciones en Quito y en Tulcán con la ecuación de corrección programada. Los resultados con la ecuación de Excel no fueron óptimos ya que el porcentaje de error en humedad relativa aumentó. Por lo tanto, se utiliza la ecuación (16) obtenida mediante Matlab para verificar y comparar ambos resultados. Los resultados de las dos programaciones permiten corroborar que el uso de

la ecuación de Excel no se puede utilizar en localidades de alta humedad, los resultados de la ecuación de Matlab se utilizan para bajas y altas humedades, obteniendo un resultado aceptable.

3.2.4. Datos obtenidos con el higrómetro digital con corrección

Para la corrección de altitud se utiliza dos ecuaciones, la ecuación (2) se utiliza para corregir la altitud de lugares superiores a los 1000 msnm, mientras que la ecuación (3) se utiliza para lugares menores a los 1000 msnm. Mediante estas dos ecuaciones se obtiene una reducción en el error porcentual promedio de altitud de 15,4% (ver Tabla 3.14) a 0,3% (ver Tabla 3.17) para localidades superiores a los 2000 msnm.

La ecuación utilizada para la corrección de temperatura de bulbo húmedo del higrómetro digital es la numero (16), esta ecuación redujo considerablemente los valores de húmedas relativa en diferentes localidades del Ecuador. El cálculo de humedad relativa promedio en la ciudad de Quito (2804 msnm) se redujo de 13,15 % (ver Tabla 3.11) hasta 4,96% (ver Tabla 3.15). Para la ciudad de Tulcán (3040 msnm) se redujo el error porcentual promedio de humedad relativa de 3,7% (ver Tabla 3.13) a 1,86% (ver Tabla 3.16). Estas reducciones en el error de humedad relativa cumplen el propósito de este proyecto, el cual es tener un margen de exactitud de $\pm 6\%$.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

En el presente trabajo se cumple con el objetivo de fabricar un higrómetro digital con prestaciones similares a los disponibles en el mercado y con corrección en humedad relativa y altitud.

La humedad relativa de diferentes higrómetros digitales existentes en el mercado no presenta confiabilidad en sus resultados al ser analizados en altitudes superiores a los 1000msnm (ver sección 3.1.2, pp. 71-77). En altitudes menores a los 1000 msnm los resultados de las propiedades psicrométricas con los higrómetros digitales se encuentran dentro de las especificaciones técnicas de los fabricantes (ver Tabla 3.7, p. 77).

La altitud en la que se analizan las propiedades psicrométricas del aire no es la única variable que influye en el error de humedad relativa. Las condiciones ambientales de cada localidad también producen cambios considerables en la medición de esta propiedad, ver sección 2.4.3, pp. 42-45 y sección 3.2.2, pp. 89-91.

La corrección más apropiada resulta ser a la temperatura de bulbo húmedo a través de una ecuación totalmente independiente de la altitud (ver análisis de la sección 2.4.2, pp. 40-42, sección 2.4.3, pp. 42-45 y sección 2.4.4, pp. 45-52). De esta corrección se deriva luego el valor de humedad relativa final.

Los resultados del coeficiente de determinación entre el Excel, regresión por mínimos cuadrados (calculado manual) y Matlab, son muy cercanos a la unidad, es decir las correcciones al usar estas ecuaciones son confiables. A partir del análisis realizado en la sección 3.2.3, pp. 91-92, se concluye que la ecuación de corrección que brinda los mejores resultados para el cálculo de humedad relativa es la ecuación (16) obtenida mediante Matlab.

En la ciudad de Quito (2800 msnm) el higrómetro digital fabricado presenta un error porcentual promedio de la humedad relativa del 5% (ver Tabla 3.15, p. 85) utilizando la ecuación de corrección (16). Sin corrección el error porcentual promedio es de 13% (ver Tabla 3.11, p. 81).

En la ciudad de Tulcán (3040 msnm) el higrómetro digital fabricado presenta un error porcentual promedio en la humedad relativa de 2% (ver Tabla 3.16, p.86) utilizando la ecuación de corrección (16). Sin corrección el error porcentual promedio es de 4% (ver

Tabla 3.13, p. 83). Cabe señalar que la humedad relativa en esta localidad se encuentra sobre el 70% durante todo el año, ver Figura 3.14, p. 90.

En la ciudad de Quito (2800 msnm) el higrómetro digital fabricado presenta un error en altitud de 8 metros (ver Tabla 3.17). Sin corrección el error es de 151 metros (ver Tabla 3.14). En la ciudad de Tulcán (3040 msnm) presenta un error en altitud de 6 metros (ver Tabla 3.17) mientras que sin corrección es de 171 metros (ver Tabla 3.14). Estos datos se obtienen utilizando la ecuación de corrección (2).

4.2. Recomendaciones

Para ampliar el rango de medición del higrómetro fabricado y de otros higrómetros digitales se requiere fabricar un túnel con acondicionamiento de aire que sea portátil y que permita modificar la temperatura y humedad relativa del aire. De tal manera que se varíe la altitud llevándolo a diferentes localidades del Ecuador.

Se recomienda utilizar cámaras frigoríficas para ampliar el universo de datos de temperatura de bulbo húmedo, encontrar una nueva ecuación de ajuste y de esta manera incrementar el rango de aplicación del higrómetro digital fabricado.

Para reducir las restricciones de trabajo del higrómetro fabricado se requiere utilizar materiales con altas propiedades térmicas para la fabricación de la carcasa. Esto debido a que el sensor de humedad relativa trabaja en rangos de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el material utilizado en la impresión 3D de la carcasa (PLA) no puede sobrepasar los $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ limitando así el rango del equipo.

El sensor de humedad y temperatura del higrómetro digital fabricado debe estar expuesto a flujos de aire, por lo que se recomienda no ponerlo en contacto directo e indirecto con agua. También no se debe presionar los tres pulsadores al mismo tiempo ya que se generan cortos dentro del equipo.

Se recomienda analizar el funcionamiento del higrómetro digital fabricado en ambientes con humedades relativas superiores al 80% (cerkas a las zonas de saturación de vapor de agua en el aire), verificando su correcto funcionamiento y de ser el caso aplicar curvas de corrección.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PCE Instruments, «Medidores de Humedad,» 15 Septiembre 2018. [En línea]. Available: www.pce-iberica.es/Catalogo/catalogo-humedad.pdf. [Último acceso: 21 Agosto 2019].
- [2] D. P. Gatley, Understanding Psychrometrics, Third ed., Atlanta: Tracy Becker, 2013.
- [3] EMERSON, «Manual Técnico de Refrigeración y Aire acondicionado».
- [4] ASHRAE, FUNDAMENTALS, Atlanta, 2017.
- [5] A. P. Miguel Ortega, Cartas Psicrométricas, Quito: Imprima, 1995.
- [6] L. G. H. III, The Dehumidification Handbook, Second ed., Amesbury: Munters Corporation, 2002.
- [7] M. A. B. Yunes A. Cengel, Termodinámica, Séptima ed., México, D.F.: McGRAW-HILL, 2012.
- [8] S. Kouro, «SENSORES DE HUMEDAD,» Valparaiso, Chile, 2001.
- [9] World Meteorological Organization, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, seventh ed., Switzerland: Geneva 2, 2008.
- [10] ARDUINO, «Arduino-Home,» Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Último acceso: 10 Diciembre 2019].
- [11] F. Stuchi, «DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA CON FINES DIDÁCTICOS,» Córdoba, 2016.
- [12] C. R. P. Chapra Steven C., Métodos Numéricos para Ingenieros, Quinta ed., México: McGraw-Hill, 2006.
- [13] ASTM, «Standard Test Method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet-and Dry-Bulb Temperatures),» ASTM E337-15, 2018.
- [14] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, «Listado de provincias, cantones y parroquias del Ecuador,» Quito, 2016.
- [15] G. F. Jesús Belchí, Excel 2000, Herramientas avanzadas, macros y programación con VBA, FC, 2000.
- [16] Tresdpro, «¿Qué material utilizan las impresoras 3d?,» 10 octubre 2019. [En línea]. Available: <https://tresdpro.com/que-material-utilizan-las-impresoras-3d/>. [Último acceso: 15 enero 2020].

[17] INAMHI, «Servicios Meteorológicos,» 2 Enero 2020. [En línea]. Available: www.serviciometeorologico.gob.ec/. [Último acceso: 5 Febrero 2020].

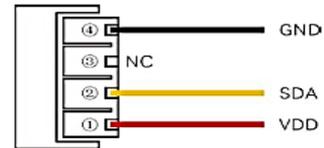
ANEXOS

ANEXO I. DATASHEET DEL SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA (AM2302 O DHT22)

4.1 AM2302 Pin assignments

Table 1: AM2302 Pin assignments

Pin	Name	Description
①	VDD	Power (3.3V–5.5V)
②	SDA	Serial data, bidirectional port
③	NC	Empty
④	GND	Ground

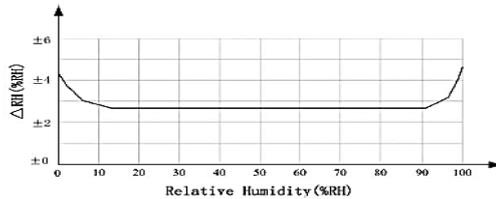


PIC1: AM2302 Pin Assignment

5.1 Relative humidity

Table 2: AM2302 Relative humidity performance table

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		%RH
Range		0		99.9	%RH
Accuracy [1]	25°C		± 2		%RH
Repeatability			± 0.3		%RH
Exchange	Completely interchangeable				
Response [2]	1/e(63%)		<5		S
Sluggish			<0.3		%RH
Drift [3]	Typical		<0.5		%RH/yr

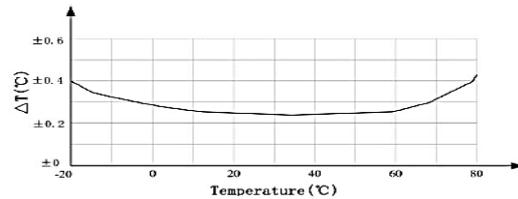


Pic2: At25°C The error of relative humidity

5.2 Temperature

Table 3: AM2302 Relative temperature performance

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		°C
n			16		bit
Accuracy			± 0.5	± 1	°C
Range		-40		80	°C
Repeat			± 0.2		°C
Exchange	Completely interchangeable				
Response	1/e(63%)		<10		S
Drift			± 0.3		°C/yr



Pic3: The maximum temperature error

Table 4: AM2302 DC Characteristics

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Voltage		3.3	5	5.5	V
Power consumption [4]	Dormancy	10	15		μA
	Measuring		500		μA
	Average		300		μA
Low level output voltage	I _{OL} [5]	0		300	mV
High output voltage	R _p <25 kΩ	90%		100%	VDD
Low input voltage	Decline	0		30%	VDD
Input High Voltage	Rise	70%		100%	VDD
R _{pu} [6]	VDD = 5V VIN = VSS	30	45	60	kΩ
Output current	turn on		8		mA
	turn off	10	20		μA
Sampling period		2			S

[1] the accuracy of the factory inspection, the sensor 25°C and 5V, the accuracy specification of test conditions, it does not include hysteresis and nonlinearity, and is only suitable for non-condensing environment.

[2] to achieve an order of 63% of the time required under the conditions of 25°C and 1m / s airflow.

[3] in the volatile organic compounds, the values may be higher. See the manual application to store information.

[4] this value at VDD = 5.0V when the temperature is 25°C, 2S / time, under the conditions of the average.

[5] low output current.

[6] that the pull-up resistor.

ANEXO II. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SENSOR BMP180.

Table 1: Operating conditions, output signal and mechanical characteristics

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Operating temperature	T _A	operational	-40		+85	°C
		full accuracy	0		+65	
Supply voltage	V _{DD}	ripple max. 50mVpp	1.8	2.5	3.6	V
			1.62	2.5	3.6	
Supply current @ 1 sample / sec. 25°C	I _{DDLOW}	ultra low power mode		3		µA
	I _{DDSTD}	standard mode		5		µA
	I _{DDHR}	high resolution mode		7		µA
	I _{DDUHR}	Ultra high res. mode		12		µA
	I _{DDAR}	Advanced res. mode		32		µA
Peak current	I _{peak}	during conversion		650	1000	µA
Standby current	I _{DDSBM}	@ 25°C		0.1	4 ¹	µA
Relative accuracy pressure V _{DD} = 3.3V		950 ... 1050 hPa @ 25 °C		±0.12		hPa
				±1.0		m
		700 ... 900hPa 25 ... 40 °C		±0.12		hPa
				±1.0		m
Absolute accuracy pressure V _{DD} = 3.3V		300 ... 1100 hPa 0 ... +65 °C	-4.0	-1.0*	+2.0	hPa
		300 ... 1100 hPa -20 ... 0 °C	-6.0	-1.0*	+4.5	hPa
Resolution of output data		pressure		0.01		hPa
		temperature		0.1		°C
Noise in pressure		see table on page 12-13				
Absolute accuracy temperature V _{DD} = 3.3V		@ 25 °C	-1.5	±0.5	+1.5	°C
		0 ... +65 °C	-2.0	±1.0	+2.0	°C
Conversion time pressure	t _{c_p_low}	ultra low power mode		3	4.5	ms
	t _{c_p_std}	standard mode		5	7.5	ms
	t _{c_p_hr}	high resolution mode		9	13.5	ms
	t _{c_p_luhr}	ultra high res. mode		17	25.5	ms
	t _{c_p_ar}	Advanced res. mode		51	76.5	ms
Conversion time temperature	t _{c_temp}	standard mode		3	4.5	ms
Serial data clock	f _{SCL}				3.4	MHz
Solder drifts		Minimum solder height 50µm	-0.5		+2	hPa
Long term stability**		12 months		±1.0		hPa

The typical value is: -1±1

* Long term stability is specified in the full accuracy operating pressure range 0 ... 65°C

Table 2: Absolute maximum ratings

Parameter	Condition	Min	Max	Units
Storage temperature		-40	+85	°C
Supply voltage	all pins	-0.3	+4.25	V
ESD rating	HBM, R = 1.5kΩ, C = 100pF		±2	kV
Overpressure			10,000	hPa

ANEXO III. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL LCD 1602.

- Display Mode: STN, BLUB
- Display Formate: 16 Character x 2 Line
- Viewing Direction: 6 O'Clock
- Input Data: 4-Bits or 8-Bits interface available
- Display Font : 5 x 8 Dots
- Power Supply : Single Power Supply (5V±10%)
- Driving Scheme : 1/16Duty,1/5Bias
- BACKLIGHT (SIDE) : LED (WHITE)

2.0 ABSOLUTE MAXIMUM

Item	Symbol	Min.	Max.	Unit
Power Supply for logic	Vdd	-0.3	+7.0	V
Power supply for LCD Drive	Vlcd	Vdd-10.0	Vdd+0.3	V
Input Voltage	Vi	-0.3	Vdd+0.3	V
Operating Temperature	Ta	0	+50	°C
Storage Temperature	Tstg	-10	+60	°C

3.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Ta=25°C; Vdd=3.0V±10%, otherwise specified)

Item	Symbol	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Power Supply for Logic	Vdd	--	4.7	5.0	5.5	V
Operating Voltage for LCD	Vdd-Vo	--	--	5.0	--	V
Input High voltage	Vih	--	2.2	--	Vdd	V
Input Low voltage	Vil	--	-0.3	--	0.6	V
Output High voltage	Voh	-Ioh=0.2mA	2.4	--	--	V
Output Low voltage	Vol	Iol=1.2mA	--	--	0.4	V
Power supply current	Idd	Vdd=3.0v	--	1.1	--	mA

4.0 MECHANICAL PARAMETERS

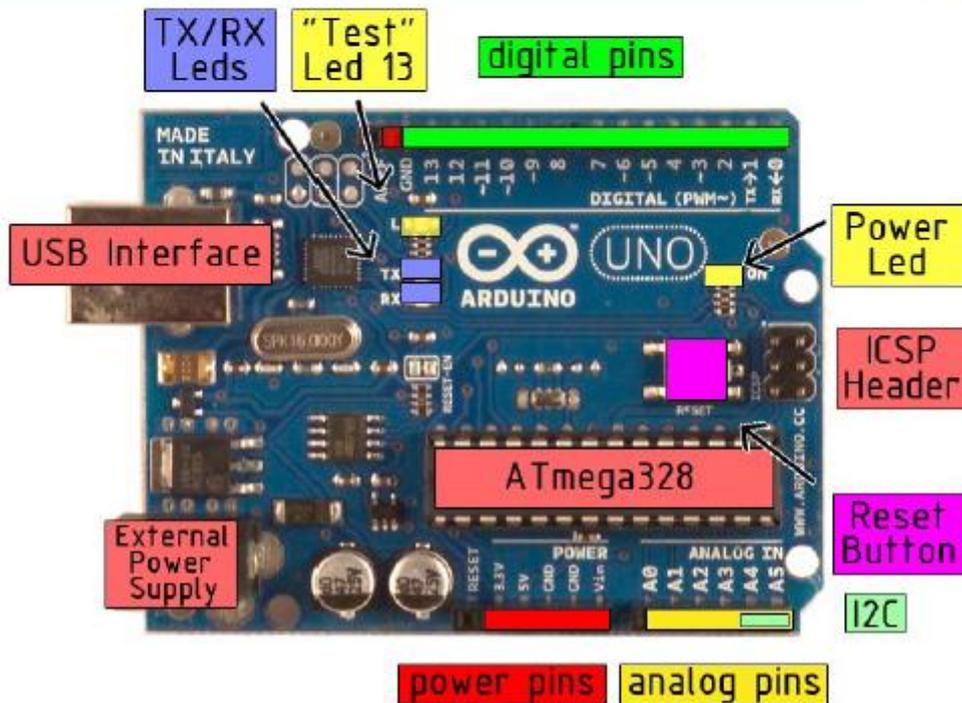
Item	Description	Unit
PCB Dimension	80.0*36.0*1.6	mm
View Dimension	69.5*14.5	mm

ANEXO IV. CONDICIONES DE OPERACIÓN Y ESQUEMA DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA328P DEL ARDUINO UNO.

Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

the board



ANEXO V. ECUACIONES PARA EL DESARROLLO DEL PROGRAMA “CÁLCULO DE TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO”

Given: Dry-bulb temperature t , Relative humidity ϕ , Pressure p

To Obtain	Use	Comments
$p_{ws}(t)$	Table 3 or Equation (5) or (6)	Sat. press. for temp. t
p_w	Equation (22)	
W	Equation (20)	
W_s	Equation (21)	Using $p_{ws}(t)$
v	Equation (26)	
h	Equation (30)	
t_d	Table 3 with Equation (36), (37), or (38)	
t^*	Equation (21) and (33) or (35) with Table 3 or with Equation (5) or (6)	Requires trial-and-error or numerical solution method

Nombre de la ecuación	Ecuación	Número de ecuación
p_{ws} = saturation pressure, Pa T = absolute temperature, K = °C + 273.15	$\ln p_{ws} = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T$ $C_8 = -5.800\ 220\ 6\ E+03$ $C_9 = 1.391\ 499\ 3\ E+00$ $C_{10} = -4.864\ 023\ 9\ E-02$ $C_{11} = 4.176\ 476\ 8\ E-05$ $C_{12} = -1.445\ 209\ 3\ E-08$ $C_{13} = 6.545\ 967\ 3\ E+00$	6
saturation humidity ratio W_s	$W_s = 0.621\ 945 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}}$	21
t = dry-bulb temperature, °C Wet-bulb temperature t^* , humidity ratio W	$W = \frac{(2830 - 0.24t^*)W_s^* - 1.006(t - t^*)}{2830 + 1.86t - 2.1t^*}$	35
relative humidity ϕ	$\phi = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu)(p_{ws}/p)}$	23
humidity ratio W	$W = 0.621\ 945 \frac{p_w}{p - p_w}$	20

ANEXO VI. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL LCD NOKIA 5110.

SYMBOL	DESCRIPTION
R0 to R47	LCD row driver outputs
C0 to C83	LCD column driver outputs
V _{SS1} , V _{SS2}	ground
V _{DD1} , V _{DD2}	supply voltage
V _{LCD1} , V _{LCD2}	LCD supply voltage
T1	test 1 input
T2	test 2 output
T3	test 3 input/output
T4	test 4 input
SDIN	serial data input
SCLK	serial clock input
D/C	data/command
SCE	chip enable
OSC	oscillator
RES	external reset input
dummy1, 2, 3, 4	not connected

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V _{DD}	supply voltage	note 3	-0.5	+7	V
V _{LCD}	supply voltage LCD	note 4	-0.5	+10	V
V _i	all input voltages		-0.5	V _{DD} + 0.5	V
I _{SS}	ground supply current		-50	+50	mA
I _i , I _O	DC input or output current		-10	+10	mA
P _{tot}	total power dissipation		-	300	mW
P _O	power dissipation per output		-	30	mW
T _{amb}	operating ambient temperature		-25	+70	°C
T _j	operating junction temperature		-65	+150	°C
T _{stg}	storage temperature		-65	+150	°C

Notes

1. Stresses above those listed under limiting values may cause permanent damage to the device.
2. Parameters are valid over operating temperature range unless otherwise specified. All voltages are with respect to V_{SS} unless otherwise noted.
3. With external LCD supply voltage externally supplied (voltage generator disabled). V_{DDmax} = 5 V if LCD supply voltage is internally generated (voltage generator enabled).
4. When setting V_{LCD} by software, take care not to set a V_{OP} that will exceed the maximum of 8.5 V when operating at -25 °C, see Caution in Section 8.9.

9 LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134); see notes 1 and 2.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{DD}	supply voltage	note 3	-0.5	+7	V
V_{LCD}	supply voltage LCD	note 4	-0.5	+10	V
V_I	all input voltages		-0.5	$V_{DD} + 0.5$	V
I_{SS}	ground supply current		-50	+50	mA
I_I, I_O	DC input or output current		-10	+10	mA
P_{Tot}	total power dissipation		-	300	mW
P_O	power dissipation per output		-	30	mW
T_{amb}	operating ambient temperature		-25	+70	°C
T_J	operating junction temperature		-65	+150	°C
T_{stg}	storage temperature		-65	+150	°C

Notes

- Stresses above those listed under limiting values may cause permanent damage to the device.
- Parameters are valid over operating temperature range unless otherwise specified. All voltages are with respect to V_{SS} unless otherwise noted.
- With external LCD supply voltage externally supplied (voltage generator disabled). $V_{DDmax} = 5$ V if LCD supply voltage is internally generated (voltage generator enabled).
- When setting V_{LCD} by software, take care not to set a V_{OP} that will exceed the maximum of 8.5 V when operating at -25 °C, see Caution in Section 8.9.

11 DC CHARACTERISTICS

$V_{DD} = 2.7$ to 3.3 V; $V_{SS} = 0$ V; $V_{LCD} = 6.0$ to 9.0 V; $T_{amb} = -25$ to $+70$ °C; unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
V_{DD1}	supply voltage 1	LCD voltage externally supplied (voltage generator disabled)	2.7	-	3.3	V
V_{DD2}	supply voltage 2	LCD voltage internally generated (voltage generator enabled)	2.7	-	3.3	V
V_{LCD1}	LCD supply voltage	LCD voltage externally supplied (voltage generator disabled)	6.0	-	9.0	V
V_{LCD2}	LCD supply voltage	LCD voltage internally generated (voltage generator enabled); note 1	6.0	-	8.5	V
I_{DD1}	supply current 1 (normal mode) for internal V_{LCD}	$V_{DD} = 2.85$ V; $V_{LCD} = 7.0$ V; $f_{CLK} = 0$; $T_{amb} = 25$ °C; display load = 10 μ A; note 2	-	240	300	μ A
I_{DD2}	supply current 2 (normal mode) for internal V_{LCD}	$V_{DD} = 2.70$ V; $V_{LCD} = 7.0$ V; $f_{CLK} = 0$; $T_{amb} = 25$ °C; display load = 10 μ A; note 2	-	-	320	μ A
I_{DD3}	supply current 3 (Power-down mode)	with internal or external LCD supply voltage; note 3	-	1.5	-	μ A
I_{DD4}	supply current external V_{LCD}	$V_{DD} = 2.85$ V; $V_{LCD} = 9.0$ V; $f_{CLK} = 0$; notes 2 and 4	-	25	-	μ A
I_{LCD}	supply current external V_{LCD}	$V_{DD} = 2.7$ V; $V_{LCD} = 7.0$ V; $f_{CLK} = 0$; $T = 25$ °C; display load = 10 μ A; notes 2 and 4	-	42	-	μ A
Logic						
V_{IL}	LOW level input voltage		V_{SS}	-	$0.3V_{DD}$	V
V_{IH}	HIGH level input voltage		$0.7V_{DD}$	-	V_{DD}	V
I_L	leakage current	$V_I = V_{DD}$ or V_{SS}	-1	-	+1	μ A
Column and row outputs						
$R_{O(C)}$	column output resistance C0 to C83		-	12	20	k Ω
$R_{O(R)}$	row output resistance R0 to R47		-	12	20	k Ω
$V_{bias(tol)}$	bias voltage tolerance on C0 to C83 and R0 to R47		-100	0	+100	mV

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
LCD supply voltage generator						
V_{LCD}	V_{LCD} tolerance internally generated	$V_{DD} = 2.85\text{ V}$; $V_{LCD} = 7.0\text{ V}$; $f_{BCLK} = 0$; display load = $10\ \mu\text{A}$; note 5	–	0	300	mV
TC0	V_{LCD} temperature coefficient 0	$V_{DD} = 2.85\text{ V}$; $V_{LCD} = 7.0\text{ V}$; $f_{BCLK} = 0$; display load = $10\ \mu\text{A}$	–	1	–	mV/K
TC1	V_{LCD} temperature coefficient 1	$V_{DD} = 2.85\text{ V}$; $V_{LCD} = 7.0\text{ V}$; $f_{BCLK} = 0$; display load = $10\ \mu\text{A}$	–	9	–	mV/K
TC2	V_{LCD} temperature coefficient 2	$V_{DD} = 2.85\text{ V}$; $V_{LCD} = 7.0\text{ V}$; $f_{BCLK} = 0$; display load = $10\ \mu\text{A}$	–	17	–	mV/K
TC3	V_{LCD} temperature coefficient 3	$V_{DD} = 2.85\text{ V}$; $V_{LCD} = 7.0\text{ V}$; $f_{BCLK} = 0$; display load = $10\ \mu\text{A}$	–	24	–	mV/K

Notes

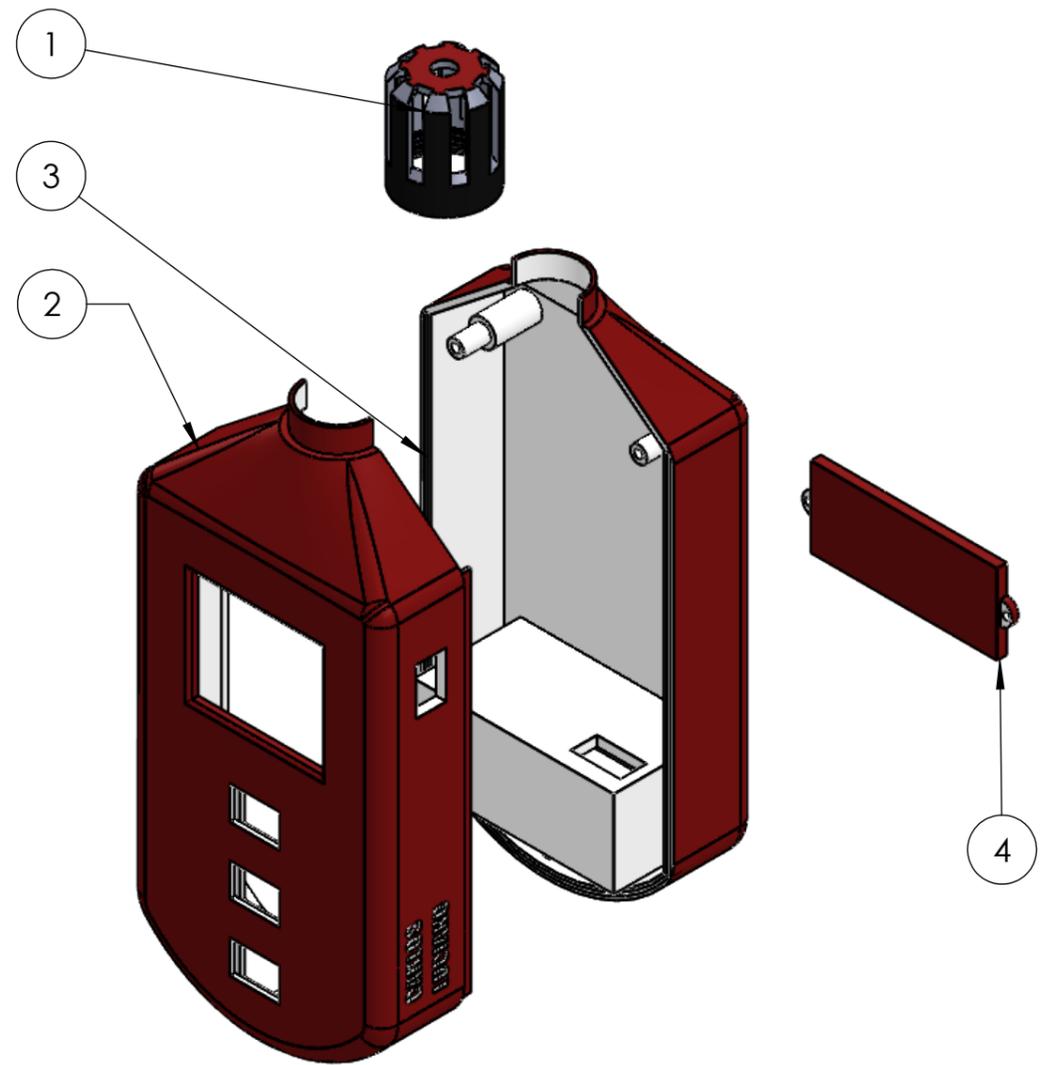
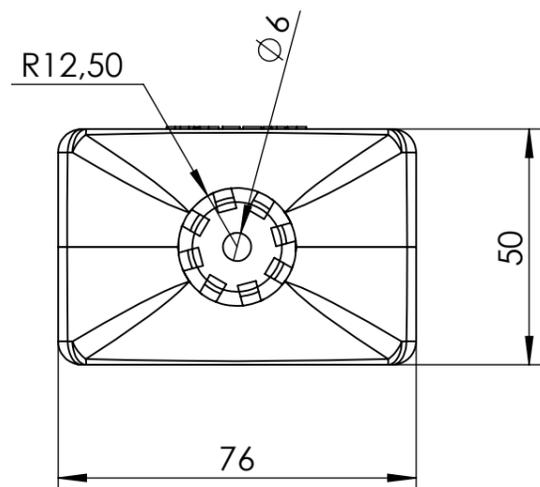
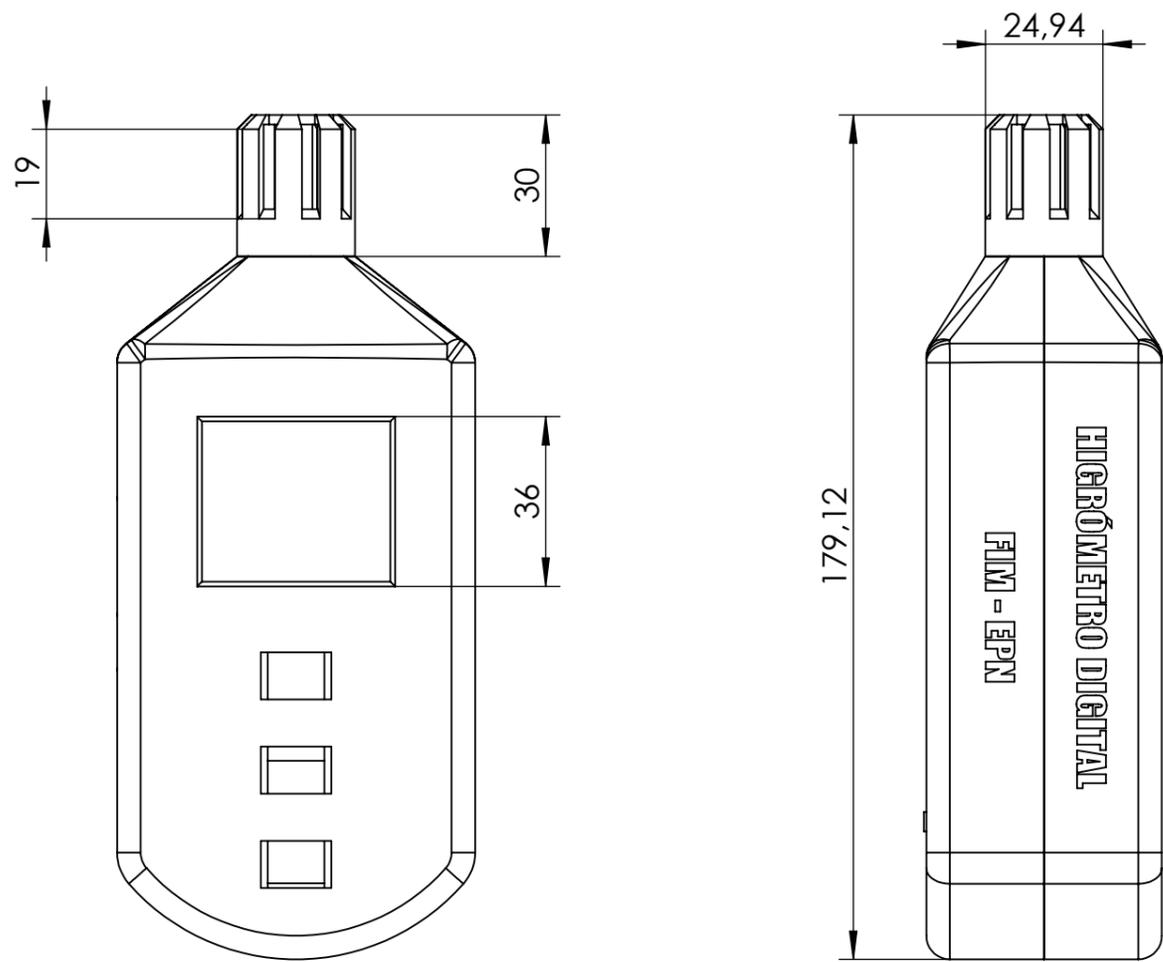
1. The maximum possible V_{LCD} voltage that may be generated is dependent on voltage, temperature and (display) load.
2. Internal clock.
3. RAM contents equal '0'. During power-down, all static currents are switched off.
4. If external V_{LCD} , the display load current is not transmitted to I_{DD} .
5. Tolerance depends on the temperature (typically zero at $27\ ^\circ\text{C}$, maximum tolerance values are measured at the temperate range limit).

ANEXO VII. ECUACIONES PARA EL DESARROLLO DEL PROGRAMA “CÁLCULO DE HUMEDAD RELATIVA”

Given: Dry-bulb temperature t , Wet-bulb temperature t^* , Pressure p

To Obtain	Use	Comments
$p_{ws}(t^*)$	Table 3 or Equation (5) or (6)	Sat. press. for temp. t^*
W_s^*	Equation (21)	Using $p_{ws}(t^*)$
W	Equation (33) or (35)	
$p_{ws}(t)$	Table 3 or Equation (5) or (6)	Sat. press. for temp. t
W_s	Equation (21)	Using $p_{ws}(t)$
ϕ	Equation (23)	Using $p_{ws}(t)$
v	Equation (26)	
h	Equation (30)	
p_w	Equation (36)	
t_d	Table 3 with Equation (36), (37), or (38)	

Nombre de la ecuación	Ecuación	Número de ecuación
p_{ws} = saturation pressure, Pa T = absolute temperature, K = °C + 273.15	$\ln p_{ws} = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T$ $C_8 = -5.800\ 220\ 6\ E+03$ $C_9 = 1.391\ 499\ 3\ E+00$ $C_{10} = -4.864\ 023\ 9\ E-02$ $C_{11} = 4.176\ 476\ 8\ E-05$ $C_{12} = -1.445\ 209\ 3\ E-08$ $C_{13} = 6.545\ 967\ 3\ E+00$	6
saturation humidity ratio W_s	$W_s = 0.621\ 945 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}}$	21
t = dry-bulb temperature, °C Wet-bulb temperature t^*	$W = \frac{(2830 - 0.24t^*)W_s^* - 1.006(t - t^*)}{2830 + 1.86t - 2.1t^*}$	35
relative humidity ϕ	$\phi = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu)(p_{ws}/p)}$	23



N.º	DENOMINACIÓN	CANTIDAD	MATERIAL	OBSERVACIÓN
4	TAPA DE BATERIA	1	PLA	IMPRESIÓN 3D
3	SECCIÓN POSTERIOR	1	PLA	IMPRESIÓN 3D
2	SECCIÓN FRONTAL	1	PLA	IMPRESIÓN 3D
1	SECCIÓN SUPERIOR	1	PLA	IMPRESIÓN 3D

EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib:	Almeida C. - Albuja L.	Escala: 1:1.5
		Dis:	Almeida C. - Albuja L.	
		Rev:	Ing. Miguel Ortega	
CARCASA DEL HIGRÓMETRO DIGITAL FABRICADO		LTD - EPN001		FECHA: 05-03-20