

**DISEÑO DE UNA UNIDAD EXPERIMENTAL DE MONITOREO DE LA CALIDAD
DE AMBIENTE INTERIOR**

RICARDO RUEDA ROMERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES (E3T)
BUCARAMANGA**

2018

**DISEÑO DE UNA UNIDAD EXPERIMENTAL DE MONITOREO DE LA CALIDAD
DE AMBIENTE INTERIOR**

RICARDO RUEDA ROMERO

Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Electrónico

Directores:

MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

Doctora en Ingeniería Electrónica

GERMÁN ALFONSO OSMA PINTO

Doctor en Ingeniería Eléctrica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES (E3T)
BUCARAMANGA**

2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por toda la ayuda, fortaleza y disponibilidad para lograr terminar mi carrera de ingeniería electrónica.

A la adoptada de mi hermana por sus enseñanzas en silencio, su apoyo y su exigencia en la realización de mis trabajos.

A mi familia más cercana, por el ánimo y servicio que mostraron durante toda la carrera.

A mis amigos, a todos y cada uno de ellos, sus historias, sus experiencias, sus ideas, sus sugerencias, sus recomendaciones, su grandeza y su humildad, en especial a esa ingeniera que fue un faro en los momentos más oscuros.

Gracias a mis directores, la profesora María y el profesor Germán, por creer en esta locura y permitirme establecer los límites de ella sin perder la fe en que podría funcionar.

La UIS ha sido un campo de enseñanza, de fortaleza y de crecimiento, los más sinceros agradecimientos a cada uno de los involucrados en que mi alma mater sea mejor cada día.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	22
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.2. ESTRATEGIA DE DESARROLLO	22
1.3. CONSIDERACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	22
1.4. HIPÓTESIS DE LA PROPUESTA.....	23
1.5. PROPUESTA DE VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS	23
1.6. RESULTADOS PREVIOS ESPERADOS.....	24
1.7. APORTE ORIGINAL DEL TRABAJO	24
1.8. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	24
1.9. OBJETIVOS	25
1.9.1. Objetivo general.	25
1.9.2. Objetivos específicos	25
1.10. ALCANCE	26
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	27
2.1. ¿QUÉ ES EL INTERNET DE LAS COSAS (IoT)?	27
2.2. ¿QUÉ ES UN “EDIFICIO ENFERMO”?.....	28
2.3. LAS VARIABLES DE INTERÉS EN UN ENTORNO DE SEE	31
2.3.1. Monóxido de carbono (CO).	31
2.3.2. Dióxido de carbono (CO ₂).	32
2.3.3. Óxidos de Nitrógeno (NO _x).	32
2.3.4. Dióxido de Azufre (SO ₂).	33
2.3.5. Compuestos orgánicos volátiles (COVs).....	33
2.3.6. Humedad y Temperatura.	34
2.3.7. Ruido o sonido ambiental.....	36
2.3.8. Biocontaminantes.....	37
2.3.9. Otro tipo de contaminante: presencia de animales.	38

2.3.10. Iluminación.....	38
2.3.11. Niveles de radiación UV.....	39
3. PROPUESTA DE UNIDAD EXPERIMENTAL.....	41
3.1. DISEÑO	41
3.2. B. MÓDULO DE COMUNICACIONES Y MICROCONTROLADOR ESP WROOM 32.....	42
3.3. C. SENSORES.....	45
3.3.1. Sensor de aceleración MPU6050 de Invensense.	46
3.3.2. Sensor de calidad de aire CCS811 de AMS.	47
3.3.3. Sensor de humedad relativa SI7006 de Silicon Labs.....	49
3.3.4. Sensor de iluminancia y radiación UV SI1145-A10 de Silicon Labs.....	49
3.3.5. Sensor de partículas GP2Y1010AU0F de Sharp.	50
3.3.6. Sensor de presión atmosférica MS5637 de TE Connectivity.	51
3.3.7. Sensor de ruido CJMCU-9812.	52
3.3.8. Sensor de temperatura LM75B de NXP.....	52
3.4. DISPOSITIVOS ADICIONALES.....	53
3.4.1. Pantalla OLED de 0.91” SSD1306.....	53
3.4.2. Barra informativa de LEDs.	54
3.5. DISEÑO PLANOS ELÉCTRICOS	55
3.5.1. Placa 1. Temperatura – Presión Absoluta.....	55
3.5.2. Placa 2. Humedad relativa – calidad de aire.....	57
3.5.3. Placa 3 (Propuesta fabricada pero no ensamblada) Iluminancia – ruido. .	60
3.5.4. Placa 4 (Propuesta fabricada pero no ensamblada) Placa principal de desarrollo.	62
3.6. MONTAJE	68
3.7. FUNCIONAMIENTO.....	70
3.7.1. Thinger.io	70
3.7.2. Rangos de clasificación de las variables monitoreadas.	71
3.8. CARACTERIZACIÓN	76
3.8.1. Movimiento.....	76
3.8.2. Calidad de aire.	78
3.8.3. Humedad relativa.	79

3.8.4.	Ruido ambiental.	81
3.8.5.	Cantidad de partículas PM10.	82
3.8.6.	Presión absoluta.	82
3.8.7.	Temperatura.....	83
3.8.8.	Iluminancia e índice de radiación UV.	85
3.8.9.	Luz visible.	85
3.8.10.	Luz infrarroja.	86
3.8.11.	Índice UV.....	86
3.9.	COMPARATIVA	87
3.9.1.	Calidad de aire.	87
3.9.2.	Humedad relativa.	89
3.9.3.	Ruido.....	91
3.9.4.	Cantidad de partículas PM10.	94
3.9.5.	Presión absoluta.	96
3.9.6.	Temperatura.....	97
3.9.7.	Iluminancia.	100
4.	CONCLUSIONES.....	104
5.	OBSERVACIONES	105
6.	MEJORAS Y FUTURAS ITERACIONES	106
6.1.	iAQ1.	106
6.2.	iAQ3.	108
	REFERENCIAS	112
	BIBLIOGRAFÍA	117

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Cubesensor, producido por Cubesensors, Eslovenia [5].	18
Figura 2. Wheater Station, producido por NETATMO, Francia [6].	19
Figura 3. Alima, producido por Foobot, Estados Unidos [7].	20
Figura 4. Ecuación del internet de las cosas [8].	27
Figura 5. Explicación del síndrome de edificio enfermo SEE.	28
Figura 6. Variables del confort térmico [11].	35
Figura 7. Relación temperatura-humedad relativa junto con las zonas de confort [12].	36
Figura 8. Descripción de luminancia E y L.	39
Figura 9. Guía indicativa de niveles de radiación UV [14].	40
Figura 10. Características físicas, eléctricas, y sensores que incorpora la unidad de monitoreo experimental iAQ2.	41
Figura 11. Características de conectividad e indicadores que incorpora la unidad de monitoreo experimental iAQ2.	41
Figura 12. Modelo 3D de la unidad experimental de monitoreo.	42
Figura 13. Módulo ESP WROOM 32.	42
Figura 14. Placa de desarrollo ESP32 WeMos. Arriba: vista superior. Abajo: vista inferior.	44
Figura 15. MPU6050. Izquierda: integrado MPU-6050. Derecha: Módulo GY-521 [16].	46
Figura 16. CCS811. Izquierda: Integrado LGA del CCS811. Derecha: módulo CJMCU-8118 [17].	48
Figura 17. SI7006 [18].	49
Figura 18. SI1145. Izquierda: sensor SI1145. Derecha: módulo GY1145 [19].	49
Figura 19. GP2Y1010AU0F [20].	51
Figura 20. MS5637 [21].	51

Figura 21. CJMCU-9812. Izquierda: vista superior del módulo. Derecha: vista inferior del módulo [22].	52
Figura 22. LM75B [23].	52
Figura 23. SSD1306 [24].	53
Figura 24. Barra de LEDs [25].	54
Figura 25. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de presión en la placa 1.	55
Figura 26. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de temperatura en la placa 1.	56
Figura 27. Placa 1, en la parte superior el sensor de temperatura LM75B y parte inferior el sensor de presión absoluta MS5637. Izquierda: frontal de la placa 1. Derecha: posterior de la placa 1.	57
Figura 28. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de gas en la placa 2.	58
Figura 29. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de humedad relativa en la placa 2.	58
Figura 30. Placa 2, la parte superior el sensor de calidad de aire CCS811 y en la parte inferior el sensor de humedad relativa SI7006. Izquierda: frontal de la placa 2. Derecha: posterior de la placa 2.	59
Figura 31. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de luz visible e infrarroja en la placa 3.	60
Figura 32. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de ruido en la placa 3.	61
Figura 33. Placa 3, en la parte superior el sensor de ruido SPH0645LM4H-B y en la parte inferior el sensor de luminancia SI1133. Izquierda: frontal de la placa 3. Derecha: posterior de la placa 3.	61
Figura 34. Esquema eléctrico de conexión conector microUSB e integrado de protección ESD.	62
Figura 35. Esquema eléctrico de conexión del regulador de tensión RichTek DS9080.	63

Figura 36. Esquema eléctrico de conexión del cargador de baterías RichTek DS9525.....	63
Figura 37. Esquema eléctrico de conexión del enclave digital con compuertas lógicas para el control de encendido apagado con botones externos.....	64
Figura 38. Esquema eléctrico de conexión de los transistores que sirven de puente entre el CP2102 y el módulo ESP WROOM 32.	64
Figura 39. Esquema eléctrico de conexión del integrado de interfaz UART-USB CP2102.....	65
Figura 40. Esquema eléctrico de conexión del módulo ESP WROOM 32.	65
Figura 41. Esquema eléctrico de conexión del sensor de aceleración LIS3DH.	66
Figura 42. Esquema eléctrico de conexión de los leds informativos WS2812.	66
Figura 43. Placa 4 con sus conexiones finalizadas para envío a fabricación.	67
Figura 44. Banco de pruebas de los sensores de la unidad de monitoreo. Arriba izquierda: vista superior. Arriba derecha: detalle barra informativa. Abajo izquierda: detalle pantalla OLED. Abajo derecha: detalle placa 1.....	68
Figura 45. Modelo final impreso en 3D de la unidad de monitoreo iAQ2.	69
Figura 46. Plantilla creada para la presentación de los datos recolectados.	71
Figura 47. Niveles de ruido en dB.....	73
Figura 48. Niveles de concentración de PM10.	74
Figura 49. Comportamiento obtenido de las aceleraciones en los 3 ejes.	77
Figura 50. Comportamiento obtenido para el giroscopio en sus 3 ejes.	77
Figura 51. Comportamiento obtenido del sensor de calidad de aire CCS811.	78
Figura 52. Comportamiento de humedad relativa.....	79
Figura 53. Comportamiento del módulo de ruido ambiental MAX9812.....	81
Figura 54. Nivel de partículas obtenido por el sensor GP2Y1010AU0F.	82
Figura 55. Comportamiento de la presión absoluta monitoreada por el sensor SI7006.	83
Figura 56. Comportamientos de temperatura obtenidos por los 3 diferentes sensores habilitados para dicha variable.	84

Figura 57. Comportamiento de la temperatura para el día 28 de enero tomado de la plataforma Thinger.io. Debe resaltarse que la mañana estuvo fresca y hacia medio día el cielo se despejó.....	84
Figura 58. Comportamiento del módulo GY-1145 para luz visible.	85
Figura 59. Comportamiento del módulo GY-1145 para luz infrarroja.....	86
Figura 60. Comportamiento del módulo GY-1145 para índice de radiación UV. ...	87
Figura 61. Comportamiento obtenido por el módulo de calidad de aire CCS811 (CO ₂) durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.	88
Figura 62. Comportamiento obtenido por el módulo de calidad de aire CCS811 (COVs) durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.....	88
Figura 63. Primera prueba comparativa entre equipo de medición RH305 y el sensor -si7006.	89
Figura 64. Segunda prueba comparativa entre equipo de medición RH305 y el sensor -si7006.	90
Figura 65. Comportamiento obtenido por el sensor de humedad relativa SI7006 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.....	91
Figura 66. Primera prueba comparativa entre equipo de medición UT350 y el módulo MAX9812.	92
Figura 67. Segunda prueba comparativa entre equipo de medición UT350 y el módulo MAX9812.	93
Figura 68. Comportamiento obtenido por el módulo de sonido MAX9812 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.....	94
Figura 69. Comportamiento obtenido por el sensor de partículas GP2Y1010AU0F durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.....	95
Figura 70. Comportamiento obtenido por el sensor de presión absoluta MS5637 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.....	96
Figura 71. Primera comparativa del comportamiento de los sensores de temperatura SI7006, MS5637 y LM75b con respecto al equipo de medición RH305.....	97

Figura 72. Primera comparativa del comportamiento de los sensores de temperatura SI7006, MS5637 y LM75b con respecto al equipo de medición RH305.....	98
Figura 73. Comportamiento obtenido por el sensor de temperatura LM75b durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.....	99
Figura 74. Comportamiento obtenido por el sensor de presión MS5637 (temperatura) durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.	99
Figura 75. Primera comparativa del comportamiento del sensor de luz visible e infrarroja SI1145 con respecto al equipo de medición Light Meter 407026 de Extech Instruments.	100
Figura 76. Segunda comparativa del comportamiento del sensor de luz visible e infrarroja SI1145 con respecto al equipo de medición Light Meter 407026 de Extech Instruments.	101
Figura 77. Comportamiento obtenido por el sensor de luz visible e infrarroja (luz visible) SI1145 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.	102
Figura 78. Comportamiento obtenido por el sensor de luz visible e infrarroja (índice UV) SI1145 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.	103
Figura 79. Variables monitoreadas por la iAQ1.	106
Figura 80. iAQ1.....	107
Figura 81. Detalle de abertura de ventilación de la iAQ1.....	107
Figura 82. iAQ3.....	109
Figura 83. Dimensiones iAQ3. Izquierda: altura 103.9mm. Centro: ancho: 122.03mm. Derecha: lateral: 39mm.....	110
Figura 84. Estructura final iAQ3. Izquierda: vista superior. Derecha: vista lateral.	110

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tabla de contaminación en ambientes interiores [10].	30
Tabla 2. Concentración, tiempo de exposición y síntomas de exposición a monóxido de carbono [10].	31
Tabla 3. Concentración, tiempo de exposición y síntomas de exposición a dióxido de carbono [10].	32
Tabla 4. Concentración, tiempo de exposición y síntomas de exposición a óxidos de nitrógeno [10].	32
Tabla 5. Concentración, tiempo de exposición y síntomas de exposición a dióxido de azufre [10].	33
Tabla 6. Efectos en la salud humana por exposición prolongada a COVs [10].	34
Tabla 7. Síntomas derivados de exposición a ruido en personas [10].	37
Tabla 8. Características del módulo ESP-WROOM-32 [15].	43
Tabla 9. Rangos utilizados para establecer los intervalos de calidad de aire de acuerdo a la concentración de CO ₂ [27].	72

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UNA UNIDAD EXPERIMENTAL DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AMBIENTE INTERIOR*

AUTOR: RICARDO RUEDA ROMERO**

PALABRAS CLAVE: UNIDAD EXPERIMENTAL, CALIDAD DE AIRE, MONITOREO, DISEÑO ELECTRÓNICO, INTERNET DE LAS COSAS, CONECTIVIDAD.

DESCRIPCIÓN

Este trabajo de investigación describe la idea, diseño, construcción y funcionamiento de la unidad experimental iAQ2 para el monitoreo de la calidad de ambiente interior (temperatura, humedad relativa, presión absoluta, ruido ambiental, radiación UV, iluminancia, luz infrarroja, material particulado PM10, niveles de CO₂ y compuestos orgánicos volátiles).

Se presentan las consideraciones iniciales, los límites de diseño y objetivos que persigue la unidad de monitoreo, junto con una descripción de las variables generales de calidad de ambiente interior y la selección de aquellas que serán objeto de estudio durante la realización del mismo.

Al mismo tiempo se describen los criterios de selección de los integrados de procesamiento y programación del módulo ESP WROOM 32 a través del protocolo USB, también el criterio de selección de los sensores seleccionados, sus características, y como han sido dispuestos en placas diseñadas para su fabricación y montaje, al igual que la estructura diseñada preliminar construida como banco de pruebas y la proyección de la unidad final, junto con las pruebas de rendimiento y comparación con equipos especializados.

Concluye con la presentación del dispositivo construido durante la realización del trabajo de investigación junto con las sugerencias y mejoras a futuro propuestas por el autor para las versiones iAQ1 e iAQ3.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones (E³T). Directora, María A. Mantilla V, Doctora en Ingeniería electrónica. Codirector, Germán A. Osma P, Doctor en Ingeniería eléctrica.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF AN EXPERIMENTAL UNIT OF MONITORING THE QUALITY OF INTERIOR ENVIRONMENT*

AUTHOR: RICARDO RUEDA ROMERO**

KEY WORDS: EXPERIMENTAL UNIT, AIR QUALITY, MONITORING, ELECTRONIC DESIGN, INTERNET OF THINGS, CONNECTIVITY.

DESCRIPTION:

This research work describes the idea, design, construction and operation of the iAQ2 experimental unit for monitoring the quality of the indoor environment (temperature, relative humidity, absolute pressure, environmental noise, UV radiation, illuminance, infrared light, particulate material PM10, CO₂ levels and volatile organic compounds).

The initial considerations, design limits and objectives pursued by the monitoring unit are presented, together with a description of the general variables of indoor environment quality and the selection of those that will be studied during the realization of the same.

At the same time, the selection criteria of the processing and programming integrations of the ESP WROOM 32 module are described through the USB protocol, as well as the selection criteria of the selected sensors, their characteristics, and how they have been arranged in plates designed for manufacturing and assembly, as well as the preliminary designed structure built as a test bench and the projection of the final unit, together with performance tests and comparison with specialized equipment.

It concludes with the presentation of the device built during the realization of the research work together with the suggestions and future improvements proposed by the author for the versions iAQ1 and iAQ3.

* Undergraduate dissertation

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering School (E³T). Director, Maria A. Mantilla V, PhD in Electronic Engineering. Co-director, German A. Osma P, PhD in Electrical Engineering.

INTRODUCCIÓN

La calidad de ambiente interior es un concepto que en muchas oportunidades pasa desapercibido en informes técnicos y formales sobre las nuevas edificaciones, sin embargo, al considerar que un ciudadano medio urbano consume más del 90% de su tiempo al día en ambientes interiores, la calidad de ambiente interior se vuelve un aspecto crítico para el adecuado desarrollo de las actividades que se realicen en dicho entorno [1].

Según las Naciones Unidas, para el 2050, alrededor de dos terceras partes de la población mundial se concentrarán en ciudades [2], esto sumado a problemas como el de Síndrome de Edificio Enfermo, en el cual, al menos el 20% de sus habitantes reportan un conjunto de molestias tales como: sequedad de piel y mucosas, escozor de ojos, cefalea, astenia, falta de concentración y reducción del rendimiento laboral, aumentan las probabilidades de tener ambientes interiores que no son apropiados para estancias prolongadas.

A pesar de estar en el siglo de las comunicaciones y las redes inteligentes, un ciudadano de Colombia, y muchos otros países del mundo no tienen acceso a cifras detalladas sobre la calidad del ambiente interior al cual están expuestos, lo que conlleva a una desinformación y falta de interés frente a las normas y políticas que se exigen para ofrecer la adecuada calidad de ambiente interior.

Por tal motivo éste proyecto propone la creación de una unidad de medición experimental para la monitorización de la calidad de ambientes interiores, que sea portable, de bajo consumo, y de fácil uso, para empoderar al usuario con los datos obtenidos y poder tomar acciones frente al ambiente interior al cual se encuentra expuesto.

El proyecto estará enfocado en el diseño de la electrónica, diseño de la estructura del dispositivo, y envío de los valores de las variables de ambiente interior por medio de Wifi a plataformas en línea dispuestas para el tratamiento de datos del Internet de la Cosas (Internet of Things, IoT).

En la actualidad, el Síndrome de Edificio Enfermo es un problema conocido y bien caracterizado [3], sin embargo, en Colombia los usuarios o residentes de estructuras no tienen un acceso rápido y sencillo al monitoreo de las variables de ambiente interior, dificultando la comprensión de las mismas o asumiendo valores de variables que son cercanas a la ubicación del usuario, pero enfocadas a ambientes exteriores, como las estaciones de monitoreo de calidad de aire a nivel nacional [4].

En el mercado internacional actual, se pueden encontrar dispositivos de monitoreo de la calidad de ambiente interior cada uno de ellos con características propias. A continuación, se presentan 3 de los dispositivos más cercanos al enfoque de éste trabajo de investigación.

Figura 1 Cubesensor, producido por Cubesensors, Eslovenia [5].



La figura 1 presenta el dispositivo CUBESENSORS, el cual monitorea las siguientes variables:

- Calidad de aire (CO₂¹, niveles de COVs²).
- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Ruido ambiente.
- Cantidad de luz.
- Presión atmosférica.
- Movimiento.

Adicionales:

- El dispositivo se ilumina cuando se agita.
- Conectividad ZigBee³.
- Portable y recargable.
- App ⁴del dispositivo (iOS y Android).

Figura 2. Wheater Station, producido por NETATMO, Francia [6].



¹ CO₂: Dióxido de carbono.

² COVs: Compuestos Orgánicos Volátiles.

³ ZigBee: Protocolo de comunicación inalámbrica de alto nivel y bajo consumo basado en el estándar IEEE 802.15.4.

⁴ Abreviatura de aplicación (application) para dispositivos móviles.

La figura 2 presenta el dispositivo Weather Station fabricado por NETATMO, el cual monitorea las siguientes variables:

- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Presión atmosférica.
- Calidad de aire (CO₂).
- Ruido ambiente.

Adicionales:

- Conectividad Wifi.
- Almacenamiento de las mediciones en servidor de la compañía.
- App del dispositivo (iOS, Windows Phone y Android).
- Portable con baterías intercambiables.

Figura 3. Alima, producido por Foobot, Estados Unidos [7].



La figura 3 presenta el dispositivo Alima, la cual monitorea las siguientes variables:

- Temperatura
- Humedad relativa

- Partículas finas PM2.5 ⁵
- Calidad de aire (COVs)

Adicionales:

- Conectividad Wifi
- Almacenamiento de las mediciones en servidor de la compañía
- App del dispositivo (iOS y Android)

El desafío de monitorear y ofrecer al usuario los valores de las variables de calidad de ambiente interior ya se ha solucionado, pero aún no son de uso extendido. Dos de ellos son portables y funcionan con batería (recargable o intercambiable) y sólo uno de ellos está pensado para ser un dispositivo estático.

Todos los dispositivos anteriores tienen un objetivo claro, servir como sensores de monitoreo de la calidad de ambiente interior para el internet de las cosas IoT, proyección principal que comparten con la realización de éste proyecto de investigación.

⁵ PM (Particulate matter): Material particulado cuyo diámetro es menor a 2.5µm.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Monitorizar y enviar por Wifi las siguientes variables de ambiente interior:

- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Iluminancia.
- Radiación UV.
- Niveles de CO₂ y COV.
- Nivel de sonido.

Se desea diseñar y construir la unidad de monitoreo a nivel local para promover el diseño y desarrollo de tecnologías propias.

1.2. ESTRATEGIA DE DESARROLLO

Diseñar una unidad de monitorización experimental que persiga los siguientes objetivos:

- Medición de las variables anteriormente listadas.
- De fácil portabilidad.
- Conectividad Wifi.

1.3. CONSIDERACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

Los usuarios de la unidad experimental de monitorización de calidad de ambiente interior podrán registrar las variables ambientales a las cuales se encuentran

expuestos y tomar decisiones frente a las medidas obtenidas, sin depender de sistemas de monitoreo externo de los cuales no puedan garantizar la fiabilidad de sus mediciones, es decir, los usuarios tendrán un dispositivo imparcial para calificar su calidad de ambiente interior.

Adicionalmente todas las zonas de una edificación poseen diferentes variables, y no todas son las apropiadas para el desarrollo de cierta actividad (comer, estudiar, dormir, leer, entre otras), con un dispositivo que pueda aportar datos sobre la calidad de cada ambiente interior al cual se encuentra expuesto el usuario, se podrá mejorar el desempeño del mismo en la tarea ejecutada.

1.4. HIPÓTESIS DE LA PROPUESTA

Diseñando una unidad experimental de monitorización de ambiente interior se facilitará la toma de acciones preventivas y correctivas sobre la edificación al proveer los valores de las variables que definen dichos escenarios a los usuarios.

1.5. PROPUESTA DE VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Para probar la unidad experimental de monitorización de calidad de ambiente interior se someterá ésta a pruebas comparativas de medición con instrumentos especializados para cada variable y definir su comportamiento respecto a estos.

Los siguientes equipos serán facilitados por el grupo GISEL para la realización de la etapa de caracterización:

- Piranómetro.
- Luxómetro.
- Termómetro digital.

- Sonómetro.

Los siguientes equipos serán facilitados con docentes de la universidad o terceros en caso de ser necesario:

- Sensor de humedad relativa.
- Dispositivo para medición de CO₂ y TVOC.

1.6. RESULTADOS PREVIOS ESPERADOS

Se espera que la unidad de medición experimental de calidad de ambiente interior sea comparada y pueda ser caracterizado su rendimiento de acuerdo a los instrumentos de comparación utilizados.

1.7. APOORTE ORIGINAL DEL TRABAJO

Éste trabajo de investigación brindará una unidad de monitorización de ambiente interior que será portable, de fácil utilización y enfocada al entorno del internet de las cosas.

1.8. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

En la actualidad las variables de ambiente interior determinan de forma crítica, la sensación de confort y bienestar de las personas en los escenarios que se encuentran. Si se tuviese la posibilidad de conocer dichas variables se podrían tomar acciones para corregirlas, mantenerlas, o mejorarlas, lo que empoderaría a los usuarios de dicho dispositivo a exigir mejores zonas apropiadas para cada actividad.

En un mundo donde la contaminación de todo tipo se mantiene en aumento y no se tienen un control estricto sobre cada una de las variables, el dispositivo de monitorización es un excelente indicador del estado actual de los ambientes interiores, y al ser un dispositivo que será portable, de fácil uso, y enfocado a un entorno de IoT, posibilita la creación de una cultura de monitorización, control, y solicitud de normas y acciones legales frente a aquellos escenarios que no proveen un adecuado ambiente interior para sus habitantes.

1.9. OBJETIVOS

1.9.1. Objetivo general. Diseñar una unidad de monitoreo de calidad de ambiente interior que sea capaz de registrar y ofrecer al usuario las siguientes variables:

- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Iluminancia.
- Radiación UV.
- Niveles de CO₂ y TVOC.
- Nivel de sonido.

1.9.2. Objetivos específicos

- Diseñar la estructura física de la unidad experimental de monitoreo.
- Diseñar los esquemáticos y planos electrónicos de la unidad experimental del monitoreo.
- Realizar la caracterización de la unidad experimental de monitoreo con respecto a cada una de las variables que se desean monitorear.

1.10. ALCANCE

Mediante este trabajo de grado se plantea construir una unidad experimental de monitoreo que permita registrar las variables de ambiente interior y brindar a sus usuarios dichos datos para realizar procesos de control, seguimiento y estudio de escenarios de ambiente interior, y proveer a la sociedad en general un dispositivo capaz de brindar datos fiables para dichas acciones de monitoreo.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. ¿QUÉ ES EL INTERNET DE LAS COSAS (IoT)?

Figura 4. Ecuación del internet de las cosas [8].

$$\begin{aligned} &\text{Physical Objects} \\ &+ \\ &\text{Controller, sensors and actuators} \\ &+ \\ &\text{Internet} \\ &= \\ &\underline{\text{Internet of Things}} \\ &\quad \underline{(\text{IoT})} \end{aligned}$$

Básicamente el IoT es la conexión de objetos comunes o no, potenciados con microcontroladores, sensores, y/o actuadores, capaces de ofrecer información rápida y en tiempo real al usuario por medio de conexión a internet o por algún medio de comunicación con el usuario (información luminosa, visible, vibraciones, acústicas, entre otras), cumpliendo de esta forma la llamada ecuación del internet de las cosas mostrada en la figura 4.

2.2. ¿QUÉ ES UN “EDIFICIO ENFERMO”?

Figura 5. Explicación del síndrome de edificio enfermo SEE.



El concepto proviene del Síndrome de Edificio Enfermo (figura 5) que significa que un edificio posee una variedad de factores que promueven o facilitan la aparición de enfermedades o complicaciones temporales de la salud de sus ocupantes.

El Síndrome de Edificio Enfermo o SEE, es un síndrome de difícil diagnóstico según la OMS⁶, su razón, que, aunque un edificio cuente con una o varias de las siguientes características:

- Ventilación forzada común sin el adecuado proceso de renovación y expulsión de aire.
- Ser un edificio de construcción ligera y económica.
- Superficies internas cubiertas con material textil.
- Mantener una temperatura elevada argumentando ahorro energético.
- Poseer muchos espacios cerrados o su misma estructura funciona como un espacio cerrado.

No garantiza que obligatoriamente sea calificado como edificio con SEE.

⁶ OMS: Organización Mundial de la Salud.

Como un edificio no es un ser vivo, no puede sufrir una enfermedad, y son sus ocupantes los que sienten los efectos que pueden generar estas características de la edificación en la cual pasan del 50% al 90% del tiempo, debido a las tareas propias de la actual actividad humana diaria se pueden llegar a presentar los siguientes síntomas:

- Elevada incidencia de infecciones respiratorias y resfriados.
- Alergias.
- Ronquera.
- Eritemas.
- Dolor de cabeza.
- Fatiga mental.
- Náuseas, mareos, vértigo.
- Sensación de sequedad en piel y mucosas.

Los síntomas que sufren los ocupantes se deben a los procesos propios de degradación, uso, o mala calidad de los materiales de la edificación y a que sus características propias potencian los efectos de los procesos mencionados anteriormente.

Esta sumatoria de factores se generan desde puntos físicos o químicos, incluyendo también los agentes patógenos presentes, lo cuales se ven potenciados por las condiciones físicas y exponen a sus ocupantes a un riesgo mayor de desarrollar algunos de los síntomas mencionados, aunque en la práctica resulta difícil valorar los riesgos de dichas exposiciones a los entornos de un edificio con SEE ya que se debe asumir que generalmente el SEE parte de un 20% de los ocupantes desarrollando síntomas similares y que si abandonan temporalmente la edificación su salud mejorará [9].

Es éste aspecto “humano” y “semi-aleatorio” el que dificulta la detección de SEE en una edificación, sin incluir la multitud de contaminantes y materiales que bajo ciertas circunstancias se pueden convertir en un riesgo para la salud humana, como se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla de contaminación en ambientes interiores [10].

TIPO DE CONTAMINACIÓN	CARACTERÍSTICAS Y ELEMENTOS RELACIONADOS	ORIGEN CONTAMINANTE	CONTAMINANTE
Contaminantes procedentes del ambiente exterior	Ubicación del edificio	Combustión (calderas, tráfico) Actividad industrial próxima Terreno Vertederos, escombros, fluviales. solares, cuencas,	CO, CO ₂ , NO _x , SO _x , partículas, metales NO _x , SO _x , COVs
Contaminantes generados en el edificio	Uso y distribución del edificio: <ul style="list-style-type: none"> • Restaurantes y cocinas • Zonas de aparcamiento • Aseos y vestuarios • Materiales de construcción y elementos decorativos Instalaciones del edificio: <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones de acondicionamiento de aire • Instalaciones de agua • Gestión de residuos • Depósitos de combustibles • Almacenes y salas de usos especiales • Sistemas de saneamiento 	Fotocopiadoras, impresoras láser Combustión Humedades, desagües Aislantes conglomerados de madera, moquetas, barnices, pinturas.	Ozono NO _x Olores Partículas Mohos Amianto, radón, COVs, polvo, formaldehído, ácaros, creosota Legionella, fibras, bacterias, artrópodos, roedores
Contaminantes generados por los ocupantes y sus actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupantes • Mantenimiento del edificio • Remodelación del edificio 	Tabaco Operaciones de limpieza, desinfección, control de plagas, jardinería y plantas verdes, ambientadores...	CO ₂ , humo de tabaco, amianto, polvo, plaguicidas, productos químicos, hongos, ácaros, legionella, bacterias, artrópodos, roedores
Disconfort: Factores físicos	<ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones de acondicionamiento de aire • Sistema de calefacción • Equipos y aparatos 	Sistemas de aire acondicionado, ventilación y calefacción Equipos informáticos Pantallas de visualización Cableado eléctrico	Humedad relativa Temperatura Ruido Vibraciones Campos electromagnéticos

2.3. LAS VARIABLES DE INTERÉS EN UN ENTORNO DE SEE

En un entorno con SEE todos los factores son importantes, inclusive en un entorno sin SEE el monitoreo y registro de dichos valores facilitará la detección de averías, mantenimiento preventivo y resguardo de la salud de los ocupantes y visitantes de las edificaciones.

A continuación, se describen las variables de interés con sus respectivos síntomas y malestares asociados en la salud de los ocupantes, adaptadas para el trabajo grado [10]:

2.3.1. Monóxido de carbono (CO). Es un gas incoloro e inodoro, de alta peligrosidad, que en ambientes interiores suele estar acompañado de otros productos derivados de la combustión. Los síntomas que se pueden desarrollar por exposición al CO se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Concentración, tiempo de exposición y síntomas de exposición a monóxido de carbono [10].

CO en ppm	Tiempo de exposición	Síntomas
100	n horas	Sin efectos considerables
200	1.5 h	Leve dolor de cabeza
400-500	1 h	Dolor de cabeza Náuseas Mareos
500-1000	1 – 1.5h	Pérdida de conciencia
1500-2000	30 min – 1 h	Dolor de cabeza Mareo Nausea severas Pérdida de conciencia
10000	Exposición corta	Muerte inmediata

2.3.2. Dióxido de carbono (CO₂). Componente natural del aire. Gas incoloro e inodoro, calificado como gas de efecto invernadero. Los síntomas que se pueden desarrollar por exposición al CO₂ se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Concentración, tiempo de exposición y síntomas de exposición a dióxido de carbono [10].

CO₂ en ppm	Tiempo de exposición	Síntomas
100	n horas	Sin efectos
300 – 400	n horas	Concentración normal en ambientes interiores
800 – 2000	Exposición media y prolongada	Incomodidad Dolor de cabeza Cansancio Problemas respiratorios
>5000	Exposición corta	Dolor de cabeza Mareo Nausea severas Pérdida de conciencia

2.3.3. Óxidos de Nitrógeno (NO_x). Conjunto de formas oxidadas del nitrógeno en la atmósfera (óxido nítrico y dióxido de nitrógeno). Los síntomas que se pueden desarrollar por exposición al NO_x se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Concentración, tiempo de exposición y síntomas de exposición a óxidos de nitrógeno [10].

Concentración de NO_x	Tiempo de exposición	Síntomas
Bajas y medias	Corto	Irritación de tracto respiratorio Irritación de ojos
	Prolongado	Efectos en: Sangre – Hígado – Pulmón – Bazo
Altas	Muy corto	Complicaciones agudas del sistema respiratorio

2.3.4. Dióxido de Azufre (SO₂). Es un gas asfixiante e incoloro para las personas. También ha sido calificado como gas de efecto invernadero. Los síntomas que se pueden desarrollar por exposición al SO₂ se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Concentración, tiempo de exposición y síntomas de exposición a dióxido de azufre [10].

SO ₂ en µg/m ³	Tiempo de exposición	Síntomas
400 – 900	24 horas	Leve incremento de trastornos respiratorios en personas con asma
500 – 1700		Incremento de trastornos respiratorios en personas con asma Agravamiento de personas con enfermedades pulmonares y cardíacas
1700 – 2300		Dolor de cabeza Náuseas Mareos
2300 – 2900		Trastornos respiratorios severos en personas con asma Agudo agravamiento de personas con enfermedades pulmonares y cardíacas
> 2900		Cambios en la función pulmonar y trastornos respiratorios en individuos sanos

2.3.5. Compuestos orgánicos volátiles (COVs). Grupo de compuestos pertenecientes a diferentes familias químicas (alcoholes, aldehídos, cetonas, éteres de glicol, terpenos, etc.), cuya base química común es el carbono y se caracterizan por ser volátiles en presencia de aire a temperatura ambiente en un corto lapso de tiempo. Existen tres tipos de compuestos orgánicos volátiles diferenciados por su punto de ebullición:

- Muy volátiles: temperatura de ebullición menor a 50 °C.
- Volátiles: temperatura de ebullición entre 50 °C a 260 °C.
- Semivolátiles; temperatura de ebullición superior a 260 °C.

En la tabla 6 se resumen los efectos que los COVs tienen en la salud humana.

Tabla 6. Efectos en la salud humana por exposición prolongada a COVs [10].

COVs	Efectos agudos	Efectos crónicos	Carcinogenicidad
Formaldehído	Respiratorios	Cáncer nasal	1 Cancerígeno
Benceno	Inmunológicos	Leucemia	1 Cancerígeno
1,3 butadieno	Irritación/Neurológicos	Neurológicos	1 Cancerígeno
Acetaldehído	Irritación mucosas	Cáncer vías respiratorias	2B Posible Cancerígeno
Tolueno	Neurológicos	Neurológicos	3 Inclasificable
Tricloroetileno	Neurológicos	Cáncer testículos y pulmón	2A Probable Cancerígeno
Tetracloroetileno	Renal	Neurológicos	2A Probable Cancerígeno
Xileno	Neurológicos	Neurológicos	3 Inclasificable
1,4 diclorobenceno	Desarrollo	Nefrotóxicos	No evaluado
2 butoxietanol	Hematológicos	Hematológicos	2B Posible Cancerígeno
Estireno	Neurológicos	Neurológicos	2B Posible Cancerígeno
1,1,1-Tricloroetano	Neurológicos	Neurológicos	3 Inclasificable
D-Limoneno	Irritación mucosas	Dermatológicos/Alergias	3 Inclasificable

2.3.6. Humedad y Temperatura. Al momento de hablar de humedad y temperatura, se debe tener en cuenta el confort térmico, que básicamente es sentirse bien desde el punto de vista del sujeto teniendo como referencia el ambiente higro-térmico exterior, es decir, su entorno.

Figura 6. Variables del confort térmico [11].

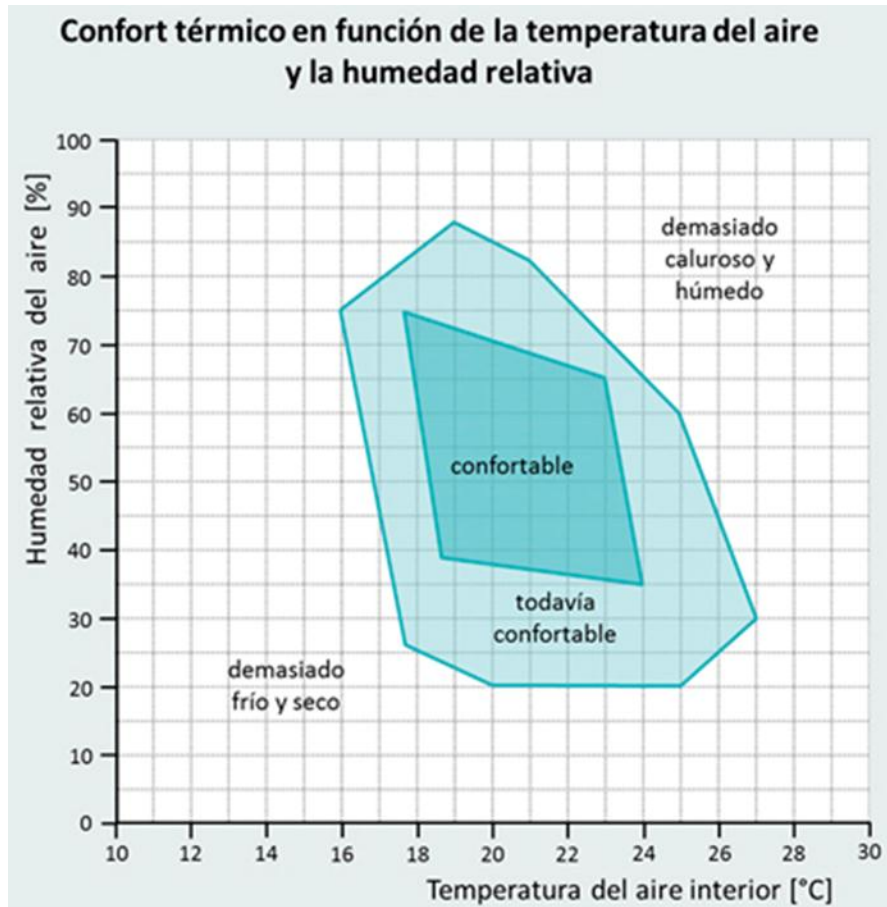


Según la norma UNE EN ISO 7730, el confort térmico se considera como el balance térmico de un cuerpo con su entorno, lo que significa que, una persona tendrá confort térmico cuando el calor interno generado y las pérdidas por evaporación de su cuerpo se compensen con las pérdidas o ganancias por calor latente, sensible o radiante con respecto al entorno [11].

Las variables que intervienen en dicho confort térmico tienen diferentes orígenes como se muestra en la figura 6.

Existe una relación entre temperatura y humedad relativa para hablar de confort térmico, como se resume en la figura 7, de donde se puede concluir que para hablar de confort térmico la humedad relativa deberá tener valores entre 30-40% como valores mínimos y de entre 60-70% como valores máximos. Al hablar de temperatura estos valores ideales deberían oscilar entre 18-24°C.

Figura 7. Relación temperatura-humedad relativa junto con las zonas de confort [12].



2.3.7. Ruido o sonido ambiental. Según la OMS el ruido es todo tipo de sonido no deseado cuyas consecuencias son molestas al humano a cualquier nivel. Idealmente se ha establecido, según el Consejo de Investigación de Canadá que el ruido de fondo, debería estar entre 42-48 dBA⁷, mientras que la ASHRAE⁸ establece que los niveles de ruido de fondo deben estar por debajo de los 47 dBA.

⁷ Nivel de audio previamente filtrado para el rango de audición humana.

⁸ Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire.

No se debe omitir que el ruido es un fenómeno que causa molestias, irritabilidad, depresión y perturbación en los humanos, donde principalmente suele disparar efectos negativos psicológicos y mentales. Se presenta en la tabla 7 los efectos del ruido en la salud humana.

Tabla 7. Síntomas derivados de exposición a ruido en personas [10].

Síntomas	Molestias
Estrés	En personas sometidas a ruidos que perturban la atención, concentración, o comunicación. Ruidos que afectan a la tranquilidad y descanso de las personas.
Cansancio crónico	Cansancio y debilidad corporal.
Trastornos del sueño	Tendencia al insomnio, etc.
Fisiológicos	Puede influir en enfermedades cardiovasculares en personas sometidas a más de 65 dB, pudiendo aumentar la presión sanguínea, cardíaca, cambios en la composición química de la sangre, isquemias cardíacas, alteración de la circulación periférica, trastornos digestivos, etc.
Trastornos del sistema inmune	Debilitamiento del sistema inmune.
Trastornos psicofísicos	Depresión, aumento de la irritabilidad, ansiedad, manías, náuseas, jaquecas y en ocasiones, neurosis o psicosis.
Cambios conductuales	Especialmente comportamientos antisociales como hostilidad, intolerancia, agresividad, aislamiento social.
Trastornos auditivos	Presbiacusia o pérdida de capacidad auditiva unida al proceso de envejecimiento. Sordera temporal o sordera permanente.
Interferencias en la comunicación	Problemas para las relaciones sociales.

2.3.8. Biocontaminantes. No sólo los contaminantes de la calidad de aire interior provienen de gases y materiales o procesos físicos, también dependen de agentes biocontaminantes como bacterias, virus, mohos y levaduras, algas y amebas, y ácaros. Sin embargo, estos contaminantes no se tendrán en cuenta durante la

realización de este proyecto de investigación, lo cual puede ser una extensión o continuación del proyecto actual en el futuro.

2.3.9. Otro tipo de contaminante: presencia de animales. Los animales no son un contaminante, pero si lo pueden ser sus desechos, su pérdida de pelo, su dieta, sus entornos de actividad física, o aquellos animales adicionales que atraen o importan al ambiente de las personas, las cuales se pueden ver afectadas por transmisión de enfermedades o lesiones directas provocadas por mordedura, contacto o picadura.

De nuevo, estos contaminantes no se tendrán en cuenta durante la realización de este proyecto de investigación, lo cual puede ser una extensión o continuación del proyecto actual en el futuro.

2.3.10. Iluminación. La iluminación también es un factor crítico al momento de considerar calidad de ambiente interior, el confort visual, es decir, la sensación de bienestar de las personas en un determinado lugar, que básicamente se reduce a que tan adecuada es la luz con la que se realizará cierta tarea durante un largo periodo de tiempo ofreciendo seguridad y confort visual a la persona.

Se debe considerar que para éste proyecto de investigación sólo se tendrá en cuenta el nivel de iluminancia mantenida sobre la zona de interés de la unidad experimental, sin tener en cuenta el rendimiento de colores o el índice de deslumbramiento (ver figura 8). Para ver más en detalle el nivel de luminancia de acuerdo a la actividad realizada se sugiere revisar la norma UNE12464-1 [13].

También se debe considerar que la unidad experimental de monitoreo es portable pero su objetivo se cumple mientras está en reposo y no en movimiento, por lo cual se considerará según la norma UNE 12464-1 que los valores ideales de iluminancia

mantenida serán los suficientes para realizar actividades que impliquen cierto nivel de detalle como la lectura o trabajo continuo frente a pantallas de computador o similares (dispositivos electrónicos) [13].

Figura 8. Descripción de luminancia E y L.



Por estas razones en un principio se utilizarán como valores ideales de iluminancia aquellos comprendidos entre 400lx y 600lx. Si dicho valor de iluminancia disminuyera más a menos 100lx se considerará un valor mínimo de iluminancia, siendo éste apenas confiable para tránsito de personas.

2.3.11. Niveles de radiación UV. La luz de tipo UV comprende aquellas longitudes de onda entre los 10nm y 400nm, clasificadas en:

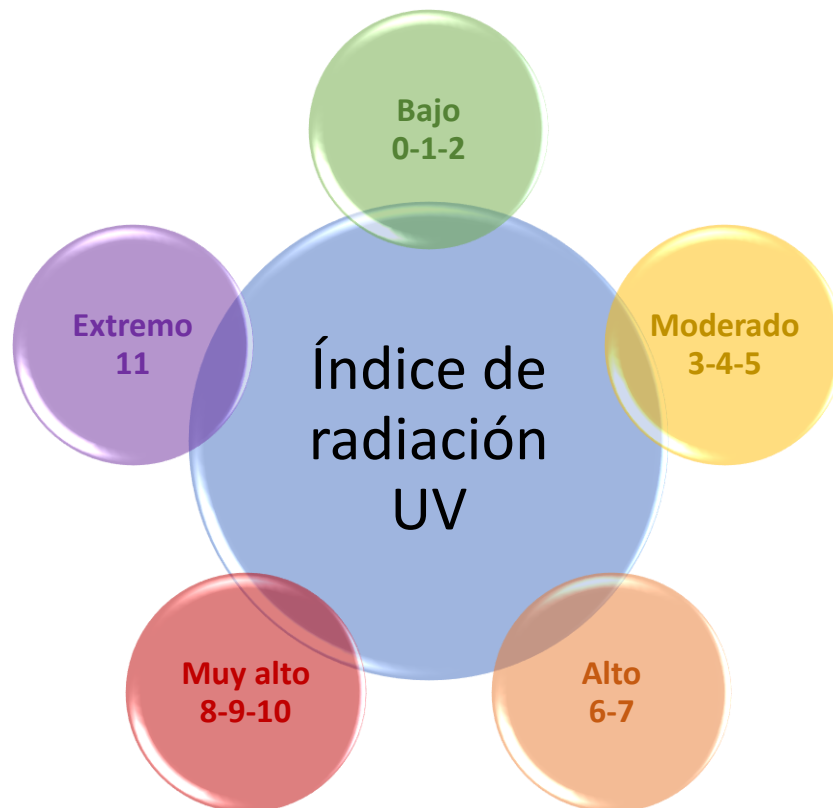
- UVA(400-315nm)
- UVB (315-280nm)
- UVC (280-100nm)
- NUV (400-300nm)
- MUV (300-200nm)
- FUV (200-122nm)
- H Lyman (122-121nm)
- VUV (200-10nm)
- EUV (121-10nm)

Toda exposición a radiación ultravioleta se debe tomar con precaución, y para ello la OMS utiliza el índice UV como referencia para determinar la intensidad de luz ultravioleta y el tiempo al cual una persona puede exponerse, ya que la prolongada exposición a niveles medio o altos, en algunos casos, inclusive niveles bajos de radiación UV, pueden desencadenar los siguientes problemas:

- Cáncer y/o envejecimiento de la piel.
- Cataratas y otros daños oculares.
- Daños e incluso supresión del sistema inmune.
- Alergias, reacciones y desarrollo de hipersensibilidad.

El índice UV nace como una presentación sencilla de representar los niveles de radiación UV relacionadas con la luz solar y los grados de precaución y seguridad que se deben tener al exponerse a la misma, como se muestra en la figura 9. Se aclara, que el tiempo de exposición también varía dependiendo del tipo de piel de la persona.

Figura 9. Guía indicativa de niveles de radiación UV [14].

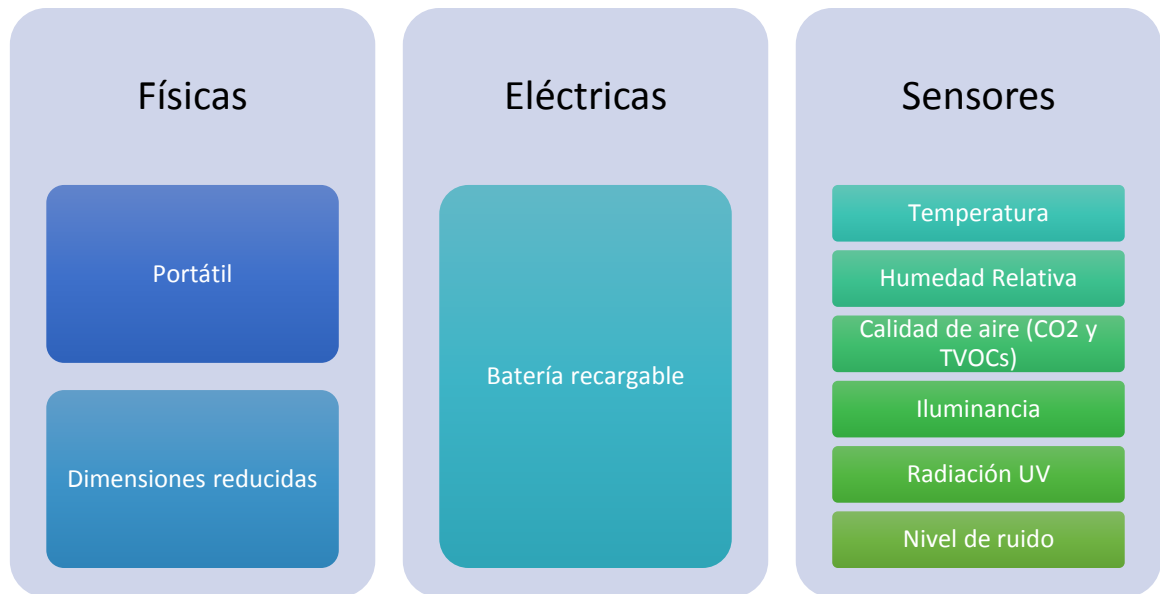


3. PROPUESTA DE UNIDAD EXPERIMENTAL

3.1. DISEÑO

Se ha decidido que la unidad experimental, bautizada como iAQ2 cumplirá las características de las figuras 10 y 11.

Figura 10. Características físicas, eléctricas, y sensores que incorpora la unidad de monitoreo experimental iAQ2.



Adicionalmente contará también con:

Figura 11. Características de conectividad e indicadores que incorpora la unidad de monitoreo experimental iAQ2.



Lo previamente descrito se sintetiza en el modelo 3D mostrado en la figura 12:

Figura 12. Modelo 3D de la unidad experimental de monitoreo.



3.2. B. MÓDULO DE COMUNICACIONES Y MICROCONTROLADOR ESP WROOM 32

Figura 13. Módulo ESP WROOM 32.



El ESP WROOM 32 (figura 13) es un módulo de conectividad Wifi y Bluetooth de modo dual, de bajo costo y reducido consumo energético. El ESP32 utiliza un Microprocesador Xtensa LX6 de Tensilica de doble núcleo [15].

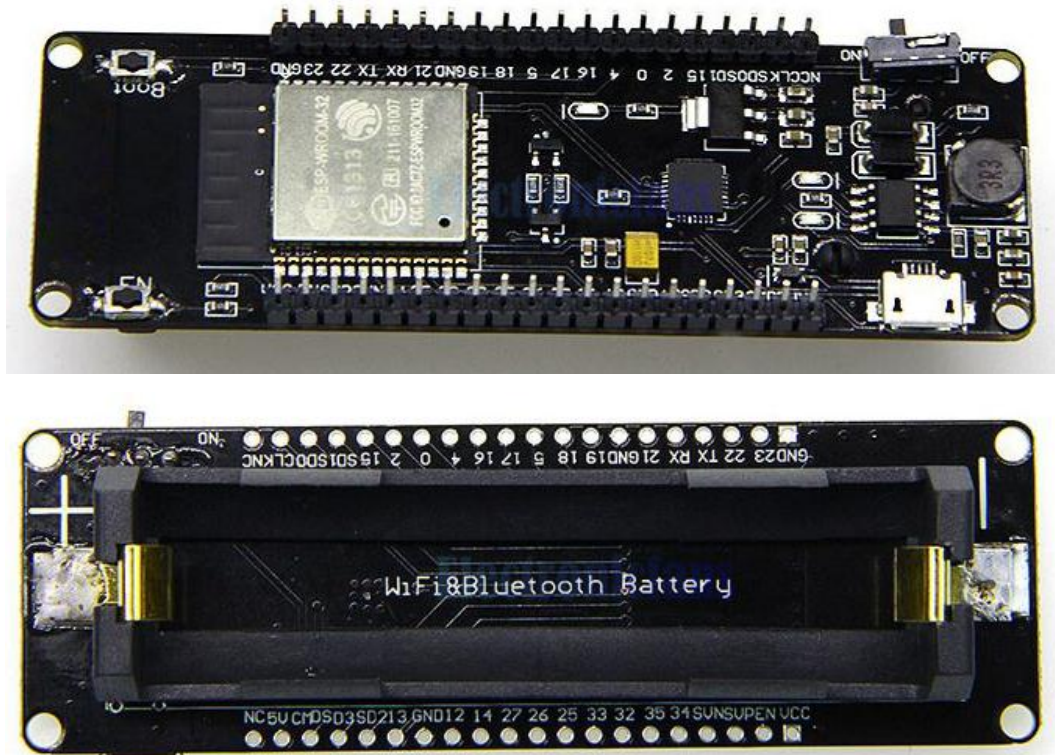
A continuación, se presentan las características del módulo:

Tabla 8. Características del módulo ESP-WROOM-32 [15].

Procesador	Xtensa dual-core 32 bits LX6, a 160 y 240 MHz. Ultra bajo consumo (ULP co-processor)
Memoria	520 KiB SRAM
Conectividad Inalámbrica	Wi-Fi 802.11 b/g/n Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE
Periféricos	12-bit SAR ADC hasta 18 canales 2 x 8-bit DACs 10 x sensores táctiles Sensor de temperatura 4 x SPI 2 x I2S 2 x I2C 3 x UART SD/SDIO/MMC host Slave (SDIO/SPI) Interface Ethernet MAC con soporte dedicado DMA e IEEE 1588 CAN bus 2.0 IR (TX/RX) Motor PWM Led PWM hasta 16 canales Sensor de efecto campo Pre-amplificador analógico de bajo consumo
Seguridad	IEEE 802.11 (WFA, WPA/WPA2, WAPI) Inicio seguro Encriptación Flash 1024-bit OTP, hasta 768-bit para clientes Aceleración criptográfica por hardware
Administración de potencia	LDO interno Dominio de potencia interna para RTC Corriente de hibernación 5uA Activación por cualquier GPIO, reloj, medidas por ADC, o sensor táctil

Para disminuir costos, tiempo y complejidad de fabricación, se ha decidido utilizar el módulo ESP-WROOM-32 incluido en una placa de desarrollo llamada ESP32 WeMos como se observa en la figura 14.

Figura 14. Placa de desarrollo ESP32 WeMos. Arriba: vista superior. Abajo: vista inferior.



Como se puede observar en la figura 14, esta placa de desarrollo incluye:

- El circuito para programación y conexión a PC UART-USB (CP2102)
- El sistema de alimentación (integrado AMS117) para el módulo ESP-WROOM-32
- El circuito de carga de batería controlado por el integrado TP4054 que habilita que la placa de desarrollo sea alimentada por una batería tipo 18650.

3.3. C. SENSORES

El método de selección utilizado para definir los sensores que llevaría la unidad experimental ha tenido en cuenta los siguientes criterios presentados de mayor a menor importancia:

- Tensión de alimentación: La tensión de alimentación de cada sensor podrá ser de 3.3 o 5V ya que son las dos tensiones de salida disponibles en la placa de desarrollo ESP32 WeMos, y se ha descartado el uso de un conversor de tensión adicional para un sensor en específico.
- Costo y Tamaño: En orden de importancia, los siguientes dos factores claves al momento de elegir cada sensor han sido su costo y sus dimensiones físicas. Se ha optado por sensores en formato QFN⁹ para los sensores de temperatura, humedad relativa, aceleración, presión atmosférica, calidad de aire, luminancia y UV; en cambio para el sensor de partículas, se ha optado por un modelo ya fabricado para su uso.
- Tipo de salida, perfil de bajo consumo, resolución, y facilidad de instalación: Al tener una amplia cantidad de sensores (8), se ha determinado que se debe usar la menor cantidad de cable para su conexión con la placa ESP32 WeMos, con esto en mente, se ha escogido que los sensores de dimensión QFN sean de tipo de salida I2C, sólo dejando como entradas analógicas, los sensores de ruido ambiental y el sensor de partículas ya que de fábrica su salida es analógica.

⁹ QFN: Quad Flat No-Leads package. Tipo de empaquetado de circuito integrado superficial caracterizado por no tener aletas para su proceso de soldadura.

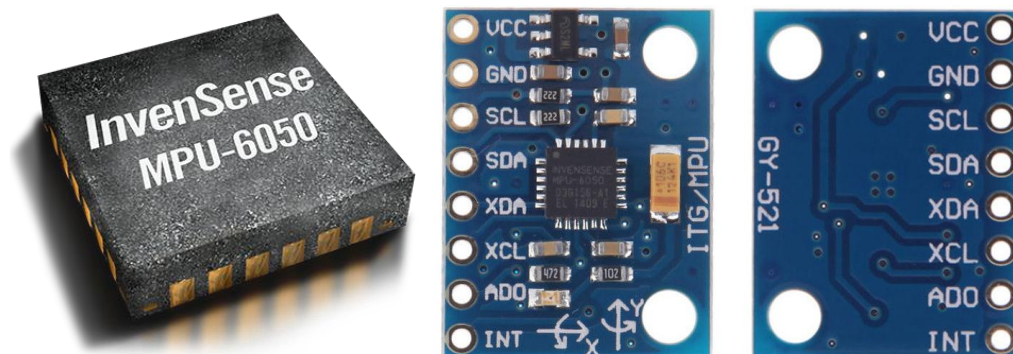
También se ha tenido en cuenta, la facilidad de instalación de cada sensor, por lo que algunos de ellos han sido comprados por separado (integrado del sensor) o en módulo ya listos para su uso como se mencionará más adelante en la explicación detallada de cada sensor.

Al mismo tiempo, pero no tan relevantes, se ha considerado la resolución de cada sensor y si éste posee o no perfiles de bajo consumo, o su propia concepción a estado enfocada a este perfil.

A continuación, se presentan los sensores seleccionados para la unidad experimental iAQ2:

3.3.1. Sensor de aceleración MPU6050 de Invensense. Es un sensor de movimiento inercial que combina un giroscopio y un acelerómetro cada uno de ellos con 3 ejes. Diseñado para alto desempeño, bajo consumo y bajo costo, cuyo mercado objetivo son los dispositivos móviles.

Figura 15. MPU6050. Izquierda: integrado MPU-6050. Derecha: Módulo GY-521 [16].



Debido a que previamente se posee el módulo GY-521 (figura 15) que incorpora el MPU6050 se ha decidido utilizar éste para reducir costos y tiempo de fabricación. A continuación, se describen sus especificaciones.

Alimentación: 5V – 3.9mA.

Tipo de sensor MEMS¹⁰:

Tipo de salida: I2C, SPI.

Rangos de medida: giroscopio ($\pm 2000^\circ/\text{sec}$), acelerómetro ($\pm 16g$), temperatura - 40+85°C.

Adicionales: ADCs de 16 bits, perfil de bajo consumo.

Precio: \$4.52 dólares¹¹.

3.3.2. Sensor de calidad de aire CCS811 de AMS. Es un sensor de ultra bajo consumo, presentado en la figura 16, que integra un sensor de gas tipo MOX¹² para monitoreo de COV y CO₂, detectando los siguientes COVs:

- Alcoholes
- Aldehídos
- Cetonas
- Ácidos orgánicos
- Aminas
- Alifáticos
- Hidrocarburos aromáticos

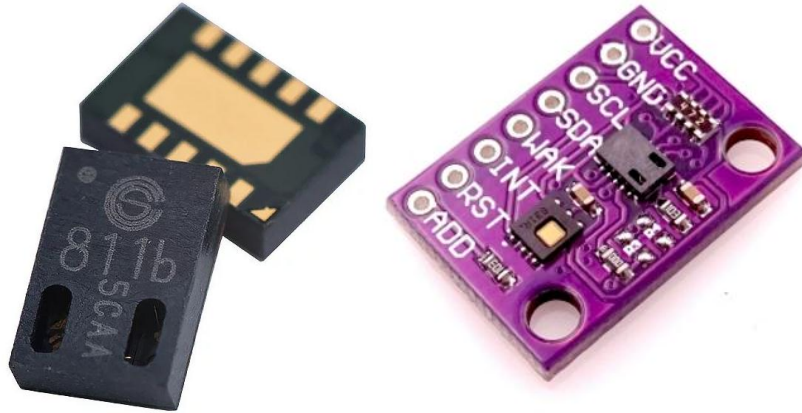
Su mercado objetivo son los dispositivos móviles y dispositivos de casa inteligente.

¹⁰ Microelectromechanical systems. Sistemas micro electromecánicos

¹¹ Precio unitario tomado de la página de Digikey para el mes de febrero de 2018.

¹² Metal oxide (MOX): Semiconductor de óxido metálico.

Figura 16. CCS811. Izquierda: Integrado LGA del CCS811. Derecha: módulo CJMCU-8118 [17].



El tipo de empaque de este sensor es LGA¹³ con una capa significativamente más delgada que un QFN estándar, debido a que debe permitir la entrada de aire a un interior, por esta razón, su proceso de montaje y soldadura es más complejo, razón por la cual se ha decidido comprar el módulo CJMCU-8118 que trae instalado el sensor CCS811 junto con el sensor de humedad HDC1080, módulo que se puede observar en la figura 16. A continuación, se describen sus especificaciones.

Alimentación: 3.3V – 26mA.

Tipo de sensor: MOX.

Tipo de salida: I2C.

Rangos de medida: eCO₂ (400 - 8192 ppm), TVOC (0 - 1187 ppb).

Adicionales: ADCs de 16 bits, incluye el sensor HDC1080 de humedad, perfil de bajo consumo.

Precio: \$12.9 dólares¹⁴.

¹³ LGA: Land Grid Array. Tipo de empaquetado de circuito integrado superficial caracterizado por no tener esferas o pines para su conexión, lo que reduce su grosor al estar ensamblado.

¹⁴ Precio unitario tomado de la página de Aliexpress para el mes de febrero de 2018.

3.3.3. Sensor de humedad relativa SI7006 de Silicon Labs. Sensor capaz de medir la humedad relativa y temperatura (figura 17). El sensor ha sido calibrado de fábrica y entrega las medidas por protocolo I2C. A continuación, se describen sus especificaciones.

Figura 17. SI7006 [18].



Alimentación: 3.3V – 10mA + 9.5mA (calentador).

Tipo de sensor: Dieléctrico.

Tipo de salida: I2C.

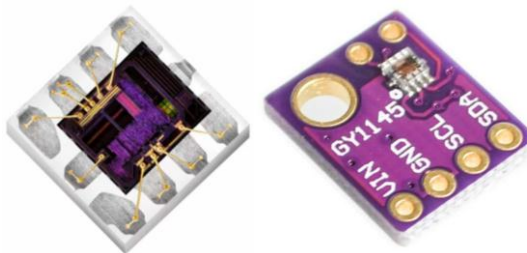
Rangos de medida: humedad relativa (0 - 80%), temperatura (-10 - +85°C).

Adicionales: ADCs de 16 bits, perfil de bajo consumo.

Precio: \$2.25 dólares¹⁵.

3.3.4. Sensor de iluminancia y radiación UV SI1145-A10 de Silicon Labs. Es un sensor de luz ambiental, radiación UV, radiación IR y proximidad, que combina sus dos fotodiodos sensores para ofrecer las 4 medidas previamente mencionadas.

Figura 18. SI1145. Izquierda: sensor SI1145. Derecha: módulo GY1145 [19].



¹⁵ Precio unitario tomado de la página de Digikey para el mes de febrero de 2018.

Debido a la complejidad de soldar un sensor cuya superficie está fabricada de un material transparente y menos resistente que la usual capa de cerámica, se ha decidido utilizar el módulo GY1145, mostrado en la figura 18, que ya incorpora el sensor SI1145 para uso inmediato evitando la complejidad del proceso de montaje y el tiempo requerido para el mismo. A continuación, se describen sus especificaciones.

Alimentación: 3.3V – 5.5mA.

Tipo de sensor: Fotodiodo.

Tipo de salida: I2C.

Rangos de medida: luz visible (0 - 128 klx), longitud de onda entre (280 - 1050 nm).

Adicionales: ADCs de 16 bits, incluye fuente de corriente para LEDs IR de apoyo.

Precio: \$2.25 dólares¹⁶.

3.3.5. Sensor de partículas GP2Y1010AU0F de Sharp. Es un sensor de medición de partículas en el aire por medio luz infrarroja (figura 19), especial para la detección de partículas finas similares al humo de tabaco. A continuación, se describen sus especificaciones.

Alimentación: 5V – 20mA.

Tipo de sensor: Infrarrojo.

Tipo de salida: Analógica.

Rangos de medida: densidad de polvo (0 - 0.8 mg/m³).

Adicionales: Ninguno.

Precio: \$3.86 dólares¹⁷.

¹⁶ Precio unitario tomado de la página de Aliexpress para el mes de febrero de 2018.

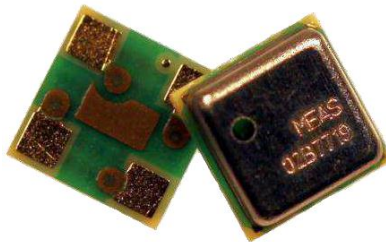
¹⁷ Precio unitario tomado de la página de Aliexpress para el mes de febrero de 2018.

Figura 19. GP2Y1010AU0F [20].



3.3.6. Sensor de presión atmosférica MS5637 de TE Connectivity.

Figura 20. MS5637 [21].



Sensor de presión absoluta que integra un sensor de temperatura (figura 20). Optimizado para aplicaciones móviles y dispositivos de medición de altitud sobre el nivel del mar. A continuación, se describen sus especificaciones.

Alimentación: 3.3V – 5.5mA.

Tipo de sensor: MEMS.

Tipo de salida: I2C.

Rangos de medida: presión (300 - 1200 mbar), temperatura (-40 - +85 °C).

Adicionales: ADC de 24bits, incluye un sensor de temperatura, perfil de bajo consumo.

Precio: \$4.49 dólares¹⁸.

¹⁸ Precio unitario tomado de la página de Digikey para el mes de febrero de 2018.

Sensor de temperatura fabricado por NXP de la línea conocida como LM75. El LM75B, presentado en la figura 22, se caracteriza por ser un sensor en encapsulado 8-WSO²⁰, lo que lo hace atractivo para aplicaciones donde el espacio es reducido. A continuación, se describen sus especificaciones.

Alimentación: 3.3V – 250µA.

Tipo de sensor: band-gap.

Tipo de salida: I2C.

Rangos de medida: temperatura (-55 - +125 °C).

Adicionales: ADC de 11bits.

Precio: \$0.74 dólares²¹.

3.4. DISPOSITIVOS ADICIONALES

3.4.1. Pantalla OLED de 0.91” SSD1306.

Figura 23. SSD1306 [24].



Es una pantalla SSD1306 mono color (blanco - negro) OLED de 0.91”, mostrada en la figura 23, con resolución 128x32 pixeles, utiliza el protocolo I2C. Su tensión de

²⁰ Precio unitario tomado de la página de Digikey para el mes de febrero de 2018.

²¹ WSON: Very Thin Small Outline No Lead Package. Tipo de empaquetado de circuito integrado superficial.

alimentación es de 3.3V – 5V, y bajo consumo de corriente (20mA), cumpliendo con los requisitos de la placa de desarrollo. A continuación, se describen sus especificaciones.

Alimentación: 3.3V – 20mA.

Resolución: 128 x 32 píxeles.

Tipo de tecnología: OLED²².

Adicionales: ninguno.

Tipo de conexión: I2C.

Precio: \$2.23 dólares²³.

3.4.2. Barra informativa de LEDs.

Figura 24. Barra de LEDs [25].



Es una barra compuesta por 8 LEDs RGB WS2812, mostrada en la figura 40, que puede ser programada por comunicación serial. A continuación, se describen sus especificaciones.

Alimentación: 3.3V – 20mA.

Tipo de tecnología: WS2812²⁴.

Tipo de conexión: Serial.

Resolución: 8 x 1 píxeles.

Precio: \$0.66 dólares²⁵.

²² Organic Light Emitting Diode (OLED): Diodo orgánico emisor de luz.

²³ Precio unitario tomado de la página de Aliexpress para el mes de febrero de 2018.

²⁴ Led RGB de comunicación serial.

²⁵ Precio unitario tomado de la página de Aliexpress para el mes de febrero de 2018.

3.5. DISEÑO PLANOS ELÉCTRICOS

Para los siguientes sensores se han diseñado sus respectivas placas de desarrollo:

- Sensor de temperatura.
- Sensor de humedad relativa.
- Sensor de presión absoluta.

Cada placa ha sido diseñada en Eagle CADsoft (gratuito) utilizando los esquemáticos sugeridos en cada una de las hojas de datos de los sensores y adaptándolos a las aplicaciones que se buscan desarrollar con la unidad experimental iAQ2.

3.5.1. Placa 1. Temperatura – Presión Absoluta. Se presentan los esquemáticos (figuras 25 y 26), los planos diseñados (diseños propios del proyecto de investigación en la figura 27) y las placas enviadas a fabricación a OSH PARK para la placa 1.

Figura 25. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de presión en la placa 1.

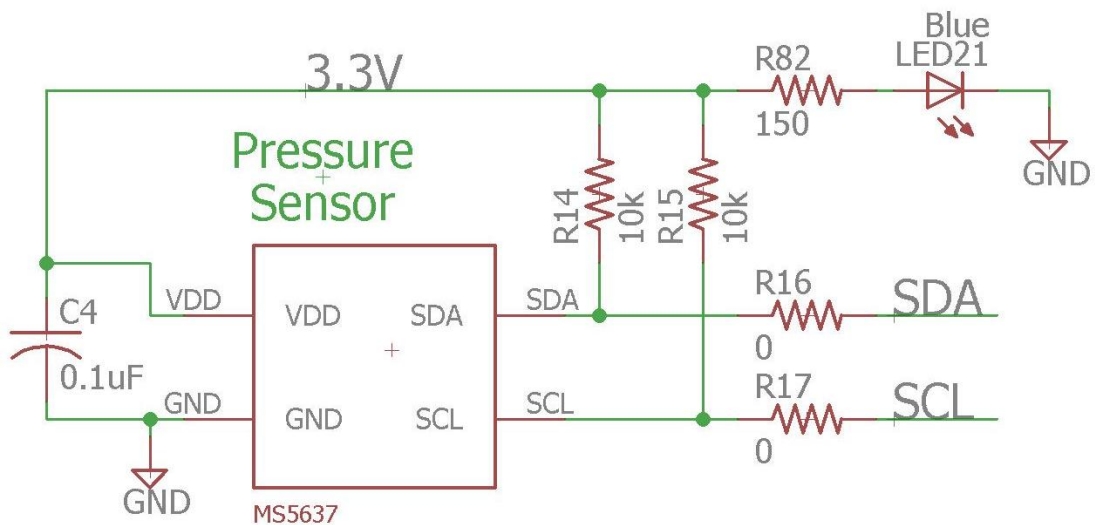
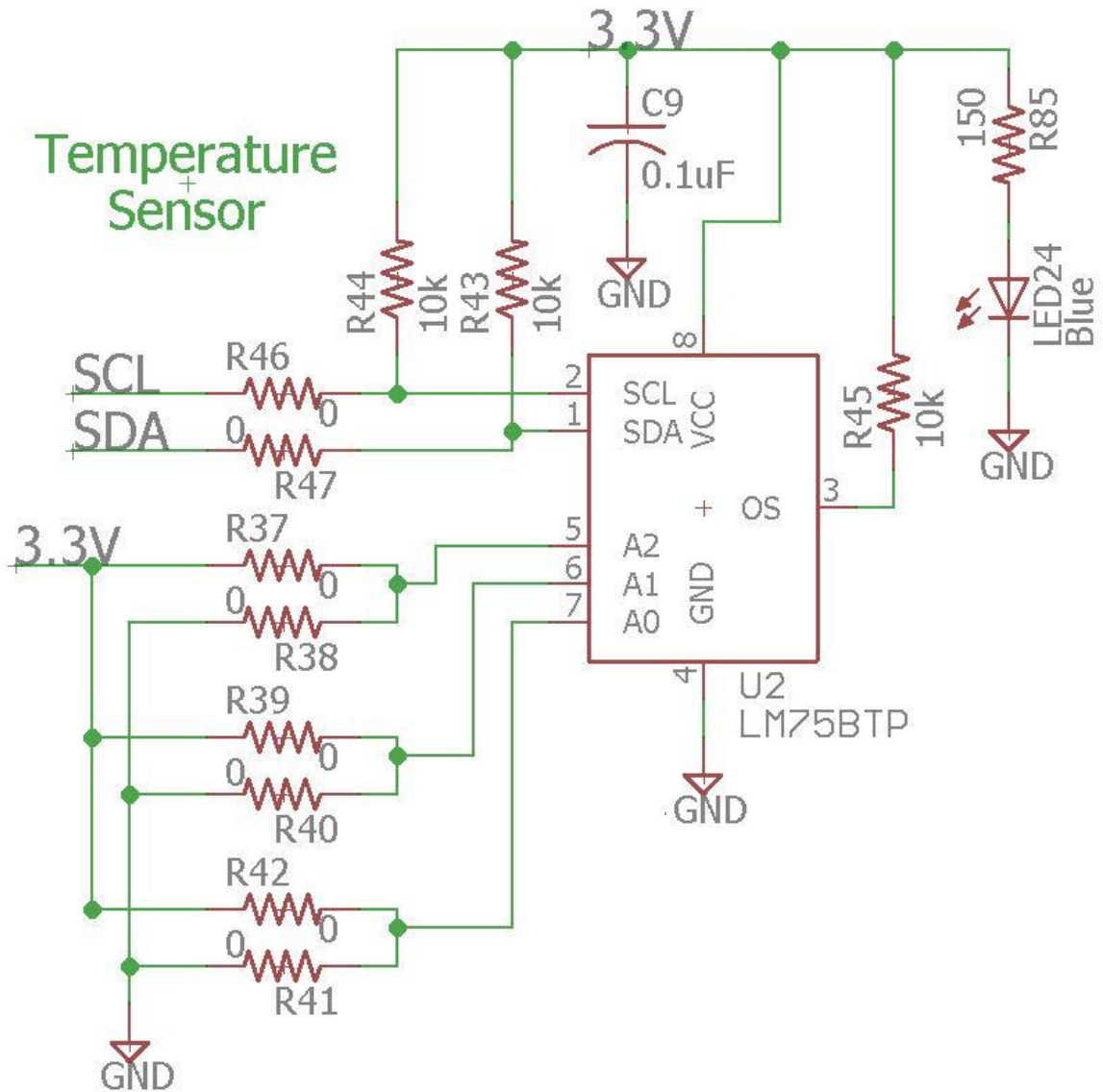
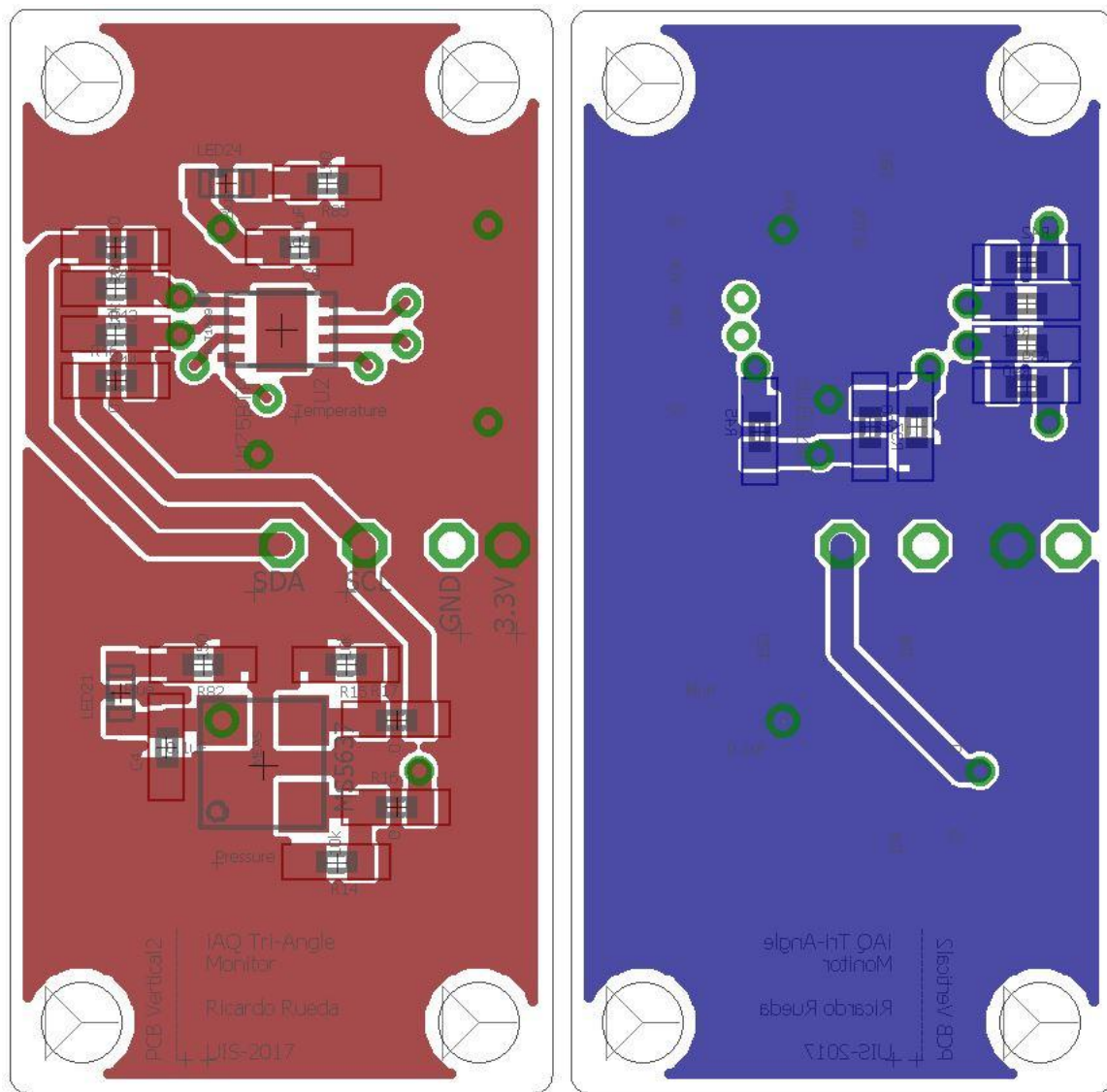


Figura 26. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de temperatura en la placa 1.



Se ha decidido ubicar en la misma placa 1 los sensores de temperatura y presión absoluta de la forma descrita en la figura 27.

Figura 27. Placa 1, en la parte superior el sensor de temperatura LM75B y parte inferior el sensor de presión absoluta MS5637. Izquierda: frontal de la placa 1. Derecha: posterior de la placa 1.



3.5.2. Placa 2. Humedad relativa – calidad de aire. Se presentan los esquemáticos, los planos diseñados (diseños propios del proyecto de investigación en las figuras 28, 29, y 30) y las placas enviadas a fabricación a OSHPARK para la placa 2.

Figura 28. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de gas en la placa 2.

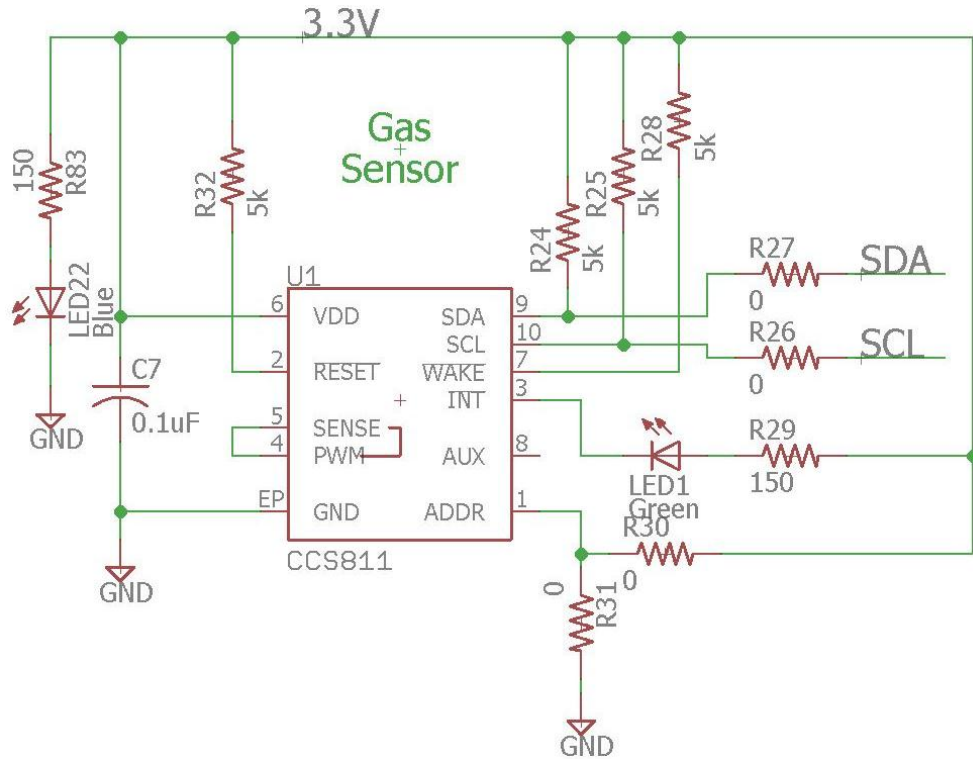
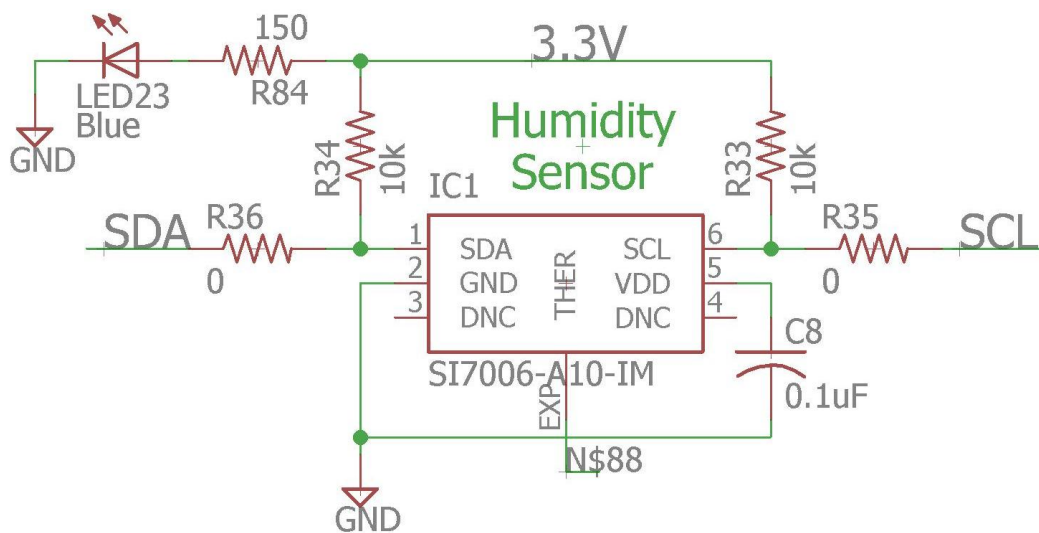
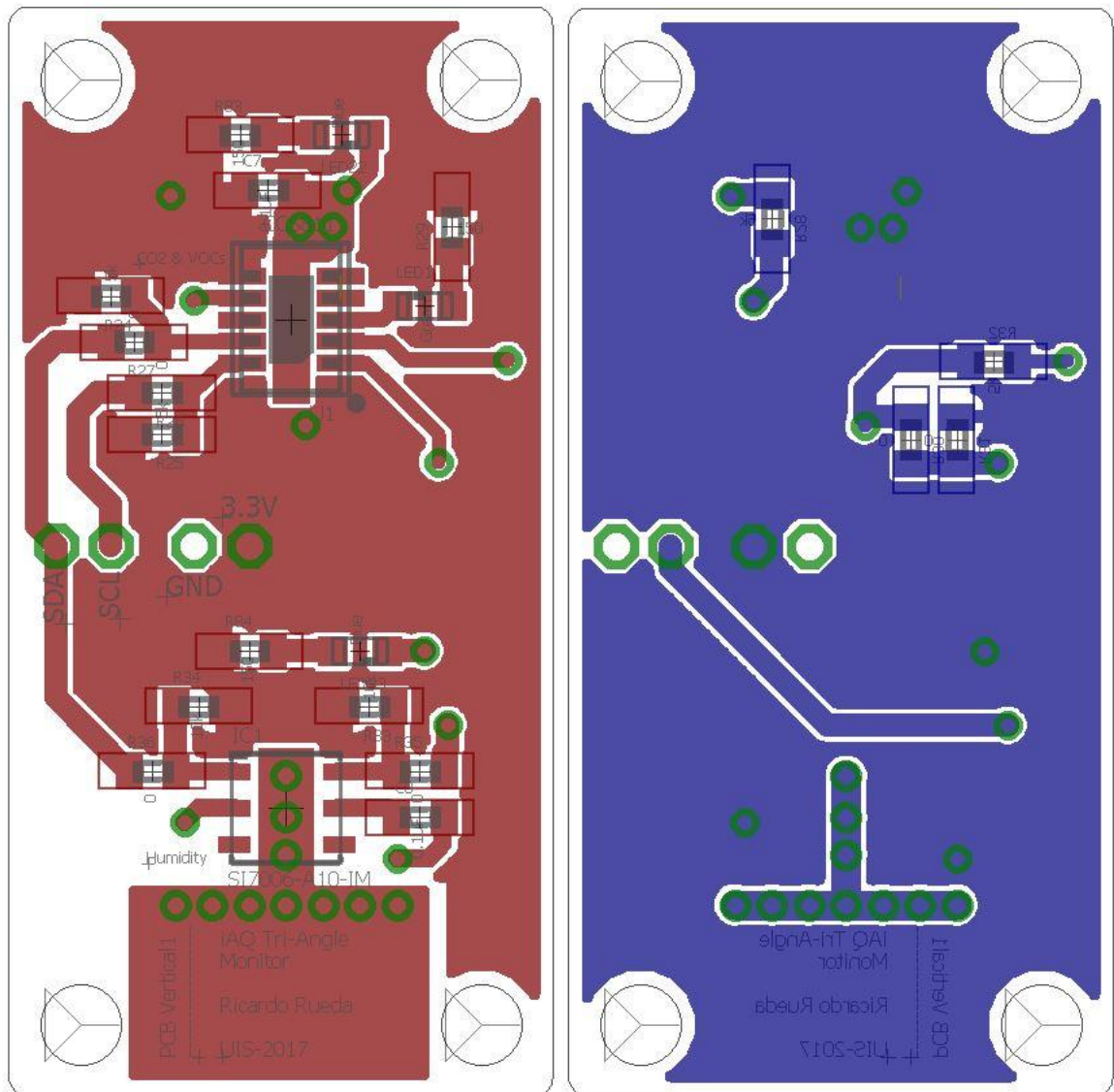


Figura 29. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de humedad relativa en la placa 2.



Se ha decidido ubicar en la placa 2 los sensores de gas y humedad juntos en la misma placa 2 como se describe en la figura 30. Nótese que el sensor de humedad posee un plano grande de disipación de calor del calentador interno, es caso que se desee utilizar a máxima potencia, lo que implica que el consumo del calentador pasará de 9.1mA a 90mA.

Figura 30. Placa 2, la parte superior el sensor de calidad de aire CCS811 y en la parte inferior el sensor de humedad relativa SI7006. Izquierda: frontal de la placa 2. Derecha: posterior de la placa 2.

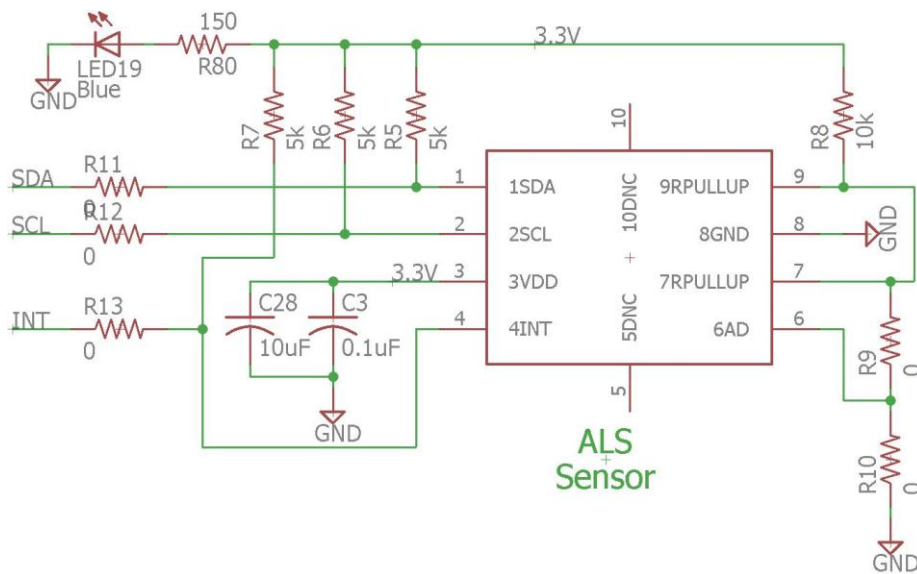


Se debe aclarar que el sensor de calidad de aire no se ha ensamblado en la placa debido a su alto costo (\$12.85 dólares en Digikey por unidad) mientras que el módulo que contiene el sensor de calidad de aire y humedad tiene un costo de \$12.9 dólares en Aliexpress. Sin embargo, se ha realizado el montaje del sensor de humedad para verificar su funcionamiento y correcta realización de la placa, como se puede observar en la figura 30.

3.5.3. Placa 3 (Propuesta fabricada pero no ensamblada) Iluminancia – ruido.

Se propone la creación de una placa 3 para albergar los sensores de iluminancia y sonido ambiental (ruido) como se describe en las figuras 31 y 32 utilizando los sensores SI1133 o SI1145 para iluminancia, luz infrarroja, índice UV y proximidad, así como el micrófono Knowles SPH0645LM4H-B que utiliza protocolo I2S de comunicación, y presenta una respuesta más limpia a las frecuencias de audio²⁶.

Figura 31. Esquema eléctrico para la conexión del sensor de luz visible e infrarroja en la placa 3.



²⁶ Frecuencias de audio contempladas en el rango de 0-20kHz.

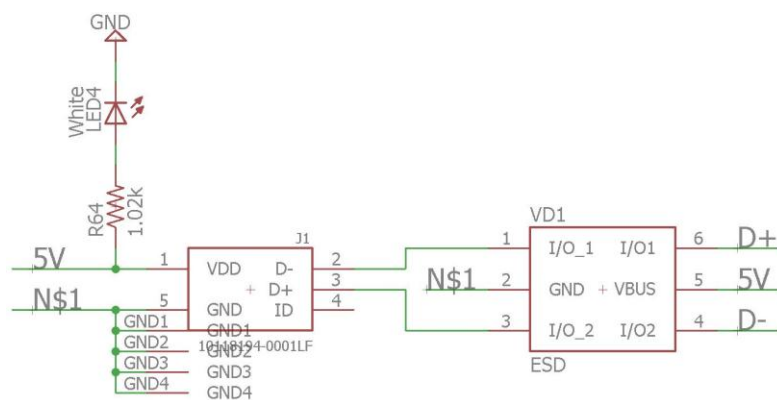
3.5.4. Placa 4 (Propuesta fabricada pero no ensamblada) Placa principal de desarrollo. Pensando en la reducción de espacio para un futuro desarrollo de la unidad experimental iAQ2 se ha propuesto la siguiente placa de desarrollo que utiliza el módulo ESP-WROOM-32 y añadiendo al mismo tiempo las funcionalidades que se tienen en la ESP32 WeMos como:

- Capacidad de programación por interfaz UART-USB utilizando el integrado CP2102 de Silicon Labs.
- Capacidad de recargar una batería que alimente la unidad experimental utilizando el integrado DS9525 de RichTek, y los contactos (Keystone 54) para baterías de tipo 18650.
- Sistema de alimentación del módulo y sensores a 3.3V utilizando el integrado DS9080 de RichTek.
- Y anexando un sistema de puertas lógicas (74LVC2) para controlar el apagado y encendido de la unidad experimental con dos botones, incluyendo también la barra de leds en la propia placa de desarrollo, junto con sensor de aceleración (LIS3DH de STMicroelectronics) en la misma placa de desarrollo.

A continuación, se presenta el diseño propuesto para esta placa.

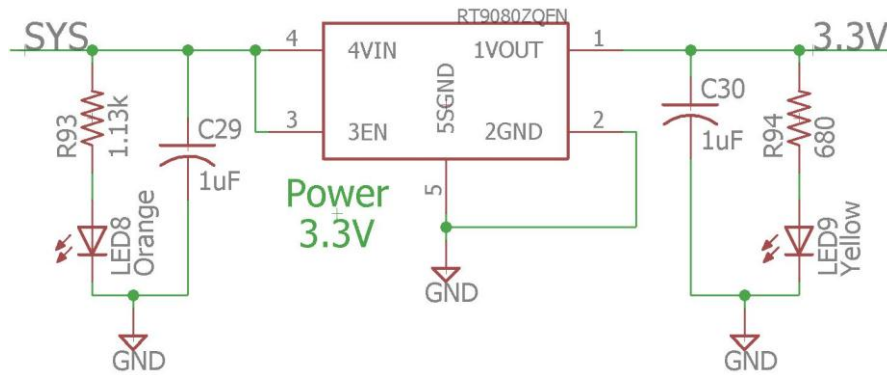
3.5.4.1. Entrada microUSB.

Figura 34. Esquema eléctrico de conexión conector microUSB e integrado de protección ESD.



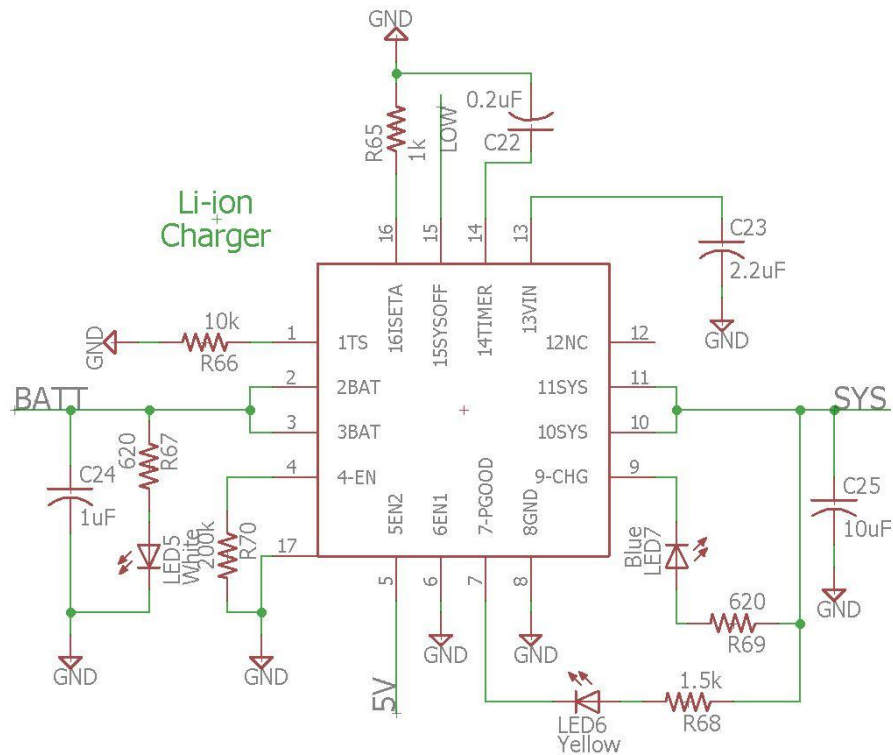
3.5.4.2. Potencia (Regulador).

Figura 35. Esquema eléctrico de conexión del regulador de tensión RichTek DS9080.



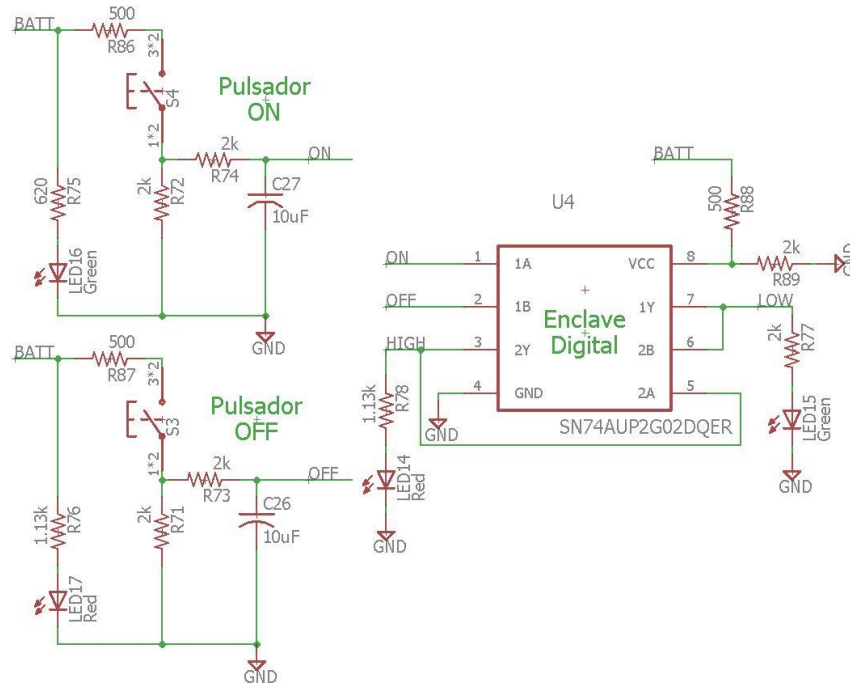
3.5.4.3. Potencia (Cargador de baterías).

Figura 36. Esquema eléctrico de conexión del cargador de baterías RichTek DS9525.



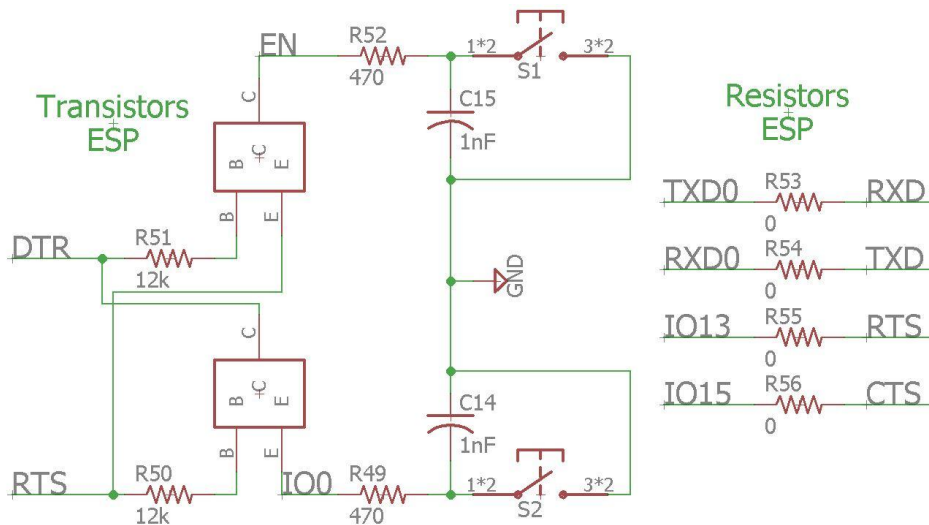
3.5.4.4. Enclave digital para los botones de control.

Figura 37. Esquema eléctrico de conexión del enclave digital con compuertas lógicas para el control de encendido apagado con botones externos.



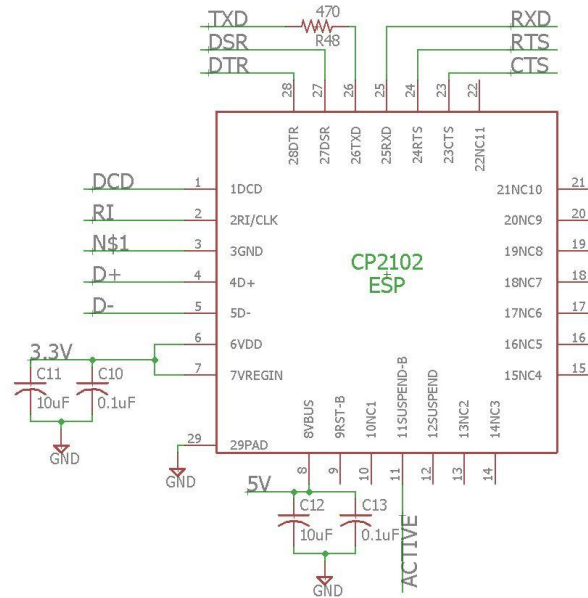
3.5.4.5. Transistores de configuración para el CP2102.

Figura 38. Esquema eléctrico de conexión de los transistores que sirven de puente entre el CP2102 y el módulo ESP WROOM 32.



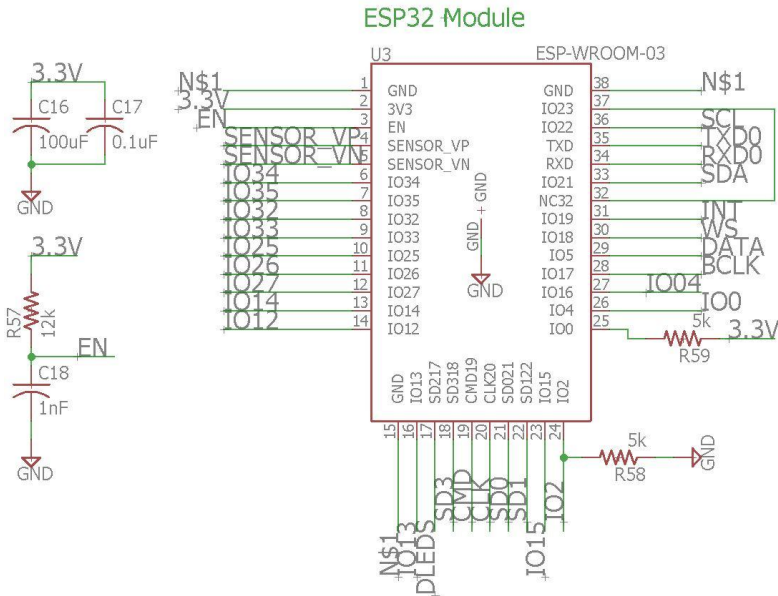
3.5.4.6. Interfaz UART-USB.

Figura 39. Esquema eléctrico de conexión del integrado de interfaz UART-USB CP2102.



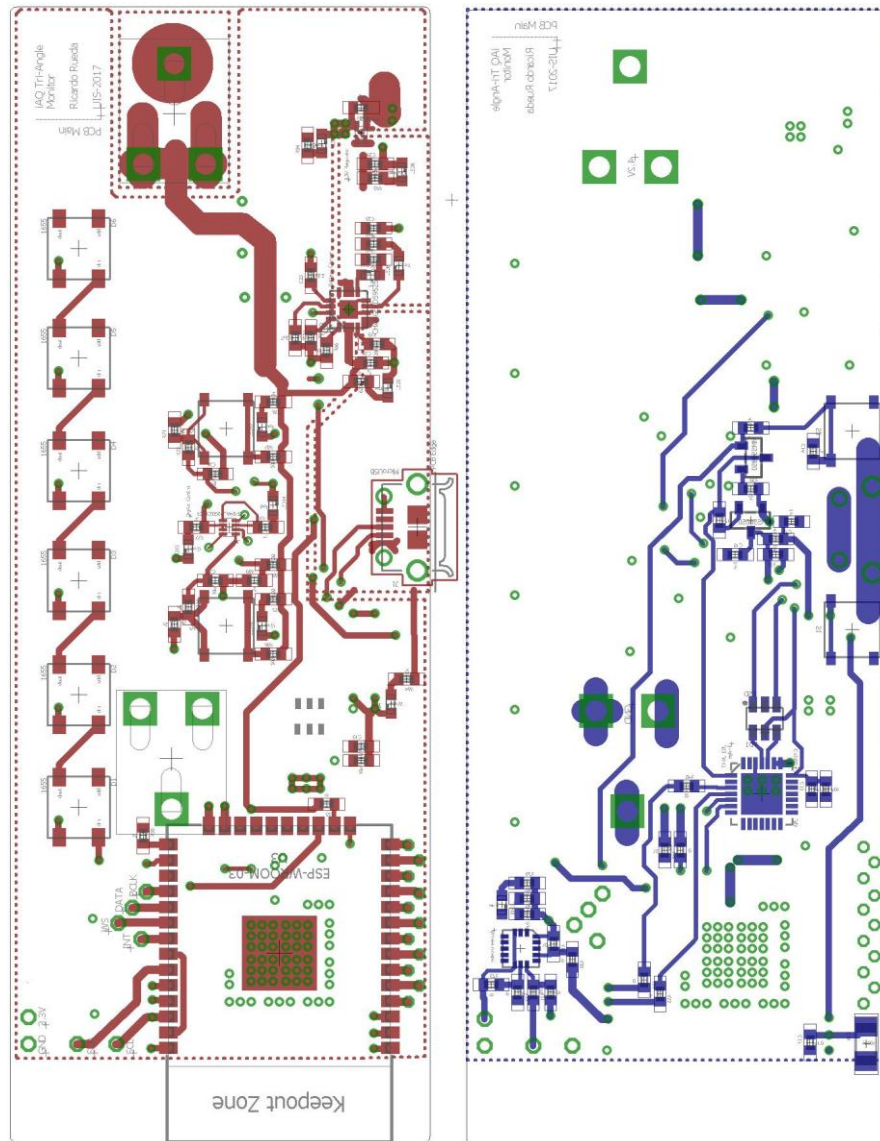
3.5.4.7. ESP WROOM 32.

Figura 40. Esquema eléctrico de conexión del módulo ESP WROOM 32.



- Aunque el diseño se ha basado en las guías de la página oficial de ESP32 para proyectos individuales, no se garantiza que el montaje sea completamente funcional, por lo que se ha decidido no invertir en ella, ya que se posee actualmente el módulo de desarrollo ESP32 WeMos. Sin embargo, presenta una excelente oportunidad para un proyecto futuro de actualización o mejora de la unidad experimental iAQ2.

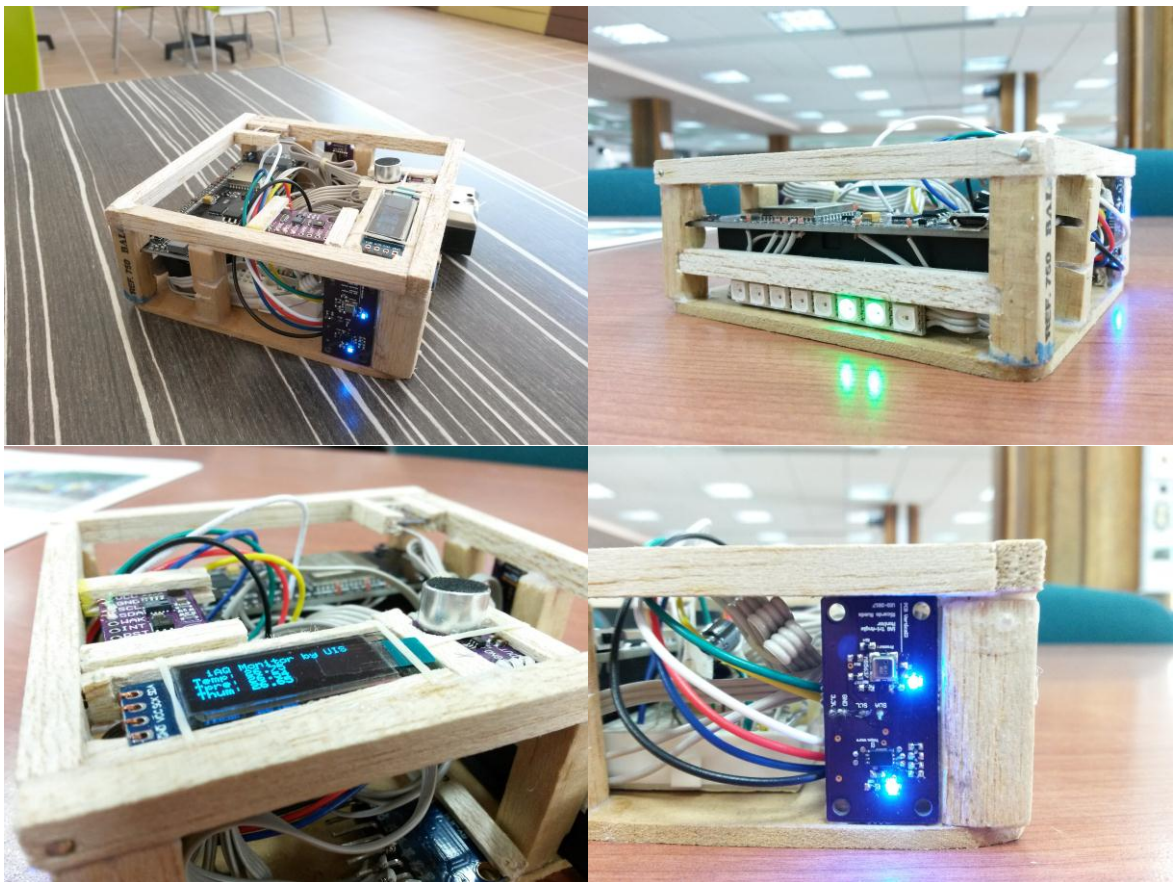
Figura 43. Placa 4 con sus conexiones finalizadas para envío a fabricación.



3.6. MONTAJE

Para la realización de las pruebas preliminares de la unidad de monitoreo de calidad de aire interior se ha propuesto el banco de pruebas presentado en la figura 44.

Figura 44. Banco de pruebas de los sensores de la unidad de monitoreo. Arriba izquierda: vista superior. Arriba derecha: detalle barra informativa. Abajo izquierda: detalle pantalla OLED. Abajo derecha: detalle placa 1.



Dicho banco de pruebas en un modelo previo y su diseño y construcción se ha realizado para observar las condiciones de montaje y ubicación apropiada para cada tipo de sensor o módulo utilizado.

Las primeras pruebas se han realizado utilizando el banco de pruebas, ya que permite la fácil desconexión o conexión del sensor de interés o del tipo de prueba que se proceda a realizar.

En la figura 45 se puede observar la unidad final diseñada y ensamblada, en la cual se llevaron a cabo las segundas pruebas de comparación.

Figura 45. Modelo final impreso en 3D de la unidad de monitoreo iAQ2.



3.7. FUNCIONAMIENTO

La unidad experimental iAQ2 funciona de la siguiente forma:

1. Recibe los datos de los 8 sensores que posee.
2. Enciende la barra de leds informativa para indicar al usuario de forma rápida el estado de cada variable de ambiente interior, utilizando un código de colores que determinan los rangos entre los cuales se encuentran las variables. Cada led individual está asociado a una variable en específico.
3. Si alguna variable sale llega a un nivel crítico, mostrará su valor en la pantalla para indicar al usuario que variable se ha salido de los rangos aceptables.
4. Cada 60 segundos la iAQ2 envía a la plataforma Thingier.io los valores de las variables monitoreadas para llevar un registro de las condiciones ambientales en las que se encuentra la unidad experimental.

Se debe tener en cuenta que el periodo de envío se ha situado en 60 segundos, ya que, éste es el tiempo mínimo que permite la plataforma para envío de datos programados en modalidad gratuita.

3.7.1. Thingier.io Es una plataforma de código abierto española que ofrece una infraestructura escalable en la nube para conexión de dispositivos y almacenaje de los datos que éstos le provean, al mismo tiempo posee herramientas de análisis y presentación de los datos. Posee su propia aplicación para dispositivos Android y es compatible con los lenguajes de programación de Atmel, Arduino, Raspberry, y ARM [26].

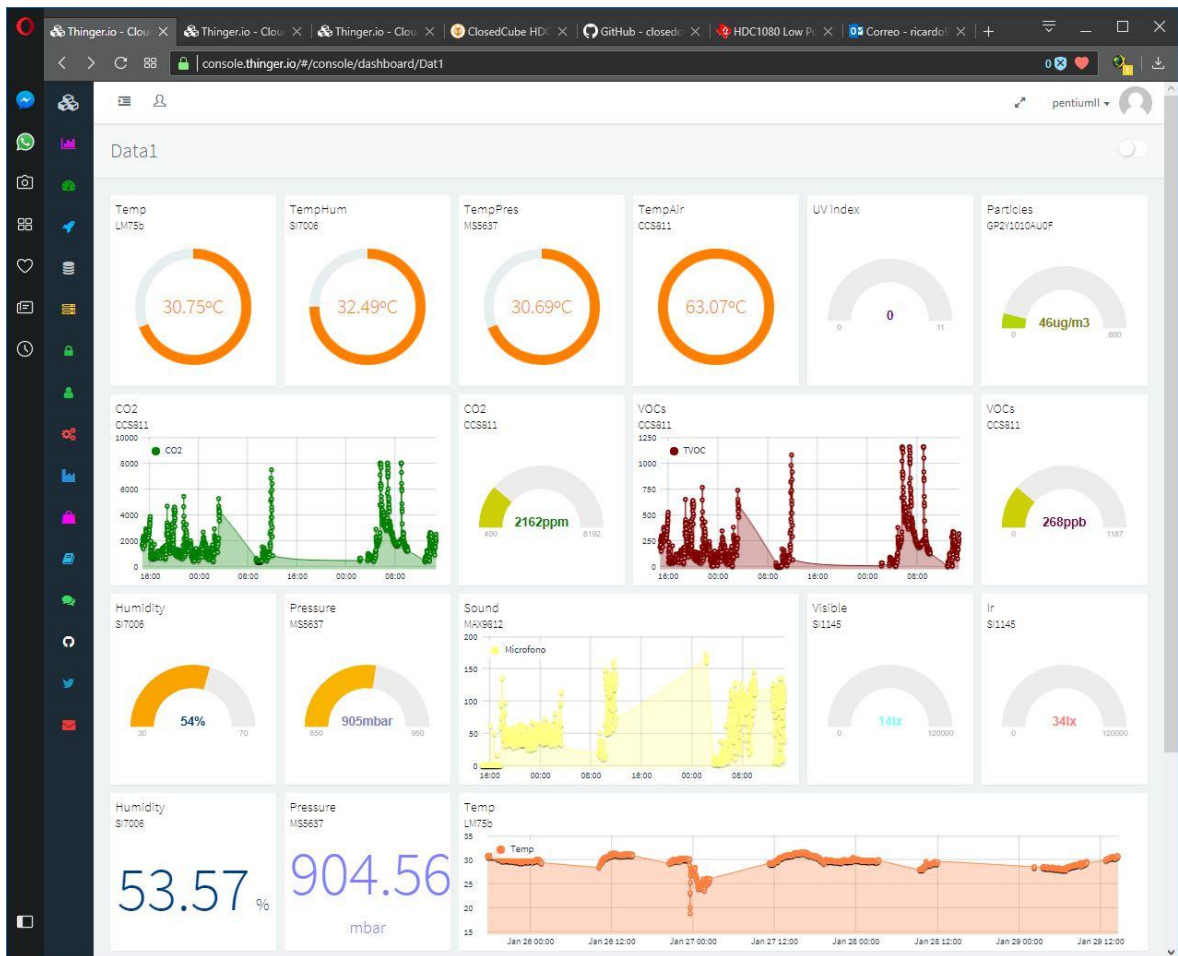
Ofrece los siguientes planes de afiliación:

- Gratuita: 2 dispositivos y tasa de envío de 60 segundos.
- Aficionado: 20 dispositivos y tasa de envío de 30 segundos.

- Negociante: 100 dispositivos y tasa de envío de 15 segundos.
- Bajo demanda: dispositivos bajo demanda y tasa de envío de 1 segundo.

3.7.2. Rangos de clasificación de las variables monitoreadas. Para la presentación de los datos se ha utilizado la herramienta de tablero (dashboard) de la plataforma junto con sus agregados para establecer una plantilla en la cual mostrar en ella los datos recolectados con un intervalo de 60 segundos, como se observa en la figura 46.

Figura 46. Plantilla creada para la presentación de los datos recolectados.



Adicionalmente se han establecido rangos de calidad de cada variable para la barra de LEDs informativa como se muestra a continuación, permitiendo de esta forma que el usuario tenga una idea rápida del estado de las variables monitoreadas sin tener que recurrir a la pantalla OLED, a una aplicación o al servidor de Thinger.io.

3.7.2.1. **Para el movimiento.** Los datos de movimiento no se han clasificado por rangos ya que el movimiento por manipulación del dispositivo dificultaría la clasificación de si es un movimiento deseado o no. Sin embargo, para un proyecto futuro en un dispositivo no portable, es decir, estático o fijo, dichos sensores ayudarían al registro de movimientos de estructuras y monitoreo del comportamiento de dicha estructura en caso de un sismo o terremoto.

3.7.2.2. **Para la calidad de aire.** Para el CO₂ se ha utilizado la tabla provista por el fabricante del dispositivo (AMS) para establecer los rangos para indicar la concentración de CO₂ en el aire monitoreado, ver tabla 9.

Tabla 9. Rangos utilizados para establecer los intervalos de calidad de aire de acuerdo a la concentración de CO₂ [27].

Indicador de calidad de aire	Nivel de COVs	Efectos de los COVs por exposición prolongada	Nivel de CO ₂	Efectos del CO ₂
Pobre	Alto	Cáncer, desmayos, daño a: ojos, nariz, garganta, piel, dolores de cabeza, nauseas	> 2500 ppm	Nauseas, dolor de cabeza, reducción de desempeño físico y toma de decisiones
Moderado	Medio	Irritación de ojos, nariz, garganta, piel, dolor de cabeza, nauseas	1500 – 2500 ppm	Leve reducción de toma de decisiones y baja concentración
Bueno	Bajo	Sin impacto	< 1500 ppm	Sin impacto

Al igual que en la tabla se ha establecido que el led indicador de calidad de aire se encenderá en verde para niveles bajos, amarillo para moderados y en rojo para niveles altos, estableciendo los siguientes rangos:

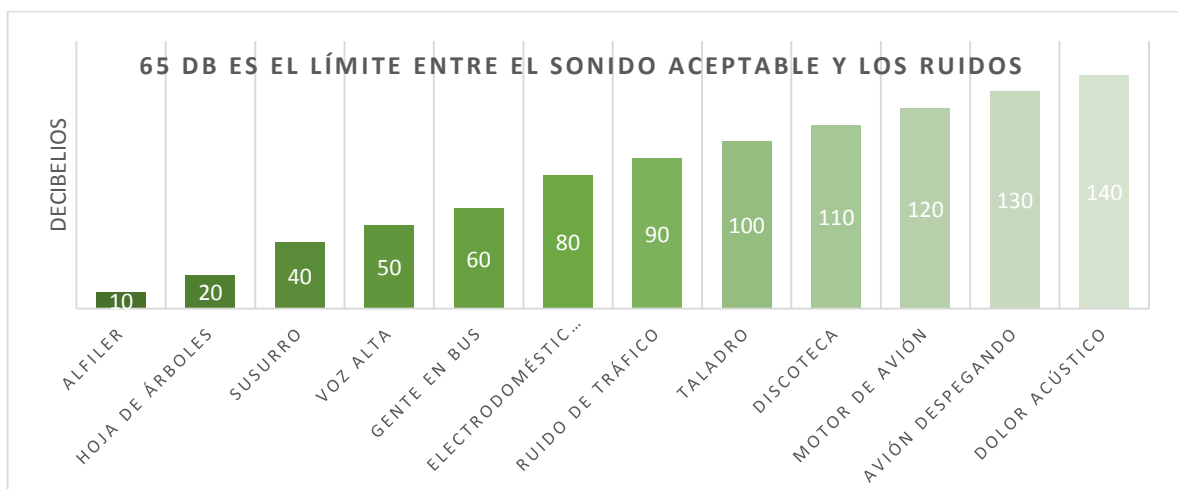
- Nivel ideal: < 1500 ppm
- Nivel aceptable: 1500 – 2500 ppm
- Nivel pobre: > 2500 ppm

3.7.2.3. **Para la humedad relativa.** Los rangos para la humedad relativa se han establecido de acuerdo a la información presentada en la figura 7, determinando los siguientes rangos:

- Nivel ideal: 40% - 65%
- Nivel aceptable: 20% - 40% y 65% - 80%
- Nivel pobre: 0% - 20% y 80% - 100%

3.7.2.4. **Para el ruido.** Los niveles de ruido establecidos se han determinado de acuerdo a la figura 47.

Figura 47. Niveles de ruido en dB.

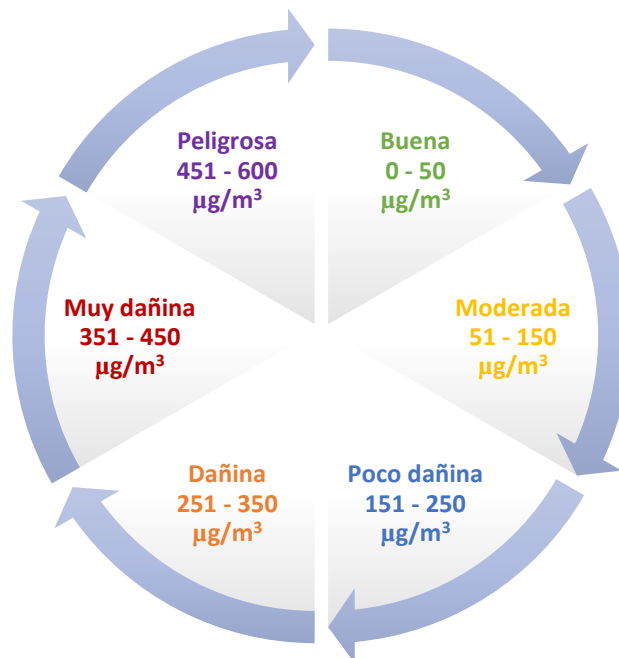


- Nivel ideal: < 50 dB
- Nivel aceptable: 50 – 80 dB
- Nivel alto: > 80 dB

3.7.2.5. **Para la cantidad de partículas.** La cantidad de partículas ha sido un reto determinar los rangos, ya que no se habla de un tipo específico de tamaño de partículas sino de micro gramos en metro cúbico, por lo cual, para éste aspecto se ha seleccionado la tabla de PM10 presentada en la figura 48 (partículas de polvo con tamaño de 10 µm) como referencia para establecer los rangos de cantidad de partículas de la siguiente forma.

- Nivel ideal: < 50 µg/m³
- Nivel aceptable: 50 – 150 µg/m³
- Nivel pobre: > 150 µg/m³

Figura 48. Niveles de concentración de PM10.



3.7.2.6. **Para la presión absoluta.** Al hablar de presión absoluta no se han establecido niveles ideales o pobres, ya que los cambios bruscos de presión son muy bajos o en cambios severos, la tasa de cambio reduce el nivel de riesgo para los humanos. Sin embargo, no se debe pasar por alto, que el dato de presión absoluta estará disponible y será útil para aquellas personas que por alguna condición especial requieran determinados niveles de presión absoluta.

De todas formas, el dato de nivel de presión absoluta planteando un escenario en el cual decenas de dispositivos provean la información a una central junto con su ubicación mejorarían las predicciones del clima y ayudarían a detectar los cambios atmosféricos vistos de ambientes interiores.

Los niveles se han establecido como abiertos por no representar un riesgo en general.

3.7.2.7. **Para la temperatura.** Los niveles de temperatura se han establecido de la misma forma que con los niveles de humedad relativa, basados en la figura 7, se han obtenido los siguientes rangos:

- Nivel ideal: 18 – 23 °C
- Nivel aceptable: 16 – 17 °C y 24 - 26%
- Nivel pobre: 10 - 15 °C y 26 - 40 °C
- Nivel dañino: -50 - 9 °C y 41 - 55 °C

3.7.2.8. **Para la cantidad de iluminación.** Para establecer los rangos de iluminación se ha determinado que el dispositivo será usado durante jornadas de estudio o lectura, por lo cual los niveles de iluminación utilizados son de lectura o trabajo con detalles según la norma UNE 12464-1.

- Nivel ideal: > 300 lx
- Nivel aceptable: 150 – 300 lx
- Nivel pobre: < 150 lx

3.7.2.9. **Para el índice de radiación UV.** Se ha decidido utilizar el sistema de calificación de la OMS descrito en la figura 15 para los rangos de exposición a radiación UV.

- Bajo: 0 – 2
- Moderado: 3 – 5
- Alto: 6 – 7
- Muy alto: 8 – 10
- Extremo: > 11

3.8. CARACTERIZACIÓN

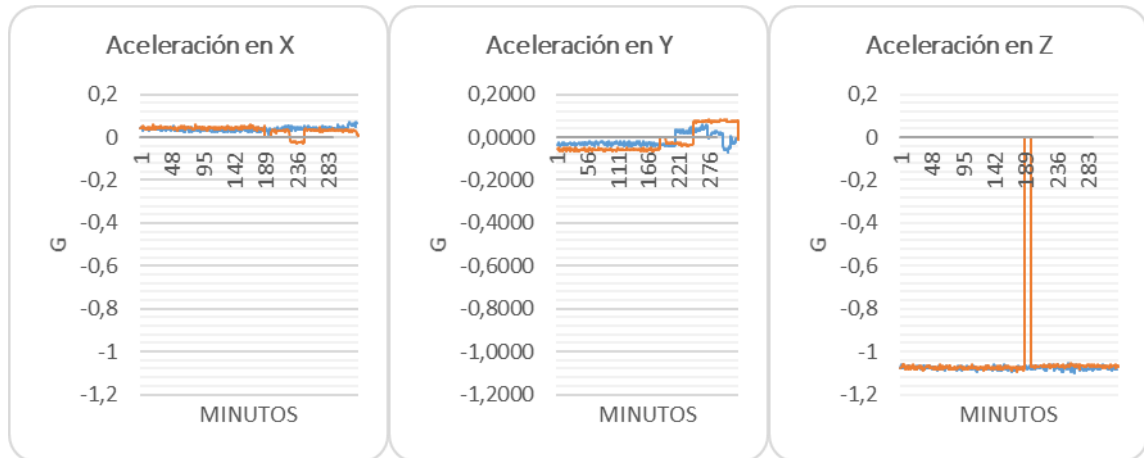
A continuación, se presentan los gráficos obtenidos por la iAQ3 para los días 27 (naranja), 28 (azul) y 29 (gris) de enero de 2018.

El escenario en el cual se han tomado los datos ha sido el salón de estudio de un apartamento familiar, ubicado en el 4 piso de la torre occidente del conjunto residencial Balcones de Gratamira, barrio Ciudad Bolívar, Bucaramanga, Santander, Colombia.

3.8.1. Movimiento. De la figura 49 se puede observar que los datos obtenidos por la IMU6050 son bastante cercanos a lo largo de los 3 días, de todas formas, se debe resaltar que en algunos momentos el banco de pruebas se tuvo que mover, lo que revela los cambios en la aceleración de un eje a otro. Los valores para el día 29 son

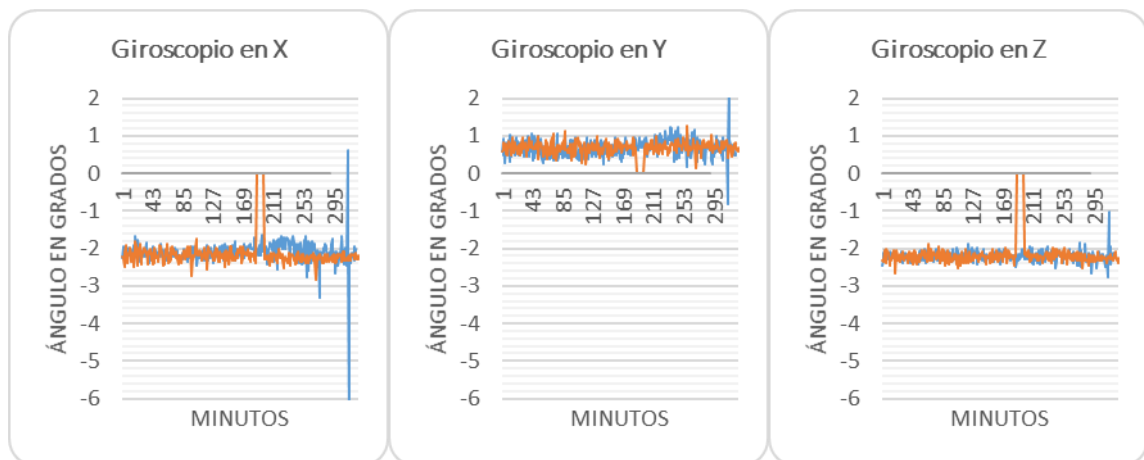
muy pequeños en comparación con los otros días debido a que el día 29 el código de programación fue actualizado y se ha decidido utilizar el valor entregado en unidades de gravedad (G).

Figura 49. Comportamiento obtenido de las aceleraciones en los 3 ejes.



Con respecto a los ángulos obtenidos por la IMU6050 (figura 50) se puede observar el mismo resultado a nivel de ángulos, siendo estos consistentes con la orientación del banco de pruebas.

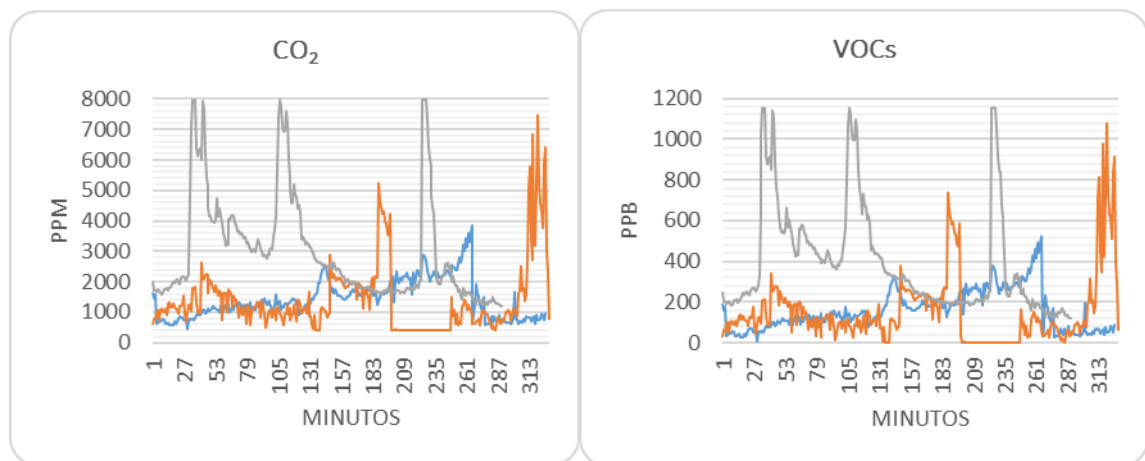
Figura 50. Comportamiento obtenido para el giroscopio en sus 3 ejes.



Sin embargo, los valores obtenidos por la IMU6050 no se han utilizado para alguna función o establecido algún rango de funcionamiento ideal. A pesar de ello, se han enviado al servidor para su almacenaje y como proyección de éste trabajo de grado, podrán ser utilizados para el análisis de vibraciones de superficies o de registro de movimientos de estructuras si se considera la posibilidad anclar el dispositivo en una zona específica.

3.8.2. Calidad de aire.

Figura 51. Comportamiento obtenido del sensor de calidad de aire CCS811.



El sensor de calidad de aire CCS811 ha resultado tener un comportamiento no tan estable, es decir, como se puede observar en la figura 51 (izquierda), el comportamiento presenta picos cercanos a su saturación, los cuales se han mantenido por varios minutos, luego de ello el sensor se “relaja” y vuelve a realizar el monitoreo “esperado”.

Como menciona el fabricante en la hoja de datos, cada sensor funciona por medio de una resistencia, las condiciones físicas de la resistencia varían de acuerdo al fabricante y no pueden ser calibradas con el primer uso, es decir, se debe esperar como mínimo 24 horas para realizar un “ajuste de línea base” (básicamente un

ajuste de offset) para el comportamiento de la resistencia y dicho ajuste debe realizarse cada 5-7 días después de las primeras 24 horas, luego de superar las 48 horas iniciales de “quemado” del sensor.

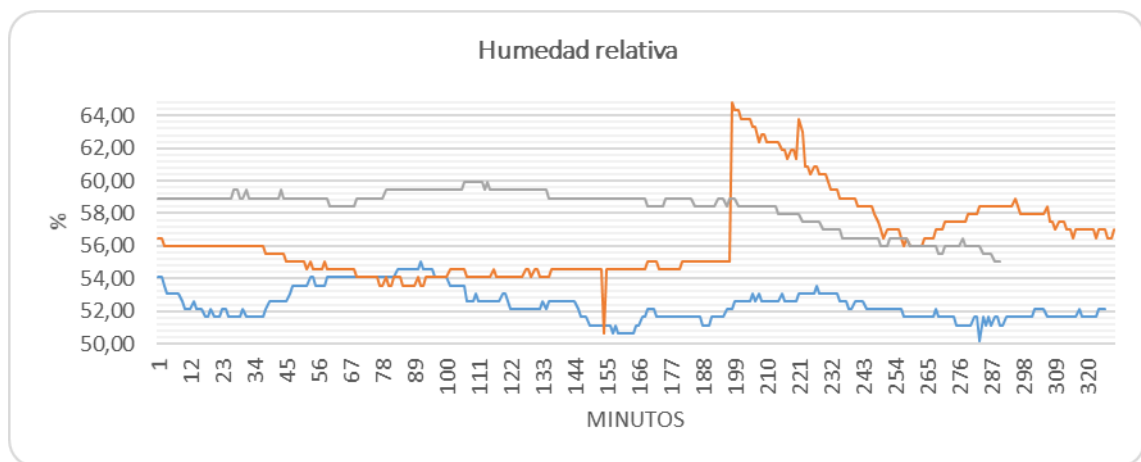
El tiempo de “quemado” del sensor son las primeras 48 horas de funcionamiento ya que el sensor debe “ajustarse al trabajo”, tiempo durante el cual las mediciones serán muy volátiles.

A pesar del comportamiento del sensor CCS811 se ha establecido que su tendencia se mantenía alrededor de las 500 – 1500 ppm de CO₂ en el aire, valores considerados como buenos para la salud humana dentro del escenario de monitoreo según la hoja de datos del fabricante del sensor.

Se debe notar que las curvas obtenidas en la figura 51 (derecha) para el valor de los Compuestos Orgánicos Volátiles son los datos originales obtenidos por el sensor CCS811, mientras que los datos para el CO₂ son una versión escalada de los VOCs medidos por medio de algoritmos propio del fabricante del sensor.

3.8.3. Humedad relativa.

Figura 52. Comportamiento de humedad relativa.



En la figura 52 se presentan los valores obtenidos para humedad relativa durante el día, obteniendo hasta picos máximos de 70% y picos mínimos alrededor de 50%.

Los datos de humedad relativa han sido contrastados con los datos ofrecidos por las siguientes páginas web durante la realización de las pruebas:

- EL TIEMPO EN BUCARAMANGA, COLOMBIA. WORLDMETEO, disponible en: <https://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/colombia/bucaramanga/tiempo-101698/>
- BUCARAMANGA, COLOMBIA. AccuWeather, disponible en: <https://www.accuweather.com/es/co/bucaramanga/111417/hourly-weather-forecast/111417>
- EL TIEMPO EN BUCARAMANGA / PALONEGRO. Tu tiempo, disponible en: <https://www.tutiempo.net/bucaramanga-palonegro.html>
- PREVISIÓN METEOROLÓGICA Y CLIMA MENSUAL BUCARAMANGA, COLOMBIA. Wheater Atlas, disponible en: <https://www.weather-col.com/es/colombia/bucaramanga-clima>

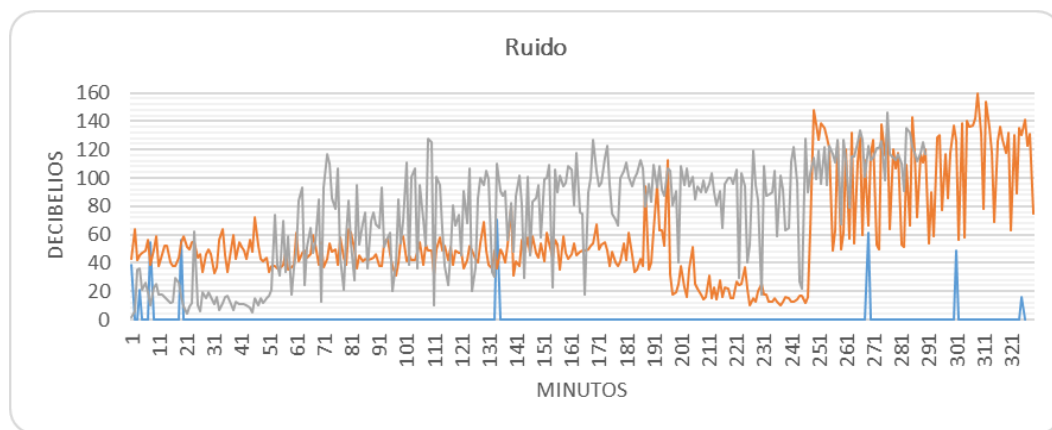
Y se ha concluido que en algunos casos los valores han coincidido o estado bastante cerca, sin embargo, al igual que con la temperatura y la presión, que dichas variables de calidad de ambiente interior son complejas de monitorear debido a su naturaleza y las fuentes y sumideros que el escenario de pruebas posea, sin olvidar, que la mayoría de las páginas de previsión climatológica o registro meteorológica utilizan los datos de la estación del clima ubicada en el Aeropuerto Internacional Palonegro de Bucaramanga y ésta es de ambiente exterior.

Por ejemplo, durante el monitoreo realizado en el primer piso de la Universidad Industrial de Santander (ambiente cerrado con sistema de aire acondicionado), la humedad relativa se ubicó en un rango de 43 – 44%, mientras que en pruebas

realizadas en la zona de estudio del cuarto piso de la escuela de Ingeniería Industrial de la universidad (ambiente amplio y abierto con ventilación y luz natural), la humedad relativa se ubicó en un rango de 37 – 40% para el mismo día con las mismas condiciones ambientales.

3.8.4. Ruido ambiental.

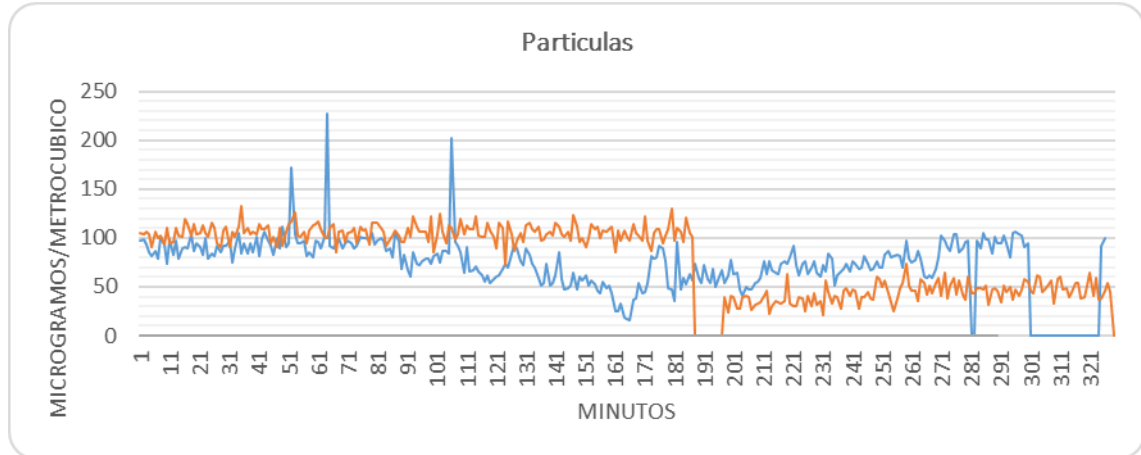
Figura 53. Comportamiento del módulo de ruido ambiental MAX9812.



Los niveles de ruido ambiental presentados en la figura 53, obtenidos para la zona de pruebas: salón de estudio, han revelado, que aunque el módulo de sonido MAX9812 es apropiado para la detección de ruidos con una intensidad alta, al momento de utilizar el mismo a bajos niveles no es capaz de detectar dichas variaciones, por lo cual se ha determinado que el sensor es adecuado para medición de ruido ambiental en ambientes amplios y de naturaleza ruidosa (calles peatonales, sitios de alta concurrencia, fábricas), mientras que en entornos más internos y con niveles de intensidad de ruido que tienden a ser menores a 80dB, como los que busca monitorear éste proyecto de investigación, el módulo MAX9812 flaquea por su baja sensibilidad, por lo que se sugiere el cambio de dicho módulo a uno más sensible y preferiblemente de menor tamaño como el SPH0645LM4H, un micrófono de montaje superficial, cuya respuesta en frecuencia es más estable y más sensible para ambientes interiores.

3.8.5. Cantidad de partículas PM10.

Figura 54. Nivel de partículas obtenido por el sensor GP2Y1010AU0F.



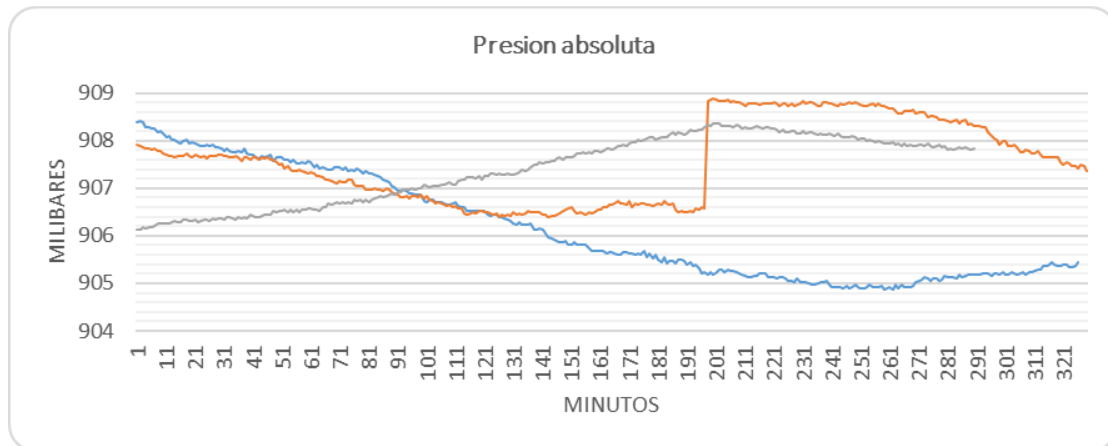
En la figura 54 se puede observar el desempeño obtenido por el sensor de partículas GP2Y1010AU0F en el escenario de pruebas, salón de estudio. Se puede observar que la cantidad de partículas en dicho entorno no suele superar los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En entornos exteriores como vías peatonales, la cantidad de partículas en el aire alcanzó picos de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lo que ratifica que los ambientes exteriores concurridos poseen una mayor cantidad de partículas en suspensión. Se debe tener en cuenta que no se ha realizado una prueba con un sensor de partículas para contrastar su comportamiento, sin embargo, se han probado los límites del sensor de partículas obteniendo los límites presentados en su hoja de datos, verificando los rangos de operación del sensor.

3.8.6. Presión absoluta. Los datos de presión absoluta mostrados en la figura 55 presentan que la presión absoluta varía levemente en el escenario de monitoreo (variación menor al 1%) lo que revela que la presión absoluta, aunque sufre cambios debido a las condiciones ambientales, dichos cambios no son apreciables por el ser

humano, por lo cual se puede hablar de una presión absoluta constante dentro de los rangos normales.

Figura 55. Comportamiento de la presión absoluta monitoreada por el sensor SI7006.

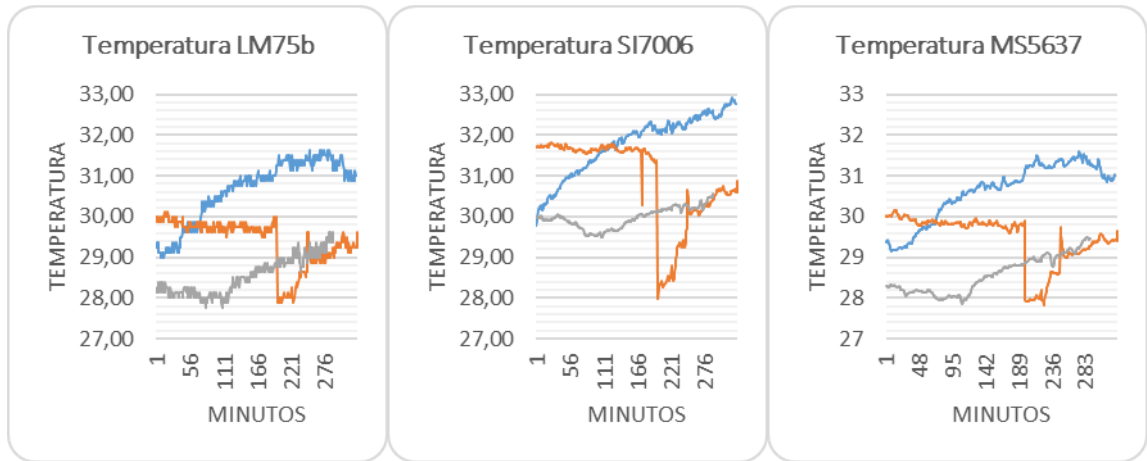


Sin embargo, el banco de pruebas fue utilizado para monitorear ambientes diferentes, en los cuales se han obtenidos lecturas de 900 mbar, lo que constata que la presión absoluta si cambia de acuerdo a la ubicación del escenario y de su elevación con respecto al nivel del mar junto con las condiciones meteorológicas presentes.

A futuro, el monitoreo por sectores de la presión absoluta ayudaría a mejorar los procesos de predicción y monitoreo de eventos climatológicos obteniendo el comportamiento de la presión absoluta desde diferentes puntos de una misma ciudad.

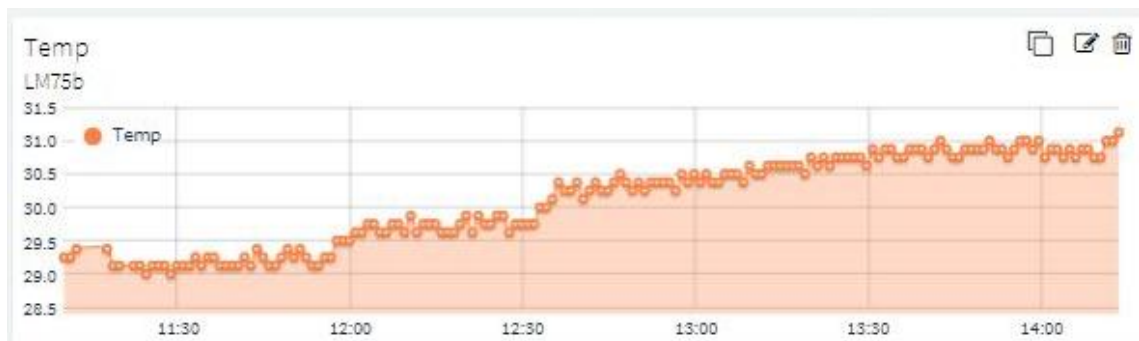
3.8.7. Temperatura. Para la medición de la temperatura se han usado 3 sensores, 1 de ellos dedicado (LM75b) y 2 que incluyen la medición de temperatura como característica adicional o complementaria (SI7006 y MS5637).

Figura 56. Comportamientos de temperatura obtenidos por los 3 diferentes sensores habilitados para dicha variable.



Como se puede observar en la figura 56, el comportamiento de dichos sensores ha sido bastante cercano, mostrando variaciones de máximo $\pm 3^{\circ}\text{C}$ entre ellos, lo que revela una tendencia clara entre los mismos.

Figura 57. Comportamiento de la temperatura para el día 28 de enero tomado de la plataforma Thinger.io. Debe resaltarse que la mañana estuvo fresca y hacia medio día el cielo se despejó.



Sin embargo, hasta la fecha 29 no se ha podido realizar una comparación con otro equipo de medición de temperatura ambiente para verificar el correcto funcionamiento; a pesar de ello, se puede observar que las tendencias son claras,

con poco ruido y que siguen el comportamiento de temperatura esperada a lo largo del día como se ve en la figura 57.

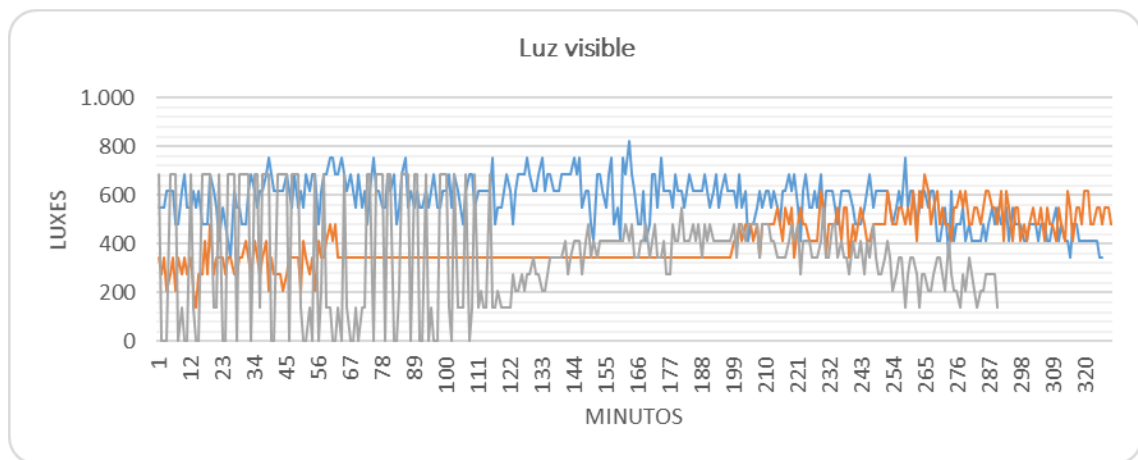
3.8.8. Iluminancia e índice de radiación UV. Para hablar de iluminancia y radiación UV, se debe tener en cuenta que el sensor SI1145 posee dos fotodiodos, uno de ellos es de menor área en comparación con el otro, y es usado para la medición de luz visible e infrarroja, mientras que el segundo sensor, de mayor área, es usado de forma exclusiva para la medición de luz infrarroja.

El sensor SI1145 está calibrado de fábrica para obtener de la información recogida por sus sensores el índice de radiación UV al cual se ve expuesto.

A continuación, se presentan las respuestas obtenidas por el SI1145.

3.8.9. Luz visible.

Figura 58. Comportamiento del módulo GY-1145 para luz visible.



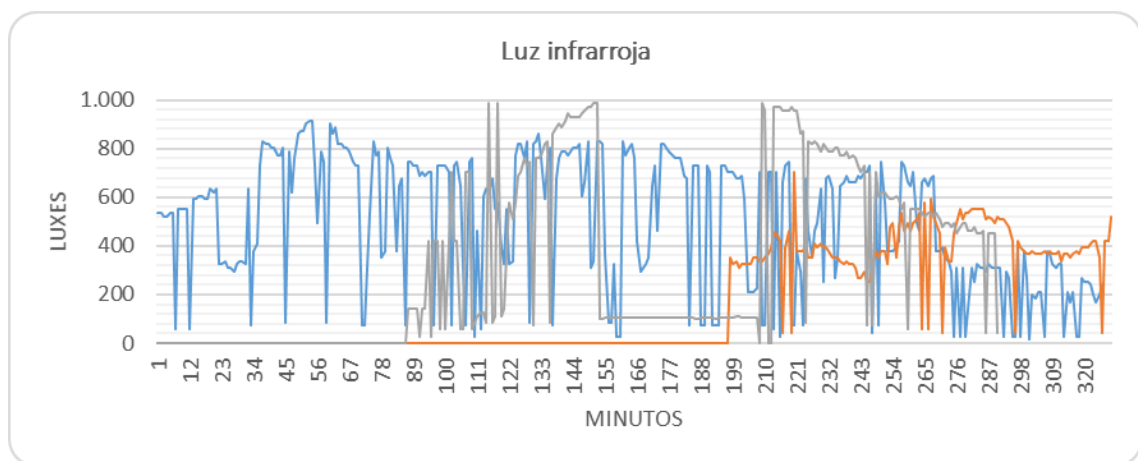
La figura 58 presenta los niveles de luz visible obtenidos por el sensor SI1145, verificando que para ser un área de estudio en la cual se ha realizado el monitoreo

por el banco de pruebas, los niveles de iluminación son los adecuados (por encima de 400 lx la media) durante el día.

Se debe resaltar que en pruebas de baja iluminación el sensor no tomaba adecuadamente los valores, es decir, su sensibilidad en condiciones de poca iluminación se mostraba baja.

3.8.10. Luz infrarroja.

Figura 59. Comportamiento del módulo GY-1145 para luz infrarroja.



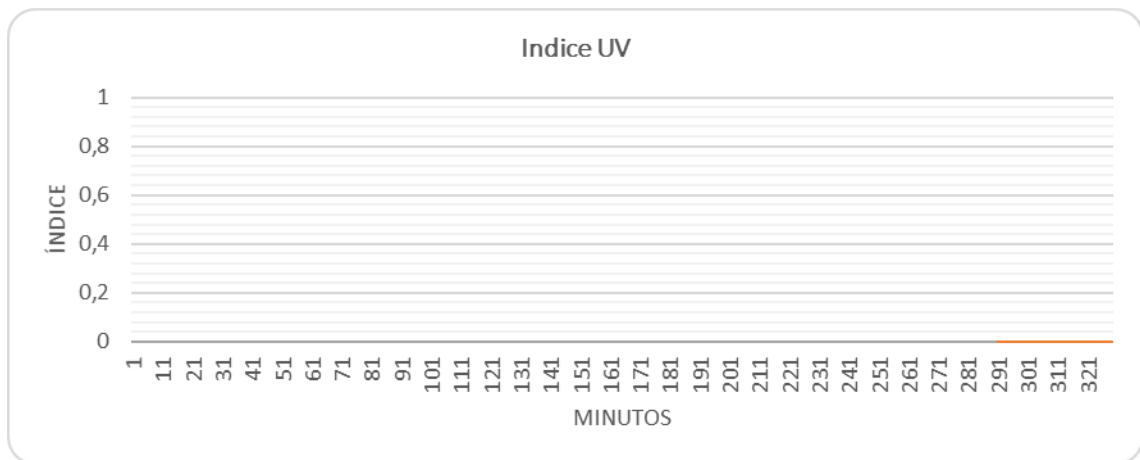
El monitoreo de luz infrarroja mostrado en la figura 59, revela un sensor más sensible a dicho tipo iluminación, con una respuesta más estable en condiciones de baja iluminación comparado con el sensor de luz visible.

Se debe resaltar que durante el día los niveles de luz infrarroja han tenido una media de casi 600lx.

3.8.11. Índice UV. Debido a que el valor de radiación UV entregado por el sensor SI1145 es un algoritmo calibrado y ajustado de fábrica por Silicon Labs, su funcionamiento ha sido satisfactorio, ya que, en el lugar de realización de las

pruebas de monitoreo del banco de pruebas, la radiación UV recibida en 0 como se muestra en la figura 60.

Figura 60. Comportamiento del módulo GY-1145 para índice de radiación UV.



Sin embargo y en pruebas adicionales realizadas se ha verificado que el sensor es capaz de medir un índice de radiación UV entre 5 - 8 cuando el sol está en su punto más alto durante el día (11:00am – 2:00pm).

3.9. COMPARATIVA

3.9.1. Calidad de aire. Durante la realización del proyecto no ha sido posible la comparación con otro equipo para verificar el correcto funcionamiento del sensor CCS811. Sin embargo, los datos obtenidos durante sus regiones estables de funcionamiento, muestran una tendencia a mantener valores entre 400 – 700 ppm para concentración de CO₂ en el aire y de entre 0 – 20 ppb para concentración de COVs, valores que coinciden con los informes de calidad de aire en Colombia para la región en la cual se ubicó la zona de pruebas del banco de pruebas [28, 29].

En las figuras 64 y 62 se puede observar el comportamiento del sensor entre los días 10 a 13 de febrero.

Figura 61. Comportamiento obtenido por el módulo de calidad de aire CCS811 (CO₂) durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.

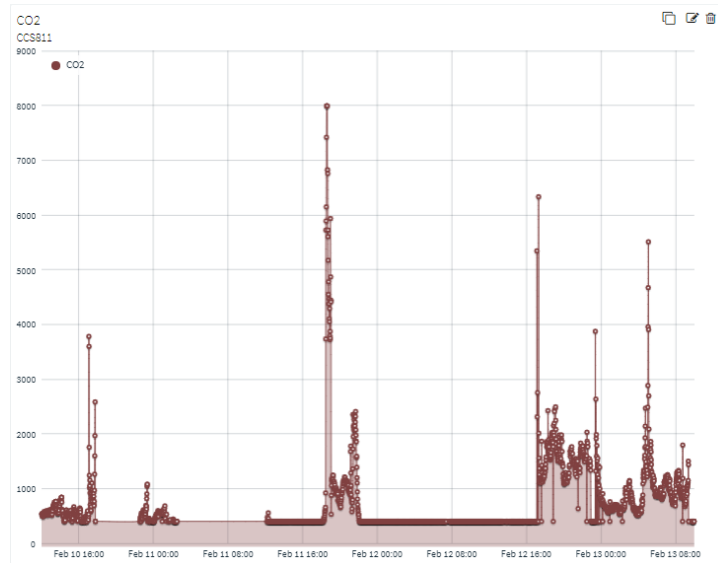
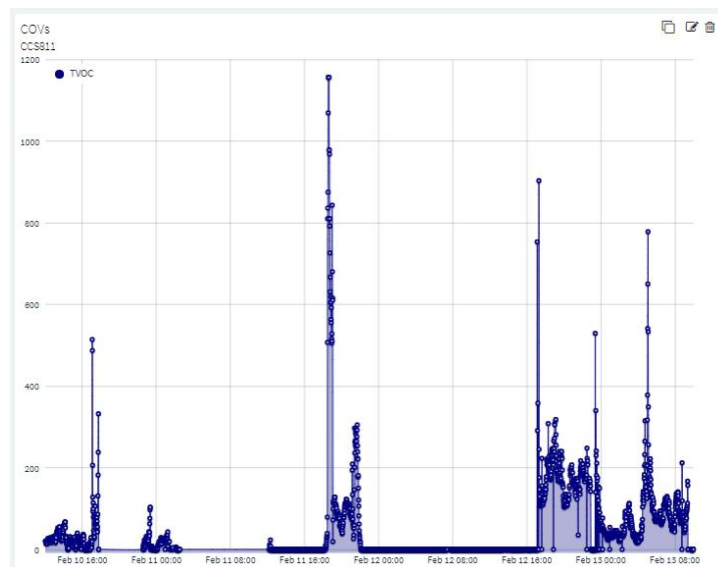
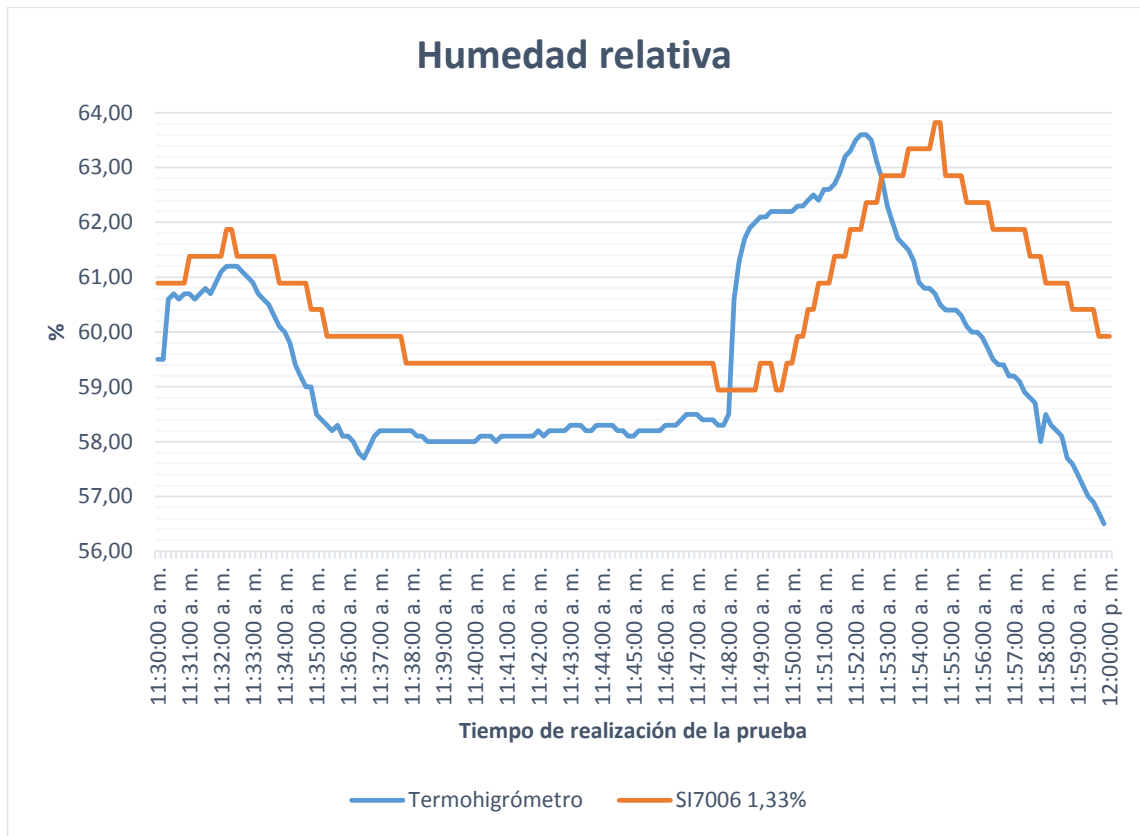


Figura 62. Comportamiento obtenido por el módulo de calidad de aire CCS811 (COVs) durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.



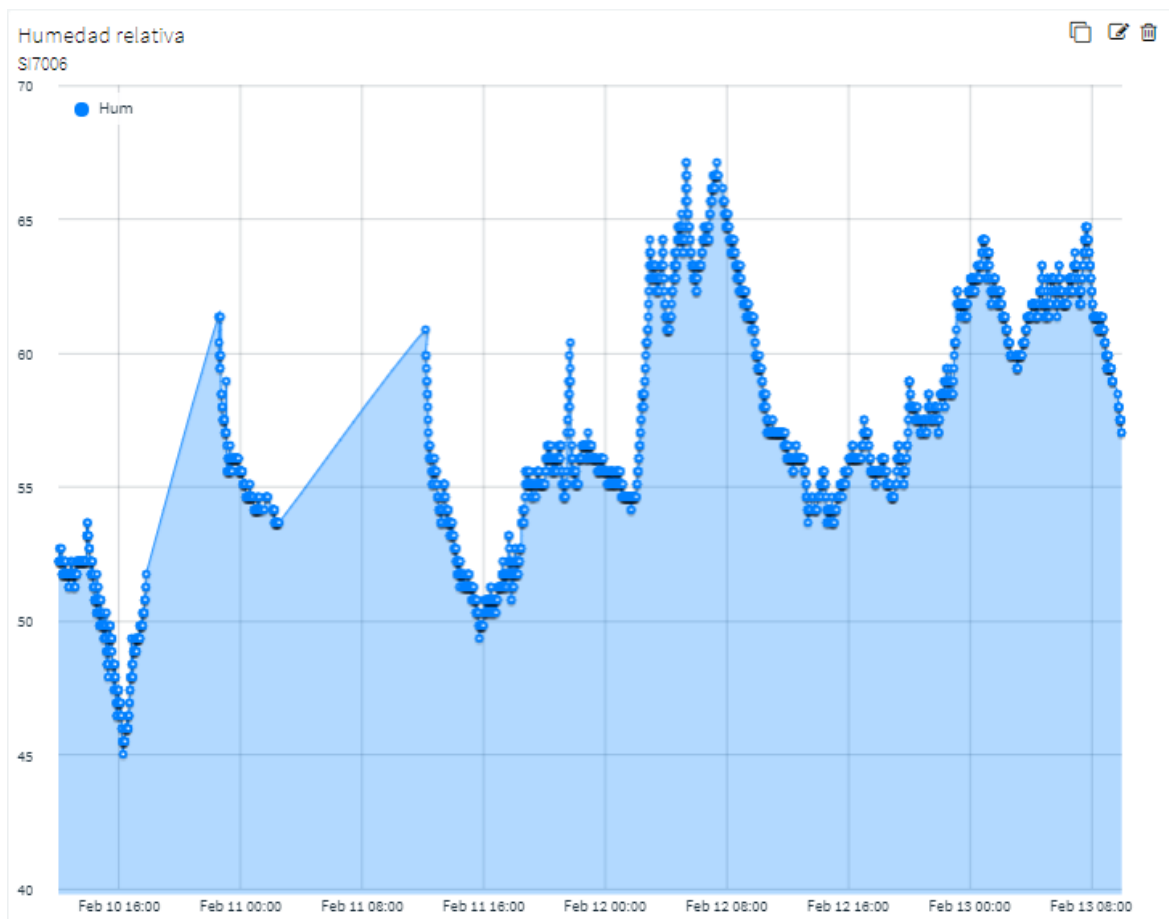
3.9.2. Humedad relativa. Se ha utilizado el equipo de medición Digital Psychrometer Kit RH305 de Extech Instruments para la prueba comparativa del sensor SI7006 y la figura 63 presenta los resultados.

Figura 63. Primera prueba comparativa entre equipo de medición RH305 y el sensor -si7006.



De la figura 63 se puede observar que el sensor de humedad SI7006 tiene un comportamiento muy cercano con el equipo de medición utilizado (termohigrómetro). Sin embargo, posee un pequeño error promedio (menor al 1.3%) que puede ser solucionado por programación.

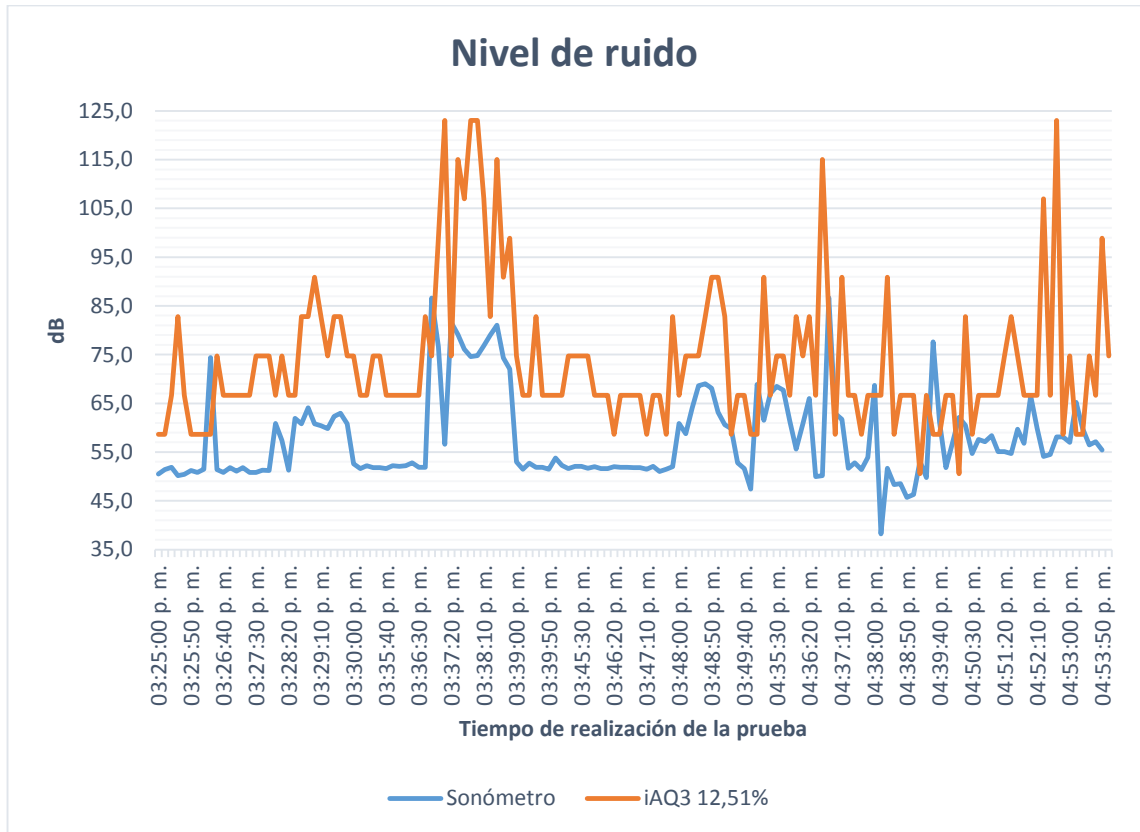
Figura 65. Comportamiento obtenido por el sensor de humedad relativa SI7006 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.



3.9.3. Ruido. Se ha usado el equipo de nivel de sonido UNI-T UT350 para la realización de la prueba comparativa y de desempeño del módulo MAX9812 obteniendo los siguientes resultados.

Como se puede observar en la figura 66, los niveles de ruido tomados por el sensor MAX9812 son cercanos al nivel de ruido tomado con el UT350, presentando un desnivel, que puede ser corregido por software.

Figura 66. Primera prueba comparativa entre equipo de medición UT350 y el módulo MAX9812.



Durante la realización de la prueba comparativa se utilizaron dos escenarios, el primero fue la sala de consulta de profesores de la E3T²⁷ y el segundo el laboratorio de mediciones eléctricas del edificio de Alta Tensión, sometiendo dichos escenarios a cambios deliberados de nivel sonido para verificar su comportamiento de la siguiente forma:

Sala de consulta de profesores.

- 15:25 a 15:27: se monitorea el ruido de fondo de la sala de consulta, procurando guardar silencio.

²⁷ E3T: Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

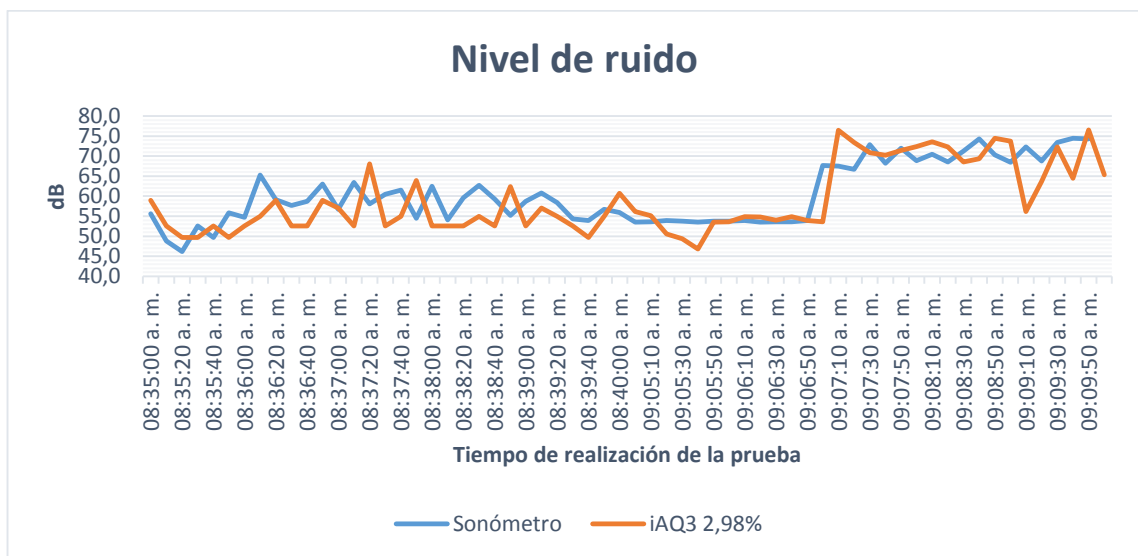
- 15:27 a 15:30: se reproduce música desde un teléfono inteligente.
- 15:30 a 15:35: se monitorea el ruido de fondo de la sala de consulta, procurando guardar silencio.
- 15:36 a 15:40: se reproduce música nuevamente con un nivel de volumen más alto.
- 15:41 a 15:47: se monitorea el ruido de fondo de la sala de consulta, procurando guardar silencio.
- 15:48 a 15:50: se monitorea la conversación que ocurre en una mesa contigua de donde se ubica la unidad iA2.

Laboratorio de mediciones eléctricas del edificio de Alta Tensión.

- 16:35 a 16:54: se monitorea una conversación de varios estudiantes ubicando la unidad iAQ2 entre los involucrados.

Al final se ha concluido que el pico más alto de error entre el equipo de medición UT350 y el módulo MAX9812 ha sido de 40.8%, sin embargo, el error promedio entre las lecturas obtenidas de ambos dispositivos ha sido de 12.51%.

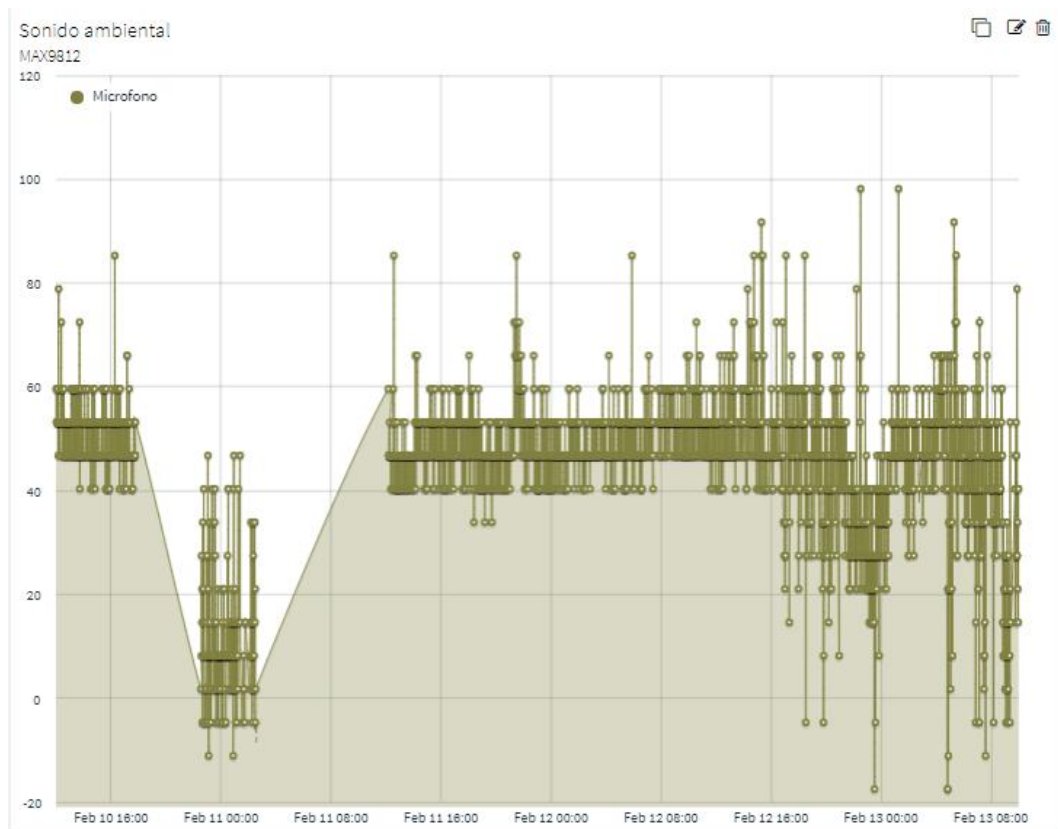
Figura 67. Segunda prueba comparativa entre equipo de medición UT350 y el módulo MAX9812.



Como se observa en la figura 67, el ajuste de curva realizado al comportamiento del sensor de ruido para el dispositivo ya instalado en el dispositivo iAQ2 representa una mejora significativa en su desempeño, con tan sólo un 3% de error promedio con respecto al sonómetro utilizado para la prueba comparativa.

En la figura 68 se puede observar el comportamiento del sensor entre los días 10 a 13 de febrero.

Figura 68. Comportamiento obtenido por el módulo de sonido MAX9812 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.

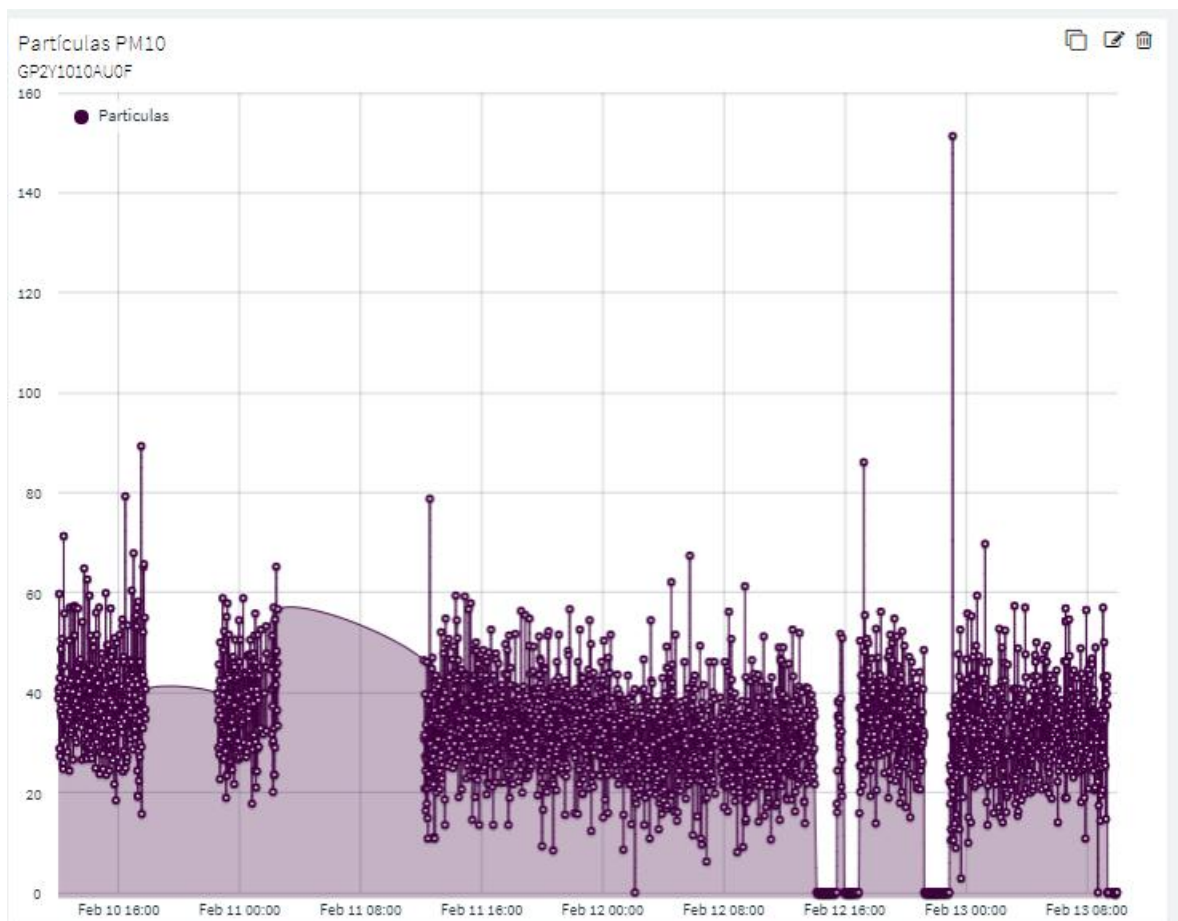


3.9.4. Cantidad de partículas PM10. Durante la realización del proyecto no ha sido posible la comparación con otro equipo en campo para verificar el correcto funcionamiento del sensor GP2Y1010AU0F. Sin embargo, las concentraciones

promedio obtenidas para el salón de estudio (escenario de pruebas inicial) se han ubicado en entre 50 – 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que coinciden con los informes de calidad de aire en Colombia para la región en la cual se ubicó la zona de pruebas del banco de pruebas [28] [29].

En la figura 69 se puede observar el comportamiento del sensor entre los días 10 a 13 de febrero.

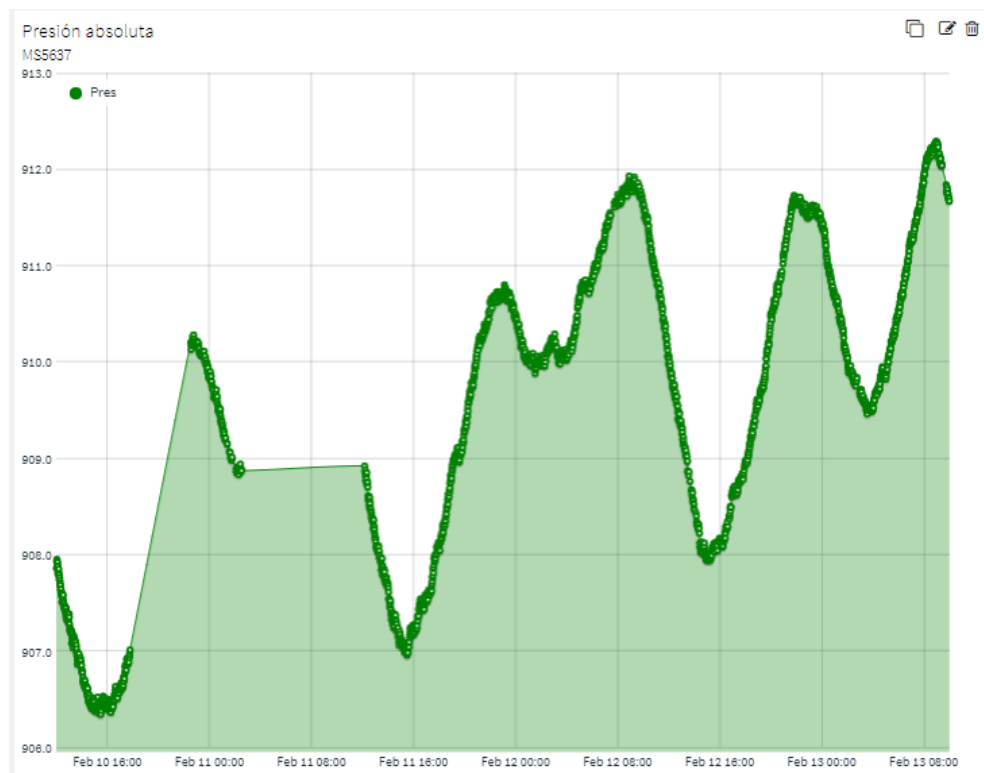
Figura 69. Comportamiento obtenido por el sensor de partículas GP2Y1010AU0F durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.



3.9.5. Presión absoluta. Durante la realización del proyecto no ha sido posible la comparación con otro equipo en campo para verificar el correcto funcionamiento del sensor MS5637. Sin embargo, las pruebas realizadas en el salón de estudio y las muestras puntuales de datos en biblioteca y la zona de estudio grupal del edificio de Ingeniería Industrial de la Universidad Industrial de Santander, revelan valores muy cercanos a los tomados por la estación meteorológica de Palonegro y de las páginas web de monitoreo del clima, valores que coinciden con los informes de calidad de aire en Colombia para la región en la cual se ubicó la zona de pruebas del banco de pruebas [28, 29].

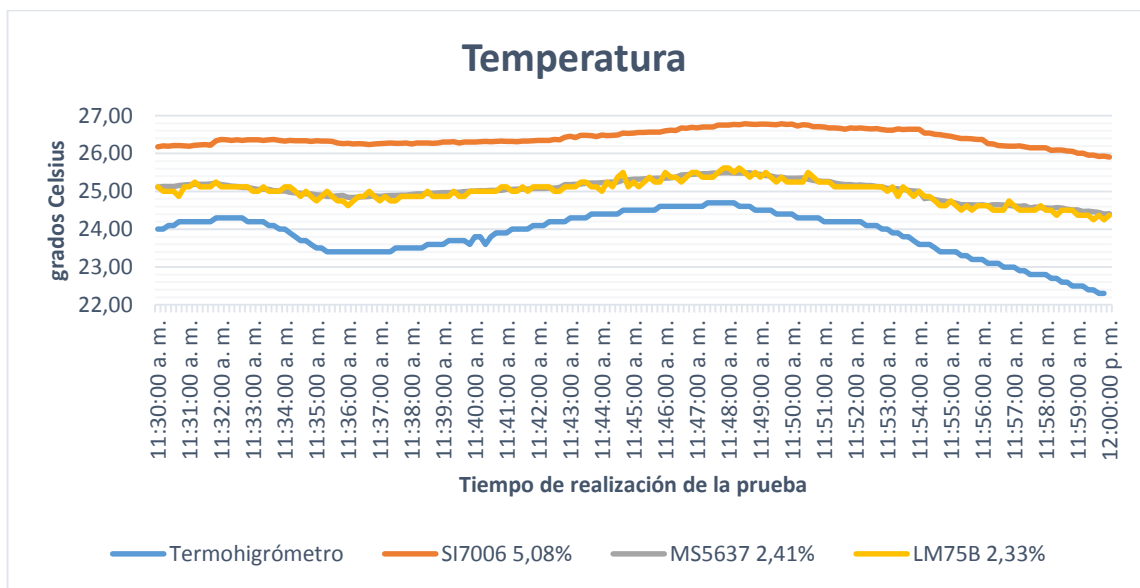
En la figura 70 se puede observar el comportamiento del sensor entre los días 10 a 13 de febrero.

Figura 70. Comportamiento obtenido por el sensor de presión absoluta MS5637 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.



3.9.6. Temperatura. Para la prueba comparativa del comportamiento de temperatura de los sensores LM75b, SI7006 y MS5637 se ha utilizado el equipo de medición Digital Psychrometer Kit RH305 de Extech Instruments, obteniendo los siguientes resultados.

Figura 71. Primera comparativa del comportamiento de los sensores de temperatura SI7006, MS5637 y LM75b con respecto al equipo de medición RH305.



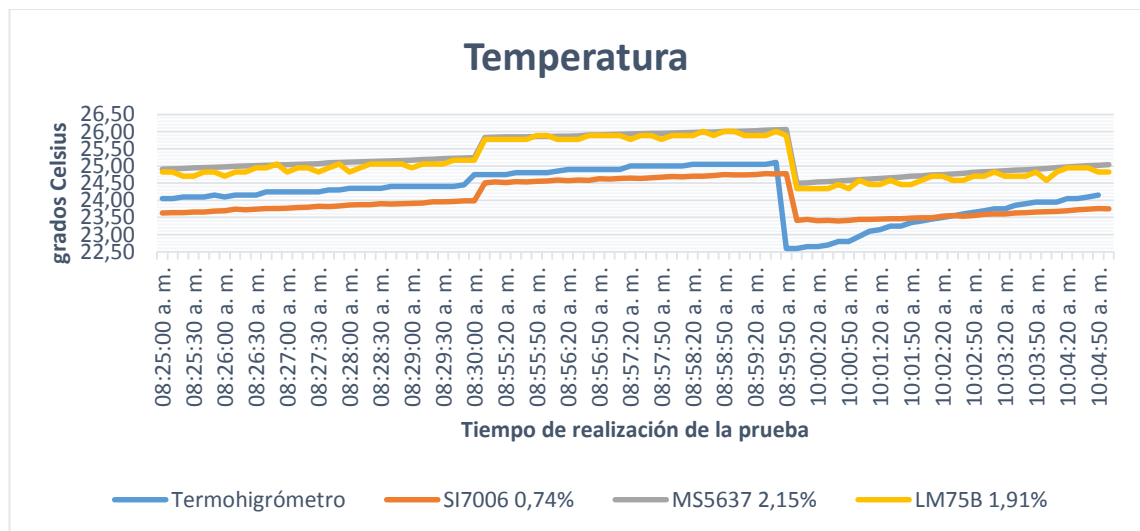
De la figura 71 se puede observar que los sensores MS5637 y LM75b tiene un desempeño igual, que puede estar asociado a que ambos sensores se ubican en la misma placa, mientras que el sensor SI7006 se encuentra en una placa diferente y en otro lado del banco de pruebas, adicionalmente el SI7006 tiene un ligero calentamiento asociado al funcionamiento propio del sensor para evitar condensación sobre el mismo.

A pesar que los sensores no obtienen la misma temperatura que el equipo de medición, éstos siguen la misma tendencia, y el desnivel presentado entre ellos y la curva del RH305 puede ser corregida por software.

Debe resaltarse que, al momento de realizar las pruebas comparativas de temperatura, se ha ubicado la sonda del equipo de medición 25 centímetros por arriba de la superficie en la cual se apoyaba el banco de pruebas, esto para conseguir una lectura más cercana a la temperatura ambiente, y evitar variaciones por temperatura latente o radiante. Adicionalmente se ha observado en pruebas fuera de los registros que el sensor de temperatura interno del equipo, el cual estaba ubicado al nivel del banco de pruebas, registraba temperaturas sobre los 25 grados, similares a las obtenidas por los sensores LM75B y MS5637.

Para la segunda ronda de comparaciones, se ha obtenido que el ajuste por programación de las curvas con respecto al comportamiento del termohigrómetro utilizado, el desempeño del sensor ha mejorado reduciendo el error promedio entre ellos a un máximo de 2%, como se puede observar en la figura 72.

Figura 72. Primera comparativa del comportamiento de los sensores de temperatura SI7006, MS5637 y LM75b con respecto al equipo de medición RH305.



En las figuras 73 y 74 se puede observar el comportamiento del sensor entre los días 10 a 13 de febrero.

Figura 73. Comportamiento obtenido por el sensor de temperatura LM75b durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.

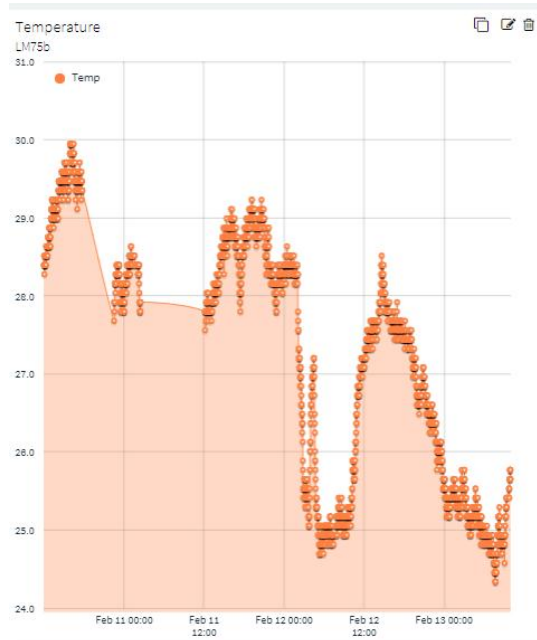
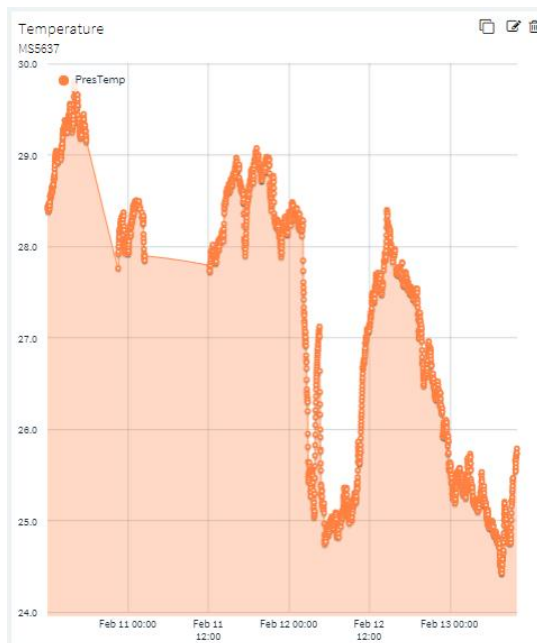
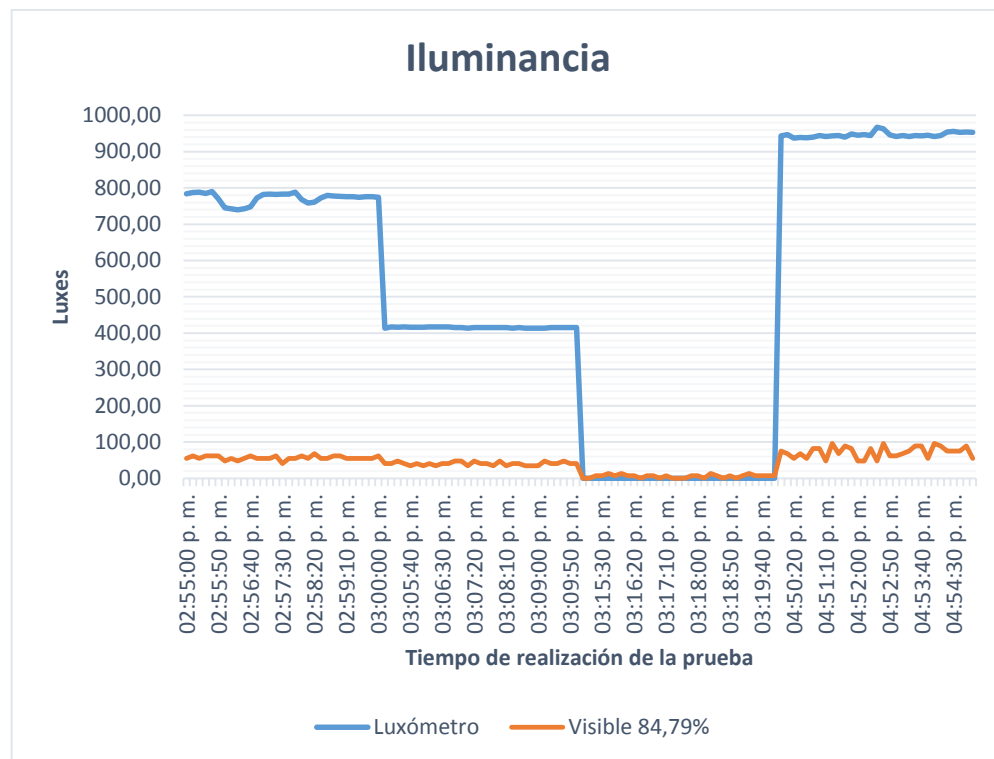


Figura 74. Comportamiento obtenido por el sensor de presión MS5637 (temperatura) durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.



3.9.7. Iluminancia. Se ha utilizado el luxómetro 407026 de Extech Instruments para la prueba comparativa con el módulo GY-1145 como se presenta a continuación.

Figura 75. Primera comparativa del comportamiento del sensor de luz visible e infrarroja SI1145 con respecto al equipo de medición Light Meter 407026 de Extech Instruments.



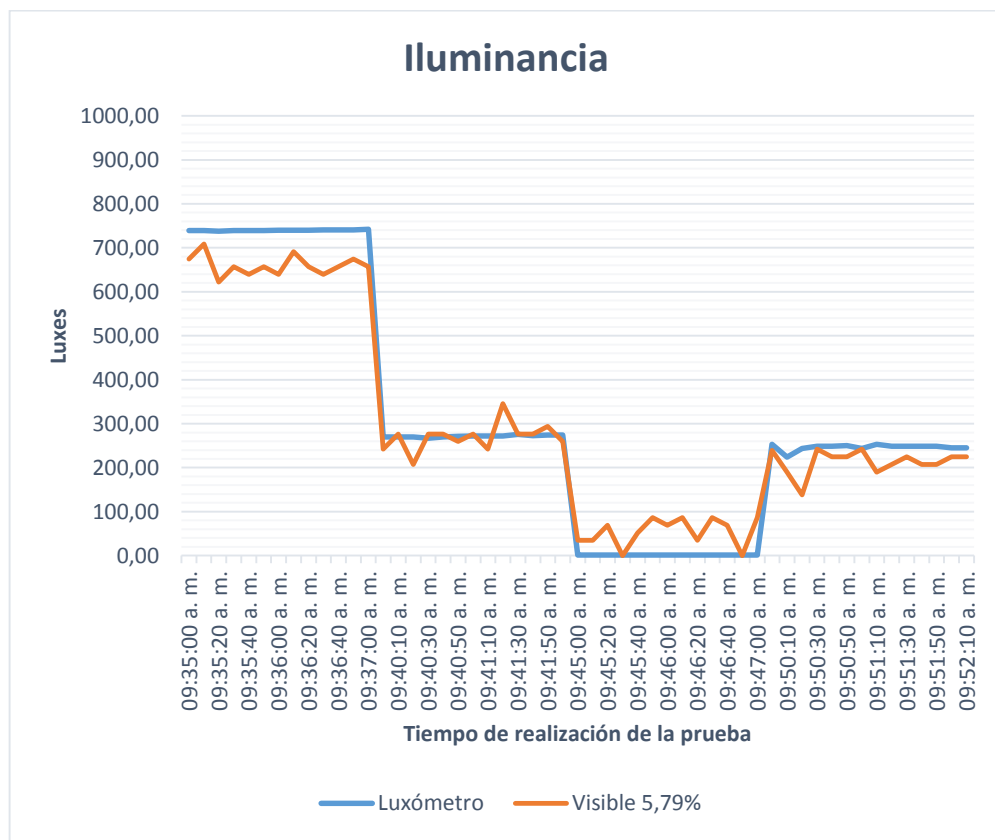
La gráfica 75 presenta el comportamiento del módulo GY-1145 frente al luxómetro 407026 en donde se puede observar un mismo comportamiento entre ellos, pero escalado. Mientras el luxómetro logra los valores más cercanos a la realidad, el módulo GY-1145 arroja los datos en una escala menor, sin embargo, éste comportamiento puede ser corregido por programación.

Nótese que los datos de intensidad infrarroja se comportan de manera similar a los de luz visible, por lo que se puede hallar una relación directa entre ambos, inclusive, durante el rango de tiempo de 14:55 a 15:20, las pruebas se llevaron a cabo en la

sala de consulta de la E3T, donde la iluminación es fluorescente, mientras que las pruebas realizadas en el laboratorio de mediciones eléctricas, la iluminación es LED y permite obtener lecturas iguales tanto para luz visible como para luz infrarroja, adicionalmente que los valores en dicho laboratorio superaban los 950lx en promedio.

Durante la realización de la segunda ronda pruebas comparativas se ha obtenido el comportamiento que se observa en la figura 76, donde se puede corroborar que el ajuste realizado por programación ha mejorado el desempeño del sensor, reduciendo el error promedio entre el sensor y luxómetro a un máximo de 5.8%.

Figura 76. Segunda comparativa del comportamiento del sensor de luz visible e infrarroja SI1145 con respecto al equipo de medición Light Meter 407026 de Extech Instruments.



En las figuras 77 y 78 se puede observar el comportamiento del sensor entre los días 10 a 13 de febrero.

Figura 77. Comportamiento obtenido por el sensor de luz visible e infrarroja (luz visible) SI1145 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.

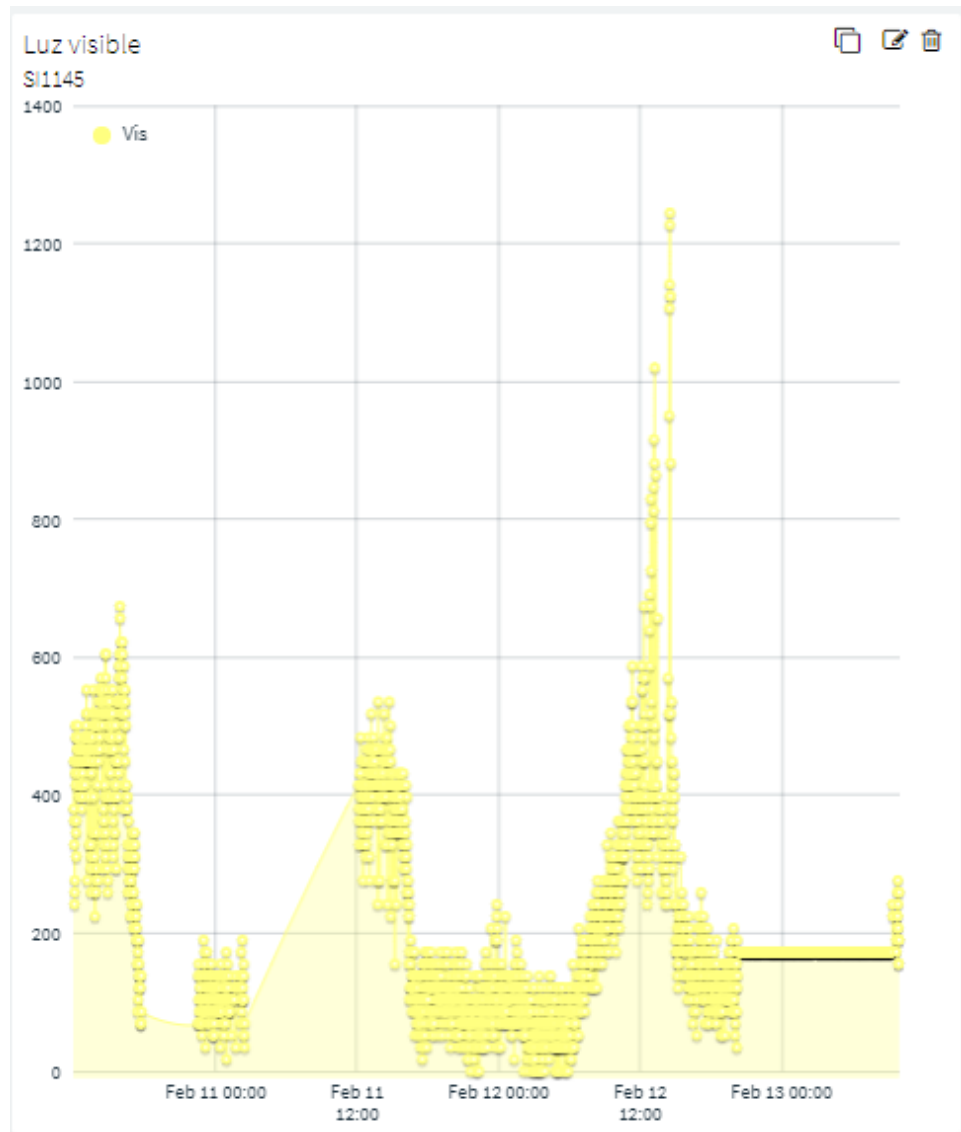
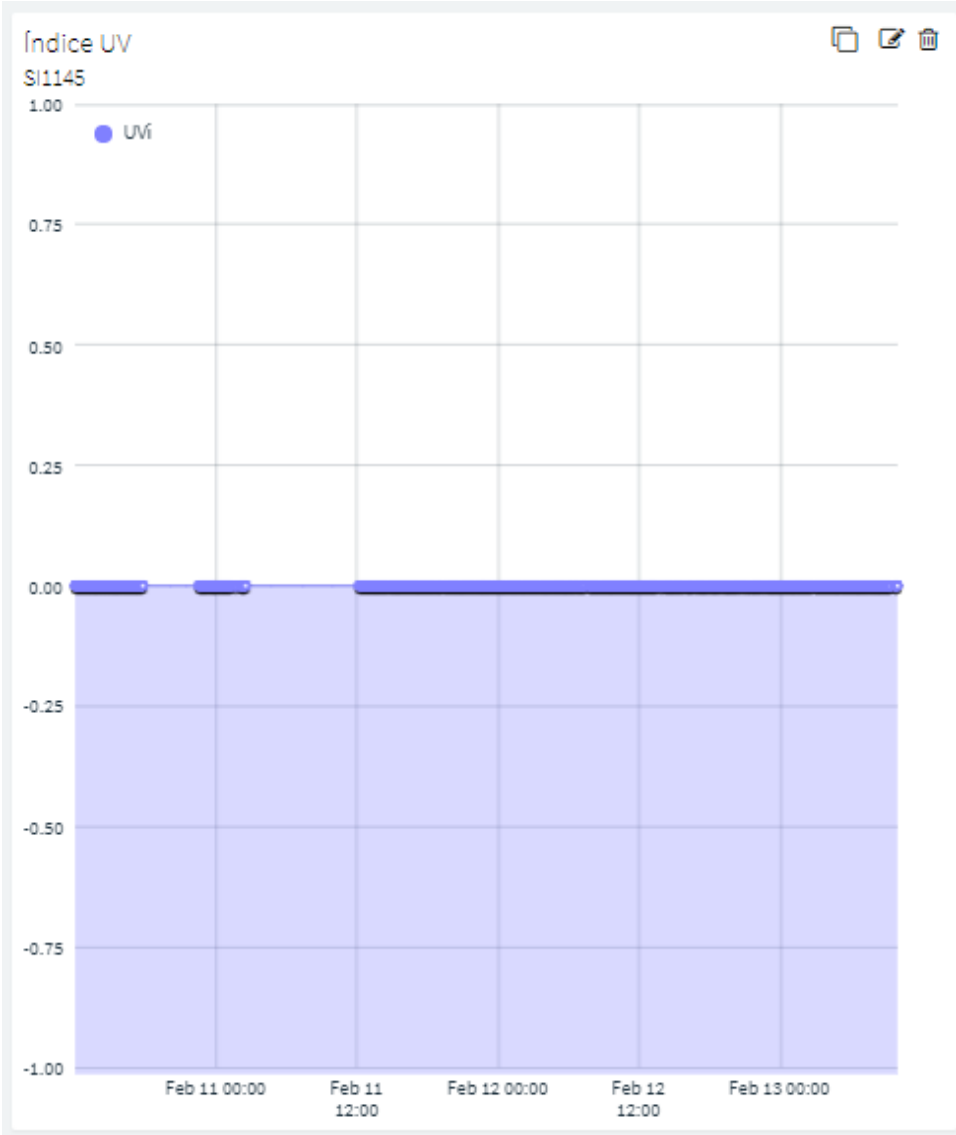


Figura 78. Comportamiento obtenido por el sensor de luz visible e infrarroja (índice UV) SI1145 durante los días 10, 11, 12 y 13 de febrero de 2018.



4. CONCLUSIONES

- Se ha logrado diseñar, construir, implementar y poner marcha una unidad de monitoreo experimental de calidad de ambiente interior funcional y portable.
- Se ha logrado que todos los sensores propuestos funcionen correctamente y en armonía al momento de realizar el montaje completo.
- Los datos enviados a la plataforma Thinger.io pueden ser utilizados en cualquier momento y sirven como registro de calidad de ambiente interior.
- El diseño de la unidad de monitoreo experimental iAQ2 se ha enfocado en ser un equipo ligero, portable y de dimensiones reducidas.
- A la propuesta inicial se han anexado los sensores de material particulado PM10 y de movimiento inercial para presentar las posibilidades que representa tener un dispositivo de monitoreo de tamaño reducido que sea capaz de monitorear un alto número de variables.

5. OBSERVACIONES

- Se ha realizado la comparativa de 4 de las 8 variables de calidad de ambiente interior verificando el correcto funcionamiento de la unidad experimental iAQ2, sin embargo, se ha decidido dejar el proceso de calibración para una futura continuación del proyecto de investigación.
- Se ha decidido no ensamblar las placas propuestas 3 y 4 junto con el sensor CCS811 debido a la complejidad del proceso de fabricación, aunque se ha asumido dicho proceso para el ensamble de las placas 1 y 2.
- Para la placa 4 propuesta se ha utilizado el regulador de tensión DS9080 por su reducido tamaño (QFN de 1x1mm) y su mayor capacidad de corriente de salida.
- Las pruebas de funcionamiento y comparación se han realizado con el banco de pruebas de la iAQ2 y no en su estructura final, por su facilidad de reparación o conexión y desconexión de componentes para la realización y verificación de las pruebas.
- Inicialmente todos los sensores fueron sometidos a pruebas de funcionamiento individuales para verificar su correcto desempeño y luego se fueron anexando uno por uno hasta llegar a la unión de todos ellos en el banco de pruebas.
- Como software de programación se ha utilizado el entorno IDE de Arduino y las librerías oficiales de cada sensor han sido utilizadas, modificadas o han servido como guía para la programación de adquisición de datos de cada sensor.
- Durante la realización de las pruebas, se logró que el banco de pruebas de la unidad experimental iAQ2 alcanzase las 7 horas de autonomía con batería.

6. MEJORAS Y FUTURAS ITERACIONES

Teniendo en cuenta el funcionamiento y comportamiento observado con la unidad experimental iAQ2 se han propuesto los siguientes modelos basándose en las placas 1, 2, 3, y 4, de las cuales ya se ha hablado previamente, pero aprovechando las ventajas de diseño de estas placas al disminuir el espacio necesario para su instalación e implementación en un modelo final más robusto y primera iteración para considerar un posible acercamiento al sector comercial.

En las siguientes imágenes se podrán observar las propuestas a futuro de la unidad experimental iAQ2.

6.1. iAQ1.

La propuesta iAQ1 ha sido el desarrollo de una unidad de monitoreo de calidad de ambiente interior de tamaño reducido (9cmx9cmx3cm), que inicialmente tendría la capacidad de monitorear las variables mostradas en la figura 79.

Figura 79. Variables monitoreadas por la iAQ1.

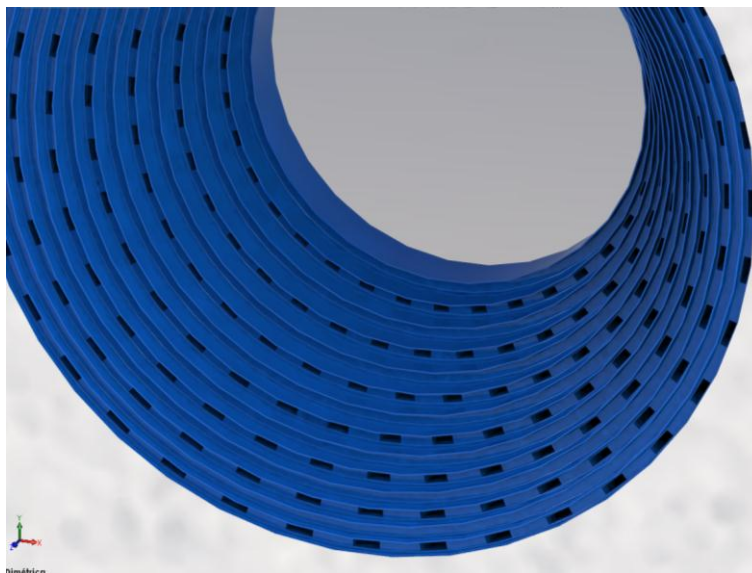


La iAQ1 resalta por su forma compacta, cuadrada y con un alto nivel de detalle y cuidado de diseño en su abertura de ventilación y en la salida de audio de su estructura, como se muestra en las figuras 80 y 81.

Figura 80. iAQ1.



Figura 81. Detalle de abertura de ventilación de la iAQ1.



El sistema de audio Bluetooth incorporado es un sistema 4.0, utilizando 2 parlantes en combinación estéreo para altas frecuencias, y otros 2 parlantes, también en combinación estéreo, para frecuencias medias y media-bajas. Su comunicación para audio utiliza el protocolo de Bluetooth v4.2 para lograr la transmisión de audio con mínima pérdida de calidad en formato estéreo. El sistema de separación de frecuencias y ecualizador lo incluye la iAQ1.

La iAQ1 comparte la filosofía original del proyecto de unidad experimental y también incorpora una batería ion-litio recargable de tipo 18650, conectividad Wifi, y como adicional incluye un sistema de audio.

Sin embargo, la iAQ1 no ha sido aprobada para montaje y pruebas, debido a:

- Costo elevado de fabricación.
- Diseño de la estructura complejo, lo que aumenta los costos y riesgos de avería al ser una unidad experimental.
- El sistema de audio representa un costo adicional que esta fuera de los objetivos básico de éste proyecto de investigación, aunque supondría un atractivo al usuario para un producto comercial.
- La abertura de ventilación, aunque de diseño moderno y al mismo tiempo complejo, no ha permitido garantizar bajo pruebas de simulación de flujo de aire en Solidworks que permita el flujo de aire necesario para permitir el monitoreo de las variables de interés.

6.2. iAQ3.

La iAQ2, mostrada en la figura 82, es la propuesta realizada luego de haber evaluado a nivel de simulación y fabricación la iAQ1. La iAQ3 es una unidad de monitoreo que ha dejado atrás el sistema de sonido y ha incorporado el sensor de

movimiento inercial (acelerómetro LIS3DH) junto con un diseño reducido de dimensiones similares a la iAQ1, pero rediseñando toda la estructura para mejorar sus entradas de aire y permitir un mejor monitoreo de las variables de interés y ventilación de la placa 4, ya que ésta posee la etapa de potencia y comunicación.

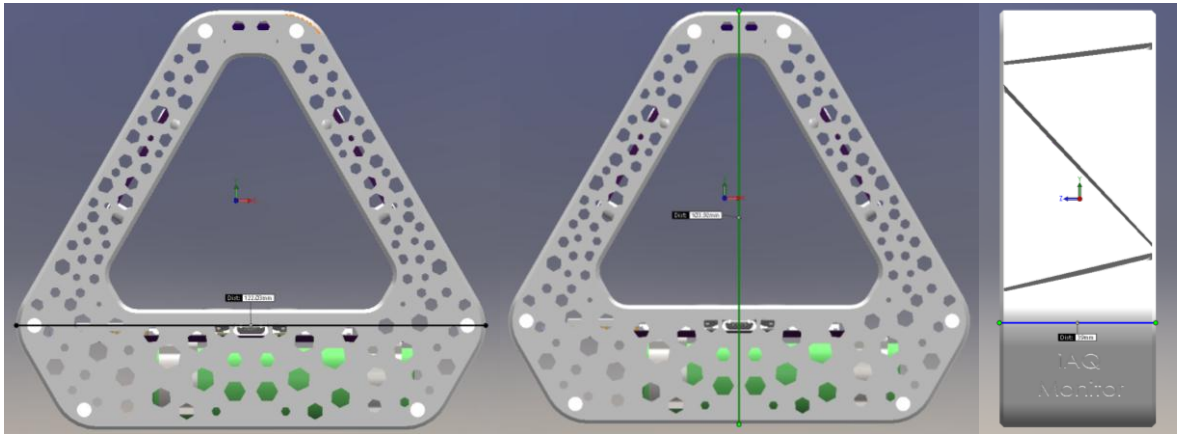
Figura 82. iAQ3



La estructura de la iAQ3 ha sido rediseñada ya que no requiere del sistema de sonido y las placas de desarrollo no se han tenido que adaptar a la nueva unidad como se ve en la figura 82.

La iAQ3 es la propuesta comercial que se ha considerado para este proyecto de investigación, debido a su facilidad de ensamblaje, consta de 6 tornillos externos para asegurar las 3 piezas del cuerpo de la iAQ3 (figura 83), adicionalmente las placas diseñadas utilizan 4 tornillos para asegurarlas a la estructura cada una.

Figura 83. Dimensiones iAQ3. Izquierda: altura 103.9mm. Centro: ancho: 122.03mm. Derecha: lateral: 39mm.



Para el sensor de ruido y de luz ambiental se ha realizado un tratamiento especial de sus boquillas, cada una de sus diseños se ha basado en lo recomendado en sus hojas de datos y guías de diseño de sus fabricantes, como se observa en la figura 84.

Figura 84. Estructura final iAQ3. Izquierda: vista superior. Derecha: vista lateral.



Para el cuerpo exterior se ha tallado el símbolo de cada variable monitoreada, para ofrecer la información básica al usuario por medio de leds de notificación sin

necesidad de ir a un sitio web o aplicación móvil. Adicional a ello se han anexado dos botones para encendido/apagado de la unidad.

Nótese que el diseño de la iAQ2 permite que el cable de recarga del dispositivo se ubique en la zona inferior, lo que mejora su estabilidad al momento de realizar la recarga del mismo, en comparación con la iAQ1 cuyo diseño requería que se ubicará en la zona superior.

REFERENCIAS

- [1] REY MARTINEZ, Fabio; CEÑA CALLEJO, Rodrigo. Edificios saludables para trabajadores sanos: calidad de ambientes interiores, Parte 1 y 2. Junta de Castilla y León, Consejería de Economía y Empleo. 2006. 10-20 p.
- [2] UNITED NATIONS. "Urban and Rural Areas 2009". United Nations, Department of Economic and Social Affairs. June 2010.
- [3] EPA & NIOSH. Building Air Quality: A guide for building owners and facility managers. US Environmental Protection Agency Staff & National Institute for Occupation Safety and Health, EPA, 1991.
- [4] MADS. Se moderniza sistema de monitoreo de calidad del aire en Colombia. Ministerio de ambiente de Colombia. Julio 2017. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/3018-se-moderniza-sistema-de-monitoreo-de-calidad-del-aire-en-colombia>
- [5] CUBESensors. CUBESensors. Descripción e imagen de producto disponible en: <https://cubesensors.com/#features>
- [6] NETATMO. NETATMO Weather Station. Descripción e imagen de producto disponible en: <https://www.netatmo.com/en-US/product/weather/weatherstation/specifications>
- [7] Foobot. Alima. Descripción e imagen de producto disponible en: <https://foobot.io/features/>

- [8] MCEWEN, Adrian; CASSIMALLY, Hakim. Designing the Internet of Things. UK. Wiley. 2014. 11p.
- [9] CALVO S, Oscar. Análisis de la calidad de aire en el interior de edificios. Tesis doctoral. Salamanca. Universidad de Salamanca. Facultad de ciencias. Octubre 2014. 4-10p.
- [10] COMUNIDAD DE MADRID. Calidad de aire interior de edificios de uso público. Documentos de sanidad ambiental. Diciembre 2010.
- [11] AENOR. Norma UNE EN ISO 7730:2006. Ergonomía del medio ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar local. (ISO 7730:2005).
- [12] BLENDER, María. El confort térmico. Marzo 10 de 2015 Disponible en: <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/>
- [13] AENOR. Norma UNE-EN 12464-1. Iluminación. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: Lugares de trabajo en interiores. (ISO 12464:2008).
- [14] Colegio Oficial de Ópticos-Optometristas de Andalucía. ¿QUÉ ES EL ÍNDICE UV SOLAR GLOBAL? [En línea]. 2017. Disponible en: <http://www.tuoptometrista.com/wp-content/uploads/2015/07/Gráfico-UV.png>
- [15] CRESPO, Enrique. ESP32 el sucesor de ESP8266. Wifi en Arduino. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/esp32/>
- [16] ROBOTS. Módulo de movimiento inercial GY-521. 2016. Disponible en: https://probots.co.in/images/large/Gy521_01_LRG.jpg

[17] CFSUNBIRD. CFSUNBIRD CCS811 HDC1080 de monóxido de carbono CO sensores de temperatura y humedad sensor de gas COV Combo. [En línea]. Aliexpress. 2017. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/CFSUNBIRD-CCS811-HDC1080-carbon-monoxide-CO-VOCs-temperature-and-humidity-gas-sensor-Combo-sensors/32798656576.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.ycYiS9>

[18] DIGIKEY. SI7006 Humidity sensor. [En línea]. 2016. Disponible en: https://media.digikey.com/Photos/Silicon%20Labs%20Photos/MFG_Si7006-DFN6.jpg

[19] ALL ELECTRONICS TRADINGS COMPANY. SI1145 IR UV Visible Sensor I2C GY1145 Luz Módulo Del Tablero Del Desbloqueo. [En línea]. Aliexpress. 2017. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/SI1145-UV-IR-Visible-Sensor-I2C-GY1145-Light-Breakout-Board-Module/32818298007.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.ycYiS9>

[20] DIGIKEY. GP2Y1010AU0F Dust particle sensor. [En línea]. 2015. Disponible en: https://cdn.itead.cc/media/catalog/product/i/m/im130608001_3.jpg

[21] TE CONNECTIVITY. MS5637 Pressure Sensor. [En línea]. 2015. Disponible en: <http://www.te.com/usa-en/product-CAT-BLPS0037.html?q=ms5637&source=header&>

[22] ALL ELECTRONICS TRADINGS COMPANY. MAX9812L micrófonos electret Micrófono sensor módulo amplificador. [En línea]. Aliexpress. 2017. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/Free-shipping-MAX9812L-electret-microphones-Microphone-sensor-amplifier-module/32687552354.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.ycYiS9>

[23] NXP. LM75B: Digital temperature sensor and thermal watchdog. [En línea]. NXP. 2015. Disponible en: <https://www.nxp.com/products/sensors/other-sensors/ic-temperature-sensors/digital-temperature-sensor-and-thermal-watchdog:LM75B?fsrch=1&sr=1&pageNum=1>

[24] ALL ELECTRONICS TRADINGS COMPANY. 0.91 pulgadas 12832 blanco y azul del color 128X32 OLED LCD módulo de Pantalla LED 0.91 "IIC Comunicarse. [En línea]. Aliexpress. 2017. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/Free-shipping-0-91-inch-12832-white-and-blue-color-128X32-OLED-LCD-LED-Display-module/32709141534.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.ycYiS9>

[25] ALL ELECTRONICS TRADINGS COMPANY. Módulo Incorporado WS2812 5050 RGB LED 8 LED de Colores para. [En línea]. Aliexpress. 2017. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/WS2812-5050-RGB-LED-Module-for-Arduino/32310687149.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.ycYiS9>

[26] THINGER. The Open Source Platform for the Internet of Things. [En línea]. Thinger. 2017. Disponible en: <https://thinger.io>.

[27] AMS. "CCS811_Doc_cQuickStart_QG000111_v1-01". [En línea]. AMS. 2017. Disponible en: <https://download.ams.com/ENVIRONMENTAL-SENSORS/CCS811>

[28] IDEAM. Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010. [En línea]. IDEAM. Bogotá, D.C., 2012. ISBN: 978-958-8067-84-1. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/68521396/5.+Informe+del+estado+de+la+calidad+del+aire+2007-2010.pdf/52d841b0-afd0-4b8e-83e5-444c3d17ed29?version=1.0>

[29] IDEAM, Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015. [En línea]. IDEAM. Bogotá, D.C., 2016. ISBN: 978-958-8067-84-1. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe_del_Estado_de_la_Calidad_del_Aire_en_Colombia_2011-2015_vfinal.pdf

BIBLIOGRAFÍA

AENOR. Norma UNE 100011:1991. Climatización. La ventilación para una calidad aceptable del aire en la climatización de los locales. 1991.

AMS. AMS1117. Hoja de datos (PDF). [En línea] 2011. Disponible en: <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>

ARSAN, Z., & SÖKMEN, N. Monitoring and simulating a private house for building performance analysis. BAUSIM 2010 (pp. 196-202). Vienna: Vienna University of Technology (ISBN: 978-3-85437-317-9). 2010.

ASHRAE Standard 62.1. Ventilation for acceptable indoor air quality. ASHRAE, ISBN 1041-2336; American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers; Atlanta, 2007.

ASHRAE. Addendum to ANSI/ASHRAE Standard 62-2001. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; Atlanta, 2003.

BAEK, S., KIM, Y., and PERRY, R. Indoor air quality in homes, offices and restaurants in Korean urban areas –indoor/outdoor relationships. Atmospheric Environment Vol. 31, 1997.

BASH. Ostro, Outdoor Air Pollution: Assessing the Environmental Burden of Disease at National and Local Levels (Number 5 in WHO Environmental Burden of Disease Series). Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2004.

EPA. Introduction to Indoor Air Quality. [En línea]. 2013. Disponible en: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP-32. Hoja de datos (PDF). [En línea]. V2.3. 2018. Disponible en: http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp-wroom-32_datasheet_en.pdf

INVENSENSE. IMU MPU6050. Hoja de datos (PDF). [En línea] 2013. Disponible en: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>

K. B. SHABAN, A. KADRI, and E. REZK, Urban air pollution monitoring system with forecasting models, IEEE Sensors J., vol. 16, no. 8, pp. 2598-2606, Apr. 2016.

MOLHAVE, L.; BACH, R.; PEDERSON, O. Human reactions to low concentrations of volatile organic compounds. Environ. Inter. 1986, 12, 167-175.

Online Hourly Determination of 62 VOCs in Ambient Air: System Evaluation and Comparison with Another Two Analytical Techniques. 2002. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad del País Vasco, Bilbao.

PASTOR PÉREZ, P. Sanidad ambiental de ambientes interiores. Diagnóstico de calidad ambiental. 2010. Ambisalud. Disponible en: www.ambisalud.es

PASTOR, P. Partículas en suspensión. Hoja Informativa HiA-02. 2010. Ambisalud. Disponible en: www.ambisalud.es

SHARP. GP2Y1010AU0F. Application note of Sharp dust sensor GP2Y1010AU0F (PDF). [En línea] 2015. Disponible en: http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_apple.pdf

SILICON LABS. SI1145. Hoja de datos (PDF). [En línea] 2014. Disponible en:
<https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si1145-46-47.pdf>

SILICON LABS. SI7006. Hoja de datos (PDF). [En línea] 2016. Disponible en:
<https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si7013-A20.pdf>

TE CONNECTIVITY. MS5637 Pressure sensor. Hoja de datos (PDF). [En línea] 2017. Disponible en:
<http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtv&DocNm=MS5637-02BA03&DocType=Data+Sheet&DocLang=English>