



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

**“Implementación de una Sonda Meteorológica
para globo cautivo y Vehículo Aéreo no
Tripulado (VANT)”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:
Marco Silvano Serrano Ramírez

DIRECTOR DE TESIS:
Ing. Gustavo Vázquez Cruz

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO



M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Implementación de una Sonda Meteorológica para globo cautivo y Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT)

Que presenta el pasante: MARCO SILVANO SERRANO RAMÍREZ

Con número de cuenta: 30820493-3 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería Mecánica Eléctrica

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 28 de septiembre de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en T.I. Jorge Buendía Gómez	
VOCAL	Ing. Jorge Ramírez Rodríguez	
SECRETARIO	Ing. Gustavo Vázquez Cruz	
1er. SUPLENTE	Ing. Noemí Hernández Domínguez	
2do. SUPLENTE	Dr. David Tinoco Varela	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

*“Nuestro mayor miedo, no es que no encajemos...
Nuestro mayor miedo es que tenemos una fuerza
desmesurada, es nuestra luz y no nuestra
oscuridad lo que más nos asusta,
empequeñecerse no ayuda al mundo, no hay
nada inteligente en encogerse para que otros no
se sientan inseguros a tu alrededor, todos
deberíamos brillar como hacen los niños, no es
cosa de unos pocos, sino de todos, y al dejar
brillar nuestra propia luz, inconscientemente
damos permiso a otros para hacer lo mismo, al
liberarnos de nuestro propio miedo, nuestra
presencia libera automáticamente a otros”*

(Nelson Mandela, 1994)

AGRADECIMIENTOS

A la vida por darme el tiempo necesario para llegar hasta aquí y demostrar de lo que soy capaz.

A mi madre, por todo tu amor y apoyo incondicional. Porque siempre me has demostrado que has luchado por mis hermanas y por mí. Donde nosotros vimos problemas, tú viste retos y me demostraste que somos capaces de mucho. Gracias por ser mi madre cuando necesitaba consejos sabios y un abrazo lleno del amor más puro que pueda existir. Gracias por ser mi madre, yo siempre he estado orgulloso de ser tu hijo.

A mi padre, gracias por enseñarme el valor del trabajo desde pequeño. Verte trabajar a sol y sombra por mis hermanas y por mí me inspiró a querer seguir tus pasos. Siempre me apoyaste y has buscado que yo salga adelante, no importando sacrificar horas de sueño, con tal de verme salir adelante. Cuando la vida me “alejó” de ustedes, me apoyaste y dabas fuerza para seguir adelante. Gracias por ser mi carnal y mi guía.

A mi hermana Leonor, por ser mi ejemplo para seguir desde pequeño. Verte estudiar día y noche, esforzarte cada día y noche, yendo tan lejos para buscar cumplir tus metas me motivaron a buscar cumplir las mías. Gracias por llevarme aquel día a inscribirte a Prepa 5, sabes que desde aquel momento mi vida cambio completamente. Gracias por ser mi guía desde pequeños. Gracias por ser mi hermana “gemela” malvada.

A mi hermana Yazmin, quien me ha guiado y cuidado desde pequeño, durante la primaria y secundaria en ningún momento me dejaste solo, contra todo y todos siempre has estado ahí para mí. Cuando tenía algún problema, nunca dudaste para ayudarme a resolverlos, fuera el momento que fuera. Gracias por ser mi hermana “adoptada”, y por darme el cariño de un sobrino, a los dos los quiero y los amo mucho.

A mi amada rojis, que desde el momento en que te conocí supe que eras alguien especial y siempre estaré agradecido que tu amor hacia los gatos nos presentó. Te agradezco por apoyarme en cada momento, que cuando sentía que no podía más, tú me has levantado, me cargabas en tus hombros y me dabas ese empuje extra que necesitaba. Te convertiste en mi amiga, mi cómplice y mi pareja, con quien con mucho amor comparto cada momento y sé que cada triunfo lo celebraremos y cada derrota la superaremos. Gracias por ser mi rojis.

A mi familia Vázquez, porque cuando pensé que la vida me había alejado de mi familia, en verdad me presentó a una nueva. A Rosa María y Francisco les agradezco que siempre me han hecho sentir como si fuese un integrante más de su familia; a Rosa Marina por tratarme como un carnal más para ti y compartirme todas tus locuras; y a Francisco David, mi mejor amigo, agradezco por todo el apoyo durante la carrera y fuera de ella, hemos compartido tantas aventuras y anécdotas que guardaré siempre en mis recuerdos, gracias por ser mi hermano de otra madre. Gracias por convertirse en mi familia.

A mi perro “Pandota”, porque a lo largo de la carrera me acompañaste en cada noche de mi carrera y sólo tú fuiste testigo de mis momentos de desesperación, y ante ello siempre apoyaste tu cabeza sobre mi mano como diciéndome que todo estaba bien. Mi eterno compañero de carrera. Gracias pandota.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme las armas que necesito para este mundo, ser mi alma mater de quien siempre estaré orgulloso de ser egresado. En las aulas de mi amada Prepa 5 y FES Cuautitlán dejo mis recuerdos y esencia.

Índice

Índice de Figuras.....	6
Índice de tablas.....	8
Objetivos.....	9
Justificación	9
Introducción	9
1. Sistemas de mediciones meteorológicas	12
1.1. Historia de los instrumentos de medición aplicados a la Meteorología	12
1.2. Diferencia entre mediciones en superficie y en altura.....	19
1.3. ¿Qué es una radiosonda y un globo cautivo?.....	21
1.4. Sistemas de despliegue de información meteorológica.....	23
2. Vehículos Aéreos no Tripulados y sus aplicaciones.....	26
2.1. ¿Qué es un VANT y un Drone?	26
2.2. Uso legal del drone	30
2.3. Uso actual de los drones	32
3. Cómputo científico	35
3.1. Historia	35
3.2. Clasificación de las computadoras	39
3.3. Raspberry Pi.....	40
4. Metodología	44
4.1. Temperatura, humedad y punto de rocío	47
4.2. Presión atmosférica y altura.....	50
4.3. Viento	53
4.4. Reloj.....	58
4.5. GPS.....	59
4.6. Voltaje y corriente de alimentación	61
4.7. Circuito impreso	62
4.8. Estuche o Case.....	64
Resultados	75
Conclusiones.....	88
Referencias	90
Anexos	95

Índice de Figuras

FIGURA 1. 1. PERFIL VERTICAL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO, EL DÍA 15 DE ENERO DEL 2018 A LAS 12 UTC (6 AM MÉXICO).	24
FIGURA 1. 2. PRONOSTICO DEL CLIMA A NIVEL NACIONAL EL DÍA 16 DE ENERO DEL 2018 A LAS 6 UTC (6 AM MÉXICO).	25
FIGURA 2. 1. CONFIGURACIÓN DE MULTIROTORES.....	29
FIGURA 3. 1. RASPBERRY PI 1 MODELO B.....	42
FIGURA 3. 2. RASPBERRY PI 1 MODELO B+.....	42
FIGURA 3. 3. RASPBERRY PI 2.....	42
FIGURA 3. 4. RASPBERRY PI 3 MODELO B.....	43
FIGURA 3. 5. RASPBERRY PI 3 MODELO B+.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 3. 6 RASPBERRY PI ZERO W.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 3. 7. RASPBERRY PI ZERO.....	43
FIGURA 4. 1. CONFIGURACIÓN DE LOS GPIO DE LA RASPBERRY PI 3.....	44
FIGURA 4. 2. ACTIVACIÓN DEL PROTOCOLO I2C.....	46
FIGURA 4. 3. AÑADIENDO PROTOCOLO I2C.....	46
FIGURA 4. 4. MÚLTIPLES SENSORES I2C.....	47
FIGURA 4. 5. SENSOR SHT15 (IZQUIERDA) Y CONEXIÓN ENTRE EL SENSOR Y LA RASPBERRY PI 3 (DERECHA).....	47
FIGURA 4. 6. SECUENCIA DE ACTIVACIÓN DEL SENSOR.....	48
FIGURA 4. 7. DIAGRAMA DEL INICIO, CÓDIGO Y TIEMPO QUE TARDA LA MEDICIÓN.....	48
FIGURA 4. 8. EL NÚMERO BINARIO OBTENIDO EN LA IMAGEN PARA LA MEDICIÓN DE HUMEDAD RELATIVA ES “0000 1001 0011 0001”.....	49
FIGURA 4. 9. SENSOR BMP180.....	50
FIGURA 4. 10. CONEXIÓN ENTRE EL SENSOR Y LA COMPUTADORA MEDIANTE PROTOCOLO I2C.....	50
FIGURA 4. 11. VECTOR VELOCIDAD ($ Z $) EN SUS COMPONENTES ZONAL (U), MERIDIONAL (V) Y SU ÁNGULO (θ).....	53
FIGURA 4. 12. POSICIÓN DE LOS TRANSMISORES Y RECEPTORES.....	53
FIGURA 4. 13. SENSOR HC-SR04.....	56
FIGURA 4. 14. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL HCSR-04.....	56
FIGURA 4. 15. PRIMER DISEÑO DEL ANEMÓMETRO SÓNICO.....	57
FIGURA 4. 16. NUEVO DISEÑO DEL ANEMÓMETRO.....	57
FIGURA 4. 17. RELOJ EN TIEMPO REAL DS1307.....	58
FIGURA 4. 18. REGISTRO DE DISPOSITIVOS.....	58
FIGURA 4. 19. ULTIMATE GPS BREAKOUT V3.....	60
FIGURA 4. 20. MÓDULO 134N3P: IZQUIERDA VISTA SUPERIOR, DERECHA VISTA INFERIOR.....	62
FIGURA 4. 21. CIRCUITO DE LOS SENSORES, IZQUIERDA CARA SUPERIOR, DERECHA CARA INFERIOR.....	63
FIGURA 4. 22. CIRCUITO DE VIENTO, IZQUIERDA CARA SUPERIOR, DERECHA CARA INFERIOR.....	63
FIGURA 4. 23. DERECHA: DISEÑO DEL CIRCUITO DE SENSORES. IZQUIERDA: CIRCUITO DEL VIENTO.....	64
FIGURA 4. 24. SENSOR GPS (IZQUIERDA) Y RELOJ TIEMPO REAL (DERECHA).....	64
FIGURA 4. 25. SENSOR DE TEMPERATURA (IZQUIERDA) Y DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA (DERECHA).....	64
FIGURA 4. 26. DRONE PHANTOM 2 DE DJI.....	65
FIGURA 4. 27. ESTRUCTURA DONDE EL GIMBAL SE ACOPLA AL PHANTOM 2.....	65
FIGURA 4. 28. SISTEMA DE GLOBO CAUTIVO.....	66
FIGURA 4. 29. IMPRESORA 3D TEVO TARANTULA.....	67
FIGURA 4. 30. INTERFAZ DEL SOFTWARE CURA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 31. PRIMER DISEÑO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 32. SEGUNDO DISEÑO.....	69
FIGURA 4. 33. SEGUNDO DISEÑO MONTADO EN EL DRONE.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 34. TERCER DISEÑO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 35. PRIMER DISEÑO DEL ANEMÓMETRO SÓNICO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 36. SEGUNDO DISEÑO DEL ANEMÓMETRO SÓNICO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

FIGURA 4. 37. TERCER DISEÑO DEL ANEMÓMETRO SÓNICO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 38. DISEÑO (IZQUIERDA) E IMPRESIÓN 3D (DERECHA) DEL ANEMÓMETRO SÓNICO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 39. DISEÑO (IZQUIERDA) E IMPRESIÓN 3D (DERECHA) DEL ANEMÓMETRO SÓNICO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 40. TÚNEL DE VIENTO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 41. ESTRUCTURA DE LA Sonda METEOROLÓGICA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4. 42. DRONE CON LA Sonda METEOROLÓGICA: DISEÑO CAD (PARTE SUPERIOR) E IMPRESIÓN 3D CON SENSORES (PARTE INFERIOR).	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5. 1. DATOS OBTENIDOS EL 2 DE NOVIEMBRE DEL 2017.	75
FIGURA 5. 2. GRÁFICA DE LOS DATOS OBTENIDOS EL DÍA 2 DE NOVIEMBRE DE 2017.	75
FIGURA 5. 3. DATOS OBTENIDOS EL DÍA 15 DE NOVIEMBRE DE 2017.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5. 4. GRÁFICA DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y PUNTO DE ROCÍO DEL DÍA 15 DE NOVIEMBRE DE 2017.	76
FIGURA 5. 5. COORDENADAS LATITUD: 19.328011667, LONGITUD: -99.176636667. FUENTE: HTTP://BIT.LY/2MTXBQL	77
FIGURA 5. 6. PRUEBA DE DISTANCIA.	77
FIGURA 5. 7. MEDICIÓN DEL VIENTO EN UN EJE, SIN TÚNEL DE VIENTO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5. 8. MEDICIÓN DEL VIENTO CON UN EJE, CON TÚNEL DE VIENTO EN EL MISMO SENTIDO DEL PULSO ULTRASÓNICO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5. 9. MEDICIÓN DEL VIENTO CON UN EJE, CON TÚNEL DE VIENTO EN SENTIDO CONTRARIO DEL PULSO ULTRASÓNICO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5. 10. MEDICIÓN DEL VIENTO CON EL SEGUNDO DISEÑO SIN TÚNEL DE VIENTO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5. 11. MEDICIÓN DEL VIENTO CON EL SEGUNDO DISEÑO CON TÚNEL DE VIENTO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5. 12. MEDICIONES SIN TÚNEL DE VIENTO PARA EJES ESTE Y OESTE.	80
FIGURA 5. 13. MEDICIONES CON TÚNEL DE VIENTO A FAVOR DEL ESTE.	81
FIGURA 5. 14. MEDICIONES CON TÚNEL DE VIENTO A FAVOR DEL OESTE.	81
FIGURA 5. 15. MEDICIONES SIN TÚNEL DE VIENTO PARA EJES NORTE Y SUR.	82
FIGURA 5. 16. MEDICIÓN DEL VIENTO CON EL VIENTO A FAVOR DEL NORTE.	82
FIGURA 5. 17. MEDICIÓN DEL VIENTO CON EL VIENTO A FAVOR DEL SUR.	82
FIGURA 5. 18. MEDICIÓN CON TÚNEL DE VIENTO CERCANO AL NORESTE.	83
FIGURA 5. 19. MEDICIÓN CON TÚNEL DE VIENTO CERCANO AL NOROESTE.	83
FIGURA 5. 20. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD Y ÁNGULO DE VIENTO PARA EL SURESTE.	84
FIGURA 5. 21. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD Y ÁNGULO DE VIENTO PARA EL SUROESTE.	84
FIGURA 5. 22. PRUEBA DE LA Sonda METEOROLÓGICA DE MANERA ESTÁTICA, DATOS (ARRIBA) Y GRÁFICA (ABAJO).	85

Índice de tablas

TABLA 1. 1. TOLERANCIAS PARA LOS SENSORES METEOROLÓGICOS.....	22
TABLA 1. 2. DATOS DE RADIOSONDEO OBTENIDOS DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO, EL DÍA 15 DE ENERO DEL 2018 A LAS 12 UTC (6 AM MÉXICO).....	23
Tabla 2. 1. CATEGORÍA POR LA ALTURA.....	30
TABLA 2. 2. CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA.....	31
TABLA 2. 3. USO CIVIL DE LOS DRONES.....	33
TABLA 2. 4. USO MILITAR DE LOS DRONES.....	34
TABLA 4. 1. LISTA DE COMANDO DE LOS SENSORES.....	48
TABLA 4. 2. MODOS DEL SENSOR BMP180.....	51
TABLA 4. 3. CARACTERÍSTICAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE LOS SENSORES.....	61
TABLA 4. 4. CORRIENTE DE SALIDA DE LOS GPIO.....	61

Objetivos

Construir una sonda meteorológica que se adapte a un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) para capturar información de temperatura, presión atmosférica, humedad relativa y, velocidad y dirección del viento a diferentes alturas; y con ello calcular punto de rocío.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- a) Diseñar y construir una sonda meteorológica con sensores comerciales.
- b) Desarrollar un anemómetro sónico para tomar mediciones de la velocidad y la dirección del viento.
- c) Adaptar la sonda meteorológica a los Vehículos Aéreos No Tripulados.

Justificación

El muestreo en la capa límite del planeta es la clave para realizar un adecuado pronóstico del tiempo, pero muchas veces los sistemas que se utilizan tienen un alto costo, lo que los vuelven casi inaccesibles. Por ello se busca contar con instrumentos de medición a un bajo costo y que obtenga mediciones confiables. Al diseñar una Sonda Meteorológica adaptable para su uso ya sea en un globo cautivo y/o en un VANT tipo Drone utilizando una computadora *Raspberry pi*, ayudaría en la obtención y estudio de los datos de temperatura, humedad, presión barométrica, velocidad y dirección del viento; esto sin presencia de parte mecánicas, ya que éstas pueden influir en el vuelo del Drone. Todo puede estar al alcance de estudiantes, investigadores, institutos o centros especializados en clima y/o meteorología.

Introducción

El tiempo y clima son factores ambientales relacionados que, en menor o mayor grado, influyen en las actividades humanas al aire libre del día a día como la agricultura donde algunas de sus aplicaciones son el saber en qué épocas cultivar y en cuáles no, cómo influye la atmósfera en las cosechas ; en transporte también pueden ser afectado en la conducción ya sea por las temperaturas bajas o altas, la lluvia o el viento, la dispersión de los contaminantes; en la pesca donde se ha demostrado que la presión atmosférica puede afectar de diferente manera el comportamiento de los peces, y el viento es factor importante para la navegación. Bajo estos hechos se busca la manera de explicar y estudiar lo mencionado anteriormente y así nació la Meteorología.

La Meteorología es la ciencia que estudia la física y la química de la baja atmósfera, sobre todo la tropósfera, la cual alcanza una altura de entre 8 Km en los polos y 18 Km en el Ecuador sobre la superficie terrestre. En la actualidad se cuenta con registros que evidencian que civilizaciones antiguas, como los egipcios, babilonios, aztecas y griegos, observaron y estudiaron el comportamiento de los fenómenos meteorológicos como el viento, la lluvia y la

temperatura, y el efecto del movimiento de los astros; para desarrollar métodos con la que les permitieran comprender y predecir cambios en dichos aspectos.

Cuando describimos las condiciones atmosféricas en un momento y lugar determinado estamos hablando de “tiempo”, mientras “clima” hace referencia a las condiciones atmosféricas promedio que se esperan en un lugar durante un período prologando de tiempo, que en el mejor de los casos se requiere de años para hacer el análisis. Para el estudio de lo mencionado se debe lograr un adecuado desarrollo de diferentes tipos de instrumentos de medición confiable para la adquisición de los datos: termómetro que mide temperaturas, higrómetro que mide humedad, barómetro que mide presión, anemómetro y veleta que miden velocidad y dirección del viento respectivamente, pirómetro que mide la radiación solar y ultravioleta, etc.

Una Estación o Sonda Meteorológica es el conjunto de estos instrumentos; las Estaciones Meteorológicas permanecen fijas sobre mástiles a una altura de hasta 10 m mientras las Sondas Meteorológicas se colocan en una base o contenedor de plástico en la parte inferior de un globo hecho de látex de gran flexibilidad y liviano de entre 4 m³ a 6 m³ al cuál se le conoce como globo cautivo y, se llena con helio elevándolo mientras es sostenido por un hilo especial a un malacate eléctrico. Conforme se eleva el globo se obtienen datos de las variables meteorológicas a diferentes alturas. Por lo general son elevados hasta 1 Km sobre la superficie, a esta altura se encuentra la ‘capa limite’ que es la región atmosférica donde se detecta un efecto directo de la interacción del calor, la lluvia, los contaminantes, los rayos ultravioletas, etc., sobre la superficie terrestre. [1]

Tanto la mayoría de los instrumentos usados en las sondas para tomar mediciones atmosféricas como la computación para la captura de datos en tiempo real se han ido desarrollando, en tamaño y eficiencia, a tal grado que contamos con ellos en pequeña escala con un alto nivel de confianza. Los instrumentos de medición pasaron de ser de un tamaño considerable a sensores de un tamaño tan pequeño que caben en un dedo. En la actualidad hay sensores electrónicos pequeños que permiten la medición de diversos factores atmosféricos, pero la manera de medir el viento es mediante instrumentos mecánicos de gran tamaño o con un alto consumo de energía; entre los más comunes hoy día son el anemómetro de copas para medir velocidad y la veleta para la dirección con ayuda de una cruz horizontal que indica los puntos cardinales, pero en los últimos años se ha estado implementando el uso de anemómetros sónicos el cual basa su funcionamiento en ondas ultrasónicas para medir la velocidad y dirección del viento. Miden la velocidad basándose en el tiempo de vuelo (*Time on Flight*) de pulsos sónicos entre un transmisor y un receptor, y la dirección dibujando un vector formado por la suma de los transmisores y receptores ultrasónicos del sistema; al carecer de partes móviles tiene la ventaja que las mediciones no son afectadas por la inercia del mecanismo de copas y su sensibilidad es muy alta.

En tecnología de sistemas computacionales se ha evolucionado de tal forma que antes eran lentas y tan grandes como un cuarto a diferencia de las presentes que son mucho más rápidas y del tamaño de una tarjeta de crédito.

Para el desarrollo de una nueva Sonda Meteorológica tenemos una *Raspberry Pi 3*, una Computadora de Placa Simple (*Single-Board Computer - SBC*) la cual, aparte de su bajo costo, es muy amigable con sus recursos como las cientos de librerías con las que cuenta para creación e implementación de programas en diferentes lenguajes, entradas y salidas de propósito general para sensores y actuadores, una gran variedad de sistemas operativos de acceso libre dependiendo el uso deseado; todo esto sumado con su amplia comunidad que los emplea día a día.

No sólo los globos cautivos son usados con las Sondas Meteorológicas, se está innovando su uso en Vehículos Aéreos no Tripulados tipo ala fija o ala rotatoria de gran tamaño, los cuales están siendo equipados con sensores y actuadores; aunque su uso actual es más enfocado al diagnóstico, estudio y pronóstico de tormentas y huracanes por su capacidad de acercarse a ellos, a diferencia de un globo cautivo. La *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y la Secretaría de la Defensa Nacional de México (SEDENA) son algunas de las instituciones que los emplean.

1. Sistemas de mediciones meteorológicas

1.1. Historia de los instrumentos de medición aplicados a la Meteorología

La meteorología como ciencia y como técnica es tan amplia como diversa. En la actualidad se cuentan con registros que evidencian que civilizaciones antiguas, como los egipcios, babilonios, aztecas y griegos, observaron y estudiaron el comportamiento de los fenómenos meteorológicos como el viento, la lluvia y la temperatura, y el efecto del movimiento de los astros; para desarrollar métodos con la que les permitieran comprender y predecir cambios en dichos aspectos.

El término de “Meteorología” proviene de *Meteorologica*, título del libro escrito alrededor del año 340 a. de C. por *Aristóteles* (384 a.C. a 322 a.C.). En él se presenta un estudio muy amplio de observaciones mixtas y especulaciones sobre el origen de los fenómenos atmosféricos y celestes. Así, “meteorología” se constituyó por las palabras *Meteoros* “alto en el cielo” y *logos* “estudio”. [2]

Con el pasar del tiempo, las pruebas y progresos realizados en el campo meteorológico se centraron en el desarrollo de instrumentos más precisos en la medición de estos fenómenos. [3]

Las mediciones principales de la meteorología son: la temperatura, que se mide en Grados Celsius; la presión atmosférica, que se mide en hectopascales; la humedad relativa, que se mide en porcentaje, y la velocidad y dirección del viento, que se miden en metros sobre segundo y en grados, respectivamente.

Todas las actividades meteorológicas realizadas, a nivel nacional o local, se fundamentan en observaciones del estado de la atmósfera o del tiempo. *La Organización Meteorológica Mundial (OMM)*, formada en 1950 por la *Organización de la Naciones Unidas (ONU)*, tiene el objetivo de asegurar y facilitar la cooperación de diversos servicios meteorológicos, como los *Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales*, organismos nacionales o internacionales especializados en satélites y una gran diversidad de organizaciones y consorcios que se ocupan de observaciones de regiones geográficas y geofísicas, así como las adquisiciones y procesamiento de datos del clima y del tiempo.

En México, el *Sistema Meteorológico Nacional (SMN)* es el organismo oficial encargado de proporcionar boletines sobre el estado del tiempo a una escala nacional y local. Vigilan la atmósfera de manera continua para identificar los fenómenos meteorológicos que pueden afectar las actividades cotidianas. [4]

1.1.1. Temperatura

La temperatura es una de las magnitudes más utilizadas para descubrir el estado de la atmósfera. De hecho, es la que más se menciona en los medios de comunicación. La OMM define a la temperatura como “La magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia”. [5]

El SMN define a la temperatura como “la medida del movimiento molecular. Se mide usando escalas arbitrarias a partir del cero absoluto (-273 °C), donde las moléculas teóricamente dejan de moverse”. [6]

El físico *Galileo Galilei* (1564-1642), para medir la temperatura del ambiente, en 1607 construyó el primer termómetro del que se tiene información, el cual se componía de un tubo de vidrio vertical cerrado por ambos extremos al que se le llenaba de agua, para que se sumergieran varias esferas de vidrio cerradas. Cada esfera contenía una determinada cantidad de aire y líquido coloreado y llevaba en su parte inferior una placa en la que estaba grabado un valor. Estas esferas subían o bajaban, con los cambios de temperatura.

En 1714, el físico *Gabriel Fahrenheit* (1686-1736) comenzó a utilizar mercurio en los termómetros, lo que permitió medir temperaturas superiores, pero se dio cuenta que necesitaba una escala de temperatura. Su primer intento fue con agua salada y después de varias pruebas, determinó usar agua pura, debido a que se congelaba a una temperatura de 32° F y alcanzaba la ebullición a 212°F.

Un cuarto de siglo después, *Anders Celsius* (1701-1744) propuso la escala de 0 a 100, la cual presentó la ventaja de ser más precisa y de fácil lectura. [7]

A principios del siglo XIX, la electricidad, como área de investigación científica, ayudó a dar un gran salto en la medición de la temperatura, ya que, en 1820, *Thomas Johann* (1770-1831) descubrió que se creaba un voltaje cuando las extremidades de 2 metales a distintas temperaturas eran puestas en contacto. Con este nuevo descubrimiento nació el “efecto termoeléctrico”, el cual consiste en la conversión directa de un diferencial de temperatura a voltaje eléctrico y viceversa; este es el principio de funcionamiento de un termopar.

El físico francés *Jean Charles Peltier* (1785-1845) en 1834 nombró el efecto termoeléctrico como “Efecto Peltier”; el cual consistía en hacer pasar una corriente por un circuito compuesto por materiales diferentes, cuyas uniones tenían las mismas temperaturas, este caso se absorbía calor y dependiendo del calor absorbido una unión se separaba indicando la temperatura con base en cálculos matemáticos.

En 1883 se creó y comercializó el primer sensor de temperatura moderno, conocido como termistor.

En el siglo XX comienza el reemplazo de metales por materiales semiconductores, debido a su propiedad de sólo conducir la electricidad generada por la diferencial de temperaturas. El Silicio (Si) y el Germanio (Ge) son los semiconductores más usados. [8]

Con los avances de la tecnología, los semiconductores se desarrollaron en calidad, fiabilidad y tamaño, lo que facilitó el traspaso de calor por el efecto de una corriente continua.

Con el uso de este nuevo material surgieron sensores de temperatura como los termistores, los cuales cambian su resistencia de acuerdo con las variaciones de la temperatura; los sensores infrarrojo, que se basan en la radiación

que emiten las diferentes temperaturas y se calculan mediante ecuaciones programadas; Sensores de fibra óptica, que se componen esencialmente de una tubería que absorbe las longitudes de luz por debajo de su hueco de banda y refleja las superiores que son enviadas a una superficie de silicio y reaccionará dependiendo del calor recibido. [9]

1.1.2. Presión atmosférica

Actualmente, se sabe que el aire que nos rodea, aunque sea imperceptible, pesa y, por ende, ejerce una fuerza sobre todos los cuerpos, debido a la acción de la gravedad. La OMM define a la presión atmosférica como “el peso de una columna de aire, que llega hasta el límite exterior de la atmósfera, sobre una proyección horizontal de la superficie”. [10]

El SMN define a la presión atmosférica como:

La presión (fuerza sobre unidad de superficie) ejercida por la atmósfera en virtud de su peso sobre una superficie dada; es numéricamente igual al peso de una columna vertical de aire, por encima de la sección de unidad de base, que se extiende hasta el límite superior de la atmósfera. [6]

Las bombas de succión-extracción se usaban en el tiempo de los griegos, las cuales consistían en una palanca, un cilindro, un pistón y un caño por el que circulaba el agua; al subir y bajar la palanca se movía el pistón ejerciendo presión sobre el agua y haciéndola subir por el caño.

Los filósofos de la época creían que la causa de este fenómeno era el “miedo al vacío” (en latín *horror vacui*). El principal problema de este mecanismo fue que no se podía extraer agua de los pozos con alturas mayores a 10 m y se pensaba que se debía a que el agua le tenía miedo al vacío que se formaba sobre ella al subir.

Galileo Galilei comenzó a estudiar este fenómeno junto a sus discípulos *Torricelli* y *Viviani*. Los físicos y matemáticos *Evangelista Torricelli* (1608-1647) y *Vincenzo Viviani* (1622-1703) en 1643 inventaron el barómetro, un instrumento para medir la presión atmosférica, el cual era un tubo de vidrio de aproximadamente 850 mm de altura, cerrado por el extremo superior y abierto por el inferior. El tubo se llenaba de mercurio, se invertía y se colocaba el extremo abierto dentro de un recipiente lleno del mismo líquido. Si se destapaba se veía que el mercurio descendía unos centímetros dejando en la parte superior un espacio vacío. Ambos sugirieron que el movimiento del mercurio se debía a la presión de la atmósfera sobre la superficie libre del mercurio del recipiente. [11]

Con este estudio concluyeron que a la altura de 10 m la presión atmosférica y la columna de agua eran iguales, lo que significaba que entraban en equilibrio, lo que provocaba que el líquido no subiera.

El experimento realizado por Torricelli y Viviani atrajo a *Blaise Pascal* (1623-1662), quien comparó la altura de una columna barométrica al pie y en la cima de una montaña, comprobando así que en el primer caso la presión barométrica era mayor que en el segundo; con esto definió el concepto físico de *presión* como la fuerza entre la unidad de superficie.

En 1654 el físico alemán *Otto Von Guericke* (1602-1686) demostró de una manera evidente la existencia y acción de la presión atmosférica uniendo dos hemisferios de cobre por medio de una junta anular y, a través de una válvula, extrajo el aire hasta que quedaron en vacío, con lo que fue imposible separar dichos hemisferios, puesto que al calcular la presión ejercida sobre cada uno de ellos era de 40,000 N sobre una superficie de 0.5 m de diámetro.

En 1849 *Eugene Bourdon* (1808-1884) inventó el manómetro, el cual era un mecanismo que constataba de un tubo en forma semicircular. Uno de sus extremos se encontraba cerrado mientras el otro se encontraba conectado a una fuente de presión, cuando ésta era aplicada en la parte del tubo abierto el mecanismo tendía a enderezarse. Dicho movimiento se vería reflejado en una aguja dando la medición de la presión.

A finales de los 90, la empresa *Honeywell* comenzó el desarrollo de los primeros sensores de tamaño pequeño, formados por dos piezo-resistores y dos capacitores, para crear un desplazamiento de fase con el que se podía medir la presión. Estos elementos estaban realimentados y conectados a un inversor para crear una oscilación y así la frecuencia de salida era directamente proporcional a la constante de tiempo y por ende a la presión.

En las últimas décadas, con la llegada de la tecnología digital, se desarrollaron una enorme variedad de equipos y sensores para medir la presión. Éstos se constituyen por un elemento primario, que está en contacto con el proceso de cambio de presión, y por un elemento secundario, que tendrá la tarea de traducir los cambios de valores analógicos a digitales. En esta medición se utilizan varias técnicas para la conversión mecánica de la presión a una señal digital, las cuales son:

1. Piezo-eléctrico: Esta técnica usa un cristal que produce un voltaje diferencial proporcional a la presión aplicada en sus caras, las cuales pueden ser de titanio de bario, cuarzo, turmalina o sal de Rochelle. Este último material acumula cargas eléctricas en ciertas zonas cuando sufren una deformidad física, por ejemplo, cuando se le ejerce alguna presión.
2. Piezo-resistivo o *Strain Gage*: La mayoría de los sensores que usan esta técnica son formados por elementos cristalinos conectados en configuración de puente Wheatstone que, junto con otros resistores ajustan, el cero de la medición, la sensibilidad y la compensación de temperatura. Lo que se mide es la deformidad/contracción que tiene una resistencia eléctrica como resultado de una presión aplicada.

3. Capacitancia variable: Usan transductores y un diafragma central donde al ejercerles una presión variará el valor de la capacitancia de este dispositivo y, con ello, el diafragma central interno resonará, provocando una oscilación que puede ser medida directamente por un CPU y convertirla en una medida digital de presión.

Esta última es la técnica más usada en los sensores actuales por su alta confiabilidad. [12]

1.1.3. Humedad relativa

El agua es uno de los principales componentes de la atmósfera, puede existir como gas, líquido o sólido. La presencia del agua en estos diferentes estados se debe a las condiciones de temperatura y presión necesarias para que se produzcan estos cambios de estado. Para medir esto la meteorología utiliza la *humedad relativa*. Su instrumento de medición es el higrómetro

La OMM define a la humedad relativa como la “relación porcentual a una presión y temperaturas dadas entre el peso molecular en gramos del vapor de agua y el peso molecular en gramos en el aire tendría si estuviese saturado de agua a la misma presión y temperatura”. [13]

El SMN define a la humedad relativa como:

La relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y el máximo que puede contener a una cierta temperatura y se expresa en porcentaje de saturación. Es la relación entre la tensión de vapor que de hecho existe, expresada en % y la máxima que puede existir a una temperatura dada. [6]

Los higrómetros se desarrollaron paralelamente a los termómetros y barómetros durante el siglo XVII. Los primeros modelos fueron implementados por el matemático alemán *Nicolás de Cusa* (1401-1464) los cuales usaban la absorción de la lana.

El científico inglés *Robert Hooke* (1635-1703) construyó un higrómetro durante el siglo XVII basado en una tripa de gato y una barba de cabra montés, ya que éstos eran sensibles al cambio de humedad. Su estudio durante mes y medio en diversas ciudades con diferentes condiciones permitió el cálculo de la humedad.

Charles le Roy (1651-1716) definió el punto de rocío o grado de saturación como la temperatura a la que hay que enfriar una masa de aire para producir condensación, sin variar su contenido de vapor.

En 1770, *Jean Deluc* (1727-1817) desarrolló un higrómetro basado en un pequeño cilindro de marfil, el cual expulsaba una parte mesurable de mercurio hacia un tubo termométrico en su base, aunque el diseño final usó barbas de ballena con elemento sensible a la humedad.

Horace Benedict de Saussure (1740-1799) sustituyó la barba de ballena en el modelo de Jean Deluc por cabello humano desgrasado, con este nuevo material de sensibilidad comprendió que el aire húmedo es más ligero.

En 1853, el físico francés *Auguste Bravais* (1811-1863) inventó el sensor de humedad, al que llamó “psicómetro giratorio”, que se componía por un termómetro de un bulbo seco y un bulbo húmedo montados sobre un brazo. Los bulbos giraban sobre el brazo con la finalidad de detectar humedad mediante el movimiento producido. La humedad era calculada por una ecuación con base en diferentes lecturas de los dos bulbos.

La empresa finlandesa *Vaisala* desarrolló la patente de un sensor de humedad en 1973. Se trataba de una película de polímero sensible a la presencia de vapor, la cual cambia sus características de capacitancia eléctrica como respuesta a las fluctuaciones que provoca la humedad en la atmósfera.

Desde entonces la tecnología ha avanzado en diferentes campos y ha generado un amplio rango de sensores de humedad, entre ellos:

1. Cloruro de litio saturado: En éste, la sal es usada como material sensible ante la presencia de humedad.
2. Cambio de color: Un material, como el cloruro de cobalto, cambia de color en relación con el agua que la atmósfera contenga.
3. Expansiones adiabáticas: Detecta el punto de rocío cuando el aire es tan frío que produce niebla.
4. Acústico: Detecta las alteraciones en la transmisión del sonido en el aire como una reflexión en un ambiente húmedo. [14]

1.1.4. Viento

El viento es el movimiento del aire de un lugar a otro a causa de una existente diferencia de presión y/o temperatura. En la primera situación, cuando en dos zonas la presión del aire es distinta el movimiento del viento tiende a ser de la zona con mayor presión a la de menor presión.

En el caso de la diferencia térmica, el viento se da cuando una masa de aire adquiere una temperatura superior a la del entorno, aumentando su volumen, lo que, a su vez, la hace menos densa para ascender, dejando lugar para nuevas masas de aire, lo que provoca desplazamientos o viento. [15]

El SMN define al viento como “aire en movimiento con relación a la superficie de la Tierra, en caso de no haber especificaciones, casi exclusivamente usado para denotar la componente horizontal” [6]. Para medir la velocidad del viento se usa un anemómetro.

El primer anemómetro, del cual se tiene registro, fue obra del arquitecto italiano *León Batista Alberti* (1404-1472) en 1450 y consistía en un disco de metal con un péndulo que se movía a merced del viento y, al mismo tiempo, marcaba, en una escala graduada, la intensidad del viento según la inclinación del disco.

Este anemómetro sería rediseñado por el inventor *Leonardo Da Vinci* (1452-1519) en 1485 cambiando el disco y añadiendo una pieza de madera en el que figuraba la escala del viento lo cual lo hizo más preciso, ya que en cuanto más fuerte era el viento la escala de madera arqueaba más.

Robert Hooke (1635-1703), en 1664, desarrolló la ecuación que lleva su nombre, la “ley de Hooke”, que plantea la deformación elástica que sufre un cuerpo y es proporcional a la fuerza que produce tal deformación, siempre y cuando no se sobrepase el límite de elasticidad, siendo éste el principio que rigen los anemómetros que se inventarían más adelante.

En 1775 el médico escocés *James Lind* (1716-1794) inventó el anemómetro de tubo. Su funcionamiento estaba basado en un vidrio en forma de “U”, el cual se llenaba de un líquido. Un extremo del tubo se encontraba abierto en posición horizontal y el otro en vertical completamente cerrado. A medida que el viento entraba en el extremo abierto provocaba una presión que hacía que el nivel de agua aumentara o disminuyera. Este cambio indicaba la medida de la velocidad del viento. [16]

Un anemómetro más avanzado fue diseñado e inventado por *John Thomas Romney Robinson* (1792-1882) en 1846, en el que se usaban cuatro copas unidas a un eje central, innovando los diseños anteriores. Este instrumento logró una medición más exacta, ya que giraba con velocidades más bajas. El número de revoluciones de la barra giratoria en un periodo determinado de tiempo arrojaba la velocidad del viento, y se indicaba en un dial conectado a una varilla.

En 1926, el meteorólogo canadiense *John Patterson* (1872-1956) desarrolló un anemómetro con 3 cazoletas, separadas entre sí cada 120°. Dicho anemómetro se usa actualmente debido a su gran precisión que le permitió medir hasta 2.7 m/s (100Km/h).

Los anemómetros sónicos fueron desarrollados a partir de 1970. Su función, se basa en ondas de ultrasonidos para medir la velocidad y dirección del viento. Miden la velocidad basándose en el tiempo de vuelo (*Time on Flight*) de pulsos sónicos entre un transmisor y un receptor. Al carecer de partes móviles, se usan para mediciones de largo plazo en estaciones meteorológicas, sumándole la ventaja que las mediciones no son afectadas por la inercia del mecanismo de copas y su sensibilidad es muy alta. [17]

1.2. Diferencia entre mediciones en superficie y en altura

La OMM define al clima como “Síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo de los elementos meteorológicos en dicho lugar”.

De igual manera la OMM define al tiempo como el “estado de la atmosfera en un instante dado, definido por los diversos elementos meteorológicos”.

Las mediciones atmosféricas se dividen en superficie y altura:

1.2.1. Superficie

Para el estudio a nivel de superficie se utilizan estaciones meteorológicas que observan diversos fenómenos atmosféricos, como la temperatura (del aire como mínima y máxima), la humedad relativa, precipitaciones, la presión atmosférica y la velocidad y dirección del viento, principalmente. [18]

Es conveniente disponer de una gran cantidad de estas estaciones en cada país por la gran diversidad de zonas climáticas clave y zonas vulnerables. En México se cuentan con 5500 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el país. [19]

Deben cumplir ciertas características emitidas por la OMM:

1. La zona donde se encuentren ubicadas deberá tener un área de entre $70 m^2$ a $100 m^2$;
2. Deberán ser puestas en un mástil con una altura de 10 a 15 m;
3. El pasto deberá ser corto;
4. No deben existir pozos ni inclinaciones en el terreno;
5. Debe estar alejada de edificios y/o arboles altos.

En la meteorología sinóptica se realizan observaciones en horas fijas del día: 03:00 - 09:00 – 15:00 – 21:00 UTC (hora del meridiano de *Greenwich*). Estas observaciones se realizan en tiempo real, para su uso inmediato y especialmente, para la elaboración de mapas meteorológicos que permiten diagnosticar y formular las condiciones del tiempo, en beneficio de diferentes actividades como la agricultura y el transporte, por ejemplo.

En la meteorología climatológica se estudia el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizadas por los estados y las evaluaciones del tiempo en una porción del espacio. Estas observaciones son poco diferentes de las sinópticas en su contenido y se realizan también en horas fijas, tres o cuatro veces al día (por lo menos) y se complementan con registros continuos diarios o semanales.

En agricultura se realizan observaciones para la obtención de datos cuantitativos para las actividades de planificación, predicción e investigación agrometeorológicas y para ayudar a los agricultores y hacer frente a la creciente demanda mundial de alimentos y de productos secundarios agrícolas. [20]

La torre de control realiza observaciones a diferentes alturas para saber las condiciones atmosféricas, la dirección y velocidad del viento, la visibilidad, la altura de las nubes, el reglaje altímetro, etc., para seguridad durante el despegue, el vuelo y aterrizaje de los aviones. La información obtenida es mostrada en un reporte llamado "METAR". [21]

Asimismo, se requiere realizar una lectura sobre la precipitación, ya que, según la altura en la que se encuentre, se puede predecir una lluvia, llovizna, aguanieve, nieve o granizo.

Todo lo anterior, sucede en la superficie terrestre y sólo nos aporta una pequeña visión de la situación atmosférica que se está produciendo en dicho nivel. Para completar el análisis de la atmósfera, son necesarios datos en la vertical; para esto se utilizan principalmente satélites y globos meteorológicos cautivos.

1.2.2. Altura

El comportamiento de la atmósfera, también se observa mediante satélites, pero presenta ciertas desventajas. Una de ellas es la resolución de las imágenes, ya que se encuentra limitada por la presencia de nubes, las cuales impiden tomar información debajo de ellas. Para superar esta limitante, se usan globos meteorológicos.

Se usan estaciones meteorológicas montadas sobre globos para elevarlos hasta una altura de 16 Km sobre la superficie. La OMM considera que deben ser 2 lanzamientos por día, en los cuales se registran perfiles verticales de la atmósfera, obteniéndose, así, información esencial para obtener el panorama general del estado actual y futuro. Alrededor del mundo se cuenta con una red de hasta 1,300 estaciones de radiosondeo, que ofrecen información mediante modelos de predicción numérica del tiempo a escala local, regional o mundial, cuyas predicciones van desde unas horas hasta varios días. [22]

Las mediciones de alta resolución de la estructura vertical de la troposfera son importantes para el estudio de contaminación ambiental y en la predicción de efectos de la refracción atmosférica sobre la propagación de la radiación electromagnética o de las ondas sonoras. La aviación y lanzamiento de vehículos espaciales tienen las necesidades operativas de mediciones de la densidad del aire a determinadas presiones.

Continuando con los ejemplos, se tiene que la actividad diaria de la ciudad genera una gran cantidad de sustancias que modifican la composición natural del aire como el monóxido de carbono (CO_2), el dióxido de azufre (SO_2), óxido de nitrógeno (NO_x), plomo y ozono. Dichas sustancias, son arrojadas a la atmósfera por la

quema de combustibles fósiles para el transporte y la generación de energía. Las variaciones del tiempo influyen sobre la dispersión de estos contaminantes por lo que es necesario conocer la dirección del viento, la diferencia de presiones a diferentes alturas y la temperatura, que pueden expandir los gases. [23]

1.3. ¿Qué es una radiosonda y un globo cautivo?

1.3.1. Radiosonda

Una radiosonda es definida por la Organización Meteorológica Mundial como:

Instrumento destinado al transporte por globo con dispositivo sensible a una o más variables meteorológicas (presión, temperatura, humedad, etc.) equipado con un transmisor de radio para enviar a la estación de observación los datos obtenidos durante su ascenso a través de la atmósfera. [24]

El diseño básico de una radiosonda comprende normalmente de cuatro partes principales:

1. Los sensores y referencias;
2. Transductores electrónicos que convierte las salidas de los sensores en señales digitales;
3. Baterías;
4. Un transmisor.

En muchas ocasiones es necesario disponer de señales de referencia para compensar la inestabilidad de la conversión entre la salida del sensor y las señales de telemetría transmitidas, por eso se necesita un método de conmutación entre los sensores, que actualmente, se pueden obtener mediciones en valores de milisegundos por cada uno. Lo cual permite muestrear todas las variables meteorológicas en intervalos de 1 a 2 segundos.

Las baterías deben tener la capacidad suficiente de alimentar la radiosonda durante el ascenso y ser los más ligeras posibles; las opciones más adecuadas, son baterías de Litio-Polímero (LiPo) debido a que son ligeras, tienen una gran capacidad de almacenamiento y su tasa de descarga es alta para alimentar sistemas electrónicos exigentes.

En cuanto al envío de información, existen varios modelos de transmisores que oscilan las frecuencias entre 400MHz y los 1,680MHz controlados por un cristal, una potencia de entre 250mW y 330mW para asegurar la estabilidad durante el sondeo y que la comunicación sea punto a punto, es decir, un enlace inalámbrico exclusivo entre la radiosonda en aire y una computadora en tierra. [25]

En la tabla 1.1 se encuentran los intervalos de funcionamiento y medición para cada sensor.

Sensor	Rango de mediciones	Resolución
Temperatura	-20 a +50 °C	±1° C
Presión	1050 a 850 hPa	±0.5 hPa
Humedad	3 a 100%	±2 %
Velocidad del viento	0.5 a 15 m/s	±0.5 m/s
Dirección del viento	0° a 360°	±1°

Tabla 1. 1 Tolerancias para los sensores meteorológicos.

Cuadro basado en la OMM. Guía de sistemas meteorológicos de observación y distribución de información para los servicios meteorológicos aeronáuticos, capítulo 12. 2014

1.3.2. Globo cautivo

Los globos cautivos son instrumentos que figuran las mediciones de los perfiles de temperatura, de humedad y de viento (y sus cambios a corto plazo) desde la superficie hasta una altura de 1,000 m sobre la misma sujetos a tierra por un cable de sujeción. Los sensores se encuentran colgados en un cesto debajo del globo o fijados al cable de sujeción del globo. Las respuestas de los sensores se transmiten a tierra por radio.

Hay dos categorías de globos utilizados en meteorología:

1. Los globos pilotos: Se utilizan para medir la velocidad y dirección del viento, y la altura base de las nubes. Son casi esféricos y de ellos se requiere que, además de alcanzar grandes alturas, mantengan su forma mientras ascienden.
2. Los globos meteorológicos: son utilizados para el transporte de instrumentos o sensores que muestrean y observan los fenómenos atmosféricos: éstos se encuentran anclados en la tierra y mediante un cable de sujeción se elevan. También se les conoce como globos de radiosondeo cautivos o sólo globos cautivos.

Los mejores materiales para estos globos extensibles son el látex de caucho natural, de alta calidad y el látex sintético a base de poli cloropreno. Los globos son inflados por helio y su tamaño puede variar. Los globos pequeños tienen un volumen de entre 10 m^3 a 100 m^3 , mientras que los globos grandes alcanzan un volumen de hasta 600 m^3 .

Los pequeños pueden soportar cargas de entre 200 gr y 1 Kg, se utilizan para la obtención de perfiles verticales, mientras que los globos grandes pueden transportar cargas de hasta 50 Kg y se emplean para obtener mediciones a cada número determinado de metros de altura. Estos globos ofrecen poca resistencia de arrastre y un avance constante. El cable que sujeta al globo durante el ascenso es controlado mediante un torno mecánico o electrónico, cuya velocidad para desenrollar es de 1 m/s o 2 m/s, además de estar equipado con un freno de mano, un contador de longitud, un medidor de tensión y debe estar aterrizado a tierra física para protegerlo de descargas atmosféricas. [26]

1.4. Sistemas de despliegue de información meteorológica

Los datos meteorológicos obtenidos deben ser mostrados después de su adquisición de alguna manera. Existen diversos modelos, como textos, gráficos o mapas. En la página de la *Universidad de Wyoming* se pueden observar estos modelos. [27]

Un ejemplo de lo mencionado anteriormente se muestra en la tabla 1.2, el cual es un archivo de texto sin formato, donde se presentan diversos datos como Presión (PRES), Altura (HGHT), temperatura (TEMP), Punto de rocío (DWPT), humedad relativa (RELH), ratio de mezcla (MIXR), dirección del viento (DRCT), velocidad del viento (SKNT), temperatura potencial (THTA), temperatura potencial equivalente (THTE) y temperatura potencial virtual (THTV)..

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1000.0	227									
925.0	885									
850.0	1588									
778.0	2313	4.0	0.9	80	5.28	195	2	297.8	313.6	298.7
777.0	2323	4.6	-4.4	52	3.57	193	2	298.5	309.5	299.2
769.0	2407	3.9	-2.1	65	4.29	180	3	298.6	311.7	299.4
762.0	2481	3.2	0.0	80	5.05	212	3	298.7	313.9	299.6
750.0	2609	3.6	-1.3	70	4.66	268	3	300.5	314.7	301.3
747.0	2641	4.4	-4.6	52	3.66	282	3	301.7	313.1	302.3
741.0	2707	5.2	-6.0	44	3.32	310	3	303.2	313.7	303.9
728.0	2851	7.0	-9.0	31	2.67	340	3	306.8	315.4	307.2
715.0	2998	6.0	-14.4	22	1.77	10	2	307.2	313.0	307.5
713.0	3020	5.8	-15.2	20	1.65	19	2	307.3	312.8	307.6
700.0	3170	6.6	-27.4	7	0.58	80	4	309.8	311.8	309.9
699.0	3182	6.6	-28.4	6	0.53	82	4	309.9	311.8	310.0
689.0	3298	5.9	-29.0	6	0.51	100	3	310.4	312.2	310.5
640.0	3893	2.2	-31.9	6	0.42	110	8	312.8	314.3	312.9
594.0	4494	-1.6	-34.9	6	0.33	50	4	315.2	316.4	315.2
576.0	4742	-3.1	-36.1	6	0.31	357	6	316.1	317.3	316.2
572.0	4797	-3.2	-37.1	5	0.28	345	6	316.6	317.7	316.7
558.0	4993	-3.7	-40.7	4	0.20	299	5	318.3	319.1	318.4
551.0	5092	-4.5	-40.0	4	0.22	275	5	318.6	319.4	318.6
510.0	5695	-9.1	-35.5	10	0.37	270	12	320.1	321.4	320.1
500.0	5850	-10.3	-34.3	12	0.42	275	13	320.4	322.0	320.5

Tabla 1. 2. Datos de radiosondeo obtenidos del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, el día 15 de enero del 2018 a las 12 UTC (6 AM México).

Una manera gráfica de generar un radiosondeo vertical tomando en cuenta datos obtenidos como los mostrados en la tabla 1.2, a estas gráficas se les conoce como termogramas y en ellos se tienen lecturas de variables, como el viento y la presión en el eje vertical, y la temperatura ambiente y punto de rocío en el eje horizontal. Dicho diagrama se observa en la figura 1.1 donde se muestran datos atmosféricos como humedad relativa, estabilidad atmosférica, cizalladura vertical del viento, tiempo severo y potencial de inundaciones repentinas en la región de sondeo. Generalmente se efectúan 2 mediciones al día, a las 0Z y 12Z (6 y 18 horas centro de México).

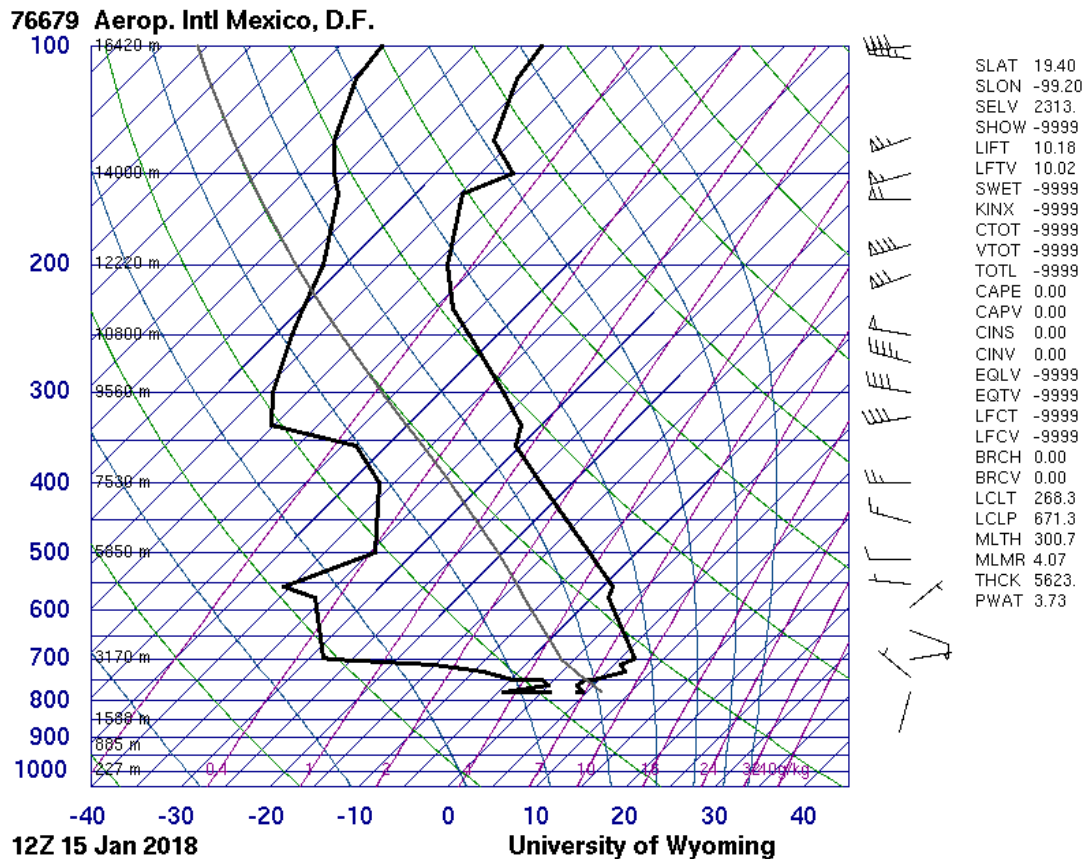


Figura 1. 1. Perfil vertical Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, el día 15 de enero del 2018 a las 12 UTC (6 AM México).

Los datos obtenidos por las observaciones meteorológicas en superficie y altura se reflejan en modelos para la predicción del tiempo y del clima. El factor caótico de la atmósfera hace que la fiabilidad en los modelos de predicción disminuya con el pasar del tiempo hasta un 60%; por debajo de este porcentaje se suele considerar que la predicción deja de ser útil. Para que una predicción sea útil debe aportar valores constantes. Actualmente se pueden predecir el tiempo de hasta 5 días. El *Weather Research and Forecasting (WRF)* está diseñado para investigar la temática de la atmósfera con la finalidad, entre otras, de resolver las necesidades del pronóstico del tiempo, usando simulaciones con datos reales o ideales como el que se muestra en la figura 1.2. Los resultados son utilizados en los diferentes aeropuertos internacionales para suplir la previsión del tiempo. [28]

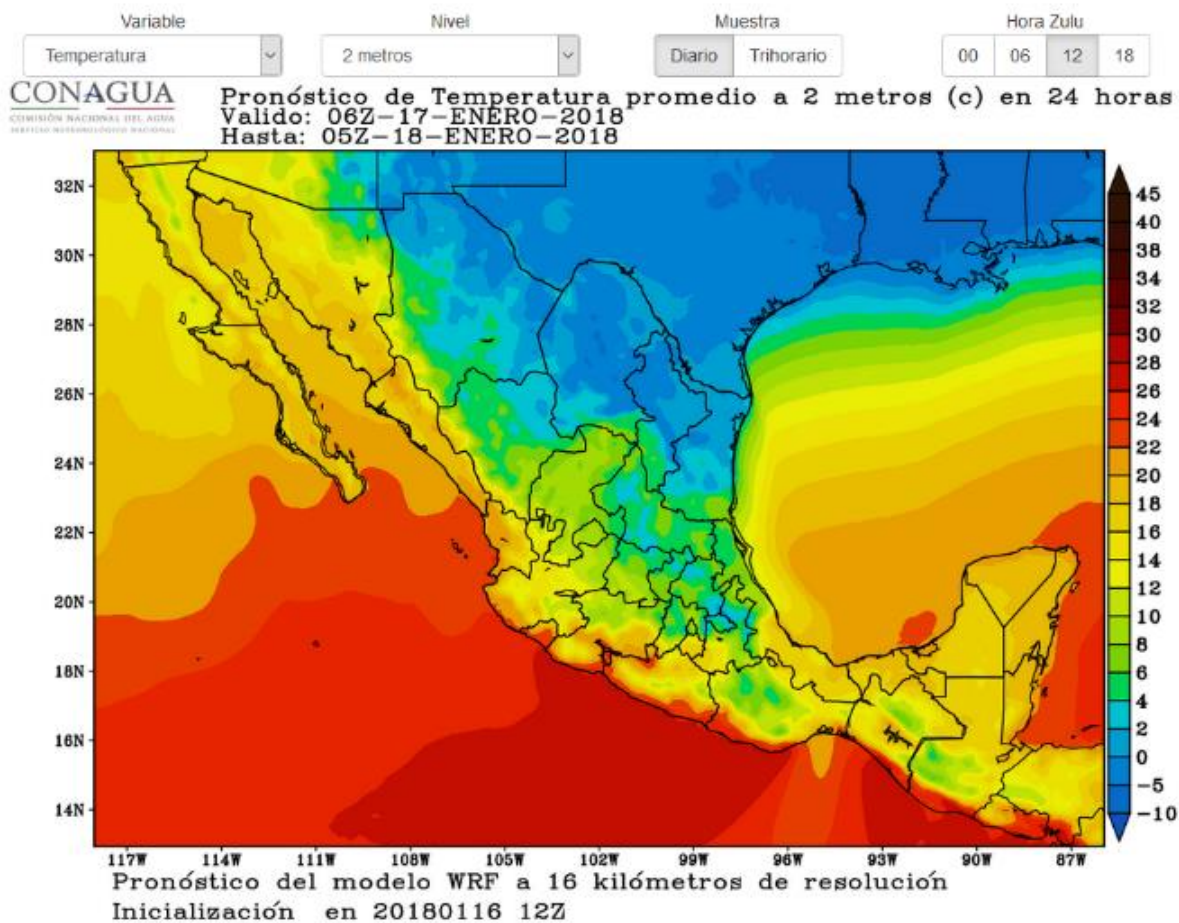


Figura 1. 2. Pronostico del clima a nivel nacional el día 16 de enero del 2018 a las 6 UTC (6 AM México).

2. Vehículos Aéreos no Tripulados y sus aplicaciones

2.1. ¿Qué es un VANT y un Drone?

En los últimos años la tecnología en el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) ha aumentado a nivel militar y civil por su amplio potencial en distintas áreas como en la fotografía, en la arquitectura, en la meteorología, etc. Estos vehículos carecen de un piloto en su interior, por lo que es dirigido de manera autónoma por sistemas electrónicos programados o por radiocontrol con un piloto en tierra. [29]

El primer registro que se tienen de un VANT fue de uso bélico por los austriacos en julio de 1849, ya que usaron aproximadamente 200 globos aerostáticos no tripulados cargados de bombas, los cuales sobrevolaron la ciudad de Venecia donde dicho arsenal fue soltado. Los Estados Unidos (EE. UU.) al saber de esta acción comprendieron las ventajas de dichos aparatos voladores no tripulados para el cumplimiento de sus objetivos; durante su *Guerra Civil*, en 1898, montaron cámaras sobre cometas con fines de vigilancia, lo cual inició las primeras fotografías de reconocimiento aéreo. En ese mismo año, el inventor e ingeniero mecánico eléctrico *Nikola Tesla* (1856-1943) presenta el primer radio a control remoto de la historia, invento que revolucionó el uso de los VANT.

En 1907, los hermanos *Louis* (1880 - 1955) y *Jacques Breguet* (1881-1939) construyeron el *Gyroplane No.1*, una máquina con un chasis rectangular y 4 brazos, uno en cada esquina, donde al final de estas se ubicada una hélice en posición vertical. Logro despegar hasta una altura de 62 cm, pero no se mantuvo suspendida por mucho tiempo, también se tenía que controlar desde el piso con cuerdas. Este fue el primer cuadricóptero con que se cuenta un registro. [30]

En 1915, los estadounidenses *Elmer Sperry* (1860-1930) y *Peter Cooper Hewitt* (1861-1921) construyeron un avión no tripulado que voló con éxito gracias al uso de giroscopios. También en este año el ejército británico usó el reconocimiento aéreo para obtener ventaja en la batalla de *Neuve Chapelle* donde fueron capaces de capturar más de 1500 fotografías de la fortaleza alemana.

Los Estados Unidos comenzaron el desarrollo de la tecnología de los VANT durante la Primera Guerra Mundial. En 1918 construyeron el *Kettering Bug*, un torpedo aéreo no tripulado que era capaz de recorrer 121 Km desde el punto de partida. El primer VANT usado para transportar armamento de ataque de un continente a otro fue un globo japonés de gran tamaño llamado "*Fu-Go*" que, durante la Segunda Guerra Mundial en 1945, voló a los estados del norte de los EE. UU. para causar daño sobre la población y bosques de la zona.

En 1920, *Etienne Oehmichen* (1884-1955) construyó el *Oehmichen No. 2*, un cuadricóptero similar al de los hermanos Louis y Jacques Breguet, pero este nuevo diseño podía llevar consigo un hombre como piloto. Dicho inventó logro recorrer una longitud de 1km en una trayectoria circular y mantenerse en vuelo en el mismo punto por 17 minutos con 40 segundos.

Reginald Denny (1891-1967) creó el *Radioplane QQ-2* en 1952, el primer VANT militar controlado por radiocontrol que fue fabricado en masa cuya finalidad fue usarlos como blanco en las prácticas de combate aéreo.

En 1973, Israel desarrolló el “Mastiff” y el “IAA Scout”, VANT cuyas tareas eran la vigilancia y exploración del entorno de este país, y en 1982 su ejército usó VANT de manera bélica contra la fuerza aérea de Siria.

En la década de los 70s, con la Guerra fría, comenzó el desarrollo de las comunicaciones y mejores cámaras para los VANT para corto y largo alcance; ya que las misiones de reconocimiento y vigilancia eran realizadas a una gran altura para no ser detectados por el enemigo.

En 1989, en Japón se inventó el *Gyrosaucer 1*, que es considerado el primero de los VANT tipo cuadricóptero moderno por su tamaño pequeño, el uso de giroscopios mecánicos para su estabilidad, la implementación de motores pequeños para girar las hélices y el uso de control remoto portátil para su manejo. Su tiempo de vuelo era de 3 minutos. [31]

En el 2000, la empresa *Draganflyer* fabricó el primer VANT con un sistema multirotor, el cual fue el *X-8*, un sistema con 8 rotores y sus hélices. Capaz de cargar una cámara de hasta 1 Kg usada para investigaciones con fotografía. [32]

En 2013, la empresa china *DJI* revolucionó el mercado del consumo de Drones. Presentó el *Phantom 1*, el primero de una serie de drones cuadricópteros con funciones avanzadas de GPS, la capacidad de montarle una cámara *GoPro* o similar mejorando notablemente la calidad de la fotografía aérea, una gran estabilidad aérea y un tiempo de vuelo de hasta 25 mins.

En la actualidad, los VANT militares son utilizados para vigilancia de ciudades y fronteras, como el de ala fija *MQ-9 Reaper* que es el VANT más avanzado del momento. Esto ha ocasionado un debate social con diferentes perspectivas a nivel mundial sobre seguridad, ética y guerra. [31]

Como hemos observado, los VANT pueden ser globos, multirotores y aviones que actualmente cuentan con una cámara y pueden ser pilotados autónomamente o mediante un control remoto. En la actualidad los VANT multirotores se han hecho popular entre la población civil mundial, a los que se les han bautizado como Drone.

El término *Drone*, que en español significa “zumbido”, proviene por el sonido que producen sus hélices durante el vuelo, similar al producido por un zángano (macho de la abeja reina). Según Helen Pike (2013) un *drone* es:

“(…) casi todo lo que este en el aire sin un piloto, un globo con un termómetro, un Multicoptero con una cámara GoPro o un avión militar portador de misiles. Son “vehículos” que pueden adoptar diferentes

formas, y que, dependiendo del modelo, pueden ser dirigidos por control remoto o incluso volar de forma autónoma a través del GPS.” [33]

Los principales componentes de un Drone son:

1. Motores y hélices: Son la parte mecánica del Drone para que se pueda mantener en el aire. Dentro de este sistema se tiene un componente de control electrónico de velocidad (*Electronic Speed Control*) el cuál regula la potencia y velocidad de los motores.
2. Control de vuelo: Es quien controla todos los componentes del Drone, es el cerebro del sistema.
3. Control remoto: Es un mando con 2 *joysticks* (palanca de mando) con la que se controla el movimiento y la altura del Drone. Debe ser de una comunicación bidireccional ya que el piloto en tierra manda las instrucciones al Drone y este debe regresar una respuesta sobre su estado actual de vuelo.
4. Baterías: Alimenta la tarjeta de control de vuelo, los sensores y los motores. Los drones actuales usan baterías de Polímero-Litio (LiPo), ideales por su bajo peso y una gran eficiencia.
5. Sensores: Muchos drones usan una variedad de sensores para complementar lo que se llama “estado de estimación” (*state estimation*). Existen sensores de chips microeletromecánicos (MEMS) para medir la aceleración y rotación, otros para medir las distancias de los obstáculos que se podría encontrar el Drone durante el vuelo. Otros sensores que usan son el Giroscopio que se encarga junto con el estabilizador de mantener el Drone nivelado; el GPS que sitúa geográficamente al Drone, el barómetro que mide las variaciones de altura dependiendo de la presión atmosférica en la que se encuentra; el acelerómetro que mide la velocidad o aceleración del drone; y la brújula que orienta al drone.
6. *Gimbal*: Es la estructura donde se instala la cámara junto con un estabilizador, neutraliza las vibraciones que recibirá la cámara generadas durante el vuelo y así las imágenes tomadas no se ven afectadas.
7. Chasis: Es la estructura que le da forma al drone. Aquí es donde se encuentran los motores, sensores, baterías, etc. Los materiales usados pueden ser aluminio, fibra de carbono, fibra de vidrio, etc. [35]

Actualmente se cuenta con un gran número de drones en el mercado, siendo *Syma*, *Hubsan*, *Parrot* y *DJI* de los más conocidos.

Los drones pueden categorizarse por:

1. El tipo de ala que poseen para su vuelo;
2. por la altitud que pueden alcanzar y;
3. por su peso y uso.

1. La clasificación por ala se divide en ala fija, ala rotatoria e híbridos:

1.1. Ala fija: Su despegue es de manera horizontal. Puede abarcar grandes extensiones de terreno gracias a su gran autonomía de batería, ya que su diseño está hecho para que planeen durante su vuelo usando la batería en las cámaras, sensores y un pequeño rotor que se usa sólo para pequeños impulsos por si se busca altura. Existen 4 tipos de ala fija:

- a. Ala alta que son drones con el ala ubicada en la parte superior del fuselaje lo que genera una gran estabilidad;
- b. Ala media donde el ala se encuentra en la parte media del fuselaje, mantiene un equilibrio entre estabilidad y maniobrabilidad;
- c. Ala baja donde los drones tienen el ala ubicada en la parte inferior del fuselaje aportando más a la maniobrabilidad; y
- d. Ala volante, en este último tipo de ala se conforma casi completamente de un fuselaje, posee una baja resistencia al viento y una gran maniobrabilidad.

1.2. Ala rotatoria: Este tipo de ala es la más usada actualmente con un 76% del total de drones en existencia. Su despegue es de manera vertical. Proporciona una gran versatilidad y eficiencia ya que su control es amigable para el usuario. Es estable gracias a que los motores se encuentran a la misma distancia del centro de gravedad. Se clasifican dependiendo del número de rotores que posee: tricóptero (tres rotores), cuadricópteros (cuatro rotores), hexacópteros (6 rotores) y octacópteros (8 rotores). La desventaja que poseen es la autonomía; entre más rotores posea el vehículo, el consumo de la batería será mayor y, por ende, el tiempo de vuelo disminuirá. Ejemplo de estas configuraciones de rotores se muestran en la figura 2.1.

1.3. Híbridos: Este tipo son capaces de despegar y aterrizar de forma vertical como los drones de ala rotatoria, y tener vuelos a alta velocidad como un ala fija. Estos drones poseen un mecanismo de sustentación compleja que los vuelve pesados, por esto su oferta en el mercado mundial es menor a diferencia de los 2 anteriormente mencionados. [34]

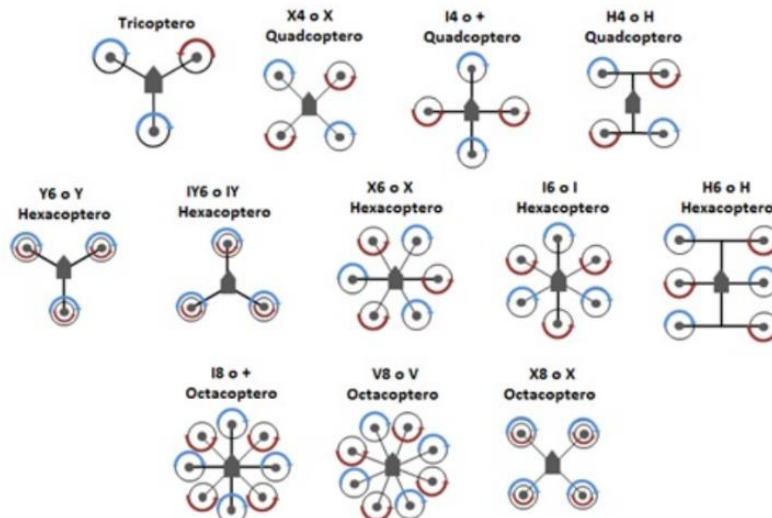


Figura 2. 1. Configuración de multirotores.

2. Otro tipo de categoría se muestra en la tabla 2.1, la cual es dependiendo de la altitud que pueden alcanzar durante el vuelo.

Nombre	Altitud	Duración de vuelo	Usos
Gran altitud	Por encima de los 18 Km (por encima de la Clase A del espacio aéreo)	Días/Semanas	Vigilancia, recopilación de datos, Retransmisión de señal
Media altitud	De 5 Km a 18 Km (Clase A del espacio aéreo)	Días/Semanas	Vigilancia, transporte de carga
Baja altitud	De 300 m a 5 Km (Clase E del espacio aéreo)	Más de 2 días	Vigilancia, retransmisión de señal
Muy baja altitud	Por debajo de los 300 m	Pocas horas	Reconocimiento, Vigilancia, Recopilación de datos

Tabla 2. 1. Categoría por la altura.

Fuente: “Drones militares, la guerra de videojuegos con victimas reales” informe núm. 23 pág. 9. (2014).

La tercera clasificación se describe en la sección 2.2 (Uso legal del dron), ya que al hablar de peso y uso en México interviene el reglamento emitido por la *Secretaria de Comunicaciones y Transporte*.

2.2. Uso legal del dron

Tareas de vigilancia y mapeo se vuelven más fáciles y precisas con el uso de drones, pero también debe contemplarse que puede ser usado con malas intenciones como espionaje y transporte de drogas o algunas armas ligeras, también su mal uso podía afectar patrimonios de terceros, provocar accidentes en la red eléctrica o interferir en zonas de operación de aeropuertos.

La *Organización General de Aviación Civil Internacional* tipifica a las aeronaves no tripuladas (*Unmanned Aircraft – UA*) como: Aeromodelos, Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA) y aeronaves autónomas, existiendo a su vez la combinación de estas. [36]

En México la *Dirección General de Aeronáutica Civil* (DGAC) de la *Secretaría de Comunicaciones y Transporte* emitió un comunicado el 25 de Julio de 2017 donde informa de manera detallada sobre el procedimiento en que debe ser registrado el dueño y la finalidad del dron. [37]

En este circular (CO AV-23/10 R4) se establecen diferentes restricciones a los drones o Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS), y las clasificaciones por su peso máximo de despegue. Dicha clasificación se observa en la tabla 2.2.

1. El uso comercial: se refiere a cuando se busca un beneficio monetario con el uso de los drones como la filmación de videos y toma de fotografías para comerciales, celebraciones, eventos especiales, etc.
2. El uso privado no recreativo: se refiere a cuando un instituto o universidad tiene la finalidad de realizar algún estudio a las alturas como el tomar imágenes en ciertas zonas y crear cartografía o modelado 3D, o montar una sonda meteorología para el estudio del tiempo, etc.

Peso máximo de despegue	Categoría	Uso
2 kg o menos	RPAS micro	Privado recreativo
		Privado no comercial
2.001 kg hasta 25 Kg	RPAS pequeño	Comercial
		Privado recreativo
		Privado no comercial
		Comercial
25.001 kg o más	RPAS Grande	Privado recreativo
		Privado no comercial
		Comercial

Tabla 2. 2. Clasificación de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia.

3. El uso privado recreativo: se refiere a cuando una persona le da al dron una finalidad para su uso propio como un dron *racer*, siendo un dron cuadricóptero equipado con cámaras volando a una gran velocidad a través de obstáculos a lo largo de una pista de carreras.

El dron deberá operarse durante el día, a menos que se tenga una autorización especial; no se debe volar a menos de 9.3 Km de un aeropuerto, a 3.7 Km de los aeródromos y 900 metros de un helipuerto. No deben dejar caer objetos durante el vuelo.

Los RPAS micro no necesitan un permiso de la DGAC, aunque no deben superar una altitud de 122 m de altura, dependiendo de su peso no deben superar velocidades de 20.89 Km/h a 55 Km/h y deben estar hechos de un material frágil ante un impacto.

Los RPAS ligeros necesitan un permiso de la DGAC, pero necesita volarse dentro de un aeródromo a una velocidad no superior de 161 Km/h.

Los RPAS pesados necesitan permiso de la DGAC, una aprobación de tipo de RPAS y una Autorización de operación. Los requisitos para obtener estos documentos se encuentran en la página web de la Secretaria de Comunicaciones y Transporte.

Para aquellos que usen los drones como medio de transporte de sustancias ilegales, armas o explosivos podrían pasar hasta 8 años en prisión más una multa de 400 a 1,500 unidades.¹ [36]

La situación en México es que, aunque existe el reglamento para el uso de estos, no existe una autoridad facultada para castigar a la persona que falte a los puntos establecidos por la DGAC.

2.3. Uso actual de los drones

Los drones tienen un gran potencial siendo aún tecnología relativamente joven para el uso civil. El poder desplazarse de manera rápida sobre caminos irregulares o accidentados, más el bajo coste que tiene, da ventajas sobre otro tipo de vehículos. Gracias a sus sensores podemos tener una adquisición de diversos datos. Podemos categorizar sus usos en militares y civiles.

1. Usos militares: Estos drones pueden volar más tiempo, recorren distancias más largas y pueden tener más peso. Es útil para misiones de reconocimiento como observar instalaciones, tareas de escolta y vigilancia de zonas fronterizas o de acceso restringido, detectando posibles situaciones de riesgo.
2. Usos civiles: son drones que no pueden estar en vuelo más de una hora o llevar mucho peso, por lo que la carga o equipamiento debe ser pequeño y su uso se limita a distancias cortas. Tenemos usos como

¹ El valor de una unidad se puede consultar en: https://data.finanzas.cdmx.gob.mx/unidad_cuenta.html.

patrullaje, agricultura, retransmitir comunicaciones, mapeo aéreo, fotografía aérea, en climatología, proyectos de investigación universitaria y búsqueda y rescate. [38]

3. Búsqueda de personas desaparecidas: Los drones pueden sobrevolar grandes terrenos en poco tiempo o de difícil acceso lo que permite una búsqueda por ejemplo en montañas o bosques.
4. Cartografía: Con la captura de imágenes a unos cuantos metros sobre la zona de estudio podemos obtener imágenes detalladas del terreno, desde cuerpos de agua, cantidad de árboles, caminos, casas, etc. Lo que nos ayudaría a crear un modelo tridimensional de la zona.
5. Patrullaje: Prevención y control de incendios: aquí los drones supervisan zonas de alto riesgo desde el aire por ejemplo en un área boscosa busca puntos activos o conatos de incendios, esto sin poner en riesgo vidas humanas y reduciendo el costo para realizar esta tarea.
6. Agricultura: Ayuda en el monitoreo del estado de los cultivos mediante imágenes espectrales, el control de la eficiencia de regadíos, dispersión de pesticidas o insecticidas y conteo de producción.
7. Geología: Realización de mapas geológicos, fracturas y deslizamientos de laderas con base en la relación entre las estructuras geológicas y formas de relieve. [39]

En el año 2014 la compañía Amazon propuso el uso de drones para la entrega de paquetes de hasta 2 Kg y actualmente en Arabia Saudita pueden entregar paquetes de hasta 22.7 Kg. [40]

Sus usos principales se muestran en la tabla 2.3 para usos civil y tabla 2.4 para uso militar.

Civiles	Protección civil	Policial
	<ul style="list-style-type: none"> • Cartografía • Agricultura • Servicios forestales, Geología, hidrología y medio ambiente • Control de obras y evaluación de su impacto, seguimiento de planificación urbanística y gestión del patrimonio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Crimen organizado • Vigilancia interna y manifestaciones • Control de fronteras

Tabla 2. 3. Uso civil de los drones.

Fuente: "Drones militares, la guerra de videojuegos con víctimas reales" informe núm. 23 pág. 9 (2014).

Militares	No armados	Armados
	<ul style="list-style-type: none"> • Espionaje/inteligencia • Patrullas militares • Reconocimiento e información militar 	<ul style="list-style-type: none"> • De blanco – sirve para simular aviones o ataques enemigos en los sistemas de defensa de tierra o aire • Combate – combatiendo y realizando misiones que suelen ser muy peligrosos

Tabla 2. 4. Uso militar de los Drones.

Fuente: “Drones militares, la guerra de videojuegos con victimas reales” informe núm. 23 pág. 9 (2014).

3. Cómputo científico

3.1. Historia

Hoy día estamos familiarizados con cálculos como adición, sustracción, multiplicación, división, etc.; el problema viene cuando hay complejas operaciones matemáticas que resolver, esto llevo al hombre a desarrollar una máquina que realicé estas operaciones de manera precisa y rápida. Esto dio hincapié para el nacimiento de la computadora. El término computadora se deriva del latín *compŭtus*, cómputo que significa “calculo”. [41]

Actualmente las computadoras pueden guardar y recuperar datos, administrar redes de comunicaciones, procesar texto, generar y manipular imágenes y sonidos; todo esto sin ver que detrás de cada aplicación hay millones de operaciones ejecutándose.

La historia del desarrollo de las computadoras es referida con diferentes generaciones de dispositivos computacionales. Cada generación de computadoras estaba caracterizada por un gran desarrollo que cambio fundamentalmente la manera de operar, resultando en una reducción de tamaño, de precio, más poderosas y eficientes.

Con el pasar del tiempo las computadoras comenzaron a ser más rápidas y eficientes; este periodo de tiempo puede dividirse en 5 generaciones basadas en el cambio del tipo de circuitos usados: [42]

Primera generación (1942 - 1958)

En esta generación había desconocimiento acerca de las capacidades de las computadoras y llegaban a ser tan grandes que ocupaban espaciosos salones en las universidades por ello se les denominaron “macrocomputadoras”, se necesitaba mucha electricidad para su funcionamiento y generaban gran cantidad de calor aparte de ser muy lentas. El funcionamiento principal era por medio de tubos de vacío por donde conducían la electricidad, también se usaban tarjetas perforadas que contenían la información y los programas del usuario. La programación era mediante lenguaje máquina el cual está basado en el sistema binario. Su costo era de cientos de miles de dólares y su principal uso era en el área científica y militar y su capacidad de almacenamiento era muy reducida que almacenaban 1kB (un kilobyte o 1024 bytes). [43] [44]

En 1951 la empresa *Remington Rand* desarrolló la primera computadora eléctrica digital comercial llamada UNIVAC I (*UNIVersal Automatic Computer*), disponía de mil palabras de memoria central, empleaba tarjetas perforadas y tenía la capacidad de leer cintas magnéticas. Se utilizó en el censo de la población estadounidense en 1950.

La empresa IBM comenzó a construir computadoras electrónicas siendo la IBM 701 la primera en sacar al mercado en 1953. En 1954 lanzó la IBM 650 con la que logró posicionarse con gran parte en el mercado computacional logrando vender más de 1000 unidades entre instituciones privadas y estatales. [45]

Segunda generación (1959 - 1963)

Alrededor de 1959 se comenzó a usar un dispositivo llamado transistor, el cual sustituyó los tubos de vacío y con ello se desarrolló un aumento en la capacidad y velocidad de procesamiento de y también en la reducción de tamaño de las computadoras. Se sustituyeron hasta 200 transistores por cada tubo de vacío existente. La información se almacenaba en tarjetas perforadas y su lenguaje de programación era COBOL o FORTRAN. Sus principales usos eran en reservaciones de líneas aéreas, control de tráfico aéreo y simulaciones de propósito general.

Las formas de programación podían ser con tarjetas perforadas o con cableado en un tablero y era realizado por un grupo de analistas, diseñadores programadores y operadores con base en cálculos. Para guardar información de un programa se podía tomar hasta 45 minutos.

Las computadoras que surgieron en esta generación son: la *Philco 212* de *Helios Electric Company*, UNIVAC M460 de *Remington Rand*, IBM 7090 de IBM y la NCR 315 de la corporación NCR.

En 1959 IBM introduce la IBM 1401 con enfoque en programas de negocios y la IBM 1602 para el cómputo científico. [46]

Tercera generación (1964 - 1970)

Con los progresos de la electrónica y los avances de las comunicaciones se comienzan a usar los circuitos integrados (pastillas de Silicio) desarrollados por la empresa Texas Instruments, que sustituyeron muchos transistores, registros y capacitores; gracias a este avance tecnológico hubo una reducción de costos y un aumento en la fiabilidad y eficiencia.

Entre las nuevas características aparecen técnicas de tiempo compartido y multiprogramación, es decir, se pueden ejecutar varios programas casi de manera simultánea en una misma computadora. La velocidad de proceso se mide en nanosegundos y la memoria alcanzaba el megabyte (MB).

En esta generación se desarrollan nuevos periféricos para facilitar la interacción usuario-computadora como monitores, disquetes, caracteres ópticos, etc. [47]

Esta generación comienza con la serie IBM 360 en abril de 1964 acaparando el 70% del mercado. Esta serie contó con los modelos 20, 22, 30, 40, 50, 65, 75, 85, 90 y 195. Estas computadoras contaban con cintas de nueve canales

y paquetes de discos magnéticos y su sistema operativo era el “OS” que contenía diferentes configuraciones para el manejo de la memoria y del procesador.

Cuarta generación (1971 - 1982)

Aquí nacen las computadoras de menor tamaño, que podía caber en una mesa, a las que se les denominó microcomputadoras. Gracias a los avances de la microelectrónica, en esta generación parecen los microprocesadores, circuitos integrados de alta densidad y con una gran velocidad de procesamiento que podían realizar diversas tareas, así como también contener la unidad central de proceso (*Central Processing Unit-CPU*) y la unidad de aritmética/lógica en un circuito integrado (*Large Scale Integrated Circuits*). El primer microprocesador lo presenta *Intel Corporation* en 1971. [45]

En 1974 es desarrollado el primer microprocesador para uso general llamado *Intel 8080*, siendo de 8 bits, conteniendo 4500 transistores y podía ejecutar hasta 200,000 instrucciones por segundo.

En 1976 *Stephen Wozniak* (1950-) y *Steve Jobs* (1955-2011) inventan la primera microcomputadora para uso masivo con la que se comenzó la fundación de la compañía *Apple*. También en este año surge la primera computadora de placa simple (*Single Board Computer – SBC*) llamada *Dyna-micro* con el microprocesador Intel 8008, este tipo de computadora contiene el procesador, la memoria y puertos de salida y entrada en una sola placa.

En 1981 el sistema operativo estandarizado MS-DOS (*Microsoft Disk Operating System*) desarrollado por *Bill Gates* (1955-) y *Gary Kildall* (1942-1994). [44] [45]

Quinta generación (1983 - actualidad)

Surge la computadora personal (PC), son más pequeñas y versátiles, revolucionó el sector informático y el desarrollo de software. En esta generación las computadoras son y poseen como herramienta indispensable el internet. La computación cuenta con arquitecturas combinadas paralelo/vectorial con cientos de microprocesadores trabajando al mismo tiempo; se pueden realizar un millón de millón de operaciones aritméticas de punto flotante en un segundo (teraflops), las redes de comunicación a nivel global (*Wide Area Network - WAN*) siguen desarrollándose a través de fibras ópticas y satélites con mayor ancho de banda. Comienza el desarrollo de la inteligencia artificial, robótica, redes de comunicaciones, nanotecnologías, computación cuántica y reconocimiento de voz. En esta generación las computadoras utilizan superconductores como materia prima para los microprocesadores. [43]

El desarrollo de la inteligencia artificial se ha convertido en parte importante de la informática ya que se incluye en las computadoras para tratar de aplicar los procesos del pensamiento humano para la resolución de los

problemas creando un sistema experto, la cual es una base de conocimiento de la experiencia humana. Con esto se busca que las computadoras aprendan e interactúen con el mundo exterior sin tener que ser programadas para ello. La robótica ha estado aprovechando el uso de la inteligencia artificial para la creación adaptativa y el empleo de robots en áreas como la industria automotriz y la médica. Un robot es un sistema de computación que realiza actividades físicas y de cálculo.

Los canales de comunicación interconectan computadoras alrededor del mundo para la transmisión y recepción de información en tiempo real.

Comienza el auge del uso de las computadoras de placa simple gracias a su código abierto. Se tiene acceso total a la computadora en una sola placa, así como a su código, lo que lo vuelve ideal para que los usuarios entiendan el completo funcionamiento del *software* y del *hardware*. Estas computadoras tienen un gran rango de tipos de procesadores desde los que están basados en x86 (Intel o AMD) hasta procesadores ARM que son usados hoy día en teléfonos móviles. El sistema operativo predominante para estas computadoras está basado en *Linux* como *Android*, *Ubuntu*, *Fedora*, *Debian* y *Arch Linux*, *Windows* tiene su distribución con *Windows IoT (Internet of Things)*. Entre las computadoras de este tipo más usadas se encuentran la *BeagleBone* de *BeagleBoard* y *Raspberry Pi* de *Raspberry Foundation*. [48]

El incremento en el poder del cálculo de las computadoras ha sido parte importante en varias áreas que van desde manejar resultados numéricos hasta la simulación y análisis visual de eventos físicos complejos como la meteorológica. El cómputo científico es parte de lo que se conoce como “Ciencia de la computación” que se divide en 6 fases:

1. Desarrollo de un modelo matemático para un fenómeno de interés,
2. Desarrollo de un algoritmo,
3. Implementación del algoritmo en un software,
4. Simulaciones numéricas del fenómeno con el software,
5. Representación de los resultados calculados (gráficas o herramientas visuales) e,
6. Interpretación y validación de los resultados.

El cómputo científico se encarga de las fases 2 a 5 lo que lo ha llevado a convertirse en una herramienta de apoyo por medio del procesamiento matemático, análisis numérico, algoritmos, simulación, visualización e instrumentación virtual. Existen diferentes tópicos en el área del cómputo científico como la realización de simulaciones, procesamiento de imágenes tridimensionales y diseño asistido por computadora, principalmente. [49]

En simulación se corren modelos numéricos representativos del fenómeno en interés que requiere de tiempo máquina y gran capacidad de procesamiento. La simulación se puede aplicar en la dinámica de fluidos, comportamiento del ozono, diseño de materiales, etc.

El procesamiento de imágenes es una de las herramientas más potentes de una computadora. Se pueden realizar imágenes, reducir ruido, resaltar detalles específicos, poner filtros multiespectrales; todo esto ayuda en la meteorología.

Otra aplicación es el diseño asistido por computadora (CAD). Con equipos de cómputo gráfico se pueden diseñar objetos mecánicos y su comportamiento ante diferentes situaciones, también se pueden trabajar mapas geográficos tridimensionales para resaltar detalles como la hidrología, las curvas de nivel o el deslizamiento en las laderas. [50]

3.2. Clasificación de las computadoras

Las computadoras pueden clasificarse dependiendo de su propósito, operación y tamaño:

1. Clasificación por propósito se divide en propósito general y propósito especial:
 - 1.1. Propósito general: Estas computadoras son para cualquier aplicación desde resolver problemas matemáticos hasta resolver negocios con la misma eficiencia para todos los casos. Muchas de estas computadoras son para su uso en casa.
 - 1.2. Propósito especial: Estas computadoras son diseñadas para un trabajo específico, por ejemplo, para el lanzamiento de un satélite, pronóstico del tiempo, etc., ya que se necesita de toda la capacidad de procesamiento de la computadora para esta tarea.
2. Clasificación acorde al principio de operación se categorizan en analógicas, digitales e híbridas:
 - 2.1. Computadoras analógicas: analiza diferentes fenómenos físicos que se puede describir en modelos matemáticos y a la vez utiliza mecanismos o energía eléctrica con variables continuas para la realización y modelaje con operaciones matemáticas que se resuelven a gran velocidad.
 - 2.2. Computadora digital: Usan circuitos digitales biestables, es decir, opera en dos estados "0" (OFF) y "1" (ON). Puede ejecutar diversos programas gracias a su gran velocidad de procesamiento sin la necesidad de modificar físicamente la computadora.
 - 2.3. Híbrida: Es a la combinación de la tecnología analógica y la digital. En este tipo de computadoras la adquisición de la información es analógica y se procesan de manera digital gracias a un convertidor analógico-digital.

3. Acorde con su tamaño físico y capacidad de procesamiento:

3.1. Supercomputadoras: Son computadoras de gama alta con altas capacidades de procesamiento, comunicaciones y almacenamiento que son decenas o centenas de veces mayores que las usadas por computadoras convencionales, por ejemplo, pueden realizar cálculos en unos días mientras una computadora convencional puede tardar años. Las áreas de uso abarcan desde el estudio de la estructura del universo hasta el comportamiento de partículas subatómicas. [51] [52]

3.2. Servidores: Son computadoras diseñadas para proveer servicios y recursos a múltiples clientes en una red de computadoras. Tienen una gran capacidad de almacenamiento de información y poderosos procesadores. Usualmente son de gran tamaño y contienen un gran número de discos duros.

3.3. Microcomputadora: Son computadoras personales (*Personal Computer-PC*) de propósito general que constan de un microprocesador, circuitos electrónicos para el manejo de entrada y salida de periféricos y los chips de memoria en un tablero electrónico llamado “tarjeta madre” (*motherboard*). Dentro de las computadoras existen:

3.3.1. Escritorio: No son portables puesto que necesitan estar conectadas ya que depende de la energía eléctrica, se le pueden agregar más partes o periféricos como una cámara web, una impresora, un monitor, audífonos o teclado.

3.3.2. Laptop: Es portátil gracias a su alimentación por baterías, tiene una pantalla plana, teclado y *mouse* incorporado, no se le pueden hacer muchas mejoras en cuanto a rendimiento.

3.4. Estación de trabajo: Son computadoras de escritorio con mayor poder de procesamiento. Su uso común es entre científicos, analistas, ingenieros, arquitectos, etc.

3.5. Computadora de placa simple: Es una computadora completa del tamaño de una tarjeta de crédito donde se encuentra el microprocesador con la memoria RAM y los periféricos de entrada y salida, todo en una sola placa. Su entorno es el industrial y el uso de estos en sistemas embebidos donde funcionan como interfaces o controladores. [53]

La sonda meteorológica que se ha mencionado en este trabajo se desarrolló con una Computadora de Placa Simple conocida como *Raspberry pi 3*. En este capítulo se mencionarán características y versiones de esta computadora ya que su aplicación se detallará más adelante en el capítulo 4.

3.3. Raspberry Pi

La fundación *Raspberry Pi* fue creada a partir de una organización de caridad en Reino Unido en el año 2012, comenzó con la búsqueda de educar y promover la enseñanza básica de las ciencias de la computación en las preparatorias y universidades alrededor de este país. El principal objetivo de la fundación *Raspberry Pi* es proveer

de tecnología para aprender y resolver problemas con una computadora de bajo costo y alto rendimiento al igual que desarrollar fuentes de acceso libre para ayudar a la gente a aprender acerca de la computación. En los últimos años esta tecnología digital comenzó a estar en manos de las personas alrededor del mundo. [54]

La Raspberry Pi necesita de periféricos de entrada y salida como un teclado, un mouse y un monitor; una fuente de poder y una memoria SD o microSD donde hospeda el sistema operativo y la información del usuario, no tiene un reloj en tiempo real por lo que cada reinicio usa información del internet en caso de estar conectado, en caso de que no esté conectada sigue la hora y fecha de la última vez que fue usada.

Los sistemas operativos compatibles con la Raspberry Pi son, en su mayoría, basadas en distribuciones de Linux. Linux fue elegido por sus características de no necesitar gran cantidad de recursos para su correcto y total funcionamiento en una computadora, sumando que es de acceso gratuito y tiene gran potencial como herramienta educativa.

Entre los sistemas operativos más usados para el desarrollo de proyectos son:

1. *Raspbian*: Es el sistema operativo desarrollado y optimizado por la fundación *Raspberry Pi* basado en Debian. Contiene más de 35,000 paquetes incluidos para programación en distintos lenguajes.
2. *Ubuntu mate*: Es un sistema operativo *open source* basado en Ubuntu desarrollado por *Martin Wimpress* y *Rohith Madhavan*.
3. *Windows 10 IoT Core*: Un sistema operativo desarrollado por Microsoft enfocado en el desarrollo y programación del internet de las cosas (*Internet of Things- IoT*). Está optimizado para dispositivos pequeños con arquitectura ARM y x86/x64.
4. *Octoprint*: Sistema operativo *open source* que funciona para el control de impresoras 3D ya sea de manera local o remota mediante direcciones IP y puertos. [55]

Hoy día existen diferentes modelos de Raspberry Pi:

Raspberry Pi 1 modelo A fue lanzada en febrero de 2012 y se muestra en la figura 3.1; tiene un procesador ARM 1176JZF-S de un núcleo @ 700MHz, memoria RAM de 256 MB, un chip de video GPU Broadcom Videocore IV, su almacenamiento y *booteo* del sistema operativo es mediante memoria SD, 26 pines GPIO, tiene 1 puerto USB 2.0. Ese mismo año salió una variante llamado *Raspberry Pi 1 Modelo B* que se observa en la figura 3.2, la cual aumentó su capacidad a 512 MB de memoria RAM, dos puertos USB 2.0 y un puerto Ethernet 10/100. En 2014 salió al mercado la Raspberry Pi 1 Modelo B+, mostrada en la figura 3.2, la cual tenía 4 puertos USB 2.0 y ocupaba una memoria microSD para el sistema operativo y el almacenamiento de la información del usuario.



Figura 3. 1. Raspberry Pi 1 Modelo B.

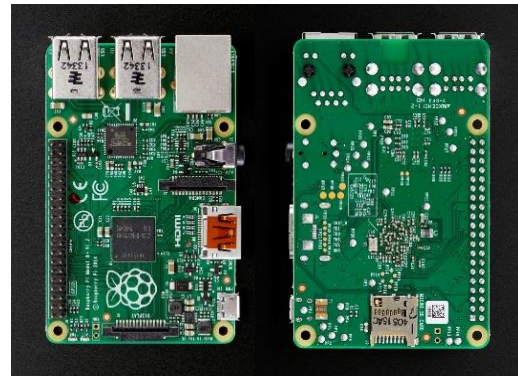


Figura 3. 2. Raspberry Pi 1 Modelo B+.

Raspberry Pi 2 mostrada en la figura 3.3 fue lanzada en febrero de 2015, tiene un procesador ARM Cortex-A53 de 4 núcleos @ 900MHz, memoria RAM de 1 GB, chip de video GPU chip de video Broadcom Videocore IV, el sistema operativo y los archivos del usuario se almacenan en una memoria microSD, 40 pines GPIO, tiene 4 puertos USB 2.0 y puerto Ethernet.



Figura 3. 3. Raspberry Pi 2.

En la figura 3.4 se muestra la *Raspberry Pi 3 modelo B*, que salió al mercado en febrero del 2016 y tiene un procesador Cortex-A53 (ARMv8) de 64 bits de 4 núcleos @ 1.2 GHz, memoria RAM de 1 GB, chip de video GPU Broadcom Videocore IV, puerto para memoria microSD para cargar el sistema operativo y los archivos de usuario, 40 pines GPIO, 4 puertos USB 2.0, puerto Ethernet 10/100, antena WiFi 802.11n y bluetooth 4.1. En marzo de 2018 salió el *Raspberry Pi 3 modelo B+*, que se muestra en la figura 3.5, con un procesador Cortex-A53 (ARMv8) de 64 bits SoC (*System on a Chip*) de 4 núcleos a 1.4 GHz, WiFi de 2.4 GHz y 5 GHz 802.11b/g/ac y Bluetooth 4.2 *Low Energy (BLE)*.

Raspberry Pi Zero, se observa en la figura 3.6, fue lanzado en febrero 2015 tiene un procesador ARM 11 de 1 núcleo @ 1 GHz, memoria RAM de 512 MB, un chip de video GPU Broadcom Videocore IV, puerto para memoria microSD para cargar el sistema operativo y los archivos de usuario, 40 pines GPIO, 1 puerto micro USB. En marzo 2017 se lanzó el modelo *Zero W*, a la cual se le implementó una antena Wifi 802.11 b/g/n y un Bluetooth *Low Energy (BLE)*, esta nueva versión se observa en la figura 3.7. [54] [56]



Figura 3. 4. Raspberry Pi 3 Modelo B.



Figura 3. 5. Raspberry Pi 3 Modelo B+.



Figura 3. 6 Raspberry Pi Zero.

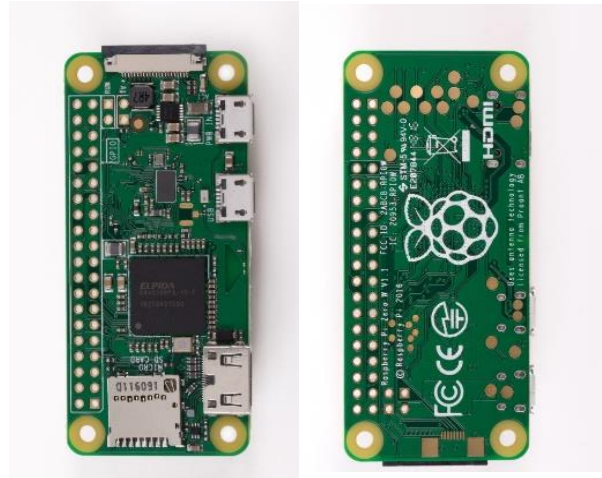


Figura 3. 7. Raspberry Pi Zero W.

4. Metodología

La sonda meteorológica está basada en una computadora de placa simple (*Single Board Computer*) llamada *Raspberry pi 3*. Necesita una alimentación de 5V @ 2A suministrada por su puerto micro USB.

Esta computadora tiene 40 pines GPIO (*General Purpose Input Output* – entradas y salida de propósito general) cuya función es la alimentación, la entrada y salida de instrucciones e información de los sensores que tomarán la medición de las variables meteorológicas: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento; el punto de rocío es calculado con la temperatura y humedad relativa. Cada pin tiene una configuración determinada como se muestra en la figura 4.1. De igual manera la *Raspberry pi 3* no tiene un reloj interno que guarde la información de fecha y hora cada vez que se reinicia, tiene un contador que sólo funciona cada vez que el sistema está encendido, es decir, se queda con la fecha y hora de cuando se apagó por última vez la *Raspberry pi 3*. Tampoco tiene un GPS integrado para saber su geolocalización por lo que estas dos carencias se satisficieron agregando un reloj externo y un módulo GPS.

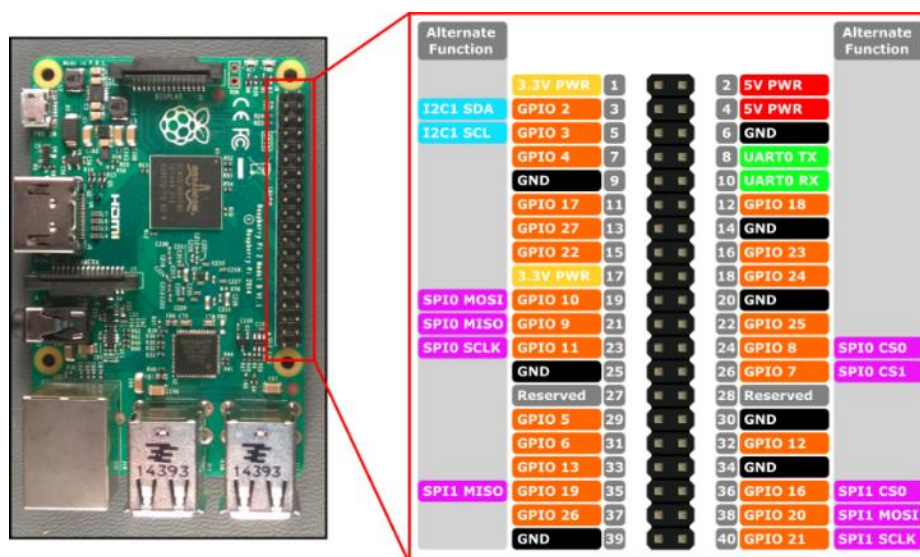


Figura 4. 1. Configuración de los GPIO de la Raspberry pi 3.

Fuente: <https://raspberrypi.stackexchange.com/questions/68126/have-the-gpio-pins-changed-between-the-pi-2-and-the-pi-3>

Existen GPIO normales que se pueden configurar como entradas o salidas generales para diversos sensores que no necesiten de alguna configuración o comunicación específica; y GPIO especiales los cuales están configurados para realizar una tarea determinada como utilizar una interfaz UART, comunicaciones en serie (*Tx-Rx*), comunicación I²C (SDA y SCL), comunicación SPI (MOSI, MISO, SCKL), etc. [57]

La *Raspberry pi 3* al ser una computadora necesita de un sistema operativo. La fundación Raspberry en su página de internet² proporciona la imagen de diversos sistemas operativos como Raspbian, Ubuntu mate, Windows 10 IOT

² <https://www.raspberrypi.org/downloads/>

Core, OSMC, LIBREELEC, PINET, etc. Cada sistema operativo tiene finalidades específicas, en el caso de la sonda meteorológica se instaló Raspbian, que está basado en Linux, por su gran cantidad de herramientas y soporte para la programación en diversos lenguajes. Para la instalación y actualización de librerías y paqueterías, así como del *Kernel*, o núcleo del sistema operativo cuya función es realizar la correcta comunicación entre *software* y *hardware*, se necesitó contar con una conexión a internet.

El lenguaje de programación fue *Python* por las ventajas que posee como su sintaxis de alto nivel al momento de estar programando, es decir, con pocas líneas de código se realizan algoritmos complejos ya que dentro de sus sintaxis se tiene patrones predefinidos que engloban varias instrucciones que en otros lenguajes de programación se deben escribir dentro del código principal. Los paquetes que posee abarcan desde el ámbito matemático hasta el gráfico; también es bastante usado para la programación de sensores, por lo que se puede encontrar mucha información de su funcionamiento en libros e internet.

Cada sensor electrónico es explicado en una hoja técnica (*datasheet*) dada por el fabricante. Entre las especificaciones más importantes se encuentran los rangos de trabajo, alimentación, tiempo de respuesta, configuración de cada pin, gráficas de comportamiento a diferentes temperaturas, dimensiones físicas y conexiones con otros componentes electrónicos.

Algunos de los sensores usados en la sonda meteorológica utilizan el protocolo de comunicación I²C con la *Raspberry pi 3*. El protocolo I²C (*Inter-Integrated Circuit*) permite tener múltiples sensores conectados en el mismo canal de comunicación ya que asigna una dirección interna única a cada uno y un tiempo de uso determinado.

Este protocolo utiliza 2 hilos de comunicación, *Serial Data (SDA)* que es un canal por la cual se transfieren los datos entre dispositivos en dirección semi bidireccional; y *Serial Clock (SCL)* que es una señal de reloj que sincroniza el sistema. [58]

Para que esta comunicación sea posible en la *Raspberry pi 3* se debe instalar un paquete de herramientas desde la terminal con los siguientes comandos:

```
sudo apt-get install python-smbus
sudo apt-get install i2c-tools
```

Una vez realizada la instalación se debe habilitar el protocolo I²C utilizando las opciones avanzadas mediante el comando *raspi-config* como se muestra en la figura 4.2.

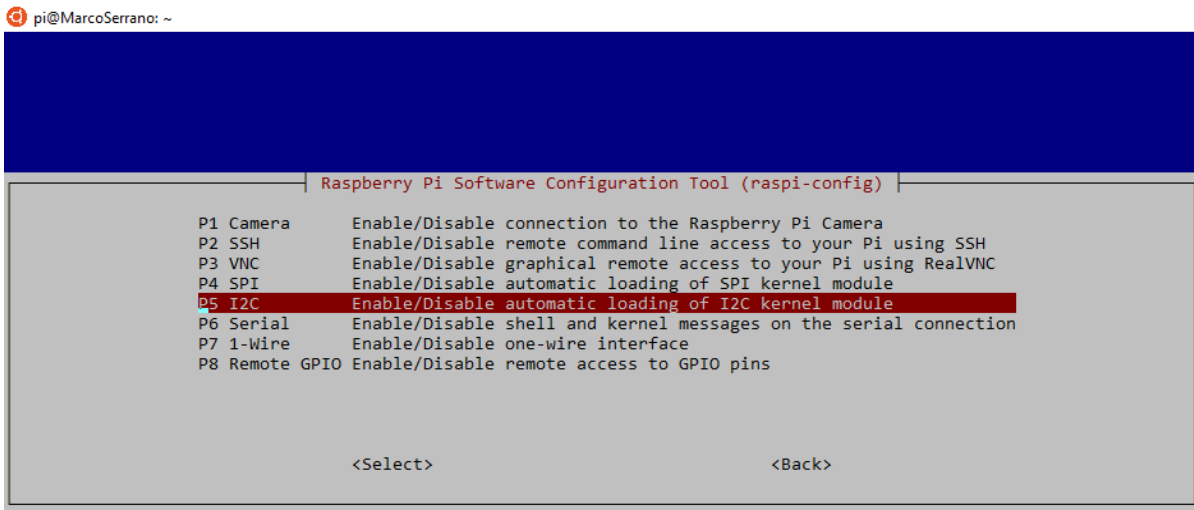


Figura 4. 2. Activación del protocolo I2C.

Para terminar de habilitar el protocolo se edita el fichero config.txt ubicado en el directorio `/boot`, quitando el comentario (#) a la línea `dtparam=i2c_arm=on`, esta acción se muestra en la figura 4.3.

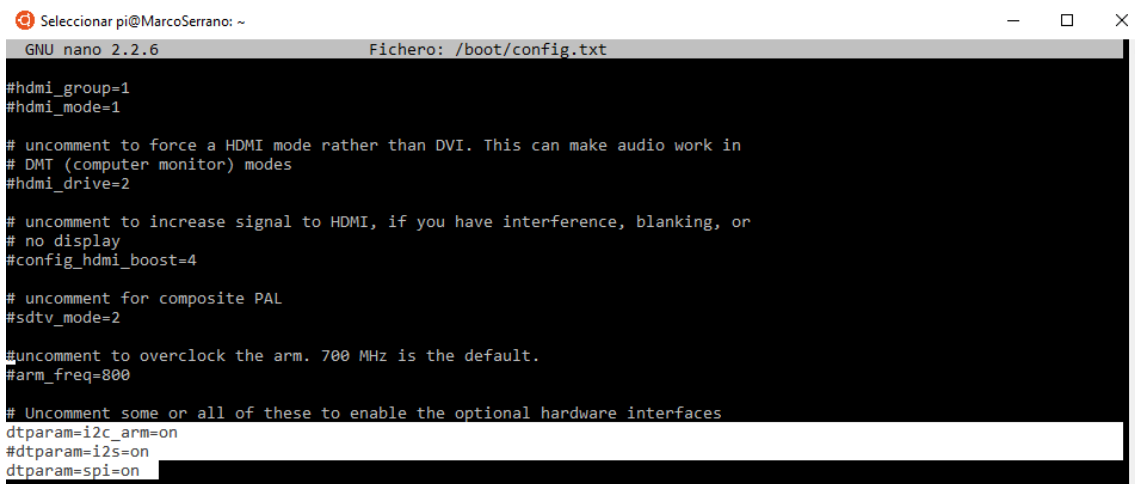


Figura 4. 3. Añadiendo protocolo I2C.

Se reinicia la *Raspberry pi 3*. Con esto reconoce todo sensor con comunicación I²C y asigna a cada uno una dirección única. Para saber las direcciones disponibles u ocupadas ejecutamos el comando `sudo i2cdetect -y 1`.

Cuando se tienen más de 2 sensores con comunicación I²C, es necesario agregar a cada sensor una resistencia *Pull-up* entre la línea de alimentación (Vcc) y los pines SDA y SCL como se muestra en la figura 4.4. El fabricante proporciona un rango de valores para estas resistencias que oscilan entre 2.2KΩ y 10KΩ.

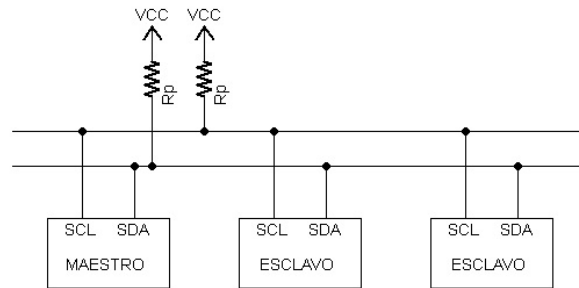


Figura 4. 4. Múltiples sensores I2C.

4.1. Temperatura, humedad y punto de rocío

El sensor utilizado para la medición de la temperatura y humedad relativa, para la sonda meteorológica es el *SHT15* de la marca *sparkfun*, que en su *datasheet* (Anexo 1) nos indica que este sensor necesita de 2.4 a 5.5 Volts @ 1 mA para su funcionamiento, entre la alimentación y la tierra debe existir un capacitor de 100nF para evitar señales ruido o señales eléctricas parásitas.

Para la medición de la temperatura tiene un intervalo de -40 °C a 120 °C con una precisión de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$; en humedad relativa de 0 a 100% con una precisión de $\pm 2\%$; y el punto de rocío depende del cálculo de las 2 anteriores.

La conexión usada en la sonda meteorológica es la que se indica en el *datasheet* que se muestra en la figura 4.5.

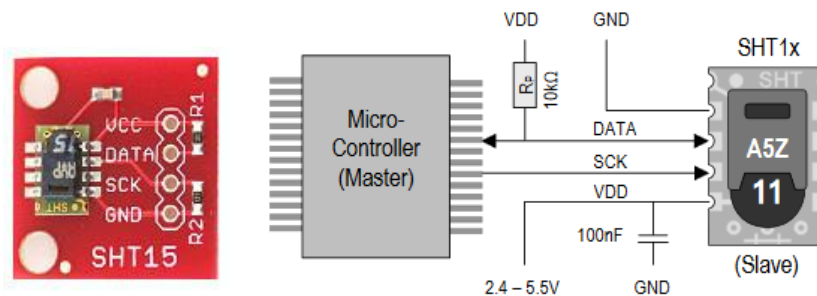


Figura 4. 5. Sensor SHT15 (izquierda) y conexión entre el sensor y la Raspberry pi 3 (derecha).

La activación y lectura del sensor depende de las señales *Serial Clock* (SCK) y la información (DATA). Se envía un 0 lógico en DATA, mientras en SCK comienza con un 1 lógico, seguido de un 0 lógico y de nuevo un 1 lógico como se muestra en la figura 4.6.

A continuación, se envía un código de 5 bits por el pin SCK, el cual dará la instrucción de medir temperatura, humedad relativa, lectura o escritura de registros o reiniciar todo el sistema, los códigos se muestran en la tabla 4.1.

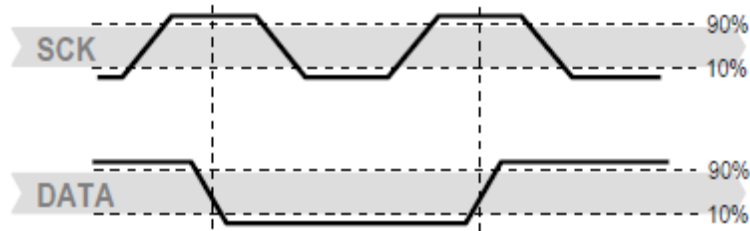


Figura 4. 6. Secuencia de activación del sensor.

Comando	Código
Reservado	0000x
Medición de la temperatura	00011
Medición de la humedad relativa	00101
Lectura del estado del registro	00111
Escritura del estado del registro	00110
Reservado	0101x - 1110x
Reinicio suave: reinicia la interfaz y limpia el estado del registro. Espera 11 ms antes del siguiente comando.	11110

Tabla 4. 1. Lista de comando de los sensores.

Fuente: hoja de especificaciones del sensor sht15, tabla 4, pág. 6.

Se manda el código de la variable meteorológica que queremos medir, 00011 para la temperatura y 00101 para la humedad relativa, después se toma una latencia (que es cuando el sensor toma las mediciones). Fig. 4.7.

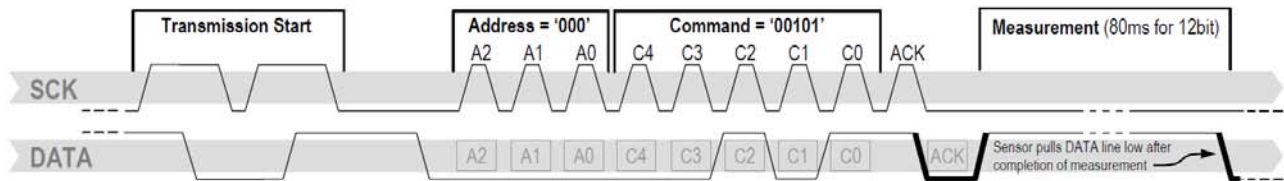


Figura 4. 7. Diagrama del inicio, código y tiempo que tarda la medición.

El pin SCK comenzará la secuencia de envío de la medición hacia la *Raspberry pi 3*, la cual está remarcada con una línea negrita en DATA en la figura 4.8. La medición se da mediante un número binario de 16 bits (SO_{RH}).

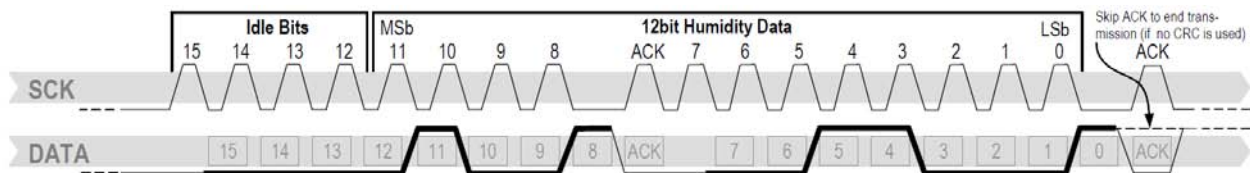


Figura 4. 8. El número binario obtenido en la imagen para la medición de humedad relativa es “0000 1001 0011 0001”.

Una vez que se obtiene el número binario, se debe convertir en un número decimal.

Decimal	32768	16384	8192	4096	2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1
Binario	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1

$$2048 + 256 + 32 + 16 + 1 = 2353$$

$$SO_{RH} = 0000\ 1001\ 0011\ 0001_2 = 2353_{10}$$

La humedad relativa es calculada mediante 2 ecuaciones, la ecuación (1) calcula la humedad relativa lineal sin consensarse con la temperatura.

$$RH_{lineal} = -4 + (0.0405 * SO_{RH}) + (-2.8 \times 10^{-6} * SO_{RH})^2 [\%] \dots (1)$$

La humedad relativa real es calculada con la ecuación (2) añadiendo el factor de la temperatura y la humedad relativa lineal.

$$RH_{True} = (T_{°C} - 25) * (0.01 - 0.00008 * SO_{RH}) + RH_{lineal} [\%] \dots (2)$$

El número binario que contiene la información de la medición de la temperatura se obtiene de la misma manera que el de la humedad relativa. Lo que cambia es el tiempo en que tarda esta lectura. Una vez se tiene el número decimal de la temperatura (SO_T) se sustituye en la ecuación (3).

$$T = -40.1 + (0.04 * SO_T) [°C] \dots (3)$$

El punto de rocío no es medido directamente por el sensor, pero puede ser calculado con la temperatura (T) y la humedad relativa (RH) medidas.

Existen diferentes ecuaciones para el cálculo del punto de rocío (T_c) pero se usó la que indica el fabricante en el datasheet (4).

$$T_c(RH, T) = (243.12\ °C) \left[\frac{\ln\left(\frac{RH_{True}}{100\%}\right) + \frac{(17.62)(T)}{243.12 + T}}{17.62 - \ln\left(\frac{RH_{True}}{100\%}\right) - \frac{(17.62)(T)}{243.12 + T}} \right] [°C] \dots (4)$$

4.2. Presión atmosférica y altura

El sensor de presión atmosférica y altura utilizado en la sonda meteorológica es el BMP180 de la marca *Adafruit* mostrado en la figura 4.9. En el *datasheet* (Anexo 2) se indica que se alimenta con 1.8 a 3.6 Volts @ 12 μ A. Tiene un tiempo de respuesta de 25.5 ms y su intervalo de lecturas de presión es de 300 a 1100 hectopascales (hPa), con un rango de error de ± 0.02 hPa. Su protocolo de comunicación con la computadora es I^2C .



Figura 4. 9. Sensor BMP180.

La conexión usada es la que el fabricante proporciona en el *datasheet* (fig. 4.10). Las resistencias *Pull-up* establecen un estado lógico en un pin, ya sea de entrada o salida. Usa protocolo I^2C para establecer la comunicación con la Raspberry pi 3 y su dirección única es la 0x77.

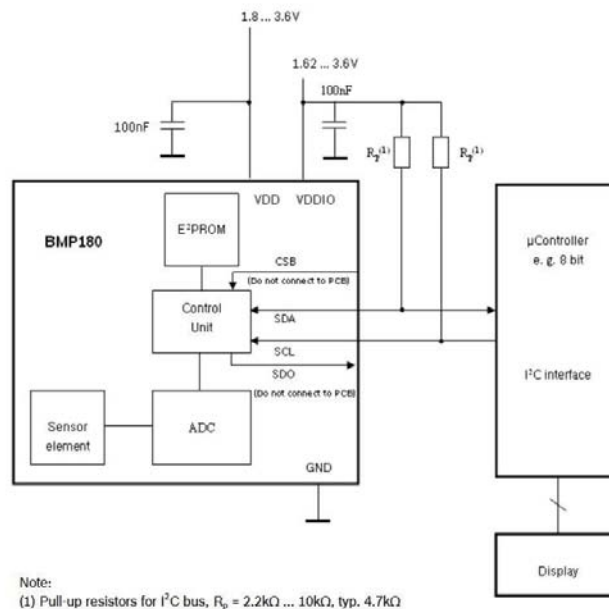


Figura 4. 10. Conexión entre el sensor y la computadora mediante protocolo I^2C .

Para usar este sensor, *Adafruit* nos da la facilidad de instalar una librería con el nombre *Adafruit_BMP.BMP085*, que contiene archivos y códigos en lenguaje Python que podemos importar dentro de un programa.

Para instalar la librería se descarga desde el repositorio del fabricante mediante el siguiente comando.

git clone <https://github.com/adafruit/Adafruit-Raspberry-Pi-Python-Code.git>

Dentro del programa se agregan 3 líneas de programación.

```
import Adafruit_BMP.BMP085 as BMP085 # Se agrega la librería
sensor = BMP085.BMP085( ) # Se crea una instancia para tomar datos de la librería
print( 'Pressure = {0:0.2f} Pa'.format(sensor.read_pressure( )) ) #Impresión de la presión atmosférica
```

En la sección 3.3.1 del *datasheet*, se puede observar una tabla (tabla 4.2) con los diferentes modos del sensor con el número de ejemplos tomados antes de enviar la medición a la computadora, el tiempo que le lleva hacer esto, la corriente de alimentación y el rango de error de la medición.

Modo	Parámetro <i>Oversampling_setting</i>	Número de muestras internos	Tiempo máximo de conversión de la presión [ms]	Corriente	Ruido de la presión [hPa]	Ruido de la altura [m]
				consumida por muestra [1 muestra/s] µA		
Ultra bajo consumo	0	1	4.5	3	0.06	0.5
Estándar	1	2	7.5	5	0.05	0.4
Alta resolución	2	4	13.5	7	0.04	0.3
Ultra alta resolución	3	8	25.5	12	0.03	0.25

Tabla 4. 2. Modos del sensor BMP180.

Para que la calidad de los datos adquiridos sea mayor usamos el modo “*ultra alta resolución*” para tomar 8 muestras, por lo que en la segunda línea agregamos el código “*mode=BMP085.BMP085_ULTRAHIGHRES*”.

```
import Adafruit_BMP.BMP085 as BMP085
sensor = BMP085.BMP085 (mode = BMP085.BMP085_ULTRAHIGHRES)
print( 'Pressure = {0:0.2f} Pa'.format(sensor.read_pressure( )) )
```

Una aplicación relacionada con la presión atmosférica es la obtención de la altura. El fabricante utiliza la *ecuación internacional barométrica*:

$$P = P_0 * e^{-\frac{h*m*g}{K*T}} \longrightarrow h = 44330 * \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right]$$

Donde h = altura

P = Presión atmosférica

P_0 = es la presión a nivel del mar = 1013.25 [hPa]

K = Constante de Boltzmann = $1.38066 \times 10^{-23} \left[\frac{m^2 Kg}{s^2 \text{ } ^\circ K} \right]$

T = Temperatura absoluta [$^\circ K$]

m = masa atómica del aire = 4.76×10^{-26} [Kg]

g = Aceleración de la gravedad = $9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

El principal inconveniente con esta ecuación es que no se toma en cuenta la temperatura del entorno, sino que considera una temperatura constante de $15 \text{ } ^\circ C$ para cada medición, lo que conlleva a obtener datos errados de la altura.

Partiendo de la ecuación internacional barométrica podemos obtener una donde usamos la temperatura en el cálculo de la altura.

$$P = P_0 \cdot e^{-\frac{h \cdot m \cdot g}{K \cdot T}} \dots (1) \quad \text{si } A = \frac{K \cdot T}{m \cdot g} \quad \text{entonces } P = P_0 \cdot e^{-\frac{h}{A}} \dots (2)$$

$$\ln(P) = \ln\left(P_0 \cdot e^{-\frac{h}{A}}\right) \dots (3) \quad \ln(P) = \ln(P_0) + \ln\left(e^{-\frac{h}{A}}\right) \dots (4) \quad \ln(P) - \ln(P_0) = -\frac{h}{A} \dots (5)$$

$$-A \cdot \ln(P) + A \cdot \ln(P_0) = h \dots (6) \quad h = A \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \dots (7) \quad h = \left(\frac{m \cdot g}{K \cdot T}\right) \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \dots (8)$$

$$h = \left(\frac{(1.38066 \times 10^{-23} \left[\frac{m^2 Kg}{s^2 \text{ } ^\circ K} \right]) (T)}{(4.76 \times 10^{-26} [Kg]) (9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right])}\right) \cdot \ln\left(\frac{1013.25 [hPa]}{P}\right) \dots (9)$$

$$h = (29.5672 \frac{m}{\text{ } ^\circ K}) (T [^\circ K]) \cdot \ln\left(\frac{1013.25 [hPa]}{P [hPa]}\right) \dots (10)$$

$$h = (29.5672)(T) \cdot \ln\left(\frac{1013.25}{P}\right) [m]$$

La ecuación obtenida (10) se le conoce como ecuación hipsométrica, usada en la meteorología ya que permite calcular el espesor de una capa atmosférica entre dos niveles de presión, conocido como perfil de temperatura virtual. Así, si se conoce la presión atmosférica y la temperatura donde se ubica nuestra sonda meteorológica se puede calcular la altura. [59]

4.3. Viento

Para la medición del viento en la sonda meteorológica se diseñó un anemómetro sónico, ya que no tiene partes mecánicas. El principio de un anemómetro sónico es la medición del tiempo de vuelo de un pulso ultrasónico entre dos transductores: transmisor (Tx) y receptor (Rx).

La velocidad es una magnitud vectorial, es decir, tiene un módulo, dirección y sentido. En el viento el vector se descompone en componente zonal (u) que es la velocidad horizontal a lo largo de la altitud, oeste-este o eje "X" en un plano cartesiano y componente meridional (v) que es la velocidad horizontal a lo largo del meridiano, Sur-Norte o eje "Y" en el plano cartesiano. El plano cartesiano queda como se muestra en la Fig. 4.11. [60]

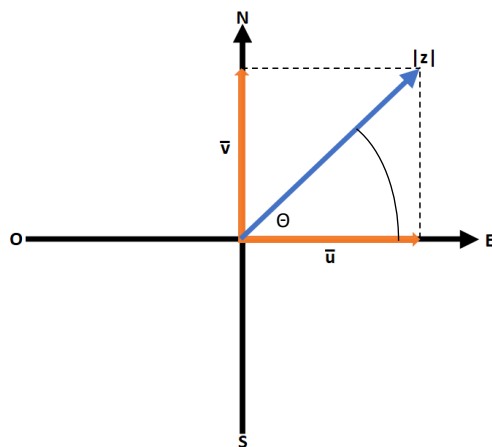


Figura 4. 11. Vector velocidad ($|z|$) en sus componentes zonal (u), meridional (v) y su ángulo (Θ).

Para dibujar un vector virtual del viento en la programación de la sonda meteorológica disponemos de 4 pares de bocinas ultrasónicas como se muestra en la figura 4.12. La configuración de transmisor-receptor es: Norte a Sur $Tx_1 - Rx_1$, Este a Oeste $Tx_2 - Rx_2$, Sur a Norte en $Tx_3 - Rx_3$, y Este a Oeste $Tx_4 - Rx_4$.

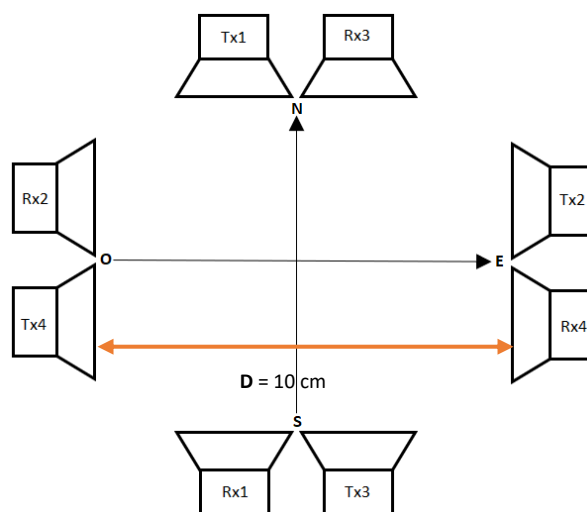


Figura 4. 12. Posición de los transmisores y receptores.

Los transductores están a una distancia (D) de 10 cm entre transmisor y receptor. Cada transmisor (Tx_x) envía un pulso senoidal a la velocidad del sonido (C) a su receptor (Rx_x).

Se tiene que tomar en cuenta el comportamiento de la velocidad del sonido a diferentes temperaturas, por lo cual se usó la ecuación de la velocidad del sonido en gases (1); en este caso, el gas es el aire.

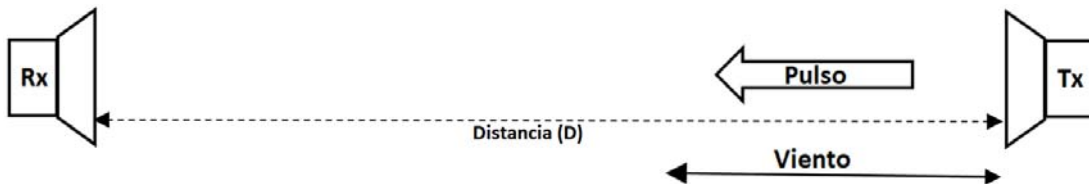
$$C = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \left[\frac{m}{s} \right] \dots (1) \quad \text{Donde}$$

C = velocidad del sonido $\left[\frac{m}{s} \right]$
 γ = Constante adiabática del aire = 1.4
 R = Constante de gas = $8.314 \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right]$
 M = Masa molecular del aire seco = $0.02895 \left[\frac{Kg}{mol} \right]$
 T = Temperatura absoluta $[^{\circ}K]$

$$C = \sqrt{\frac{(1.4)(8.314 \left[\frac{Kg \cdot m^2}{mol \cdot K \cdot s^2} \right])(T [^{\circ}K])}{(0.02895 \left[\frac{Kg}{mol} \right])}} \dots (2) = \sqrt{402.058 \frac{m^2}{s^2} (T)} \dots (3)$$

$$C = 20.05\sqrt{T} \left[\frac{m}{s} \right] \dots (4)$$

Con la ecuación (4) se calcula la velocidad del pulso ultrasónico que emite el transmisor a través del viento teniendo en cuenta la temperatura. La velocidad total es igual a la velocidad del sonido (C) más la velocidad del viento, ya que este último afecta si el pulso llega más rápido o más lento al receptor.



$$\text{Si } \text{Velocidad}_{Total} = \text{Velocidad}_{sonido} + \text{Velocidad}_{viento} \dots (5)$$

$$\text{Entonces } \text{Velocidad}_{viento} = \text{Velocidad}_{Total} - \text{Velocidad}_{sonido} \dots (6)$$

$$\text{Si } \text{velocidad} = \frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}} ; \text{ entonces: } \text{velocidad}_{total} = \frac{\text{Distancia}_{total}}{\text{Tiempo}_{total}} \dots (7)$$

$$\text{Sustituyendo la ecuación (7) en (6) } \text{Velocidad}_{viento} = \frac{\text{Distancia}_{total}}{\text{Tiempo}_{total}} - \text{Velocidad}_{sonido} \dots (8)$$

Con la ecuación obtenida (7) podemos calcular la velocidad del viento teniendo nuestra distancia total (D) = a 10 cm, el tiempo total es el que tarda el pulso en llegar desde el transmisor al receptor más la velocidad del sonido (C) obtenida mediante la ecuación (4), pero en la ecuación (8) sólo calcula la velocidad del viento en un solo eje, por lo que este cálculo debe hacerse para cada eje.

Primero se calculó la componente zonal (u) que son los pares Este a Oeste $Tx_2 - Rx_2$ y Este a Oeste $Tx_4 - Rx_4$.

1.- Componente zonal, Este a Oeste $Tx_2 - Rx_2$ (←)

$$Velocidad_{-X} = C_{-X} + Velocidad_{viento E-O} \quad Velocidad_{viento E-O} = Velocidad_{-X} - C_{-X}$$

$$Si \text{ velocidad} = \frac{Distancia}{Tiempo} \quad \text{entonces} \quad velocidad_{-X} = \frac{Distancia_{-X}}{Tiempo_{-X}}$$

$$Velocidad_{viento E-O} = \frac{Distancia_{-X}}{Tiempo_{-X}} - C_{-X} \dots (9)$$

2.- Componente zonal, Oeste a Este $Tx_4 - Rx_4$ (→)

$$Velocidad_{+X} = C_{+X} + Velocidad_{viento O-E} \quad Velocidad_{viento O-E} = Velocidad_{+X} - C_{+X}$$

$$Si \text{ velocidad} = \frac{Distancia}{Tiempo} \quad \text{entonces} \quad velocidad_{+X} = \frac{Distancia_{+X}}{Tiempo_{+X}}$$

$$Velocidad_{viento O-E} = \frac{Distancia_{+X}}{Tiempo_{+X}} - C_{+X} \dots (10)$$

La velocidad total de la componente Zonal es la diferencia de las velocidades obtenidos mediante las ecuaciones (9) y (10), ya que el sentido de los pulsos es en sentido contrario uno del otro.

$$V_u = Velocidad_{viento E-O} - Velocidad_{viento O-E}$$

$$V_u = \left[\frac{Distancia_{-X}}{Tiempo_{-X}} - C_{-X} \right] - \left[\frac{Distancia_{+X}}{Tiempo_{+X}} - C_{+X} \right] \quad ; \quad Distancia_{-X} = Distancia_{+X} = D$$

$$V_u = \left[\frac{D}{Tiempo_{-X}} - C_{-X} \right] - \left[\frac{D}{Tiempo_{+X}} - C_{+X} \right]$$

$$V_u = D \left[\left(\frac{1}{Tiempo_{-X}} - C_{-X} \right) - \left(\frac{1}{Tiempo_{+X}} - C_{+X} \right) \right] \dots (11) \text{ Velocidad componente Zonal}$$

De la misma manera se calcula el vector meridional (v); de Norte a Sur ($Tx_1 - Rx_1$) y Sur a Norte ($Tx_3 - Rx_3$).

La ecuación quedaría como:

$$V_v = D \left[\left(\frac{1}{Tiempo_{-Y}} - C_{-Y} \right) - \left(\frac{1}{Tiempo_{+Y}} - C_{+Y} \right) \right] \dots (12) \text{ Velocidad componente Meridional}$$

Ahora que tenemos los vectores V_u y V_v de manera polar podemos obtener la Velocidad del viento mediante el Teorema de Pitágoras y la dirección calculando la tangente entre ambos vectores.

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad ; \quad Velocidad_{viento}^2 = V_u^2 + V_v^2$$

$$Velocidad_{viento} = \sqrt{V_u^2 + V_v^2} \dots (13)$$

$$\acute{A}ngulo_{viento} = \theta = Tan^{-1} \left[\frac{V_v}{V_u} \right] \dots (14)$$

Con las ecuaciones (13) y (14) se calcula la velocidad y el ángulo del viento, respectivamente.

El sensor usado para la construcción del anemómetro sónico es el HC-SR04 (ver figura 4.13). Este es empleado comúnmente para la detección de objetos mediante pulsos ultrasónicos. El *datasheet* (Anexo 3) indica que este sensor se alimenta con un voltaje de entrada de 5V @ 15mA, tiene 4 pines: *Vcc*, *Trigger*, *Echo* y *GND*; trabaja a una frecuencia de 40 KHz y una apertura del pulso de 15°. Este sensor no requiere de una configuración especial de comunicación, así que se puede usar cualquier GPIO normal.



Figura 4. 13. Sensor HC-SR04.

El *datasheet* indica la forma para tomar la medición del tiempo. Se necesita enviar un pulso de 10 microsegundos (μ S) por el *trigger* para iniciar el funcionamiento del sensor; el transmisor envía un tren de 8 ciclos de pulso que recibe el receptor después de un tiempo medible, al recibir el tren de pulsos el sensor envía un 1 lógico por el *echo* a la Raspberry pi 3. (Fig. 4.14)

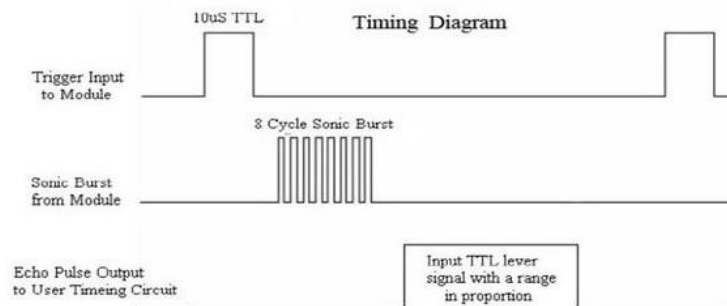


Figura 4. 14. Diagrama de funcionamiento del HCSR-04.

Los pulsos ultrasónicos del primer diseño del anemómetro sónico presentan un inconveniente, al analizar y comparar la señal de transmisión con la de recepción, estas eran muy similares, es decir; no presentaban retraso

o adelante respecto al tiempo calculado para la recepción de la señal, por lo que se concluyó que el viento rodeaba la bocina sónica y esto impedía que el pulso fuera afectado. Este fenómeno se ilustra en la figura 4.15.

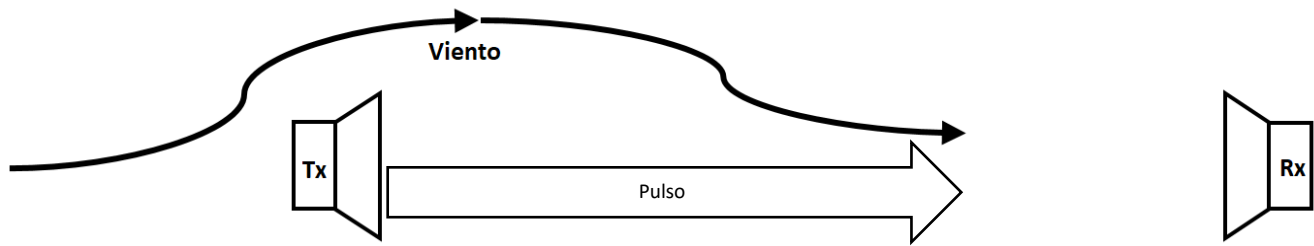


Figura 4. 15. Primer diseño del anemómetro sónico.

Se buscaron maneras para que el viento afectara el pulso como disminuir la potencia del pulso, cambiar la programación, sustituir algunos componentes y cambiar la posición de las bocinas sónicas, siendo este último el que mejores resultados arrojó, ya que el pulso presentaba mayor afectación en el tiempo que transcurría entre la transmisión y recepción.

Al ir variando el nuevo diseño se optó por inclinar las bocinas 30° y después 50° hacia arriba (más adelante se explica con detalle esto) y así el pulso rebotara en una superficie, con esto el pulso presenta mayor alteración por parte del viento que el diseño anterior. El nuevo diseño se muestra en la figura 4.16.

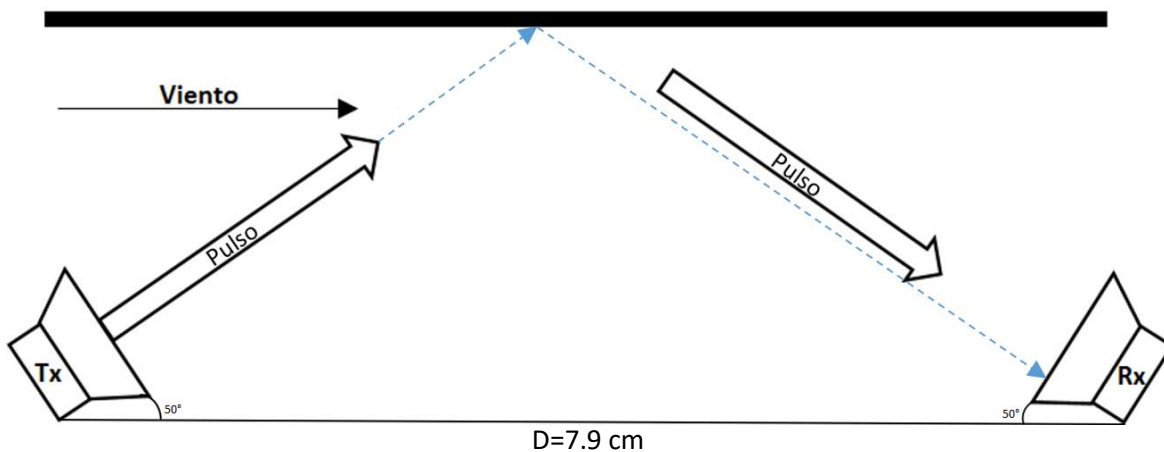


Figura 4. 16. Nuevo diseño del anemómetro.

La nueva distancia (D_2) es la que se ve punteada de color azul en la imagen (16) entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) y se calcula con:

$$\cos(\theta) = \frac{\text{Cateto Adyacente}}{\text{Hipotenusa}} ; \cos(50^\circ) = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)}{D_2} ; D_2 = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)}{\cos(50^\circ)}$$

$$D_2 = \frac{\left(\frac{7.9}{2}\right)}{\cos(50^\circ)} = 6.14 \text{ cm}$$

El resultado obtenido se multiplica por 2 ya que 6.14 es la distancia de la hipotenusa de la primera parte de la medición, antes de que el pulso rebote en la superficie superior y se dirija al receptor.

$$D_2 = (6.14 \text{ cm})(2) = 12.3 \text{ cm}$$

Para calibrar el anemómetro sónico es recomendable usar un túnel de viento suficientemente largo para establecer un flujo de viento uniforme y en un solo sentido, para así analizar las mediciones tomadas y el comportamiento del sistema con una velocidad y dirección del viento controlado.

4.4. Reloj

El reloj en tiempo real (*Real Clock Time*) usado en la *Raspberry pi 3* es el sensor DS1307 de la marca *Adafruit* (Figura 4.17), necesita una alimentación de 5V@ 125 μ A. Puede operar sin problemas en un entorno con temperaturas de entre -40 a 85°C. Contiene una pila de 3.3V en la parte inferior. Su protocolo de comunicación es I²C por lo que la *Raspberry pi 3* le asigna una dirección única, la cual es la 0x68.

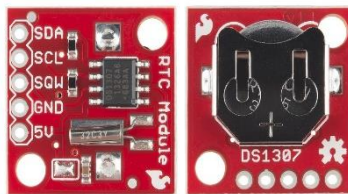


Figura 4. 17. Reloj en tiempo real DS1307.

Este reloj proporciona la información de segundos, minutos, horas, día, mes y año válido hasta 2100; funciona con formato de 12 y 24 horas. Tiene un sensor incorporado para detectar fallas en el voltaje de alimentación y, en caso de presentarse una, cambia el suministro de energía de la *Raspberry pi 3* por la pila que posee.

Se tiene que dar de alta el reloj en el registro de dispositivos de la *Raspberry pi 3*, para realizarlo se edita el archivo *config.txt* en el directorio */boot/* añadiendo *ds1307* en la línea de los *overlays* como se muestra en la figura 4.18.

```
Seleccinar pi@MarcoSerrano: ~
GNU nano 2.2.6 Fichero: /boot/config.txt
#uncomment to overclock the arm. 700 MHz is the default.
#arm_freq=800

# Uncomment some or all of these to enable the optional hardware interfaces
dtparam=i2c_arm=on
#dtparam=i2s=on
dtparam=spi=on

# Uncomment this to enable the lirc-rpi module
#dtoverlay=lirc-rpi

# Additional overlays and parameters are documented /boot/overlays/README

# Enable audio (loads snd_bcm2835)
dtparam=audio=on

dtparam=spi=on
dtoverlay=pi3-disable-bt-overlay
enable_uart=1
force_turbo=1

dtoverlay=i2c-rtc,ds1307,w1-gpio
```

Figura 4. 18. Registro de dispositivos.

Se reinicia la *Raspberry pi 3* y el reloj de tiempo real queda configurado en el sistema. Se le debe dar de baja un contador interno y dejar predominado que la fecha y hora será tomada del DS1307 cada vez que la *Raspberry pi 3* se encienda. Esto se hace con los siguientes comandos:

```
sudo apt-get -y remove fake-hwclock
sudo update-rc.d -f fake-hwclock remove
```

En el directorio */lib/udev/* se edita el archivo *hwclock-set* comentando con el símbolo numeral (#) al inicio de las siguientes líneas:

```
#if [ -e /run/systemd/system ] ; then
#     exit 0
#fi
```

Para finalizar se sincroniza el reloj con internet mediante el comando *sudo hwclock -D -r*. Con esto tenemos la fecha y hora exacta cada vez que se reinicia la *Raspberry pi 3*.

En caso de no contar con acceso a internet, el reloj puede ser configurado de manera manual con los siguientes comandos:

```
date ---set "yyyy-mm-dd %hh:%mm"
hwclock --set--date="yyyy-mm-dd hh:mm"
```

Donde:

yyyy es el año;

mm es el mes;

dd es el día;

%hh es la hora en formato de 24 hrs y;

%mm son los minutos.

4.5. GPS

El GPS utilizado es el *Ultimate GPS Breakout V3* de *Adafruit* (Figura 4.19). Este sensor se alimenta con 5V @ 20mA. Puede establecer comunicación con hasta 22 satélites para determinar las coordenadas geográficas, teniendo una exactitud de $\pm 3m$. Su protocolo de comunicación es UART, es decir, envía bits de información de manera secuencial, un bit a la vez a una velocidad de baudios definidos entre el transmisor y receptor. Los pines 8 y 10 de la *Raspberry pi 3* se usan para conexiones UART.

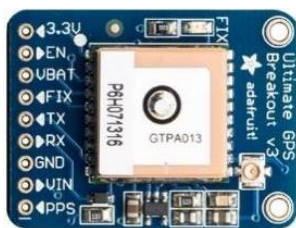


Figura 4. 19. Ultimate GPS Breakout V3.

El pin Tx del GPS debe ir conectado al pin Rx (pin 10) de la Raspberry pi 3 así como el pin Tx de la Raspberry pi 3 debe ir en el pin Rx del GPS. Para su uso debe darse de alta la herramienta *gpsd*, la cual entiende la información obtenida del GPS. Para instalar esta herramienta es mediante el comando:

```
sudo apt-get install gpsd gpsd-clients python-gps
```

En el fichero *cmdline.txt* ubicado en */boot* se cambian las líneas:

```
dwc_otg.lpm_enable=0 console=ttyAMA0,115200 kgdboc=ttyAMA0,115200 console=tty1  
root=/dev/mmcblk0p2 rootfstype=ext4 elevator=deadline rootwait
```

Por:

```
dwc_otg.lpm_enable=0 console=ttyS0 root=/dev/mmcblk0p2 rootfstype=ext4 elevator=deadline rootwait
```

Para que el GPS pueda usarse en la Raspberry pi 3 se necesita habilitar los puertos seriales en los GPIOs. En el mismo directorio encontramos un archivo llamado *config.txt*, en este habilitaremos la comunicación UART agregando un "1":

```
enable_uart=1
```

Se reinicia la Raspberry pi 3. Debe reiniciarse el servicio *gpsd* y dirigirlo para usarse en los pines UART de los GPIOs en lugar del puerto USB. Para ello se usan los siguientes comandos:

```
sudo killall gpsd  
sudo gpsd /dev/ttyS0 -F /var/run/gpsd.sock
```

Con esto la Raspberry pi 3 reconoce el GPS cada vez que es encendida, pero hay veces que la frecuencia del CPU de esta cambia, por lo que saca de sincronía el GPS. Ante esta situación la solución es reinicia el servicio *gpsd* a través de los siguientes comandos:

```
sudo killall gpsd  
sudo gpsd /dev/ttyS0 -F /var/run/gpsd.sock
```

4.6. Voltaje y corriente de alimentación

La *Raspberry pi 3* alimenta los sensores de la sonda meteorológica cuyas características se muestran en la tabla 4.3. El *datasheet* de la *Raspberry pi 3* indica que necesita una alimentación de 5V @ 1A. Lo que se tiene que tomar en cuenta es que por protección se debe añadir un 50% a la corriente que necesita cada sensor por si se presenta algún pico de corriente o similar, así el sistema está protegido.

Sensor	Medición	Voltaje [V]	Corriente [mA]
SHT15	Temperatura y humedad relativa	5	1
BMP180	Presión atmosférica y altitud	3.3	0.012
HCSR04	Viento	5	15
DS1307	Reloj en tiempo real	3.3	0.125
Ultimate GPS	Coordenadas geográficas	5	20

Tabla 4. 3. Características de voltaje y corriente de los sensores.

El *datasheet* de la *Raspberry pi 3* en la sección 7 especifica el voltaje y corriente que proporciona cada GPIO de alimentación. El pin 1 y 17 proporciona 3.3 V mientras que los pines 2 y 4 proporcionan 5V. Para la corriente es necesario saber si es suficiente la suministrada por los GPIOs ya que, si se exige más de la que puede proporcionar, la computadora se puede quemar internamente. En la tabla 4.4 se muestra la corriente suministrada por los GPIOs.

Fuente	Corriente suministrada	Unidad
Pin 3.3V	250	mA
Pin 5V	250	mA
GPIO	50	mA

Tabla 4. 4. Corriente de salida de los GPIO.

Fuente: *Datasheet Raspberry pi compute module*, página 16.

La corriente suministrada por los pines de 5 V y 3.3 V es de 250mA que es suficiente para la alimentación de los sensores.

La fuente de alimentación de la *Raspberry pi 3* es mediante una batería de Litio Polímero (LiPo) de 3.7 V @ 2000mAh. Para elevar este voltaje se usó el módulo 134N3P (Figura 4.20) que es un circuito que eleva los 3.7 V de entrada a 5 V de salida. Este módulo tiene un sistema de protección ante sobrevoltajes, cortocircuitos y sobrecargas. Para cargar la batería LiPo es mediante el puerto micro-USB en la parte inferior mientras la alimentación suministrada a algún dispositivo es por el puerto USB en la parte superior.

El chip principal en este módulo es el L6924D; usa tecnología de Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET), utilizado en cámaras digitales y cargadores USB. Su voltaje de entrada es de 2.5V a 12V @ 1 A mientras el voltaje de salida puede ser programable entre -0.3 V a 6 V @ 1 A.

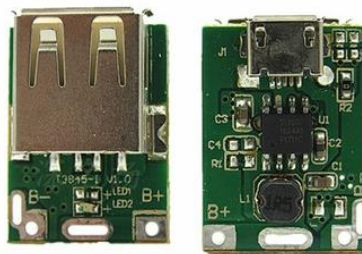


Figura 4. 20. Módulo 134N3P: izquierda vista superior, derecha vista inferior.

4.7. Circuito impreso

Se diseñaron dos circuitos impresos (*Printed Circuit Board – PCB*) donde se soldaron *headers* para conectar y comunicar los sensores con las *Raspberry Pi 3*. El software usado fue *EAGLE*.

EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor) es un software de licencia gratuita desarrollado por Autodesk Inc. Este software permite el diseño de diagramas electrónicos y esquemas de circuitos impresos. Usa librerías o paqueterías que contienen el diseño físico y electrónico de diversos componentes y, en caso de que no exista la librería de algún componente se tienen las herramientas para su diseño. Los PCBs generalmente son de una cara o dos caras, pero a nivel industrial alcanzan hasta 9 capas.

En el primer circuito, que se muestra en la figura 4.21, se ubican los sensores GPS, reloj en tiempo real, altura, temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. El segundo circuito, mostrado en la figura 4.22 es para la medición del viento.

El objetivo de tener un PCB para cada circuito es que minimizar el ruido electrónico que afecta el rendimiento de los sensores. También el tamaño de la sonda meteorológica se compacta más, aunque se tengan muchos

componentes electrónicos y más si el PCB es de dos capas. Su inmunidad ante movimientos bruscos que puedan desconectar los sensores es alta, ya que estos se encuentran soldados a la placa. [61]

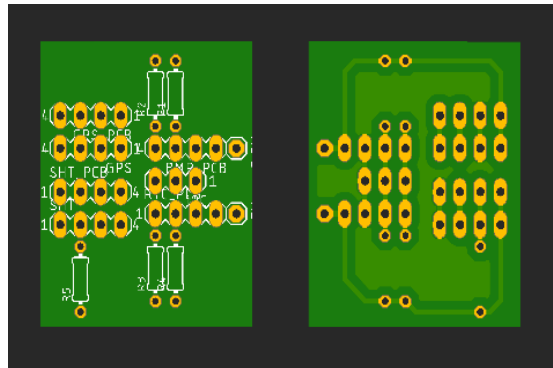


Figura 4. 21. Circuito de los sensores, izquierda cara superior, derecha cara inferior.

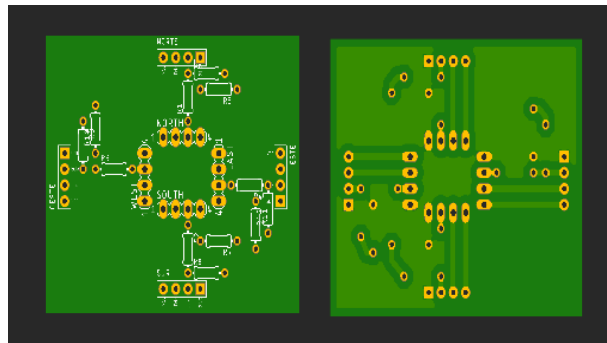


Figura 4. 22. Circuito de viento, izquierda cara superior, derecha cara inferior.

Se realizó el diagrama electrónico de las conexiones de los sensores con la Raspberry pi 3, de igual manera los componentes que requiere cada uno para su correcto funcionamiento. El inconveniente que se presentó fue que no existían todas las librerías de los sensores usados en la sonda meteorológica, por lo que se usaron las herramientas del software para su diseño. Esto es gracias a que con estas herramientas se crea una librería en 3 partes.

1. Se diseña un diagrama de funcionamiento del componente, es decir, crear las interconexiones que posee,
2. Se crea un diagrama de cómo es físicamente el componente y,
3. Al último se hace una referencia a la librería creada mediante un símbolo.

Una vez realizados los diagramas electrónicos de las conexiones corresponde la creación de los esquemas de los circuitos impresos, con EAGLE se puede definir un área en milímetros o en pulgadas donde se ubicarán los componentes. La figura 4.23 muestra el diseño de ambos PCBs, que son de una cara.

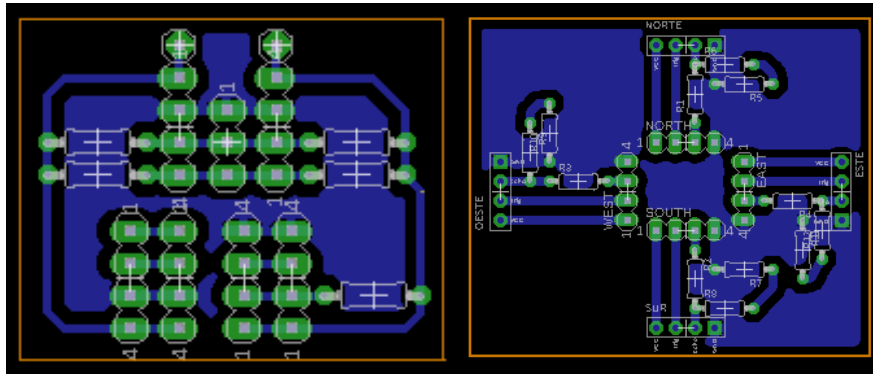


Figura 4. 23. Derecha: diseño del circuito de sensores. Izquierda: Circuito del viento.

4.8. Estuche o Case

Para acoplar la sonda meteorológica al vehículo aéreo no tripulado se diseñó un estuche (*case*), este *case* debe tener un diseño aerodinámico para no perjudicar el vuelo ni del globo cautivo ni del dron. El *case* fue diseñado mediante el software CAD 3D *Inventor* de Autodesk Inc. Este software brinda herramientas de diseño mecánico de sólidos en 3D, documentación y simulación de productos en calidad profesional. Se hizo el diseño 3D de la Raspberry pi 3, de cada uno de los sensores añadidos en la PCB, que se muestran en las figuras 4.24 y 4.25, y la batería con su módulo de carga y descarga.

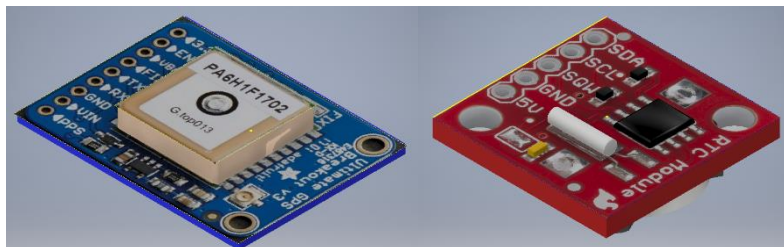


Figura 4. 24. Sensor GPS (Izquierda) y Reloj tiempo real (Derecha).

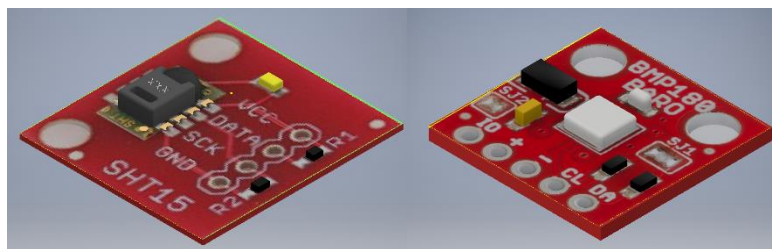


Figura 4. 25. Sensor de temperatura (Izquierda) y de Presión atmosférica (Derecha).

El dron usado para el transporte de la sonda meteorológica fue el *Phantom 2* de *DJI* mostrado en la figura 4.26. Sus características principales son:

1. Peso de 1 Kg (incluyendo la batería),
2. Velocidad máxima de ascenso de 6 m/s y descenso de 2 m/s,

3. Tiempo de vuelo de hasta 25 minutos,
4. Peso máximo de despegue de 1.3 Kg.

Con estas características sabemos que si el dron pesa 1Kg y soporta hasta 1.3Kg para despegar la sonda meteorológica no debe pesar más de 300gr.



Figura 4. 26. Dron Phantom 2 de DJI.

El Phantom 2 posee un espacio en la parte inferior del cuerpo, entre las patas de aterrizaje, donde se ubica un *gimbal* con una cámara. El *gimbal* es un mecanismo que mantiene estable la cámara ante movimientos gracias a su acelerómetro y brújula electrónica. Para nuestro propósito se retiró el *gimbal* con la cámara y en ese espacio se ubicó la *Raspberry pi 3* en su *case*.

Para acoplar la *Raspberry pi 3* el diseño del *case* tiene una estructura similar a la que usa el gimbal para estar sujeto al dron, esta estructura es una cruz con un hueco circular de 1 cm de diámetro en cada extremo donde se coloca una goma antivibración, esta estructura se puede observar en la figura 4.27.



Figura 4. 27. Estructura donde el gimbal se acopla al Phantom 2.

Para adaptar el *case* al globo cautivo se ubican unos pequeños agujeros en la parte superior con un soporte en medio de estos donde se pueden amarrar hilos y el extremo de estos se amarran al globo cautivo. En caso de que el globo llegue a reventarse el sistema debe contar con un paracaídas de al menos 1 m² para suavizar la caída y evitar accidentes. Un diagrama de este sistema se muestra en la figura 4.28.

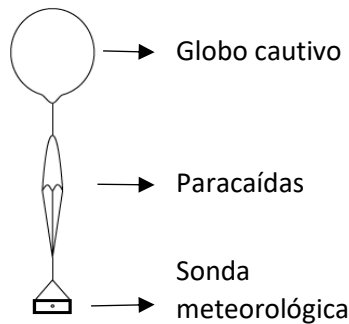


Figura 4. 28. Sistema de Globo cautivo.

Se usó la tecnología de la impresión 3D para tener de manera física el *case*.

La impresión 3D es un proceso por el que se crean objetos físicos colocando un material por capas basado en un modelo digital. La manera más conocida de impresión 3D es calentar y extraer materiales termoplásticos por una boquilla.

Una de las partes más importantes en la impresión 3D es elegir el material de impresión adecuado. Las características principales de los materiales son la fortaleza, flexibilidad y la precisión. Entre los materiales más usados están:

1. *Ácido Poli-láctico* (PLA) es inodoro, resistente a la humedad y puede resistir una temperatura de 65°C antes de comenzar a deformarse, es el material más usado, por su alta rigidez no es recomendado usarse para partes móviles;
2. *Acrilonitrilo Butadieno Estireno* (ABS) resiste temperaturas de 105°C, es el más resistente de los materiales para impresora 3D, los olores que despiden al imprimirse pueden ser tóxicos;
3. *Politereftalato de Etileno con Glicol* (PETG) es usado en botellas de plástico, es un material suave, no emite olores, 100% reciclable, su flexibilidad es mayor que el PLA y ABS. [62] [63]

Para la impresión 3D de los *case* de la sonda meteorológica se usó una impresora 3D *Tevo Tarantula i3* de la empresa *Tevo*. Las características principales son: alcanza una velocidad de impresión de 150 mm/s; imprime con distintos materiales como PLA, ABS, PETG, PLA Wood, etc.; el diámetro de la boquilla es de 0.3 mm y puede calentarla hasta los 280°C, la temperatura de la cama alcanza los 110°C y la resolución de cada capa es de 50 micras.

Un problema con esta impresora fue que se le tuvo que añadir modificaciones en la mecánica, en la programación y en la electrónica; ya que sus impresiones presentaban deformidades, muchas de las capas no se adherían y la precisión era muy baja. Las modificaciones mecánicas añaden estabilidad y tensión a los ejes, en la programación

se cambiaron parámetros para que la inyección del material fuera de mayor calidad y los motores no presentaran vibraciones por la velocidad en sus pasos; y al final en electrónica se añadieron protecciones contra sobre cargas y sobrecalentamientos. En la figura 4.29 se observa la impresora 3D con las modificaciones en color verde.



Figura 4. 29. Impresora 3D Tevo Tarantula.

Para que se imprima un objeto a partir de un diseño 3D se necesita generar su código o segmentación, basado en un control numérico que proporciona los movimientos que debe seguir una máquina para realizar dicho diseño. El software que genera el código, o segmentado, es *CURA 3D* de *Ultimaker*.

CURA es un software *open source* que establece una comunicación entre la computadora y la impresora 3D para crear el segmentado de objetos 3D. Este software contiene herramientas para la impresión, entre las más importantes son: la velocidad de impresión en cada eje, la temperatura tanto del extrusor como de la cama caliente, el porcentaje de relleno que va a llevar la pieza, la forma de laminado del objeto, la distancia entre cada capa y si el objeto necesita soportes en algunas partes. La figura 4.30 muestra la interfaz de *CURA*.

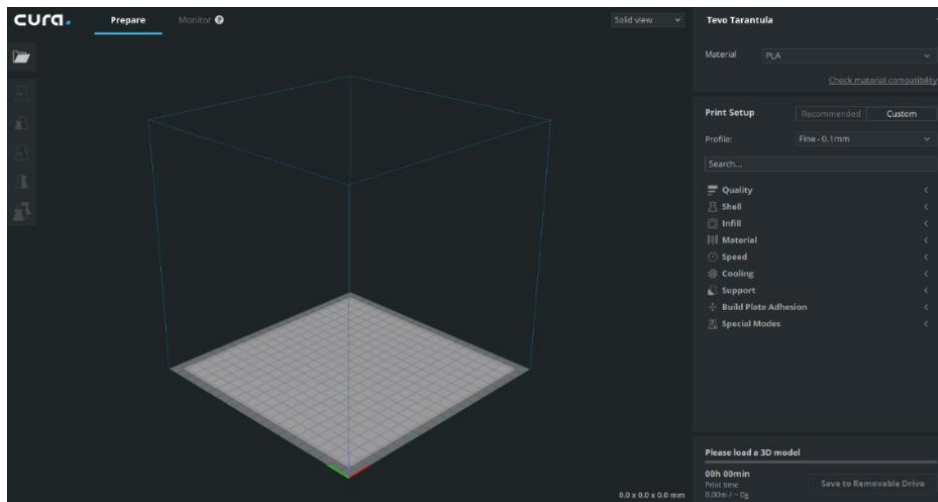


Figura 4. 30. Interfaz del software *CURA*.

Este software tiene un perfil predeterminado de muchas impresoras 3D del mercado, a partir del cual se pueden ir modificando parámetros para tener la impresión deseada. De igual manera puede dar un tiempo aproximado de la impresión.

El material usado en la impresión de los *case* de la sonda meteorológica fue PLA. Se diseñaron 3 diferentes modelos de *case*, ya que conforme la sonda meteorológica se fue desarrollando, nuevas necesidades se iban presentando.

El primer diseño del *case* se muestra en la figura 4.31; fue un diseño simple. Era similar a una caja dividida en 2 partes unidas con 4 tornillos. Presenta ranuras ubicadas donde la *Raspberry pi 3* tiene sus puertos de USB, Ethernet, HDMI, salida de audio y la entrada para la alimentación. Este *case* sólo estaba pensado para realizar pruebas de vuelo del drone y globo cautivo transportando la Raspberry Pi 3 a diferentes alturas con distintos movimientos y así observar el

comportamiento de estos. En la tapa superior presenta unos huecos donde acoplan las gomas antivibración que vienen de la cruceta en la parte inferior del drone.

Las características más importantes en la impresión 3D de este *case* están: una altura entre capas de 0.3 mm, un relleno del 50% y grosor de las paredes de 0.8 mm.

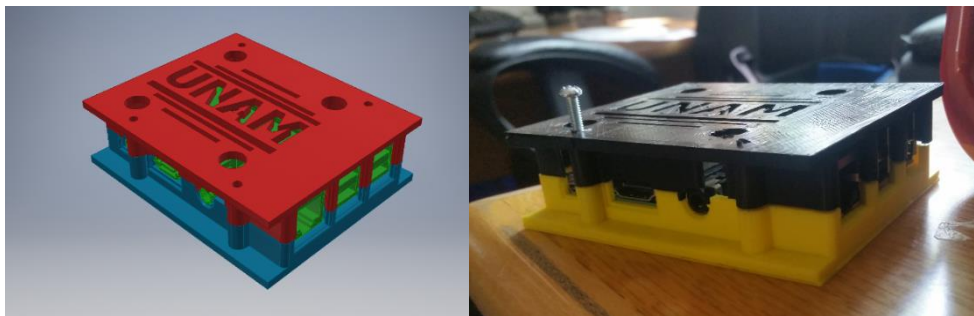


Figura 4. 31. Primer diseño.

El segundo diseño, mostrado en la figura 4.32, es una modificación del primero. Este nuevo *case* es más largo y ancho, podía transportar la *Raspberry pi 3*, el circuito impreso donde se ubican los sensores, 2 baterías LiPo de 3.7V @ 2000mAh en la parte posterior y el módulo troceador de voltaje de 3.7 V a 5V del lado izquierdo.

El principal problema de este diseño en el drone era que pesaba 278 gr, mucho espacio era desperdiciado y el viento chocaba con las paredes internas del *case*, por lo que el drone se tambaleaba a baja altura, con vientos más fuertes podría caerse. El montaje de este diseño en el drone se muestra en la figura 4.33.

Las características en la impresión 3D son: altura entre capas de 0.25 mm, un relleno del 100% y grosor de las paredes de 1 mm.

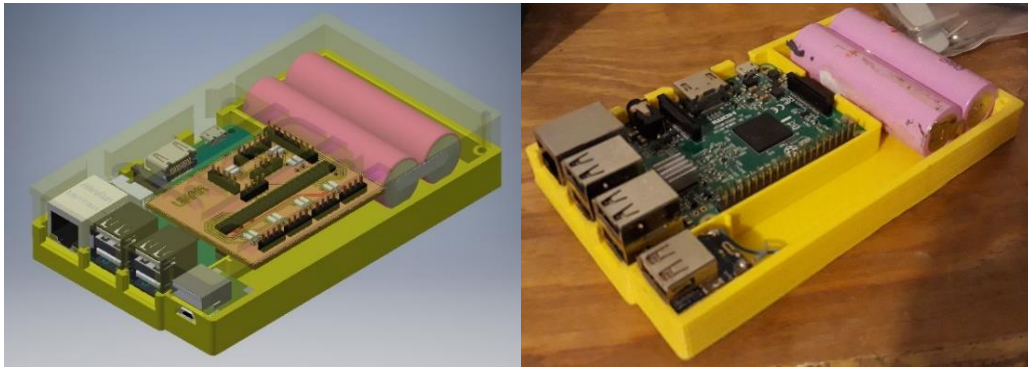


Figura 4. 32. Segundo diseño.



Figura 4. 34. Segundo diseño montado en el Drone.

En la figura 4.34 se observa el tercer diseño, el cual transporta una batería LiPo de 3.7V @ 2000mAh con el módulo que eleva el voltaje de 3.7V a 5V; el cual puede alimentar el sistema hasta por 2 horas continuas. Su peso es de 198 gr, presenta más ranuras por donde el viento puede entrar y salir sin generar un empuje. El centro de masa total de la sonda meteorológica se sigue ubicando en la parte inferior del drone. Permite ubicar los sensores en un mejor lugar para que la adquisición de los datos de las variables meteorológicas sea de alta fiabilidad.

Sus características de impresión 3D son: altura entre capas de 0.15 mm, un relleno del 10% y grosor de las paredes de 1.5 mm.

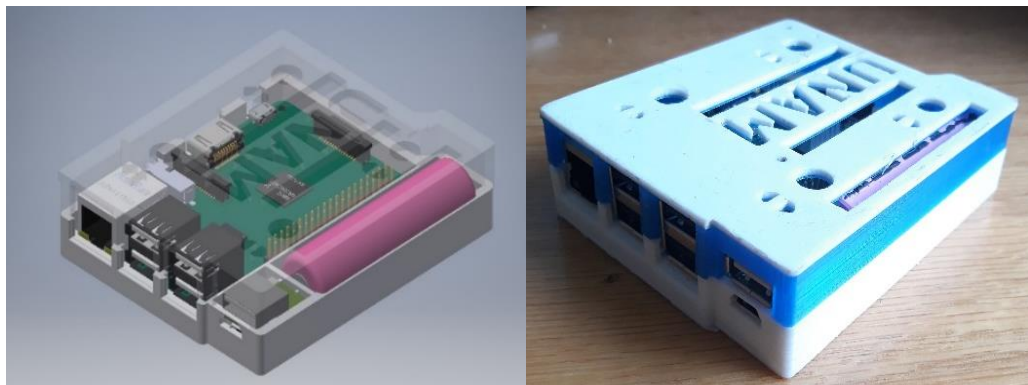


Figura 4. 35. Tercer diseño.

El diseño del anemómetro sónico está basado en los que existen en el mercado. El primer diseño es el que se muestra en la figura 4.35 fue de un solo eje para ver la respuesta de las bocinas ante un viento presente, las bocinas se encontraban una con otra directamente apoyados con una base hecha de PVC espumoso.

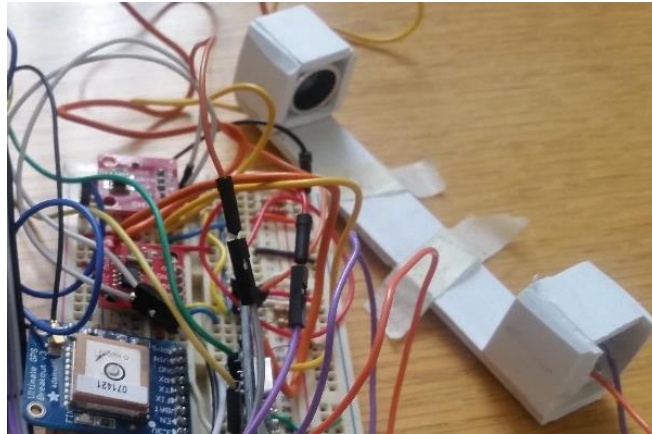


Figura 4. 36. Primer diseño del anemómetro sónico.

La figura 4.36 muestra el segundo diseño, el cual estaba constituido por 2 pares de bocinas. Su objetivo era observar el comportamiento de dos ejes posicionados en sentido contrario frente a la presencia de viento; si el tiempo del viaje del pulso era más rápido cuando el viento venía en dirección similar, y si se reduce el tiempo en caso contrario. Su material de construcción fue PVC espumado de 3 mm y 4 codos de 90° de ½" pulgada.



Figura 4. 37. Segundo diseño del anemómetro sónico.

El tercer diseño tenía el mismo objetivo del anterior, pero se modificó la forma en la que el pulso puede ser afectado por el viento. Los codos de 90° se cambiaron por unos de 45° y se agregó un techo. Con este nuevo diseño el pulso sale del transmisor en dirección al techo donde rebota y llega al receptor, pero al momento de que el pulso rebota en el techo es afectado por el viento que pasa en la apertura que existe entre las bocinas y el techo. Este diseño se muestra en la figura 4.37.

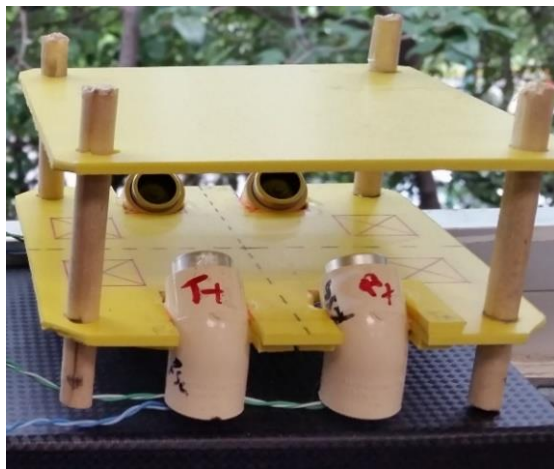


Figura 4. 38. Tercer diseño del anemómetro sónico.

El cuarto diseño del anemómetro sónico se muestra en la figura 4.38. Es similar al tercero, pero ahora es una cruceta donde se tienen 4 pares de bocinas ultrasónicas, uno para cada eje cardinal; el transmisor de cada eje se encuentra en un extremo y su receptor se encuentra en el extremo contrario. El ángulo de inclinación de las bocinas era de 30°, esto influyó a que el diseño fuese largo para el drone, ya que las hélices chocaban con el anemómetro sónico.

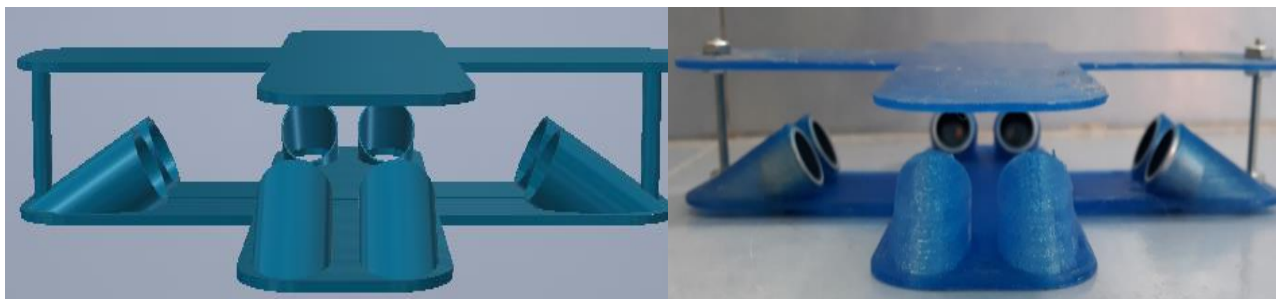


Figura 4. 39. Diseño (izquierda) e impresión 3D (derecha) del anemómetro sónico.

En la figura 4.39 se muestra el diseño final del anemómetro sónico, el cual recibió pocos cambios: se incrementó el ángulo de los soportes de las bocinas ultrasónicas de 30° a 50°, para que el anemómetro sónico sea más corto y no haya problemas durante el vuelo en el drone.



Figura 4. 40. Diseño (izquierda) e impresión 3D (derecha) del anemómetro sónico.

Para probar cada modelo de anemómetro sónico se construyó un túnel de viento con un ventilador, este se muestra en la figura 4.40.

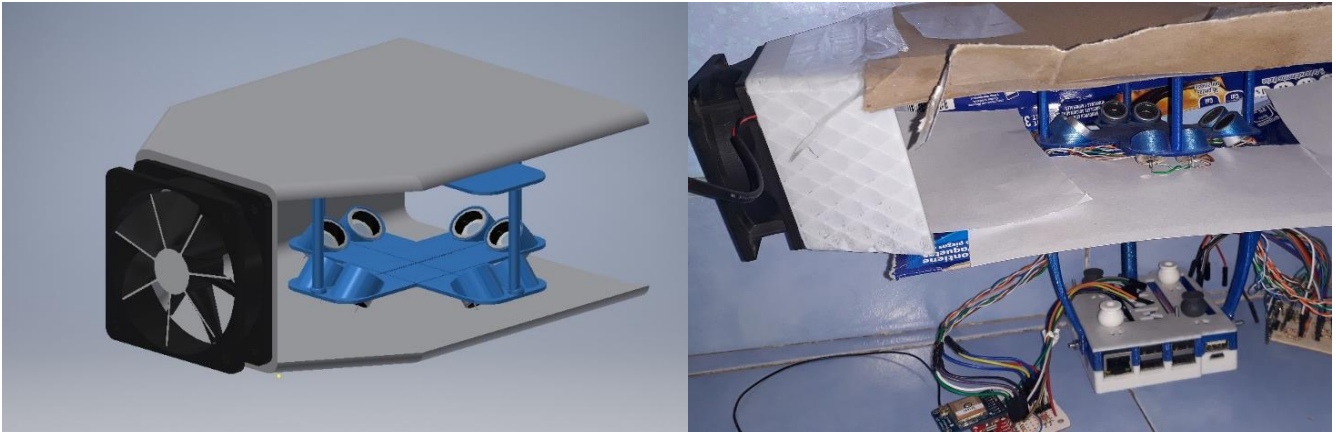


Figura 4. 41. Túnel de viento.

El ventilador es de la marca *Superred*. Sus dimensiones físicas son 8x8x2.5 cm. La alimentación es de 12 V @ 0.17 A. Tiene una velocidad de giro de 2800 revoluciones por minuto (rpm) o 32.39 pies cúbicos por minuto (*Cubic feet per minute*, CFM). Para calcular la velocidad del viento producida por el ventilador parte de la ecuación que:

$$CFM = \left(\left(\text{Velocidad del viento} \left[\frac{ft}{min} \right] \right) (\text{Area de conducto} [ft^2]) \right) \left[\frac{ft^3}{min} \right] \dots (1)$$

El área del conducto es de 8cm x 8cm. De la ecuación (1) despejamos la velocidad del viento:

$$\text{Velocidad del viento} = \frac{CFM \left[\frac{ft^3}{min} \right]}{\text{Area del conducto} [ft^2]} \left[\frac{ft^2}{min} \right] \dots (2)$$

$$\text{Velocidad del viento} = \frac{32.39 \left[\frac{ft^3}{min} \right]}{(8 [cm])(8 [cm])[ft^2]} \left[\frac{ft^2}{min} \right] \dots (3)$$

La velocidad del viento está dada en pies cuadrados sobre minutos, para ello convertiremos los pies a metros y los minutos a segundos.

$$\text{si } 1 \text{ minutos} = 60 \text{ segundos} \quad , \quad 1 \text{ ft}^3 = 0.0283 \text{ m}^3 \quad \text{y} \quad 1 \text{ m}^2 = 10000 \text{ cm}^2$$

$$\text{Velocidad del viento} = \frac{\left(32.39 \frac{ft^3}{min} \right) \left(\frac{1 min}{60 segs} \right) \left(\frac{0.0283 m^3}{1 ft^3} \right)}{(64 \text{ cm}^2) \left(\frac{1 m^2}{10,000 \text{ cm}^2} \right)} = \frac{0.0152}{6.4 \times 10^{-3}} \left[\frac{m}{s} \right] = 2.37 \frac{m}{s} \dots (4)$$

Con este dato tenemos la referencia de una medición aproximada que debemos tener con el anemómetro ultrasónico dentro del túnel de viento; debe ser cercano a 2.37 m/s.

El túnel de viento comienza con un área de 8x8 cm, pero el anemómetro sónico necesita un área de 13x8 cm por lo que con la ecuación de continuidad se calcula la nueva velocidad del viento en esta área

$$G = A_1V_1 = A_2V_2 \quad \text{Si } A_1 = 64 \text{ cm}^2 = 0.0064 \text{ m}^2, \quad V_1 = 2.37 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{y} \quad A_2 = 104 \text{ cm}^2 = 0.0104 \text{ m}^2$$

$$V_2 = \frac{(A_1)(V_1)}{A_2} \quad V_2 = \frac{(0.0064 \text{ m}^2)(2.37 \frac{\text{m}}{\text{s}})}{0.0104 \text{ m}^2} = \frac{15.168 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.0104} = 1.45 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

La velocidad teórica de la velocidad del viento es de 1.45 m/s.

Para unir los sensores y el anemómetro sónico con la *Raspberry pi 3* se diseñó una estructura que se acoplara al cuerpo del drone, que no haya contacto con las hélices, en el globo cautivo se debe cuidar la distribución del peso. Esta estructura se muestra en la figura 4.41.

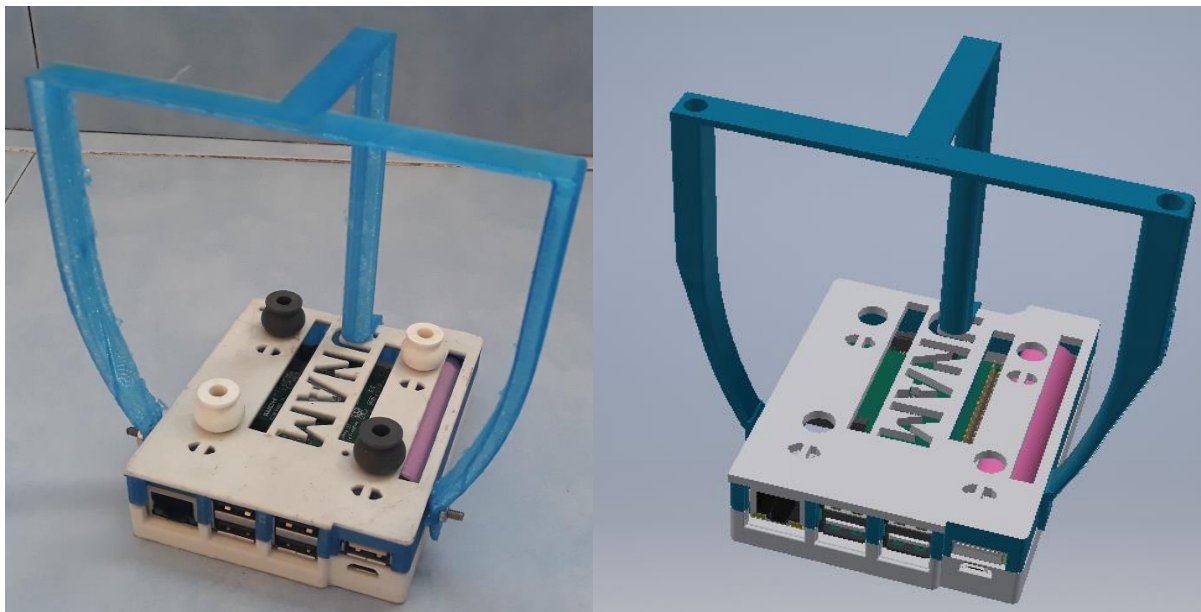


Figura 4. 42. Estructura de la sonda meteorológica.

Los sensores SHT15 (Temperatura, humedad relativa y punto de rocío) y BMP180 (presión atmosférica y altitud) son ubicados en la parte inferior de la base del anemómetro sónico para que la medición de las variables meteorológicas no sea falseada debido a los rayos directos del Sol. Los cables de los sensores pasan a través de la estructura para que no tengan problemas con las hélices del drone. Los sensores HCR-04 del anemómetro sónico son están ubicados en una pequeña base en la pata del tren de aterrizaje del drone.

La sonda meteorológica final en el drone se muestra a continuación en la figura 4.42.

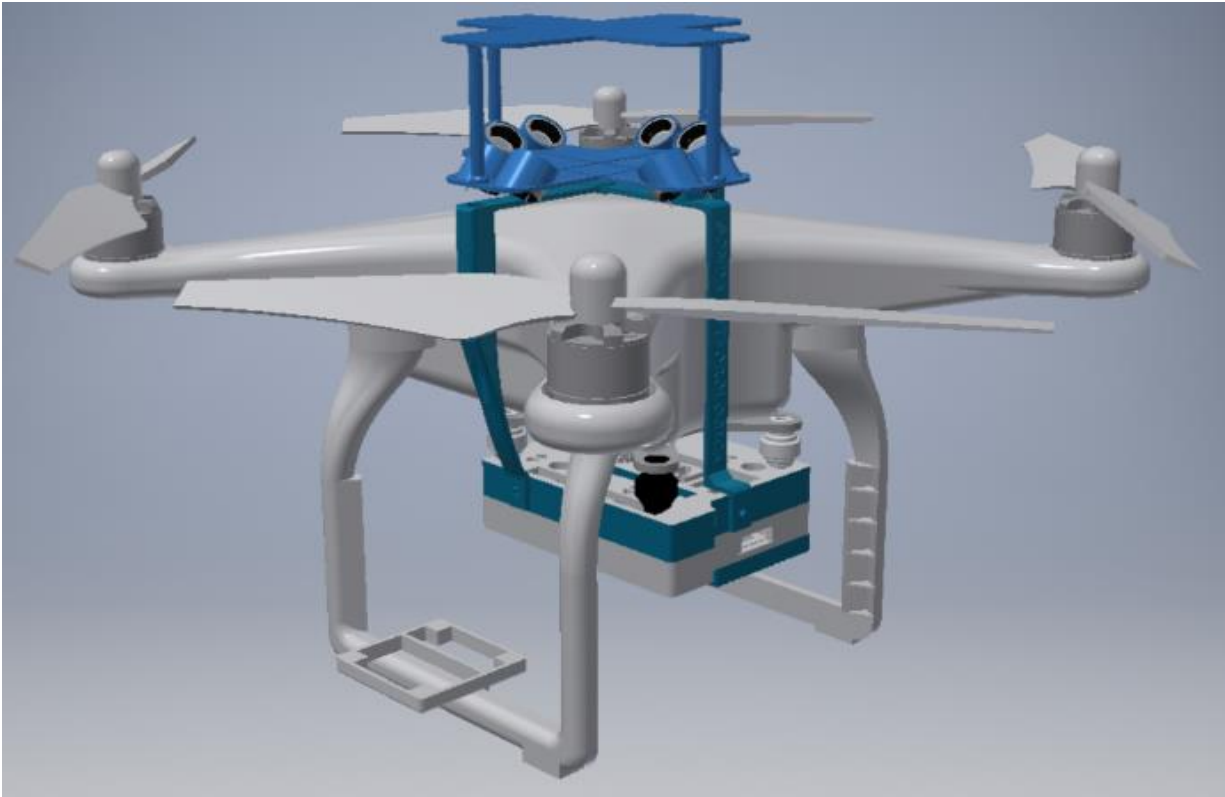


Figura 4. 43. Drone con la sonda meteorológica: diseño CAD (parte superior) e impresión 3D con sensores (parte inferior).

Resultados

Las pruebas del drone y el primer diseño del *case* con la Raspberry pi 3 resultaron de manera exitosa ya que pudo transportarlas sin presentar problemas; el peso total de la sonda y el drone fue de 1.091 Kg.

Las primeras pruebas se hicieron con la sonda meteorológica de manera estática en el segundo piso del Instituto de Geografía, UNAM por un lapso de hora y media. La medición de los factores atmosféricos era tomada cada 5:01 minutos con una posibilidad de variación de +1 segundo. Los datos obtenidos se muestran en la figura 5.1.

Date	Temperature [C]	Humidity [%]	Dew point [C]
Fri Nov 2 11:34:29 2018	26.8	25.6	5.5
Fri Nov 2 11:39:30 2018	26.4	26.6	5.7
Fri Nov 2 11:44:32 2018	26.8	25.9	5.6
Fri Nov 2 11:49:33 2018	26.3	25.8	5.1
Fri Nov 2 11:54:34 2018	26.2	25.4	4.8
Fri Nov 2 11:59:35 2018	26.2	26.8	5.6
Fri Nov 2 12:04:36 2018	26.1	26.1	5.2
Fri Nov 2 12:09:37 2018	26.3	25.6	5.0
Fri Nov 2 12:14:39 2018	26.4	24.6	4.5
Fri Nov 2 12:19:40 2018	26.1	22.7	3.1
Fri Nov 2 12:24:41 2018	26.1	24.6	4.3
Fri Nov 2 12:29:42 2018	26.3	22.6	3.3
Fri Nov 2 12:34:43 2018	26.5	20.6	2.1
Fri Nov 2 12:39:45 2018	26.2	20.7	2.0
Fri Nov 2 12:44:46 2018	26.3	21.8	2.7
Fri Nov 2 12:49:47 2018	26.4	22.2	3.1
Fri Nov 2 12:54:48 2018	26.5	20.1	1.8
Fri Nov 2 12:59:49 2018	26.1	19.1	0.7

Figura 5. 1. Datos obtenidos el 2 de noviembre del 2017.

Se realizó la gráfica mostrada en la figura 5.2, con los datos obtenidos donde se observa que el punto de rocío y la temperatura ambiente están alejados, mientras que la humedad fue baja.

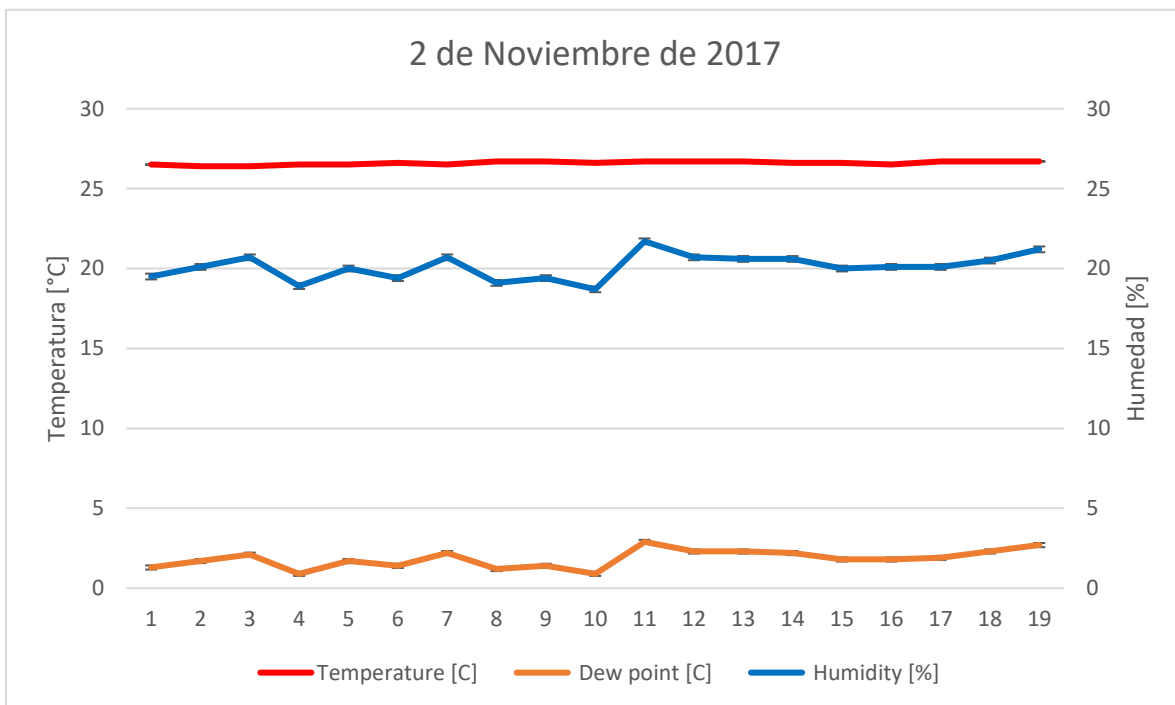


Figura 5. 2. Gráfica de los datos obtenidos el día 2 de noviembre de 2017.

Un vuelo hecho con la sonda meteorológica durante un lapso de 18 minutos el día 15 de noviembre del 2017 a las 13 horas en el estacionamiento del Instituto de geografía, a una altura de 10 m sobre la superficie. Los datos obtenidos se muestran en la figura 5.3.

Altitude: 2184 m, Presion: 779 hPa, GPS: 19.3228271, -99.175938

Date	Temperature [C]	Humidity [%]	Dew point [%]
Wen Nov 15 12:59:32 2017	19.7	47.2	8.1
Wen Nov 15 13:00:02 2017	20.9	45.1	8.5
Wen Nov 15 13:00:32 2017	20.8	45.5	8.6
Wen Nov 15 13:01:02 2017	20.3	42.0	7.0
Wen Nov 15 13:01:33 2017	20.9	39.9	6.8
Wen Nov 15 13:02:03 2017	19.2	48.7	8.1
Wen Nov 15 13:02:33 2017	20.0	45.0	7.7
Wen Nov 15 13:03:03 2017	20.1	42.5	7.0
Wen Nov 15 13:03:33 2017	19.9	45.6	7.8
Wen Nov 15 13:04:04 2017	19.8	44.3	7.2
Wen Nov 15 13:04:31 2017	19.9	46.5	8.1
Wen Nov 15 13:05:01 2017	19.1	48.6	8.0
Wen Nov 15 13:05:31 2017	20.3	43.2	7.4
Wen Nov 15 13:06:01 2017	21.1	44.3	8.4
Wen Nov 15 13:06:32 2017	22.4	42.2	9.0
Wen Nov 15 13:07:02 2017	21.2	42.0	7.8
Wen Nov 15 13:07:32 2017	22.0	42.4	8.6
Wen Nov 15 13:08:02 2017	22.0	41.8	8.4
Wen Nov 15 13:08:32 2017	20.0	43.7	7.2
Wen Nov 15 13:09:03 2017	19.5	44.8	7.2
Wen Nov 15 13:09:33 2017	20.9	45.3	8.6
Wen Nov 15 13:10:03 2017	20.4	43.0	7.3
Wen Nov 15 13:10:33 2017	21.4	41.9	8.0
Wen Nov 15 13:11:03 2017	21.2	42.5	7.9
Wen Nov 15 13:11:34 2017	22.1	43.7	9.2
Wen Nov 15 13:12:04 2017	22.1	41.1	8.3
Wen Nov 15 13:12:34 2017	21.7	42.4	8.3
Wen Nov 15 13:13:04 2017	21.7	42.4	8.3
Wen Nov 15 13:13:34 2017	21.9	43.7	9.0
Wen Nov 15 13:14:05 2017	20.9	42.6	7.7
Wen Nov 15 13:14:35 2017	21.2	43.1	8.2
Wen Nov 15 13:15:05 2017	20.9	42.8	7.7
Wen Nov 15 13:15:32 2017	20.8	42.7	7.6
Wen Nov 15 13:16:02 2017	20.9	43.4	8.0
Wen Nov 15 13:16:32 2017	21.8	43.1	8.7
Wen Nov 15 13:17:02 2017	20.9	43.2	7.9
Wen Nov 15 13:17:33 2017	22.1	42.2	8.6

Figura 5. 3. Datos obtenidos el día 15 de noviembre de 2017.

De los datos mostrados en la figura 5.3 se realizó el gráfico mostrado en la figura 5.4 donde se compara la temperatura, el punto de rocío y la humedad relativa. Con esta prueba se observó que la temperatura y el punto de rocío estaban un poco alejados, mientras la humedad era por debajo del 50%, esto indica que había pocas posibilidades de lluvia. En la figura 5.5 se muestra el lugar al que corresponden las coordenadas indicadas por el GPS, siendo este el Instituto de Geografía.

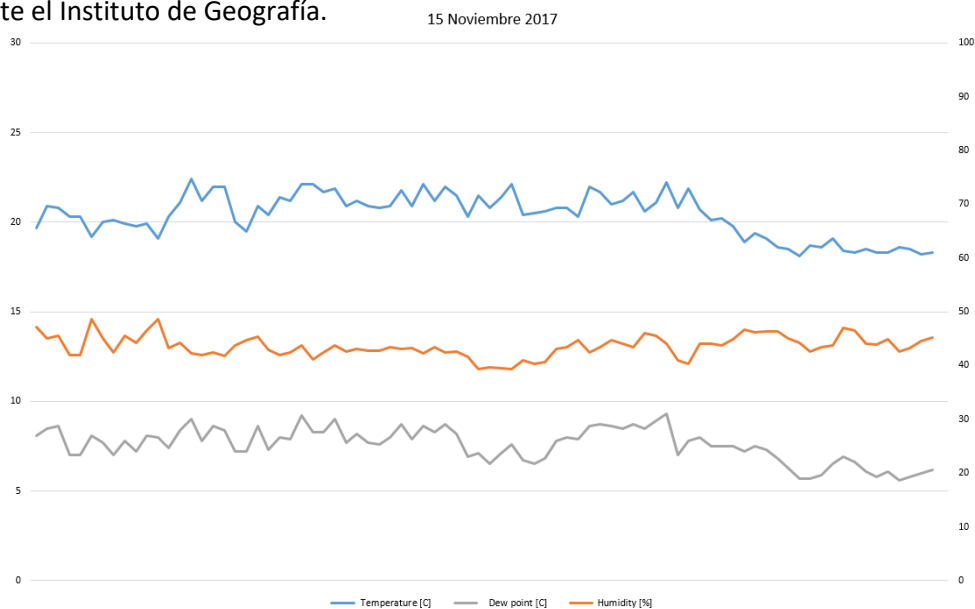


Figura 5. 4. Gráfica de temperatura, humedad y punto de rocío del día 15 de noviembre de 2017.

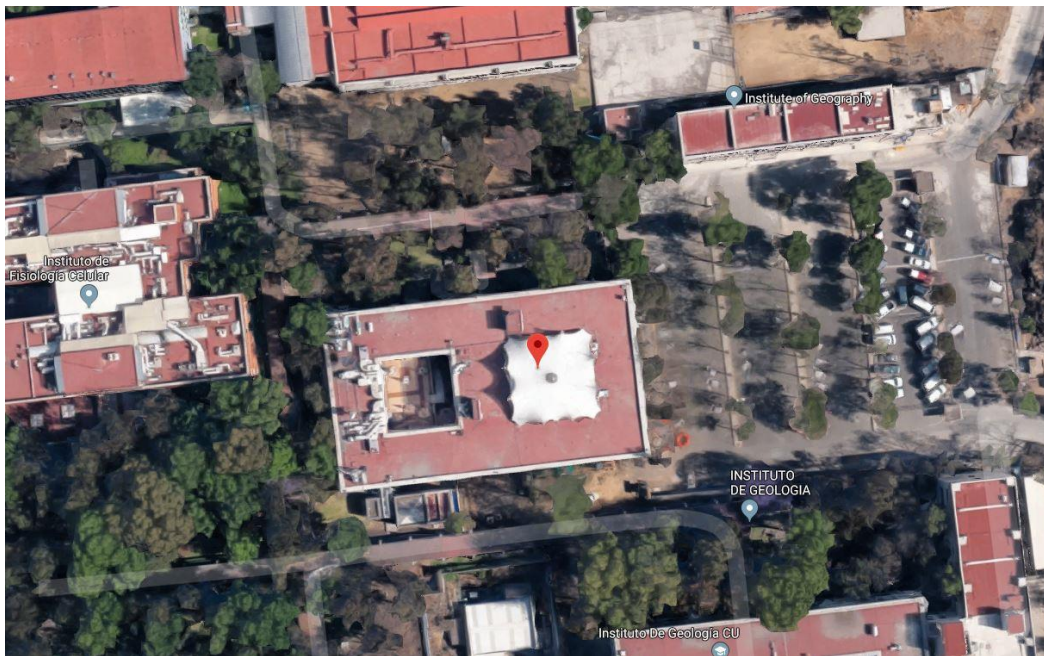


Figura 5. 5. Coordenadas latitud: 19.328011667, longitud: -99.176636667.

Fuente: <http://bit.ly/2MtxBQI>

Cuando las pruebas de la sonda meteorológica en vuelo midieron los fenómenos atmosféricos dando valores razonables, el reloj marca la hora exacta y el GPS muestra las coordenadas correctas; comenzaron las pruebas del anemómetro sónico.

Medición del viento

Se hicieron pruebas durante cada etapa del anemómetro sónico. El primer diseño consistía en 2 bocinas sónicas ultrasónicas, transmisor (Tx) y receptor (Rx), ubicadas una frente a la otra de manera directa a una distancia de 12 cm. Este par es equivalente a 1 eje en la medición del viento. Las primeras pruebas se hicieron con el objetivo de observar si la distancia entre las bocinas eran los 12 cm y cuál era la velocidad del pulso ultrasónico. Los resultados se muestran en la figura 5.6.

```
pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/AD9850/hcsr04 $ sudo python Distancia_0_0.py
Messuring distance...
Waiting for Sensor to Settle...
Distance: 14.4 cm
Speed pulse: 341.231511864 m/s
pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/AD9850/hcsr04 $ sudo python Distancia_0_0.py
Messuring distance...
Waiting for Sensor to Settle...
Distance: 12.3 cm
Speed pulse: 343.932928 m/s
pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/AD9850/hcsr04 $ sudo python Distancia_0_0.py
Messuring distance...
Waiting for Sensor to Settle...
Distance: 13.8 cm
Speed pulse: 341.483157522 m/s
pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/AD9850/hcsr04 $ sudo python Distancia_0_0.py
Messuring distance...
Waiting for Sensor to Settle...
Distance: 13.8 cm
Speed pulse: 341.483157522 m/s
```

Figura 5. 6. Prueba de distancia.

En la figura 5.7 se observa que la medición de la distancia entre las bocinas ultrasónicas era entre 12 a 14 cm. Una vez realizadas las pruebas de la medición de la distancia entre bocinas ultrasónicas y velocidad del pulso, se tomaron mediciones de la velocidad del viento sin el túnel de viento.

```
pi@MarcoSerrano: ~/Desktop/PRUEBAS/AD9850/hcsr04 $ sudo python Distancia_2.py
Velocidad: -0.26 m/s
Velocidad: 1.22 m/s
Velocidad: -2.06 m/s
Velocidad: 0.08 m/s
Velocidad: -0.26 m/s
Velocidad: 0.59 m/s
Velocidad: 2.24 m/s
Velocidad: -0.12 m/s
Velocidad: -0.0 m/s
Velocidad: 0.32 m/s
Velocidad: -0.26 m/s
```

Figura 5. 7. Medición del viento en un eje, sin túnel de viento.

Las mediciones sin túnel de viento muestran que no hay una tendencia a vientos positivos o negativos, es intermitente. A continuación, se usó el túnel de viento para tener una manera de manipular la dirección del viento, primero en el mismo sentido que el pulso ultrasónico y una segunda prueba en sentido contrario. En la figura 5.8 se muestran las mediciones obtenidas.

```
pi@MarcoSerrano: ~/Desktop/PRUEBAS/AD9850/hcsr04 $ sudo python Distancia_2.py
Velocidad: 2.59 m/s
Velocidad: 2.12 m/s
Velocidad: 2.36 m/s
Velocidad: 2.49 m/s
Velocidad: 2.23 m/s
Velocidad: 2.51 m/s
Velocidad: 2.33 m/s
Velocidad: 2.15 m/s
Velocidad: 2.38 m/s
Velocidad: 2.15 m/s
Velocidad: 2.15 m/s
Velocidad: 2.4 m/s
Velocidad: 2.49 m/s
Velocidad: 2.36 m/s
Velocidad: 2.54 m/s
```

Figura 5. 8. Medición del viento con un eje, con túnel de viento en el mismo sentido del pulso ultrasónico.

Las mediciones con el túnel de viento en el mismo sentido que el pulso ultrasónico, donde se observan velocidades positivas con valores entre 2 a 3 m/s.

La siguiente prueba es con el túnel de viento en sentido contrario al pulso ultrasónico, mostrando en la figura 5.9 los resultados obtenidos.

```
pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/AD9850/hcsr04 $ sudo python Distancia_2.py
Velocidad: -0.58 m/s
Velocidad: -0.82 m/s
Velocidad: -0.68 m/s
Velocidad: -0.54 m/s
Velocidad: -0.8 m/s
Velocidad: -0.68 m/s
Velocidad: -0.68 m/s
Velocidad: -0.77 m/s
Velocidad: -0.57 m/s
Velocidad: -0.8 m/s
Velocidad: -0.66 m/s
Velocidad: -0.79 m/s
Velocidad: -0.77 m/s
Velocidad: -0.58 m/s
Velocidad: -0.79 m/s
```

Figura 5. 9. Medición del viento con un eje, con túnel de viento en sentido contrario del pulso ultrasónico.

Las mediciones con el flujo del viento en sentido contrario al pulso ultrasónico arrojaron velocidades negativas.

Con las 2 pruebas anteriores sabemos que el sistema está detectando el sentido del viento, aunque las mediciones de la velocidad del viento con el túnel de viento a favor del pulso son mayores que cuando el viento se mueve en sentido contrario.

El segundo diseño del anemómetro sónico consta de 2 pares de bocinas ultrasónicas, cada transmisor frente a su receptor. Los pares se encontraban en sentido contrario uno del otro, para tomar mediciones en 2 sentidos; un par será para el Este y el otro para el Oeste. La figura 5.10 muestra una prueba sin túnel de viento.

```
pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/AD9850/hcsr04 $ sudo python Distancia_2.py
Distancia_2.py:11: RuntimeWarning: This channel is already in use, continuing anyway.
  GPIO.setup(TRIG,GPIO.OUT)
Velocidad: -0.12 m/s
Velocidad: 0.08 m/s
Velocidad: -0.13 m/s
Velocidad: 0.08 m/s
Velocidad: 0.08 m/s
Velocidad: 0.09 m/s
Velocidad: -0.13 m/s
Velocidad: -0.02 m/s
Velocidad: -0.05 m/s
Velocidad: -0.11 m/s
Velocidad: 0.11 m/s
Velocidad: -0.06 m/s
Velocidad: -0.08 m/s
Velocidad: -0.05 m/s
Velocidad: 0.82 m/s
Velocidad: -0.76 m/s
Velocidad: 0.2 m/s
```

Figura 5. 10. Medición del viento con el segundo diseño sin túnel de viento.

Los resultados obtenidos eran tanto positivos como negativos, lo que indica que el anemómetro sónico estuvo midiendo el viento a favor y en contra del pulso. El máximo valor positivo medido fue de 0.82 m/s, mientras el negativo fue de -0.76 m/s. La siguiente prueba fue con presencia del túnel de viento, cuyos resultados se muestran en la figura 5.11.

z

```
pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/AD0050/ACS004 $ sudo python Distancia_2.py
Distancia_2.py:11: RuntimeWarning: This channel is already in use, continuing
  GPIO.setup(TRIG,GPIO.OUT)
Velocidad: 0.5 m/s
Velocidad: 0.49 m/s
Velocidad: 0.5 m/s
Velocidad: 0.44 m/s
Velocidad: 0.5 m/s
Velocidad: 0.5 m/s
Velocidad: 0.41 m/s
Velocidad: 0.5 m/s
Velocidad: 0.5 m/s
Velocidad: 0.38 m/s
Velocidad: 0.56 m/s
Velocidad: 0.39 m/s
Velocidad: 0.55 m/s
Velocidad: 0.38 m/s
Velocidad: 0.49 m/s
```

Figura 5. 11. Medición del viento con el segundo diseño con túnel de viento.

Se analizaron los resultados ya que después de varias pruebas las mediciones con y sin la presencia del túnel de viento eran similares, como se muestra en la figura 5.10 y 5.11. Se llegó a la conclusión de que el túnel de viento no estaba afectando de la manera deseada al pulso ultrasónico, por lo que el diseño de las bocinas fue el de elevarlas 30° y añadir un techo donde el pulso pudiera rebotar, de esta manera era afectado de mayor manera el viento.

Con el tercer diseño del anemómetro sónico se hicieron 3 principales pruebas, una sin túnel de viento que se muestra en la figura 5.12, otra con el viento a favor del Este que se muestra en la figura 5.13 y la última a favor del Oeste que se muestra en la figura 5.14.

```
pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/Programa_final/viento $ sudo python Este_Oeste.py
Este , Oeste , Velocidad
0.41 m/s , 0.59 m/s , -0.17 m/s
0.43 m/s , 0.66 m/s , -0.23 m/s
0.39 m/s , 0.43 m/s , -0.05 m/s
0.52 m/s , 0.39 m/s , 0.13 m/s
0.4 m/s , 0.39 m/s , 0.02 m/s
0.41 m/s , 0.54 m/s , -0.13 m/s
0.52 m/s , 0.35 m/s , 0.17 m/s
0.52 m/s , 0.39 m/s , 0.13 m/s
0.61 m/s , 0.46 m/s , 0.16 m/s
0.6 m/s , 0.54 m/s , 0.06 m/s
0.49 m/s , 0.59 m/s , -0.09 m/s
0.52 m/s , 0.57 m/s , -0.05 m/s
0.4 m/s , 0.48 m/s , -0.08 m/s
0.57 m/s , 0.48 m/s , 0.09 m/s
```

Figura 5. 12. Mediciones sin túnel de viento para ejes Este y Oeste.

En las mediciones tomadas se observa que unas veces es mayor el viento del Este y otras es mayor el del Oeste. La siguiente prueba fue con el túnel de viento, pero a favor del Este para observar que el sistema detecte un viento a favor.

```

pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/Programa_final/Viento $ sudo python Este_Oeste.py
Este      , Oeste   , Velocidad
2.4 m/s  , 0.5 m/s , 1.9
2.4 m/s  , 0.4 m/s , 2.0
2.3 m/s  , 0.7 m/s , 1.6
2.2 m/s  , 0.6 m/s , 1.7
2.4 m/s  , 0.4 m/s , 1.9
2.2 m/s  , 0.4 m/s , 1.8
2.3 m/s  , 0.5 m/s , 1.8
2.2 m/s  , 0.5 m/s , 1.7
2.3 m/s  , 0.6 m/s , 1.7
2.3 m/s  , 0.5 m/s , 1.8
2.3 m/s  , 0.6 m/s , 1.7
2.4 m/s  , 0.5 m/s , 1.9
2.3 m/s  , 0.5 m/s , 1.8
2.2 m/s  , 0.6 m/s , 1.6

```

Figura 5. 13. Mediciones con túnel de viento a favor del Este.

Con el túnel de viento a favor del par ultrasónico correspondiente a la medición del Este, se registró un aumento en los valores medidos en este eje, ya que aumentó la velocidad medida por encima de 2 m/s mientras el valor del este no cambio mucho en comparación de la prueba sin túnel de viento.

La última prueba fue el observar el comportamiento de las mediciones obtenidas por el eje correspondiente al Oeste del anemómetro sónico con el túnel de viento a favor de este eje.

```

pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/Programa_final/Viento $ sudo python Este_Oeste.py
Este      , Oeste   , Velocidad
0.4 m/s  , 2.1 m/s , 1.7
0.4 m/s  , 2.1 m/s , 1.7
0.5 m/s  , 2.2 m/s , 1.6
0.6 m/s  , 2.2 m/s , 1.8
0.6 m/s  , 2.1 m/s , 1.9
0.5 m/s  , 2.0 m/s , 1.8
0.6 m/s  , 2.3 m/s , 1.7
0.4 m/s  , 2.1 m/s , 1.7
0.6 m/s  , 2.1 m/s , 1.8
0.6 m/s  , 2.3 m/s , 1.7
0.4 m/s  , 2.2 m/s , 1.6
0.5 m/s  , 2.2 m/s , 1.7
0.6 m/s  , 2.1 m/s , 1.8
0.4 m/s  , 2.1 m/s , 1.6
0.6 m/s  , 2.2 m/s , 1.8
0.4 m/s  , 2.2 m/s , 1.6

```

Figura 5. 14. Mediciones con túnel de viento a favor del Oeste.

El comportamiento de las mediciones en esta prueba es el mismo que cuando el túnel estuvo a favor del eje Este, con un incremento en la velocidad del eje que tiene el túnel de viento a favor y sin cambio en el eje contrario.

Se hicieron las mismas pruebas con los pares ultrasónico que representan al Norte y al Sur, siendo la figura 5.15 las mediciones tomadas sin túnel de viento, la figura 5.16 con el túnel de viento a favor del eje Norte y la figura 5.17 las mediciones a favor del eje Sur.

```

pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/Programa_final/Viento $ sudo python Norte_Sur.py
Norte , Sur , Velocidad
0.5 m/s , 0.48 m/s , 0.02
0.5 m/s , 0.38 m/s , 0.12
0.5 m/s , 0.5 m/s , -0.0
0.5 m/s , 0.5 m/s , -0.0
0.5 m/s , 0.5 m/s , -0.0
0.5 m/s , -3.23 m/s , 3.73
0.5 m/s , 0.64 m/s , -0.14
0.5 m/s , 0.05 m/s , 0.45
0.5 m/s , 0.27 m/s , 0.23
0.5 m/s , 0.68 m/s , -0.18
0.5 m/s , 0.54 m/s , -0.04
0.5 m/s , 0.49 m/s , 0.01
0.5 m/s , 0.37 m/s , 0.13
0.5 m/s , 0.52 m/s , -0.02

```

Figura 5. 15. Mediciones sin túnel de viento para ejes Norte y Sur.

```

pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/Programa_final/Viento $ sudo python Norte_Sur.py
Norte , Sur , Velocidad
2.2 m/s , 0.5 m/s , 1.7 m/s
2.2 m/s , 0.4 m/s , 1.8 m/s
2.2 m/s , 0.7 m/s , 1.5 m/s
2.2 m/s , 0.5 m/s , 1.7 m/s
2.2 m/s , 0.5 m/s , 1.7 m/s
2.2 m/s , 0.6 m/s , 1.6 m/s
2.2 m/s , 0.5 m/s , 1.7 m/s
2.2 m/s , 0.5 m/s , 1.7 m/s
2.2 m/s , 0.5 m/s , 1.7 m/s
2.2 m/s , 0.5 m/s , 1.7 m/s
2.2 m/s , 0.5 m/s , 1.7 m/s
2.2 m/s , 0.6 m/s , 1.5 m/s
2.2 m/s , 0.6 m/s , 1.5 m/s
2.2 m/s , 0.6 m/s , 1.6 m/s

```

Figura 5. 16. Medición del viento con el viento a favor del Norte.

```

pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PRUEBAS/Programa_final/Viento $ sudo python Norte_Sur.py
Norte , Sur , Velocidad
0.5 m/s , 0.9 m/s , 0.4 m/s
0.5 m/s , 1.0 m/s , 0.5 m/s
0.5 m/s , 0.9 m/s , 0.4 m/s
0.5 m/s , 1.7 m/s , 1.2 m/s
0.5 m/s , 1.0 m/s , 0.5 m/s
0.5 m/s , 1.0 m/s , 0.5 m/s
0.5 m/s , 1.1 m/s , 0.6 m/s
0.5 m/s , 1.0 m/s , 0.5 m/s
0.5 m/s , 1.0 m/s , 0.5 m/s
0.5 m/s , 0.9 m/s , 0.4 m/s
0.5 m/s , 0.9 m/s , 0.4 m/s
0.5 m/s , 1.0 m/s , 0.5 m/s
0.5 m/s , 1.0 m/s , 0.5 m/s
0.5 m/s , 0.9 m/s , 0.4 m/s

```

Figura 5. 17. Medición del viento con el viento a favor del Sur.

Al igual que con las pruebas de los ejes Este y Oeste, las velocidades del viento medidas son mayores en el eje que tiene el túnel de viento a su favor, mientras el otro eje no presenta un aumento o decremento significativo en la velocidad.

El diseño final consta de un par de bocinas ultrasónicas para cada eje cardinal. La última prueba fue colocar el túnel de viento cada 45°, para simular vientos del noreste, noroeste, sureste y suroeste. La primera prueba fue para el eje Noreste y los resultados se muestran en la figura 5.18. La segunda prueba fue con el túnel de viento cercano al Noroeste mostrado en la figura 5.19.

```

pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PIUTBAS/Programa_Final/Viento $ sudo python Vel_Viento.py
Norte , Sur , Este , Oeste , Velocidad del viento , Direccion del viento
1.8 , 0.52 , 1.83 , 0.41 , 1.91 , 48.12
1.8 , 0.43 , 1.95 , 0.41 , 2.06 , 48.26
1.8 , 0.65 , 1.83 , 0.6 , 1.69 , 47.01
1.8 , 0.63 , 1.83 , 0.39 , 1.86 , 51.03
1.8 , 0.65 , 1.87 , 0.51 , 1.78 , 49.74
1.8 , 0.65 , 1.98 , 0.45 , 1.91 , 52.9
1.8 , 0.52 , 1.89 , 0.59 , 1.83 , 45.59
1.8 , 0.65 , 2.06 , 0.5 , 1.94 , 53.48
1.8 , 0.62 , 1.97 , 0.5 , 1.88 , 51.03
1.8 , 0.4 , 2.07 , 0.51 , 2.1 , 47.92
1.8 , 0.63 , 1.85 , 0.57 , 1.73 , 47.58
1.8 , 0.65 , 1.86 , 0.6 , 1.71 , 47.72
1.8 , 0.66 , 1.83 , 0.59 , 1.69 , 47.66
1.8 , 0.66 , 1.83 , 0.52 , 1.74 , 49.19
1.8 , 0.54 , 1.95 , 0.54 , 1.89 , 48.08
1.8 , 0.4 , 1.87 , 0.5 , 1.96 , 44.32
1.8 , 0.43 , 1.95 , 0.42 , 2.05 , 48.08
1.8 , 0.65 , -8.22 , 0.41 , 8.71 , -82.4
1.8 , 0.52 , 2.03 , 0.42 , 2.05 , 51.58
1.8 , 0.52 , 1.85 , 0.6 , 1.79 , 44.36
1.8 , 0.43 , 1.87 , 0.56 , 1.9 , 43.78
1.8 , 0.65 , 1.85 , 0.45 , 1.81 , 50.46
1.8 , 0.43 , 2.09 , 0.52 , 2.09 , 48.75
1.8 , 0.65 , 2.03 , 0.59 , 1.85 , 51.45

```

Figura 5. 18. Medición con túnel de viento cercano al NorEste.

```

pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PIUTBAS/Programa_Final/Viento $ sudo python Vel_Viento.py
Norte , Sur , Este , Oeste , Velocidad del viento , Direccion del viento
1.8 , 0.52 , 0.6 , 1.64 , 1.65 , -39.2
1.8 , 0.66 , 0.61 , 1.72 , 1.59 , -43.98
1.8 , 0.44 , 0.39 , 1.79 , 1.95 , -45.87
1.8 , 0.4 , 0.37 , 1.7 , 1.93 , -43.41
1.8 , 0.65 , 0.41 , 1.66 , 1.7 , -47.2
1.8 , 0.66 , 0.43 , 1.77 , 1.76 , -49.73
1.8 , 0.37 , 0.49 , 1.7 , 1.87 , -40.2
1.8 , 0.54 , 0.52 , 1.7 , 1.73 , -43.26
1.8 , 0.51 , 0.61 , 1.69 , 1.68 , -39.8
1.8 , 0.63 , 0.62 , 1.69 , 1.58 , -42.38
1.8 , 0.52 , 0.49 , 1.7 , 1.76 , -43.57
1.8 , 0.65 , 0.4 , 1.77 , 1.79 , -49.97
1.8 , 0.56 , 0.41 , 1.58 , 1.71 , -43.12
1.8 , 0.64 , 0.61 , 1.58 , 1.51 , -40.02
1.8 , 0.66 , 0.4 , 1.68 , 1.71 , -48.14
1.8 , 0.43 , 0.49 , 1.66 , 1.8 , -40.5
1.8 , 0.56 , 0.4 , 1.8 , 1.87 , -48.2
1.8 , 0.52 , 1.71 , 1.33 , 1.33 , 16.26
1.8 , 0.54 , 0.51 , 1.7 , 1.74 , -43.6
1.8 , 0.65 , 1.71 , 1.41 , 1.19 , 14.48
1.8 , 0.46 , 0.37 , 1.61 , 1.82 , -42.59
1.8 , 0.65 , 0.37 , 1.77 , 1.81 , -50.55
1.8 , 0.65 , 0.37 , 1.7 , 1.76 , -49.09
1.8 , 0.64 , 0.52 , 1.71 , 1.66 , -45.89
1.8 , 0.54 , 0.41 , 1.7 , 1.8 , -45.71
1.8 , 0.51 , 0.49 , 1.57 , 1.68 , -39.84
1.8 , 0.35 , 0.61 , 1.61 , 1.76 , -34.55
1.8 , 0.64 , 0.61 , 1.76 , 1.63 , -44.7
1.8 , 0.65 , 2.1 , 1.51 , 1.3 , 27.22

```

Figura 5. 19. Medición con túnel de viento cercano al NorOeste.

De igual manera se hicieron las pruebas para observar el comportamiento de las mediciones en Sureste mostrados en la figura 5.20 y Suroeste mostrado en la figura 5.21.


```

pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PROFBA5/Programa_final/Viento $ sudo python Vel_Viento.py
Norte , Sur , Este , Oeste , Velocidad del viento , Direccion del viento
0.5 , 2.25 , 1.83 , 0.46 , 2.22 , -38.15
0.5 , 2.22 , 1.76 , 0.46 , 2.16 , -37.33
0.5 , 2.26 , 1.81 , 0.61 , 2.13 , -34.2
0.5 , 2.12 , 1.86 , 0.61 , 2.05 , -37.64
0.5 , 2.01 , 1.72 , 0.64 , 1.86 , -35.33
0.5 , 2.22 , 1.85 , 0.52 , 2.17 , -37.79
0.5 , 2.11 , 1.96 , 0.62 , 2.09 , -39.81
0.5 , 2.23 , 1.85 , 0.43 , 2.24 , -39.23
0.5 , 2.0 , 2.84 , 0.65 , 2.65 , -55.59
0.5 , 1.95 , 1.93 , 0.5 , 2.04 , -44.52
0.5 , 2.04 , 1.77 , 0.41 , 2.05 , -41.69
0.5 , 2.03 , 1.96 , 0.6 , 2.05 , -41.71
0.5 , 2.23 , 1.73 , 0.5 , 2.13 , -35.39
0.5 , 1.94 , 1.93 , 0.41 , 2.09 , -46.66
0.5 , 2.15 , 1.73 , 0.5 , 2.06 , -36.66
0.5 , 2.23 , 1.93 , 0.43 , 2.29 , -40.91
0.5 , 2.15 , 1.83 , 0.61 , 2.06 , -36.5
0.5 , 2.25 , 1.75 , 0.51 , 2.14 , -35.19
0.5 , 2.01 , 1.73 , 0.57 , 1.91 , -37.48
0.5 , 2.25 , 1.79 , 0.62 , 2.1 , -33.81
0.5 , 2.12 , 1.91 , 0.42 , 2.2 , -42.58
0.5 , 2.25 , 1.93 , 0.52 , 2.25 , -39.02
0.5 , 2.12 , 1.75 , 0.42 , 2.1 , -39.29
0.5 , 2.01 , 1.93 , 0.62 , 2.0 , -40.99
0.5 , 2.15 , 1.96 , 0.43 , 2.25 , -42.8
0.5 , 2.15 , 1.85 , 0.52 , 2.12 , -38.76

```

Figura 5. 20. Medición de la velocidad y ángulo de viento para el SurEste.

```

pi@MarcoSerrano:~/Desktop/PROFBA5/Programa_final/Viento $ sudo python Vel_Viento.py
Norte , Sur , Este , Oeste , Velocidad del viento , Direccion del viento
0.5 , 2.26 , 0.37 , 1.89 , 2.33 , 40.91
0.5 , 2.03 , 0.59 , 1.9 , 2.02 , 40.76
0.5 , 2.16 , 0.6 , 2.03 , 2.19 , 40.89
0.5 , 1.97 , 0.46 , 2.07 , 2.18 , 47.55
0.5 , 2.26 , 0.36 , 1.97 , 2.38 , 42.5
0.5 , 2.26 , 0.56 , 1.96 , 2.25 , 38.67
0.5 , 2.22 , 0.57 , 1.93 , 2.19 , 38.28
0.5 , 2.04 , 0.36 , 2.05 , 2.29 , 47.61
0.5 , 2.14 , 0.6 , 2.03 , 2.18 , 41.16
0.5 , 2.12 , 0.37 , 2.03 , 2.32 , 45.66
0.5 , 2.26 , -9.68 , 1.95 , 11.76 , 81.37
0.5 , 2.11 , 0.49 , 2.06 , 2.25 , 44.33
0.5 , 2.03 , 0.5 , 2.06 , 2.18 , 45.57
0.5 , 2.03 , 0.37 , 2.06 , 2.27 , 47.77
0.5 , 2.03 , 0.5 , 2.02 , 2.15 , 44.85
0.5 , 2.11 , 0.49 , 1.96 , 2.18 , 42.58
0.5 , 2.03 , 0.52 , 1.92 , 2.07 , 42.46
0.5 , 2.14 , 0.5 , 1.94 , 2.18 , 41.24
0.5 , 2.23 , 0.37 , 1.87 , 2.29 , 40.78
0.5 , 2.26 , 0.37 , 1.97 , 2.37 , 42.18
0.5 , 2.12 , 0.5 , 2.06 , 2.25 , 43.77
0.5 , 2.25 , 0.39 , 2.02 , 2.39 , 43.06
0.5 , 2.12 , 0.59 , 2.02 , 2.17 , 41.49
0.5 , 2.23 , 0.57 , 2.03 , 2.27 , 40.2
0.5 , 2.12 , 0.6 , 1.96 , 2.12 , 40.07

```

Figura 5. 21. Medición de la velocidad y ángulo de viento para el SurOeste.

Aunque el anemómetro sónico está detectando las velocidades del viento y sus cambios, el ángulo no es el adecuado ya que se repite el intervalo entre -89° y 89° lo que indica que la programación no esté siendo la adecuada.

Los datos obtenidos en la última prueba sin drone, hasta la realización de esta tesis, con todo el sistema funcionando se muestra a continuación en la figura 5.22.

Date	Altitude[m]	Temperature [C]	Humidity [%]	Pressure [hPa]	Dew point [C]	Speed Wind [m/s]	Dir. Wind [°]	Latitude [°]	Longitude [°]
Thu Aug 16 11:37:00 2018	2264.6	21.9	55.6	781.0	12.6	1.4	-85.16	19.328	-99.176
Thu Aug 16 11:46:20 2018	2267.7	22.3	56.1	781.0	13.2	0.26	54.74	19.328	-99.176
Thu Aug 16 11:55:41 2018	2263.9	21.8	55.5	781.0	12.5	2.57	15.72	19.328	-99.176
Thu Aug 16 12:05:01 2018	2262.3	22.8	54.8	781.0	13.2	1.66	15.08	19.328	-99.176
Thu Aug 16 12:14:22 2018	2263.1	22.9	53.5	781.0	12.9	1.62	-87.0	19.328	-99.176
Thu Aug 16 12:23:42 2018	2267.7	23.4	51.9	781.0	13.0	1.12	-65.49	19.328	-99.176
Thu Aug 16 12:33:02 2018	2266.2	23.5	49.6	781.0	12.3	1.26	11.46	19.328	-99.176
Thu Aug 16 12:42:23 2018	2267.7	23.2	50.8	781.0	12.5	1.37	73.1	19.328	-99.176
Thu Aug 16 12:51:43 2018	2268.9	23.5	49.5	780.0	12.4	1.31	-52.15	19.328	-99.176
Thu Aug 16 13:01:03 2018	2265.1	22.9	48.1	780.0	11.4	1.75	68.01	19.328	-99.176
Thu Aug 16 13:10:24 2018	2264.3	22.8	42.2	780.0	9.3	0.56	-89.02	19.328	-99.176
Thu Aug 16 13:19:44 2018	2261.3	23.3	46.7	780.0	11.3	0.9	-78.24	19.328	-99.176
Thu Aug 16 13:29:04 2018	2265.9	23.8	47.5	780.0	12.0	1.68	74.35	19.328	-99.176
Thu Aug 16 13:38:24 2018	2265.9	23.9	47.6	780.0	12.1	10.09	87.42	19.328	-99.176
Thu Aug 16 13:47:45 2018	2263.6	23.8	47.3	780.0	11.9	0.56	81.34	19.328	-99.176
Thu Aug 16 13:57:05 2018	2260.5	23.3	47.0	780.0	11.4	0.13	-69.0	19.328	-99.176
Thu Aug 16 14:06:26 2018	2268.2	24.1	47.2	780.0	12.2	1.25	35.16	19.328	-99.176
Thu Aug 16 14:15:46 2018	2268.2	24.3	45.4	779.0	11.7	2.18	50.74	19.328	-99.176
Thu Aug 16 14:25:06 2018	2265.1	23.9	44.9	780.0	11.2	0.4	77.72	19.328	-99.176
Thu Aug 16 14:34:27 2018	2260.3	24.2	43.7	779.0	11.1	3.31	80.01	19.328	-99.176
Thu Aug 16 14:43:47 2018	2268.7	24.4	44.3	779.0	11.4	1.59	86.98	19.328	-99.176
Thu Aug 16 14:53:07 2018	2263.4	24.7	42.3	779.0	11.1	0.85	-55.17	19.328	-99.176
Thu Aug 16 15:02:28 2018	2260.3	24.5	40.9	779.0	10.3	0.29	12.66	19.328	-99.176
Thu Aug 16 15:11:48 2018	2261.8	24.7	38.6	779.0	9.6	0.59	-63.45	19.328	-99.176
Thu Aug 16 15:21:08 2018	2264.2	25.2	36.6	779.0	9.3	0.67	-75.44	19.328	-99.176
Thu Aug 16 15:33:23 2018	2267.0	25.2	38.5	778.0	10.1	0.12	-79.68	19.328	-99.176
Thu Aug 16 15:42:43 2018	2266.2	25.1	38.9	778.0	10.1	0.17	35.89	19.328	-99.176
Thu Aug 16 15:52:04 2018	2267.0	25.3	38.6	778.0	10.2	0.14	-26.18	19.328	-99.176
Thu Aug 16 16:01:24 2018	2266.2	25.2	39.6	778.0	10.5	0.08	73.72	19.328	-99.176
Thu Aug 16 16:10:45 2018	2261.7	25.6	40.7	778.0	11.3	3.84	-88.67	19.328	-99.176
Thu Aug 16 16:20:05 2018	2260.1	25.7	39.9	778.0	11.1	0.12	0.0	19.328	-99.176
Thu Aug 16 16:39:25 2018	2264.7	25.0	40.2	778.0	10.5	0.14	-8.66	19.328	-99.176
Thu Aug 16 16:48:45 2018	2261.6	24.8	39.9	778.0	10.2	0.13	-85.47	19.328	-99.176
Thu Aug 16 16:58:06 2018	2260.8	24.6	39.8	778.0	10.0	0.08	-32.24	19.328	-99.176

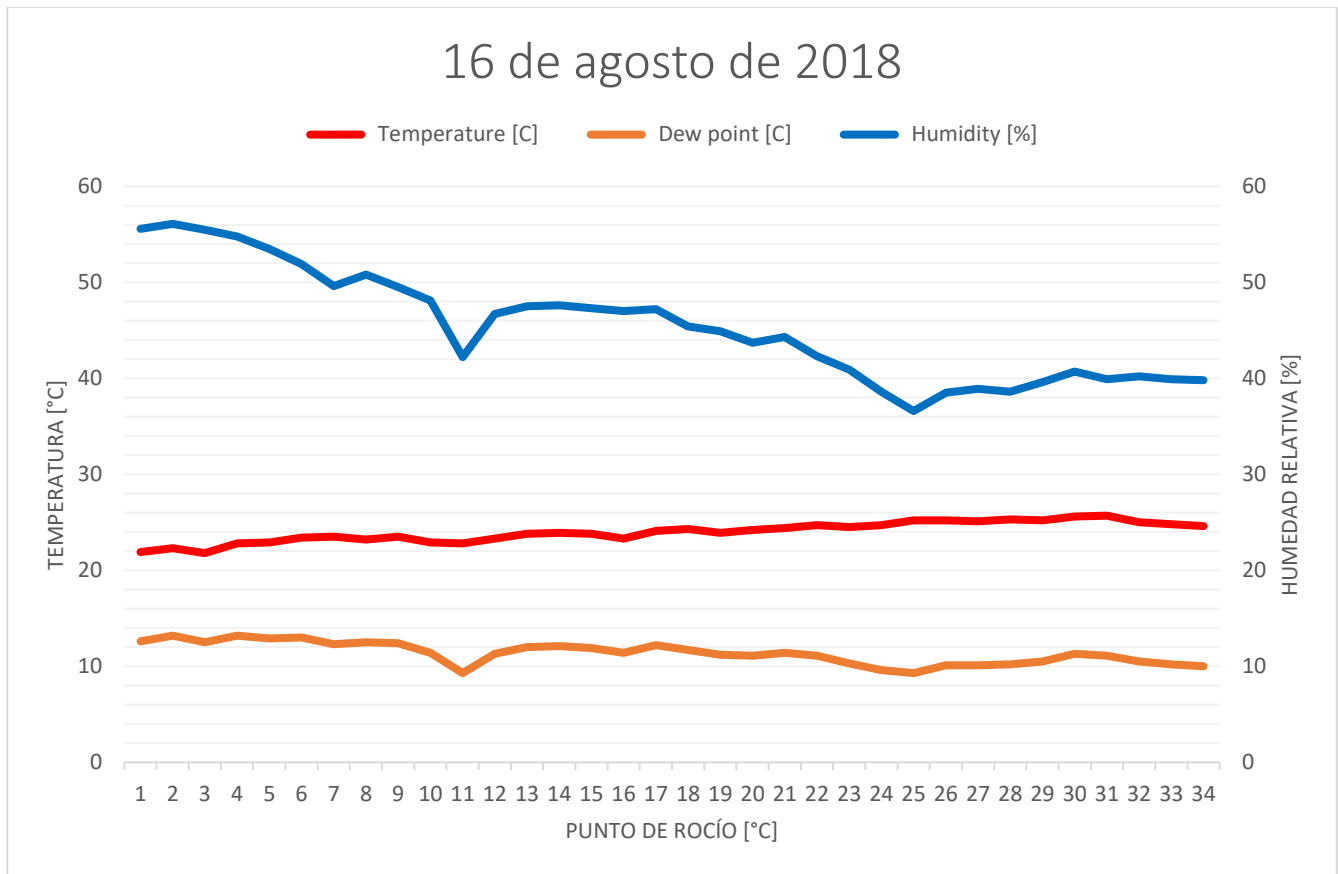


Figura 5. 22. Prueba de la sonda meteorológica de manera estática, datos (Arriba) y gráfica (abajo).

La hora dada por el reloj indica que las mediciones se hicieron cada 9:40 minutos con una posibilidad de variación de +1 segundo.

Los valores de la altura oscilan entre los 2260.1 m y los 2268.9 m ya que los valores de la presión atmosférica y la temperatura varían, aunque la diferencia no es mucha. Los valores de la temperatura ascendieron, mientras la humedad, la presión atmosférica y el punto de rocío descendieron.

La velocidad del viento indicaba que el viento oscilaba entre 0 y 3 m/s, aunque en la 13:38 horas se registró un valor de 10 m/s que podría haber sido un error del sistema ya que esto indicaría que pruebas anteriores no se registraron valores mayores a los 4 m/s. La dirección del viento registrado es de entre 86.98° y -89°.

Las coordenadas registradas por el GPS son las mismas que en todas las pruebas, siendo 19.328°, -99.176° las del *Instituto de geografía*.

Trabajos a futuro

En recientes reportes de la *National Research Council and instrumentation workshops* (NRC, 2009; Hoff et al. 2012) se estableció que son necesarios sistemas de observación capaces de proveer perfiles detallados de temperatura, humedad y viento dentro de la capa límite de la atmosfera para analizar y determinar el desarrollo de climas extremos y monitorear la cinemática y termodinámica de la atmosfera.

A pesar de que se necesita gran cantidad de información meteorológica, no es tan fácil de adquirir dichas mediciones en la capa límite. Comúnmente se recurre al uso de sensores remotos como radares y radiómetros en aeronaves tripuladas. La alternativa a lo anterior es implementar la adquisición de datos meteorológicos a grandes alturas a través de VANT trabajando en coordinación con radares, estaciones y plataformas de observación. La instrumentación de los VANT debe contar con sensores, sistemas de adquisición de datos, almacenamiento de información, telemetría y comunicación. [64]

La OMM menciona que una sonda meteorológica debe contar con un sistema de transmisión de datos para enviarlos a una computadora en tierra, por lo que más adelante se tiene planeado añadir 2 módulos inalámbricos Xbee *pro 60mW* de Digi Xbee, uno en aire cuyo trabajo será transmitir la información obtenida para mandarla a un receptor en tierra conectado a una computadora. Este módulo tiene la capacidad de enviar información de punto a punto hasta 1 Km de distancia.

A pesar de que el anemómetro sónico está detectando los cambios del viento, no hay manera de determinar la precisión de los datos obtenidos ya que no se cuenta con una señal referencia con que comparar. Se debe hacer un estudio acerca del efecto negativo que provoca el ruido o viento, producido por el ascenso del globo cautivo y el giro de las hélices en el caso del drone, y la manera de eliminarlo.

Durante el vuelo, tanto el globo cautivo como el drone sufren de una rotación sobre su eje, por lo que la medición del viento es afectada ya que los ejes no quedan en su posición cardinal correcta. Para corregir esto se tiene planeado añadir el sensor HMC5883L, el cual es una brújula electrónica cuyo propósito es resolver el inconveniente de la rotación y recomponer los datos medidos.

El drone tiene un tiempo máximo de vuelo de 22 mins y la máxima altura alcanzada es de 500 m sobre la superficie. Para aumentar el tiempo de vuelo y la altura máxima se debe sustituir el sistema por uno más liviano, por lo que la Raspberry Pi 3 podría sustituirse por una computadora más pequeña y liviana como la *Banana Pi* de Banana.org o la *Omega 2* de Kickstarter; los sensores deberán ser diseñados y fabricados con tecnología de montaje superficial (*Surface-mount technology – SMD*) soldados en una única PCB; usar una batería más ligera pero con la misma capacidad de alimentación y por ultimo las partes impresas en 3D hacerlas más ligeras sustituyendo el PLA por PETG. Otra solución es sustituir el drone por uno con mayor tiempo de vuelo, por ejemplo, el modelo S1000 de DJI que puede cargar hasta 11 Kg, y aprovechando esto se le pueden agregar baterías extra para extender su tiempo de vuelo.

Aunque ya se han hecho pruebas con el drone, falta realizar más con el globo cautivo, ya que por falta de presupuesto no se pudieron concretar, para así ver si el peso afecta a la altura que podría alcanzar y también analizar la manera en corregir el viento con base en la trayectoria tomada por globo.

Conclusiones

La observación de los fenómenos meteorológicos resulta de gran ayuda para conocer y predecir el comportamiento de nuestro entorno mediante modelos atmosféricos, y usar esa información a favor, como en la agricultura; pero de igual manera ayuda para estar preparado contra algún desastre como tormentas o tornados, y minimizar pérdidas en la mayor cantidad posible.

Existen una gran variedad de instrumentos para la medición de temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento; cuya finalidad es conocer más sobre el comportamiento y predicción de nuestro entorno. Estos instrumentos se encuentran en estaciones meteorológicas a una altura máxima de 10 m sobre la superficie, pero los cambios más significantes están dentro de la capa límite, es decir, hasta 1 Km de altura, para este propósito se montan sensores electrónicos a un globo cautivo sin la capacidad de ser controlado. El trabajo presente demuestra que para resolver esta situación se utilizó un drone, el cual puede ser controlado en tierra.

La evidencia que se presenta en este trabajo demuestra que la sonda meteorológica cumple con la mayoría de los objetivos planteados al inicio de la investigación. Se diseñó, programó y construyó la sonda meteorológica con sensores electrónicos que pueden tomar las mediciones de: fecha, hora, altitud, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, coordenadas geográficas y el cálculo del punto de rocío; en un pequeño intervalo de hasta 3 segundos. Para mejorar la calidad de los datos se toman entre 4 a 8 muestras siendo estos los intervalos que sugiere cada fabricante dependiendo el sensor. La cantidad de muestras usadas en la programación también depende de la exactitud que se desea obtener de cada fenómeno meteorológico para después promediarlo.

Desarrollar una manera de tener la medición de la velocidad y dirección del viento sin necesidad de partes mecánicas fue otro de los principales objetivos, para ello se decidió por implementar un anemómetro sónico. Los anemómetros sónicos poseen una alta sensibilidad, ya que tienen la capacidad de detectar vientos por debajo de 1 m/s y medir su dirección en un intervalo de tiempo muy corto. Su adaptación en el VANT presenta un gran problema, ya que el viento producido por el ascenso y, en el caso del drone, el producido por la turbulencia del giro de las hélices durante el vuelo, alteran completamente la medición. A pesar de añadir un filtro digital en la programación, los resultados obtenidos presentan saltos entre mediciones.

A pesar de que se tiene un gran avance en el desarrollo del anemómetro sónico, las mediciones que toma no son del todo confiables ya que se presentaron momentos en que los valores de la velocidad variaban por más de 9 m/s entre un dato y otro al momento de hacer el promedio entre 4 mediciones. Por otra parte, la medición de la dirección del viento no pasa el valor de $\pm 89^\circ$ y durante las pruebas se presentaron ocasiones en las que el sistema colapsaba, indicando que en ocasiones algunas variables no estaban definidas antes de usarse. Por esto la programación y la electrónica del anemómetro sónico debe mejorarse, haciendo pruebas y teniendo señales de referencia entre el comportamiento de un globo cautivo y el de un drone.

El hecho de que los sensores y módulos estén soldados a un PCB impidió que se presentaran vibraciones y que algún componente se soltara del sistema durante el vuelo. De igual manera se tuvo un orden en el alambrado. Todo el sistema está conectado mediante *headers* hembra a los pines de la Raspberry pi 3.

Por otra parte, el uso de la impresión 3D para adaptar la sonda meteorológica al drone fue exitoso, ya que el estuche cumplió su trabajo durante las pruebas: impidió que el sistema cayera causando algún accidente y no fue factor para interrumpir la adquisición de los datos. El uso de PLA como material de impresión fue el adecuado ya que no presentó deformaciones o fracturas causadas por el entorno o movimiento del drone durante el vuelo. De igual manera, con esta tecnología se pudo realizar el desarrollo del anemómetro sónico, mostrando resultados positivos.

Como ingeniero mecánico eléctrico pude orientar mis conocimientos tanto teóricos como prácticos orientados a la programación, electrónica y diseño, adquiridos durante la carrera, hacia el ámbito meteorológico. Los fabricantes de los sensores y módulos usados en la sonda meteorológica ofrecían un código para el funcionamiento de cada uno y así, poder ser usado por cualquier persona con entendimiento en el área de la programación; pero estudiando cada *datasheet* se pudo conocer más a profundidad acerca del funcionamiento de cada uno y así especificar más las instrucciones con la finalidad de obtener mediciones más reales y precisas en un lapso corto.

Otro punto es el logro adecuado y preciso del diseño de un PCB para la sonda meteorológica. El principal problema fue que en el software de diseño (EAGLE) no se contaban con las librerías de los sensores y módulos, pero se lograron hacer mediante las herramientas de este, tomando la información acerca de las medidas físicas y la configuración de los pines necesaria de la hoja técnica de cada sensor y modulo.

Para lograr adaptar y distribuir de manera adecuada los sensores, módulos, la batería y la Raspberry pi 3 en un estuche de bajo peso al dron y al globo cautivo fue necesario realizar un diseño mecánico que posteriormente fue impreso en 3D.

Asimismo, el desarrollo de la sonda meteorológica fue posible debido a la investigación de diversas ecuaciones que explican el comportamiento de los distintos fenómenos meteorológicos; al no existir un sensor que mida el punto de rocío de manera directa se investigaron diferentes ecuaciones, que al final fue la misma que sugería el fabricante en la hoja de especificaciones del sensor. Para la medición de altitud se partió de internacional barométrica enfocando el desarrollo en la dependencia del cálculo de los cambios de la temperatura y presión atmosférica a diferentes alturas, teniendo al final la ecuación hipsométrica.

Para la parte de la medición de la velocidad y dirección del viento, se enfocó el desarrollo en la obtención de 2 vectores que componen estos cálculos: el vector meridional y el vector zonal. Para ello se hicieron cálculos vectoriales de la magnitud y dirección del vector final conformado por los dos anteriores.

El uso de esta sonda meteorológica permitirá a institutos y estudiantes que se dediquen al área de la meteorología tener un instrumento más accesible ya que en la actualidad estos sólo se tienen en aeropuertos ya sea por norma internacional o por el costo que representa hacer estas mediciones. De igual manera se busca beneficiará a sectores como el transporte, en la pesca y la agricultura donde, con la información obtenida, se podrán predecir distintos escenarios que se pueden aprovechar y/o al mismo tiempo prevenir desastres. La sonda meteorológica puede ser usada como una estación meteorológica si se le añade un pluviómetro, el cual mide la precipitación en un intervalo de tiempo.

Referencias

- [1] Castro M., González R. y Portela A. (s.f.), *Parametrización de la capa límite atmosférica de los modelos numéricos de pronóstico meteorológico* (pp. 104-105). Madrid, España. Disponible en:
<http://bit.ly/2LVnP8G>
- [2] Barrero P. A. (2004). *El aporte de Aristóteles a la meteorología* (Pp. 107-113). Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://bit.ly/2MwoyhN>
- [3] Palomares C. M. (s.f.). *Breve historia de la meteorología* (Pp. 7). Madrid, España: Agencia Estatal de Meteorología. Disponible en: <http://bit.ly/2t0vf3r>
- [4] Glosario Técnico (<http://smn.cna.gob.mx/es/infantil>)
- [5] Organización Meteorológica Mundial (2012). *International Glossary of hydrology* (Pp 343). Geneva 2, Suiza: World Meteorological Organization. Disponible en: <http://bit.ly/2JRHJE2>
- [6] Glosario técnico (<http://smn.cna.gob.mx/es/smn/glosario>)
- [7] Hernández J., Martínez J., Osuna M. y Zubiaurre S. (2012). *Ciencias de la naturaleza 2° eso, Capítulo 11: El calor y la temperatura* (Pp. 358). Madrid, España: Anaya. Disponible en: <http://bit.ly/2HTSQXV>
- [8] Una breve historia de la medición y los sensores de temperatura (<http://bit.ly/2t1SXMu>)
- [9] Tipos de termómetros (<http://bit.ly/2JNj28r>)
- [10] Organización Meteorológica Mundial (2012). *International Glossary of hydrology* (Pp 260). Geneva 2, Suiza: World Meteorological Organization. Disponible en: <http://bit.ly/2JRHJE2>
- [11] Benito C.A., Pórtela L.A. y Rodríguez J. R. (2004). *Meteorología y climatología* (Pp. 17-19). La Coruña, España: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. Disponible en: <http://bit.ly/2t1ggX3>
- [12] Medición de presión: Características, tecnologías y tendencias. (<http://bit.ly/2JNkPub>)
- [13] Organización Meteorológica Mundial (2012). *International Glossary of hydrology* (Pp 279). Geneva 2, Suiza: World Meteorological Organization. Disponible en:
http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf
- [14] Kouro S. (2001). *Automatización industrial: Sensores de humedad* (Pp. 2-20). Valparaíso, Chile: Universidad técnica Federico Santa María. Disponible en:
<http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Instalaciones%20Electricas%20Industriales/Sensores%20de%20Humedad.pdf>

- [15] Benito C.A., Pórtela L.A. y Rodríguez J. R. (2004). *Meteorología y climatología* (Pp. 17-19). La Coruña, España: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. Disponible en: <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>
- [16] León Battista y otros padres del anemómetro (<https://weather.com/es-ES/espana/ciencia/news/2017-12-18-anemometro-viento-historia>)
- [17] Institute of Electrical and Electronic Engineers (2018). *Measuring the wind* (5-6). Geneva 2, Suiza: <http://tryengineering.org/sites/default/files/lessons/measurewind.pdf>
- [18] Organización Meteorologica Mundial (2012). *International Glossary of hydrology* (Pp 53). Geneva 2, Suiza: World Meteorological Organization. Disponible en: http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf
- [19] Organización Meteorologica Mundial (2012). *International Glossary of hydrology* (Pp. 338). Geneva, Suiza: World Meteorological Organization. Disponible en: http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf
- [20] Organización Meteorologica Mundial (2014). *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos: capítulo 1.1-1.4* (Pp. 16-21). Geneva, Suiza. Disponible en: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8-2014_es.pdf.
- [21] Aviation routine weather reports (METAR) (<http://avsport.org/docs/metar.pdf>)
- [22] Organización Meteorologica Mundial (2015). *Manual del sistema mundial de observación: Volumen 1 Aspectos mundiales* (Pp. 69). Gineva, Suiza: Disponible en: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_544-v1-2015_es.pdf
- [23] Organización Meteorologica Mundial (2011). *Guía de prácticas climatológicas Volumen 1* (Pp. 24-26). Ge Suiza. Disponible en: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/wmo_100_es.pdf
- [24] Organización Meteorologica Mundial (2014). *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos: capítulo 12-1* (Pp. 288-290). Gineva, Suiza. Disponible en: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8-2014_es.pdf
- [25] Organización Meteorologica Mundial (2014). *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos: capítulo 12.2-12.3 (294-296)*. Gineva, Suiza. Disponible en: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8-2014_es.pdf.

- [26] Escalante G. J., García E. M., Gutiérrez L. W. y Magaña R. V (2007). Diseño y construcción de un globo meteorológico cautivo instrumentado. *Ingeniería y ciencia*, 3, 29-42. Disponible en: <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/454/421>
- [27] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- [28] Palomares M. (2008). *La meteorología y la predicción del tiempo ¿Cuál es actualmente su nivel de fiabilidad?, ¿Por qué se equivocan los meteorólogos?* (Pp. 6). Madrid, España. Disponible en: <http://www.divulgameteo.es/uploads/Fiabilidad-predicci%C3%B3n.pdf>
- [29] Blog dedicado al mundo de los drones-UAVs-RPAS (<http://www.xdrones.es/>)
- [30] Breguet Richet Gyroplane no. 1 (<http://all-aero.com/index.php/contactus/35-helicopters/copters/1895-breguet-richet-gyroplane-no1>)
- [31] Quadcopters (Breve historia) (<https://drones.mx/blog/quadcopters-breve-historia/>)
- [32] Kakaes K. (s.f). *Drones and aerial observation - Chapter 1: What drones can do and how they can do it* (Pp. 9). Disponible en: <http://drones.newamerica.org/primer/Chapter%201.pdf>
- [33] Pike, H. (2013, noviembre). *Drone journalism: worth exploring. A valuable new tool may soon appear in the sky you*. King's Journalism, 2-4. Disponible en: <http://thebjr.kingsjournalism.com/journalists-with-an-eye-to-the-sky/>
- [34] Clasificación de drones (<http://www.xdrones.es/tipos-de-drones-clasificacion-de-drones-categorias-de-drones/>)
- [35] García M. L. (2015). *Drones, el cielo está al alcance de todos* (Pp. 5-6). Barcelona, España. Disponible es: http://www.edubcn.cat/rcs_gene/treballs_recerca/2015-2016-03-1-TR.pdf
- [36] Circular obligatoria que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano, CO AV-23/10 R4. Dirección general de aeronáutica civil, México. 25 de Julio de 2017. Disponible en <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo3/co-av-23-10-r4.pdf>
- [37] Cárdenas Guzmán Guillermo. (junio 2015). Revista ¿Cómo ves? Año 17, No 199, p. 12.
- [38] S.A. (s.f). *Chapter 1: Introduction to quadcopters* (Pp. 5). Disponible en: http://www.nutsvolts.com/uploads/featured_articles/Build_Your_Own_Quadcopter-Chapter-1.pdf
- [39] *Aplicaciones y usos. (Intelligential Dynamics ,2012)*. (http://www.iuavs.com/pages/aplicaciones_y_usos)

- [40] Holland M.A. (septiembre 2017). *Amazon's Drone Patents*. Disponible en:
www.dronecenter.bard.edu/files/2017/09/CSD-Amazons-Drone-Patents-1.pdf
- [41] *Unit 1: Introduction to computers and generations of computers*. Disponible en
<http://bieap.gov.in/Pdf/CGAPaper1.pdf>
- [42] Ceruzzi, P., (2003), *A history of modern computing* (1-4), Londres, Inglaterra. Disponible en
https://doc.lagout.org/science/0_Computer%20Science/0_Computer%20History/A%20History%20of%20Modern%20Computing,%202nd.pdf
- [43] *Generaciones de computadoras*. P. 1. Disponible en:
<https://www.virtuniversidad.com/greenstone/collect/informatica/archives/HASH2de3.dir/doc.pdf>
- [44] Universidad Andrés Bello. *Unidad 1: Antecedentes y aplicaciones de la informática*. (Pp. 1-3), Santiago, Chile. Disponible en:
http://www.academia.edu/22934401/Unidad_I_Antecedentes_y_aplicaciones_de_la_inform%C3%A1tica_1_1.2_Generaciones_de_computadoras
- [45] Garrido C.A., (2008), *Historia de la computación* (9 y 10). Guatemala. Disponible en:
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/07/07_2010.pdf
- [46] Hernández G.I., *Historia de las computadoras* (11-14). Disponible en:
<https://www.uv.mx/personal/gerhernandez/files/2011/04/historia-compuesta.pdf>
- [47] Trigo V., *Las generaciones de ordenadores*, (43-45). Disponible en:
http://tic.iespadremanjon.es/jdownloads/Lecturas/generacin_ordenadores.pdf
- [48] S.A. (2014). Then and now: A brief history of single board computers. *Electronic design uncovered* (Pp. 5-11). Disponible en:
<http://www.newark.com/wcsstore/ExtendedSitesCatalogAssetStore/cms/asset/pdf/americas/common/N E14-ElectronicDesignUncovered-Dec14.pdf>
- [49] Salvador, V. y Silva, G. *El ININ hoy: Cómputo científico*. México. Disponible en
<http://inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/computocientifico.pdf>
- [50] S.A., (2018). *Análisis numérico y cómputo científico*. Disponible en: <https://github.com/ITAM-DS/analisis-numerico-computo-cientifico>
- [51] García, F. (s.f.). La supercomputación. (Pp. 1-3). Disponible en:
https://www.acta.es/medios/articulos/informatica_y_computacion/030009.pdf

- [52] ¿Qué es supe cómputo? (<http://www.super.unam.mx/index.php/home/enlace/quesc>)
- [53] S.A. (s.f). *Computador, sus elementos periféricos y aplicaciones* (Pp. 7-8). Disponible en: <https://previa.uclm.es/area/egi/OFITEC/Descarga/COMPUTADOR.PDF>
- [54] Raspberry Pi Foundation (<https://www.raspberrypi.org/about/>)
- [55] Bernadette, J (2017). *How the Raspberry pi works*. Atlanta, EU. Disponible en: <https://computer.howstuffworks.com/raspberry-pi.htm>
- [56] Wright, S (2016). *The Raspberry Pi 1, 2 and 3 compared*. Reino Unido. Disponible en: <https://www.stewright.me/2016/03/raspberry-pi-1-2-3-compared/>
- [57] Isaac, P (2015). *Todo sobre los GPIO Raspberry Pi*. Disponible en: <https://comohacer.eu/gpio-raspberry-pi/#dsq-wrap>
- [58] Tojeiro, G., (2016), *Raspberry pi 2 para electrónicos* (Pp. 78-82). Barcelona, España: Alfaomega.
- [59] Pérez, V. y Sendiña I. (2006), *Fundamentos de meteorología* (Pp. 33-37). Santiago de Compostela, España: Servizo de Publicación e Intercambio Científico da USC.
- [60] Pérez S. (2014), *Dirección y velocidad del viento con componentes meridional y zonal*. Islas canarias, España.: Silvia Alonso Pérez. Disponible en <http://www.silviaalonsoperez.com/2014/06/direccion-y-velocidad-del-viento-con-componentes-meridional-y-zonal/>
- [61] Las ventajas de un PCB Board (<http://bueno-saber.com/aficiones-juegos-y-juguetes/ciencia-y-naturaleza/las-ventajas-de-un-pcb-board.php>)
- [62] S.A., (2017). *16 different types of 3D printing materials*. 3D Insider. Disponible en: <http://3dinsider.com/3d-printing-materials/>
- [63] Powell I., (2017). *ABS or PLA? Choosing the right filament*. Disponible en: <https://makezine.com/2014/11/11/abs-or-pla-choosing-the-right-filament/>
- [64] Axisa, D., Jacob, J. y Oncley S. (2017). *Unmanned Aerial Systems for Atmospheric Research: Instrumentation Issues for Atmospheric Measurements*. (8-11).

Anexos

Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15)

Humidity and Temperature Sensor

- Fully calibrated
- Digital output
- Low power consumption
- Excellent long term stability
- SMD type package – reflow solderable



Product Summary

SHT1x (including SHT10, SHT11 and SHT15) is Sensirion's family of surface mountable relative humidity and temperature sensors. The sensors integrate sensor elements plus signal processing on a tiny foot print and provide a fully calibrated digital output. A unique capacitive sensor element is used for measuring relative humidity while temperature is measured by a band-gap sensor. The applied CMOSens® technology guarantees excellent reliability and long term stability. Both sensors are seamlessly coupled to a 14bit analog to digital converter and a serial interface circuit. This results in superior signal quality, a fast response time and insensitivity to external disturbances (EMC).

Each SHT1x is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into an OTP memory on the chip. These coefficients are used to internally calibrate the signals from the sensors. The 2-wire serial interface and internal voltage regulation allows for easy and fast system integration. The tiny size and low power consumption makes SHT1x the ultimate choice for even the most demanding applications.

SHT1x is supplied in a surface-mountable LCC (Leadless Chip Carrier) which is approved for standard reflow soldering processes. The same sensor is also available with pins (SHT7x) or on flex print (SHTA1).

Dimensions

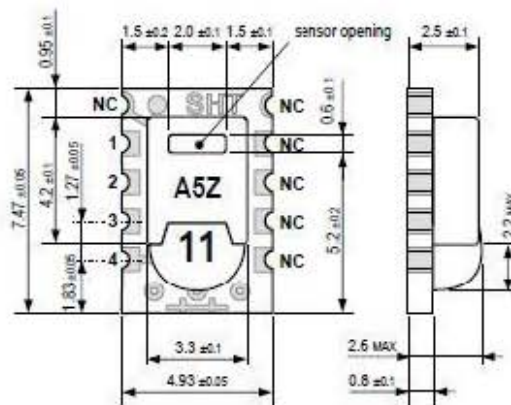


Figure 1: Drawing of SHT1x sensor packaging, dimensions in mm (1mm = 0.039inch). Sensor label gives "11" for SHT11 as an example. Contacts are assigned as follows: 1:GND, 2:DATA, 3:SCK, 4:VDD.

Sensor Chip

SHT1x V4 – for which this datasheet applies – features a version 4 Silicon sensor chip. Besides a humidity and a temperature sensor the chip contains an amplifier, A/D converter, OTP memory and a digital interface. V4 sensors can be identified by the alpha-numeric traceability code on the sensor cap – see example "A5Z" code on Figure 1.

Material Contents

While the sensor is made of a CMOS chip the sensor housing consists of an LCP cap with epoxy glob top on an FR4 substrate. The device is fully RoHS and WEEE compliant, thus it is free of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

Evaluation Kits

For sensor trial measurements, for qualification of the sensor or even experimental application of the sensor there is an evaluation kit *EK-H2* available including sensor, hard and software to interface with a computer.

For more sophisticated and demanding measurements a multi port evaluation kit *EK-H3* is available which allows for parallel application of up to 20 sensors.

Sensor Performance

Relative Humidity

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.4	0.05	0.05	%RH
		8	12	12	bit
Accuracy ² SHT10	typical		±4.5		%RH
	maximal	see Figure 2			
Accuracy ² SHT11	typical		±3.0		%RH
	maximal	see Figure 2			
Accuracy ² SHT15	typical		±2.0		%RH
	maximal	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Replacement		fully interchangeable			
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Response time ³	τ (63%)		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift ⁴	normal		< 0.5		%RH/yr

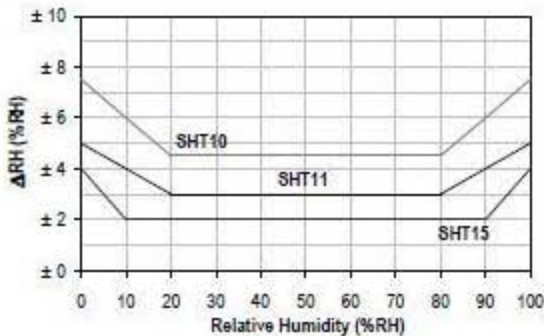


Figure 2: Maximal RH-accuracy at 25°C per sensor type.

Temperature

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy ² SHT10	typical		±0.5		°C
	maximal	see Figure 3			
Accuracy ² SHT11	typical		±0.4		°C
	maximal	see Figure 3			
Accuracy ² SHT15	typical		±0.3		°C
	maximal	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Replacement		fully interchangeable			
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time ⁴	τ (63%)	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

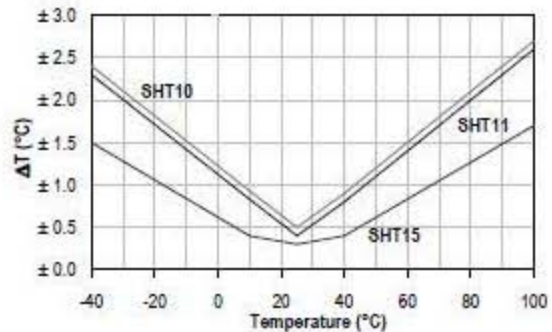


Figure 3: Maximal T-accuracy per sensor type.

Electrical and General Items

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Source Voltage		2.4	3.3	5.5	V
Power Consumption ⁵	sleep		2	5	μW
	measuring		3		mW
	average		150		μW
Communication	digital 2-wire interface, see Communication				
Storage	10 – 50°C (0 – 125°C peak), 20 – 60%RH				

Packaging Information

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT10	Tape & Reel	2000	1-100218-04
	Tape & Reel	100	1-100051-04
SHT11	Tape & Reel	400	1-100098-04
	Tape & Reel	2000	1-100524-04
SHT15	Tape & Reel	100	1-100085-04
	Tape & Reel	400	1-100093-04

¹ The default measurement resolution of is 14bit for temperature and 12bit for humidity. It can be reduced to 12/8bit by command to status register.

² Accuracies are tested at Outgoing Quality Control at 25°C (77°F) and 3.3V. Values exclude hysteresis and non-linearity.

³ Time for reaching 63% of a step function, valid at 25°C and 1 m/s airflow.

⁴ Value may be higher in environments with high contents of volatile organic compounds. See Section 1.3 of Users Guide.

⁵ Values for VDD=5.5V at 25°C, average value at one 12bit measurement per second.

⁶ Response time depends on heat capacity of and thermal resistance to sensor substrate.

Users Guide SHT1x

1 Application Information

1.1 Operating Conditions

Sensor works stable within recommended normal range – see Figure 4. Long term exposures to conditions outside normal range may temporarily offset the RH signal (+3 %RH after 60h). After return to normal range it will slowly return towards calibration state by itself. See Section 1.4, “Reconditioning Procedure” to accelerate eliminating the offset. Prolonged exposure to extreme conditions may accelerate ageing.

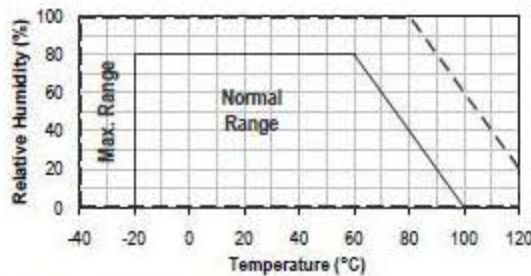


Figure 4: Operating Conditions

1.2 Soldering instructions

For soldering SHT1x standard reflow soldering ovens may be used. The sensor is qualified to withstand soldering profile according to IPC/JEDEC J-STD-020C with peak temperatures at 260°C during up to 40sec including Pb-free assembly in IR/Convection reflow ovens.

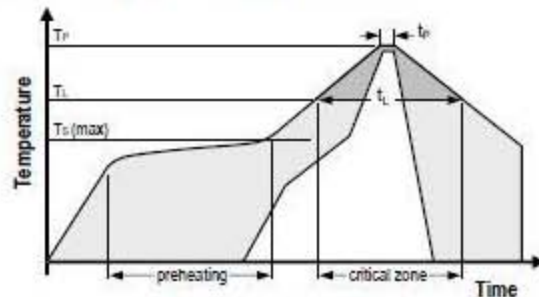


Figure 5: Soldering profile according to JEDEC standard. $T_p \leq 260^\circ\text{C}$ and $t_p < 40\text{sec}$ for Pb-free assembly. $T_L < 220^\circ\text{C}$ and $t_L < 150\text{sec}$. Ramp-up/down speeds shall be $< 5^\circ\text{C}/\text{sec}$.

For soldering in Vapor Phase Reflow (VPR) ovens the peak conditions are limited to $T_p < 233^\circ\text{C}$ during $t_p < 60\text{sec}$ and ramp-up/down speeds shall be limited to $10^\circ\text{C}/\text{sec}$. For manual soldering contact time must be limited to 5 seconds at up to 350°C ⁷.

⁷ $233^\circ\text{C} = 451^\circ\text{F}$, $260^\circ\text{C} = 500^\circ\text{F}$, $350^\circ\text{C} = 662^\circ\text{F}$

IMPORTANT: After soldering the devices should be stored at $>75\%RH$ for at least 12h to allow the polymer to re-hydrate. Otherwise the sensor may read an offset that slowly disappears if exposed to ambient conditions.

In no case, neither after manual nor reflow soldering, a board wash shall be applied. Therefore it is strongly recommended to use “no-clean” solder paste. In case of application with exposure of the sensor to corrosive gases the soldering pads shall be sealed to prevent loose contacts or short cuts.

For the design of the SHT1x footprint it is recommended to use dimensions according to Figure 7. Sensor pads are coated with $35\mu\text{m Cu}$, $5\mu\text{m Ni}$ and $0.1\mu\text{m Au}$.

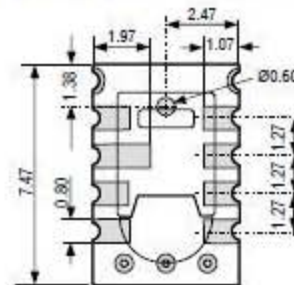


Figure 6: Rear side electrodes of sensor, view from top side.

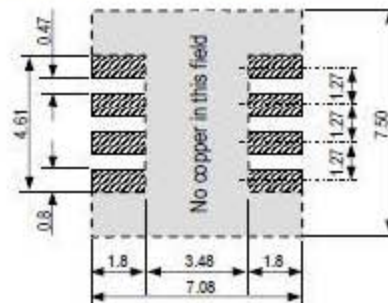


Figure 7: Recommended footprint for SHT1x. Values in mm.

1.3 Storage Conditions and Handling Instructions

It is of great importance to understand that a humidity sensor is not a normal electronic component and needs to be handled with care. Chemical vapors at high concentration in combination with long exposure times may offset the sensor reading.

For these reasons it is recommended to store the sensors in original packaging including the sealed ESD bag at following conditions: Temperature shall be in the range of $10^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$ ($0 - 125^\circ\text{C}$ for limited time) and humidity at $20 - 60\%RH$ (sensors that are not stored in ESD bags).

For sensors that have been removed from the original packaging we recommend to store them in ESD bags made of PE-HD⁸.

In manufacturing and transport the sensors shall be prevented of high concentration of chemical solvents and long exposure times. Out-gassing of glues, adhesive tapes and stickers or out-gassing packaging material such as bubble foils, foams, etc. shall be avoided. Manufacturing area shall be well ventilated.

For more detailed information please consult the document "Handling Instructions" or contact Sensirion.

1.4 Reconditioning Procedure

As stated above extreme conditions or exposure to solvent vapors may offset the sensor. The following reconditioning procedure may bring the sensor back to calibration state:

Baking: 100 – 105°C at < 5%RH for 10h
 Re-Hydration: 20 – 30°C at ~ 75%RH for 12h⁹.

1.5 Temperature Effects

Relative humidity reading strongly depends on temperature. Therefore, it is essential to keep humidity sensors at the same temperature as the air of which the relative humidity is to be measured. In case of testing or qualification the reference sensor and test sensor must show equal temperature to allow for comparing humidity readings.

If the SHT1x shares a PCB with electronic components that produce heat it should be mounted in a way that prevents heat transfer or keeps it as low as possible. Measures to reduce heat transfer can be ventilation, reduction of copper layers between the SHT1x and the rest of the PCB or milling a slit into the PCB around the sensor (see Figure 8).

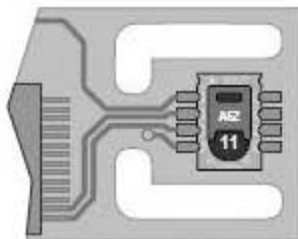


Figure 8: Top view of example of mounted SHT1x with slits milled into PCB to minimize heat transfer.

Furthermore, there are self-heating effects in case the measurement frequency is too high. Please refer to Section 3.3 for detailed information.

⁸ For example, please check www.sirel.ch
⁹ 75%RH can conveniently be generated with saturated NaCl solution. 100 – 105°C correspond to 212 – 221°F, 20 – 30°C correspond to 68 – 86°F

1.6 Light

The SHT1x is not light sensitive. Prolonged direct exposure to sunshine or strong UV radiation may age the housing.

1.7 Membranes

SHT1x does not contain a membrane at the sensor opening. However, a membrane may be added to prevent dirt and droplets from entering the housing and to protect the sensor. It will also reduce peak concentrations of chemical vapors. For optimal response times the air volume behind the membrane must be kept minimal. Sensirion recommends and supplies the SF1 filter cap for optimal IP54 protection (for higher protection – i.e. IP67 - SF1 must be sealed to the PCB with epoxy). Please compare Figure 9.

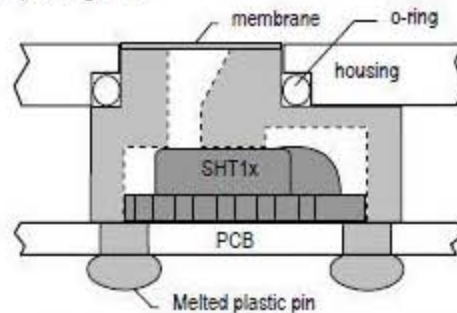


Figure 9: Side view of SF1 filter cap mounted between PCB and housing wall. Volume below membrane is kept minimal.

1.8 Materials Used for Sealing / Mounting

Many materials absorb humidity and will act as a buffer increasing response times and hysteresis. Materials in the vicinity of the sensor must therefore be carefully chosen. Recommended materials are: Any metals, LCP, POM (Delrin), PTFE (Teflon), PE, PEEK, PP, PB, PPS, PSU, PVDF, PVF.

For sealing and gluing (use sparingly): High filled epoxy for electronic packaging (e.g. glob top, underfill), and Silicone. Out-gassing of these materials may also contaminate the SHT1x (see Section 1.3). Therefore try to add the sensor as a last manufacturing step to the assembly, store the assembly well ventilated after manufacturing or bake at >50°C for 24h to outgas contaminants before packing.

1.9 Wiring Considerations and Signal Integrity

Carrying the SCK and DATA signal parallel and in close proximity (e.g. in wires) for more than 10cm may result in cross talk and loss of communication. This may be resolved by routing VDD and/or GND between the two data signals and/or using shielded cables. Furthermore, slowing down SCK frequency will possibly improve signal integrity. Power supply pins (VDD, GND) must be decoupled with a 100nF capacitor if wires are used.

Capacitor should be placed as close to the sensor as possible. Please see the Application Note "ESD, Latchup and EMC" for more information.

1.10 ESD (Electrostatic Discharge)

ESD immunity is qualified according to MIL STD 883E, method 3015 (Human Body Model at ±2 kV).

Latch-up immunity is provided at a force current of ±100mA with $T_{amb} = 80^{\circ}\text{C}$ according to JEDEC78A. See Application Note "ESD, Latchup and EMC" for more information.

2 Interface Specifications

Pin	Name	Comment
1	GND	Ground
2	DATA	Serial Data, bidirectional
3	SCK	Serial Clock, input only
4	VDD	Source Voltage
NC	NC	Must be left unconnected




Table 1: SHT1x pin assignment, NC remain floating.

2.1 Power Pins (VDD, GND)

The supply voltage of SHT1x must be in the range of 2.4 – 5.5V, recommended supply voltage is 3.3V. Power supply pins Supply Voltage (VDD) and Ground (GND) must be decoupled with a 100 nF capacitor – see Figure 10.

The serial interface of the SHT1x is optimized for sensor readout and effective power consumption. The sensor cannot be addressed by I²C protocol, however, the sensor can be connected to an I²C bus without interference with other devices connected to the bus. The controller must switch between the protocols.

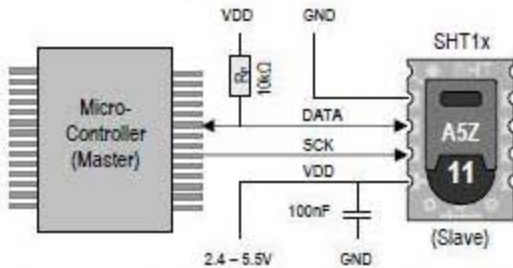


Figure 10: Typical application circuit, including pull up resistor R_p and decoupling of VDD and GND by a capacitor.

2.2 Serial clock input (SCK)

SCK is used to synchronize the communication between microcontroller and SHT1x. Since the interface consists of fully static logic there is no minimum SCK frequency.

2.3 Serial data (DATA)

The DATA tri-state pin is used to transfer data in and out of the sensor. For sending a command to the sensor, DATA is valid on the rising edge of the serial clock (SCK) and must remain stable while SCK is high. After the falling edge of SCK DATA may be changed. For safe communication DATA valid shall be extended T_{su} and T_{hd} before the rising and after the falling edge of SCK, respectively – see Figure 11. For reading data from the sensor, DATA is valid T_v after SCK has gone low and remains valid until the next falling edge of SCK.

To avoid signal contention the microcontroller must only drive DATA low. An external pull-up resistor (e.g. 10kΩ) is required to pull the signal high – it should be noted that pull-up resistors may be included in I/O circuits of microcontrollers. See Table 2 for detailed I/O characteristic of the sensor.

2.4 Electrical Characteristics

The electrical characteristics such as power consumption, low and high level, input and output voltages depend on the supply voltage. Table 2 gives electrical characteristics of SHT1x with the assumption of 5V supply voltage if not stated otherwise. For proper communication with the sensor it is essential to make sure that signal design is strictly within the limits given in Table 3 and Figure 11.

Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
Power supply DC ¹⁰		2.4	3.3	5.5	V
Supply current	measuring		0.55	1	mA
	average ¹¹	2	28		μA
	sleep		0.3	1.5	μA
Low level output voltage	$I_{OL} < 4 \text{ mA}$	0		250	mV
High level output voltage	$R_p < 25 \text{ k}\Omega$	90%		100%	VDD
Low level input voltage	Negative going	0%		20%	VDD
High level input voltage	Positive going	80%		100%	VDD
Input current on pads				1	μA
Output current	on			4	mA
	Tri-stated (off)		10	20	μA

Table 2: SHT1x DC characteristics. R_p stands for pull up resistor, while I_{OL} is low level output current.

¹⁰ Recommended voltage supply for highest accuracy is 3.3V, due to sensor calibration.

¹¹ Minimum value with one measurement of 8 bit accuracy without OTP reload per second, typical value with one measurement of 12bit accuracy per second.

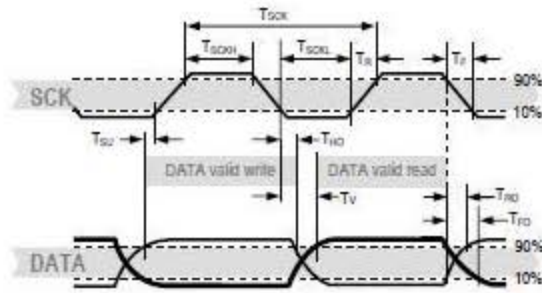


Figure 11: Timing Diagram, abbreviations are explained in Table 3. Bold DATA line is controlled by the sensor, plain DATA line is controlled by the micro-controller. Both valid times refer to the left SCK toggle.

Parameter	Conditions	min	typ	max	Units	
F _{SCK}	SCK Frequency	VDD > 4.5V	0	0.1	5	MHz
		VDD < 4.5V	0	0.1	1	MHz
T _{SCKx}	SCK hi/low time	100			ns	
T _R /T _F	SCK rise/fall time	1	200	*	ns	
T _{FO}	DATA fall time	OL = 5pF	3.5	10	20	ns
		OL = 100pF	30	40	200	ns
T _{RO}	DATA rise time	**	**	**	ns	
T _V	DATA valid time	200	250	***	ns	
T _{SU}	DATA setup time	100	150	***	ns	
T _{HO}	DATA hold time	10	15	****	ns	

* $T_{R,fall} + T_{F,fall} = (F_{SCK})^{-1} - T_{SCKH} - T_{SCKL}$
 ** T_{RO} is determined by the R_{pull-up}C_{bus} time-constant at DATA line
 *** T_{V,read} and T_{SU,read} depend on external pull-up resistor (R_{pull-up}) and total bus line capacitance (C_{bus}) at DATA line
 **** T_{HO,read} < T_V - max(T_{RO}, T_{FO})

Table 3: SHT1x I/O signal characteristics, OL stands for Output Load, entities are displayed in Figure 11.

3 Communication with Sensor

3.1 Start up Sensor

As a first step the sensor is powered up to chosen supply voltage VDD. The slew rate during power up shall not fall below 1V/ms. After power-up the sensor needs 11ms to get to Sleep State. No commands must be sent before that time.

3.2 Sending a Command

To initiate a transmission, a Transmission Start sequence has to be issued. It consists of a lowering of the DATA line while SCK is high, followed by a low pulse on SCK and raising DATA again while SCK is still high – see Figure 12.

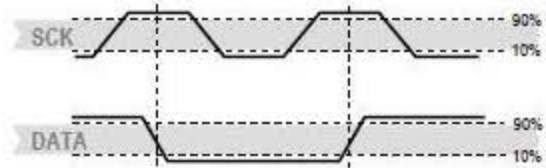


Figure 12: "Transmission Start" sequence

The subsequent command consists of three address bits (only '000' is supported) and five command bits. The SHT1x indicates the proper reception of a command by pulling the DATA pin low (ACK bit) after the falling edge of the 8th SCK clock. The DATA line is released (and goes high) after the falling edge of the 9th SCK clock.

Command	Code
Reserved	0000x
Measure Temperature	00011
Measure Relative Humidity	00101
Read Status Register	00111
Write Status Register	00110
Reserved	0101x-1110x
Soft reset , resets the interface, clears the status register to default values. Wait minimum 11 ms before next command	11110

Table 4: SHT1x list of commands

3.3 Measurement of RH and T

After issuing a measurement command ('00000101' for relative humidity, '00000011' for temperature) the controller has to wait for the measurement to complete. This takes a maximum of 20/80/320 ms for a 8/12/14bit measurement. The time varies with the speed of the internal oscillator and can be lower by up to 30%. To signal the completion of a measurement, the SHT1x pulls data line low and enters Idle Mode. The controller must wait for this Data Ready signal before restarting SCK to readout the data. Measurement data is stored until readout, therefore the controller can continue with other tasks and readout at its convenience.

Two bytes of measurement data and one byte of CRC checksum (optional) will then be transmitted. The micro controller must acknowledge each byte by pulling the DATA line low. All values are MSB first, right justified (e.g. the 5th SCK is MSB for a 12bit value, for a 8bit result the first byte is not used).

Communication terminates after the acknowledge bit of the CRC data. If CRC-8 checksum is not used the controller may terminate the communication after the measurement data LSB by keeping ACK high. The device automatically returns to Sleep Mode after measurement and communication are completed.

Important: To keep self heating below 0.1°C, SHT1x should not be active for more than 10% of the time – e.g. maximum one measurement per second at 12bit accuracy shall be made.

3.4 Connection reset sequence

If communication with the device is lost the following signal sequence will reset the serial interface: While leaving DATA high, toggle SCK nine or more times – see Figure 13. This must be followed by a Transmission Start sequence preceding the next command. This sequence resets the interface only. The status register preserves its content.



Figure 13: Connection Reset Sequence

3.5 CRC-8 Checksum calculation

The whole digital transmission is secured by an 8bit checksum. It ensures that any wrong data can be detected and eliminated. As described above this is an additional feature of which may be used or abandoned.

Please consult Application Note "CRC-8 Checksum Calculation" for information on how to calculate the CRC.

Status Register

Some of the advanced functions of the SHT1x such as selecting measurement resolution, end of battery notice or using the heater may be activated by sending a command to the status register. The following section gives a brief overview of these features. A more detailed description is available in the Application Note "Status Register".

After the command Status Register Read or Status Register Write – see Table 4 – the content of 8 bits of the status register may be read out or written. For the communication compare Figures 16 and 17 – the assignment of the bits is displayed in Table 5.

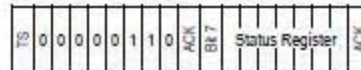


Figure 14: Status Register Write

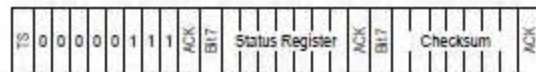


Figure 15: Status Register Read

Examples of full communication cycle are displayed in Figures 15 and 16.

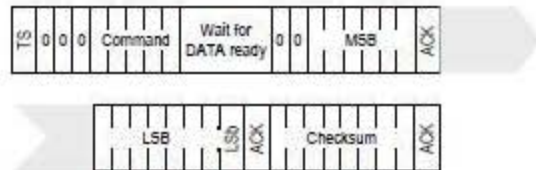


Figure 16: Overview of Measurement Sequence. TS = Transmission Start, MSB = Most Significant Byte, LSB = Last Significant Byte, LSb = Last Significant Bit.

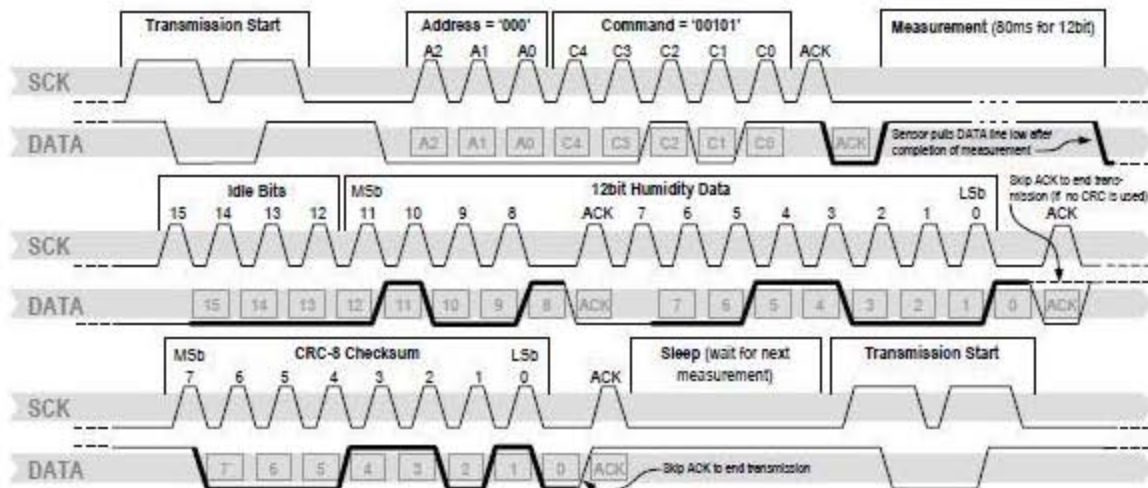


Figure 17: Example RH measurement sequence for value "0000'1001'0011'0001" = 2353 = 75.79 %RH (without temperature compensation). DATA valid times are given and referenced in boxes on DATA line. Bold DATA lines are controlled by sensor while plain lines are controlled by the micro-controller.

Bit	Type	Description	Default
7		reserved	0
6	R	End of Battery (low voltage detection) '0' for VDD > 2.47 '1' for VDD < 2.47	X No default value, bit is only updated after a measurement
5		reserved	0
4		reserved	0
3		For Testing only, do not use	0
2	R/W	Heater	0 off
1	R/W	no reload from OTP	0 reload
0	R/W	'1' = 8bit RH / 12bit Temp. resolution '0' = 12bit RH / 14bit Temp. resolution	0 12bit RH 14bit Temp.

Table 5: Status Register Bits

Measurement resolution: The default measurement resolution of 14bit (temperature) and 12bit (humidity) can be reduced to 12 and 8bit. This is especially useful in high speed or extreme low power applications.

End of Battery function detects and notifies VDD voltages below 2.47 V. Accuracy is ±0.05 V.

Heater: An on chip heating element can be addressed by writing a command into status register. The heater may increase the temperature of the sensor by 5 – 10°C¹² beyond ambient temperature. The heater draws roughly 8mA @ 5V supply voltage.

For example the heater can be helpful for functionality analysis: Humidity and temperature readings before and after applying the heater are compared. Temperature shall increase while relative humidity decreases at the same time. Dew point shall remain the same.

Please note: The temperature reading will display the temperature of the heated sensor element and not ambient temperature. Furthermore, the sensor is not qualified for continuous application of the heater.

4 Conversion of Signal Output

4.1 Relative Humidity

For compensating non-linearity of the humidity sensor – see Figure 18 – and for obtaining the full accuracy of the sensor it is recommended to convert the humidity readout (SO_{RH}) with the following formula with coefficients given in Table 6:

$$RH_{linear} = c_1 + c_2 \cdot SO_{RH} + c_3 \cdot SO_{RH}^2 \text{ (%RH)}$$

¹² Corresponds to 9 – 18°F

SO _{RH}	c ₁	c ₂	c ₃
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

Table 6: Optimized V4 humidity conversion coefficients

The values given in Table 6 are newly introduced and provide optimized accuracy for V4 sensors along the full measurement range. The parameter set c_x^{*}, which has been proposed in earlier datasheets, which was optimized for V3 sensors, still applies to V4 sensors and is given in Table 7 for reference.

SO _{RH}	c ₁ [*]	c ₂ [*]	c ₃ [*]
12 bit	-4.0000	0.0405	-2.8000E-6
8 bit	-4.0000	0.6480	-7.2000E-4

Table 7: V3 humidity conversion coefficients, which also apply to V4.

For simplified, less computation intense conversion formulas see Application Note "RH and Temperature Non-Linearity Compensation". Values higher than 99% RH indicate fully saturated air and must be processed and displayed as 100%RH¹³. Please note that the humidity sensor has no significant voltage dependency.

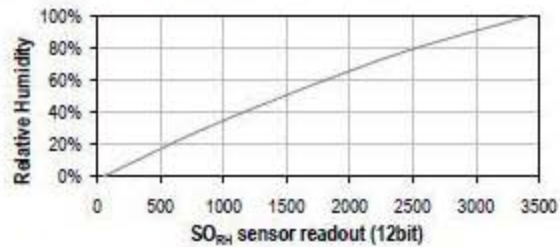


Figure 18: Conversion from SO_{RH} to relative humidity

4.2 Temperature compensation of Humidity Signal

For temperatures significantly different from 25°C (~77°F) the humidity signal requires a temperature compensation. The temperature correction corresponds roughly to 0.12%RH/°C @ 50%RH. Coefficients for the temperature compensation are given in Table 8.

$$RH_{true} = (T_c - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{linear}$$

SO _{RH}	t ₁	t ₂
12 bit	0.01	0.00008
8 bit	0.01	0.00128

Table 8: Temperature compensation coefficients¹⁴

¹³ If wetted excessively (strong condensation of water on sensor surface), sensor output signal can drop below 100%RH (even below 0%RH in some cases), but the sensor will recover completely when water droplets evaporate. The sensor is not damaged by water immersion or condensation.

¹⁴ Coefficients apply both to V3 as well as to V4 sensors.

4.3 Temperature

The band-gap PTAT (Proportional To Absolute Temperature) temperature sensor is very linear by design. Use the following formula to convert digital readout (SO_T) to temperature value, with coefficients given in Table 9:

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T$$

VDD	d ₁ (°C)	d ₁ (°F)	SO _T	d ₂ (°C)	d ₂ (°F)
5V	-40.1	-40.2	14bit	0.01	0.018
4V	-39.8	-39.6	12bit	0.04	0.072
3.5V	-39.7	-39.5			
3V	-39.6	-39.3			
2.5V	-39.4	-38.9			

Table 9: Temperature conversion coefficients¹⁵.

4.4 Dew Point

SHT1x is not measuring dew point directly, however dew point can be derived from humidity and temperature readings. Since humidity and temperature are both measured on the same monolithic chip, the SHT1x allows superb dew point measurements.

For dew point (T_d) calculations there are various formulas to be applied, most of them quite complicated. For the temperature range of -40 – 50°C the following approximation provides good accuracy with parameters given in Table 10:

$$T_d(RH, T) = T_n \cdot \frac{\ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) + \frac{m \cdot T}{T_n + T}}{m - \ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) - \frac{m \cdot T}{T_n + T}}$$

Temperature Range	T _n (°C)	m
Above water, 0 – 50°C	243.12	17.62
Above ice, -40 – 0°C	272.62	22.46

Table 10: Parameters for dew point (T_d) calculation.

Please note that "ln(...)" denotes the natural logarithm. For RH and T the linearized and compensated values for relative humidity and temperature shall be applied.

For more information on dew point calculation see Application Note "Dew point calculation".

5 Environmental Stability

If sensors are qualified for assemblies or devices, please make sure that they experience same conditions as the reference sensor. It should be taken into account that response times in assemblies may be longer, hence enough dwell time for the measurement shall be granted. For detailed information please consult Application Note "Qualification Guide".

The SHT1x sensor series were tested according to AEC-Q100 Rev. F qualification test method. Sensor specifications are tested to prevail under the AEC-Q100 temperature grade 2 test conditions listed in Table 11¹⁶. Sensor performance under other test conditions cannot be guaranteed and is not part of the sensor specifications. Especially, no guarantee can be given for sensor performance in the field or for customer's specific application.

Please contact Sensirion for detailed information.

Environment	Standard	Results ¹⁷
HTSL	125°C, 1000 hours	Within specifications
TC	-50°C - 125°C, 1000 cycles Acc. JESD22-A104-C	Within specifications
UHST	130°C / 85%RH, 96h	Within specifications
THU	85°C / 85%RH, 1000h	Within specifications
ESD immunity	MIL STD 883E, method 3015 (Human Body Model at ±2kV)	Qualified
Latch-up	force current of ±100mA with T _{amb} = 80°C, acc. JEDEC 17	Qualified

Table 11: Qualification tests: HTSL = High Temperature Storage Lifetime, TC = Temperature Cycles, UHST = Unbiased Highly accelerated temperature and humidity Test, THU = Temperature humidity unbiased

6 Packaging

6.1 Packaging type

SHT1x are supplied in a surface mountable LCC (Leadless Chip Carrier) type package. The sensor housing consists of a Liquid Crystal Polymer (LCP) cap with epoxy glob top on a standard 0.8mm FR4 substrate. The device is fully RoHS and WEEE compliant – it is free of of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

¹⁵ Temperature coefficients have slightly been adjusted compared to datasheet SHTxx version 3.01. Coefficients apply to V3 as well as V4 sensors.

¹⁶ Sensor operation temperature range is -40 to 105°C according to AEC-Q100 temperature grade 2.

¹⁷ According to accuracy and long term drift specification given on Page 2.

Data sheet

BMP180

Digital pressure sensor

Bosch Sensortec



BOSCH
Invented for life

BMP180 Data sheet

Document revision	2.5
Document release date	5 April 2013
Document number	BST-BMP180-DS000-09
Technical reference code(s)	0 273 300 244

Notes Data in this document are subject to change without notice. Product photos and pictures are for illustration purposes only and may differ from the real product's appearance.

BMP180

DIGITAL PRESSURE SENSOR

Key features

Pressure range: 300 ... 1100hPa (+9000m ... -500m relating to sea level)
 Supply voltage: 1.8 ... 3.6V (V_{DD})
 1.62V ... 3.6V (V_{DDIO})

Package: LGA package with metal lid
 Small footprint: 3.6mm x 3.8mm
 Super-flat: 0.93mm height

Low power: 5 μ A at 1 sample / sec. in standard mode

Low noise: 0.06hPa (0.5m) in ultra low power mode
 0.02hPa (0.17m) advanced resolution mode

- Temperature measurement included
- I²C interface
- Fully calibrated
- Pb-free, halogen-free and RoHS compliant,
- MSL 1

Typical applications

- Enhancement of GPS navigation (dead-reckoning, slope detection, etc.)
- In- and out-door navigation
- Leisure and sports
- Weather forecast
- Vertical velocity indication (rise/sink speed)

1. Electrical characteristics

If not stated otherwise, the given values are ± 3 -Sigma values over temperature/voltage range in the given operation mode. All values represent the new parts specification; additional solder drift is shown separately.

Table 1: Operating conditions, output signal and mechanical characteristics

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Operating temperature	T_A	operational	-40		+85	°C
		full accuracy	0		+65	
Supply voltage	V_{DD}	ripple max. 50mVpp	1.8	2.5	3.6	V
			1.62	2.5	3.6	
Supply current @ 1 sample / sec. 25°C	I_{DDLOW}	ultra low power mode		3		µA
	I_{DDSTD}	standard mode		5		µA
	I_{DDHR}	high resolution mode		7		µA
	I_{DDUHR}	Ultra high res. mode		12		µA
	I_{DDAR}	Advanced res. mode		32		µA
Peak current	I_{peak}	during conversion		650	1000	µA
Standby current	I_{DOSBM}	@ 25°C		0.1	4 ¹	µA
Relative accuracy pressure $V_{DD} = 3.3V$		950 ... 1050 hPa @ 25 °C		±0.12		hPa
				±1.0		m
Absolute accuracy pressure $V_{DD} = 3.3V$		300 ... 1100 hPa 0 ... +65 °C	-4.0	-1.0*	+2.0	hPa
		300 ... 1100 hPa -20 ... 0 °C	-6.0	-1.0*	+4.5	hPa
Resolution of output data		pressure		0.01		hPa
		temperature		0.1		°C
Noise in pressure		see table on page 12-13				
Absolute accuracy temperature $V_{DD} = 3.3V$		@ 25 °C	-1.5	±0.5	+1.5	°C
		0 ... +65 °C	-2.0	±1.0	+2.0	°C

¹ at 85°C

Conversion time pressure	$t_{c_p_low}$	ultra low power mode		3	4.5	ms
	$t_{c_p_std}$	standard mode		5	7.5	ms
	$t_{c_p_hr}$	high resolution mode		9	13.5	ms
	$t_{c_p_uhr}$	ultra high res. mode		17	25.5	ms
	$t_{c_p_ar}$	Advanced res. mode		51	76.5	ms
Conversion time temperature	t_{c_temp}	standard mode		3	4.5	ms
Serial data clock	f_{SCL}				3.4	MHz
Solder drifts		Minimum solder height 50 μ m	-0.5		+2	hPa
Long term stability**		12 months		± 1.0		hPa

* The typical value is: -1 ± 1

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

2. Absolute maximum ratings

Table 2: Absolute maximum ratings

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

The BMP180 has to be handled as

Electrostatic Sensitive Device (ESD).



Figure 1: ESD



Tech Support: services@elecfreaks.com

Ultrasonic Ranging Module HC - SR04

Product features:

Ultrasonic ranging module HC - SR04 provides 2cm - 400cm non-contact measurement function, the ranging accuracy can reach to 3mm. The modules includes ultrasonic transmitters, receiver and control circuit. The basic principle of work:

- (1) Using IO trigger for at least 10us high level signal,
- (2) The Module automatically sends eight 40 kHz and detect whether there is a pulse signal back.
- (3) IF the signal back, through high level , time of high output IO duration is the time from sending ultrasonic to returning.

Test distance = (high level time×velocity of sound (340M/S) / 2,

Wire connecting direct as following:

- 5V Supply
- Trigger Pulse Input
- Echo Pulse Output
- 0V Ground

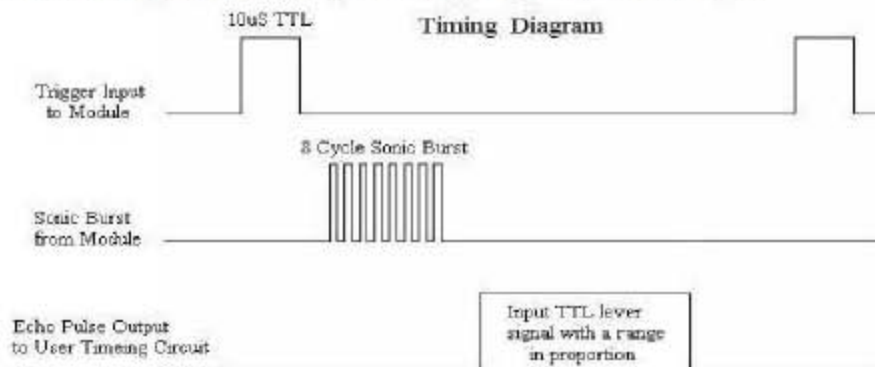
Electric Parameter

Working Voltage	DC 5 V
Working Current	15mA
Working Frequency	40Hz
Max Range	4m
Min Range	2cm
MeasuringAngle	15 degree
Trigger Input Signal	10uS TTL pulse
Echo Output Signal	Input TTL lever signal and the range in proportion
Dimension	45*20*15mm



Timing diagram

The Timing diagram is shown below. You only need to supply a short 10 μ s pulse to the trigger input to start the ranging, and then the module will send out an 8 cycle burst of ultrasound at 40 kHz and raise its echo. The Echo is a distance object that is pulse width and the range in proportion. You can calculate the range through the time interval between sending trigger signal and receiving echo signal. Formula: $\mu\text{s} / 58 = \text{centimeters}$ or $\mu\text{s} / 148 = \text{inch}$; or: the range = high level time * velocity (340M/S) / 2; we suggest to use over 60ms measurement cycle, in order to prevent trigger signal to the echo signal.



DS1308

Low-Current I²C RTC with 56-Byte NV RAM

General Description

The DS1308 serial real-time clock (RTC) is a low-power, full binary-coded decimal (BCD) clock/calendar plus 56 bytes of NV RAM. Address and data are transferred serially through an I²C interface. The clock/calendar provides seconds, minutes, hours, day, date, month, and year information. The end of the month date is automatically adjusted for months with fewer than 31 days, including corrections for leap year. The clock operates in either the 24-hour or 12-hour format with an AM/PM indicator. The DS1308 has a built-in power-sense circuit that detects power failures and automatically switches to the backup supply, maintaining time and date operation.

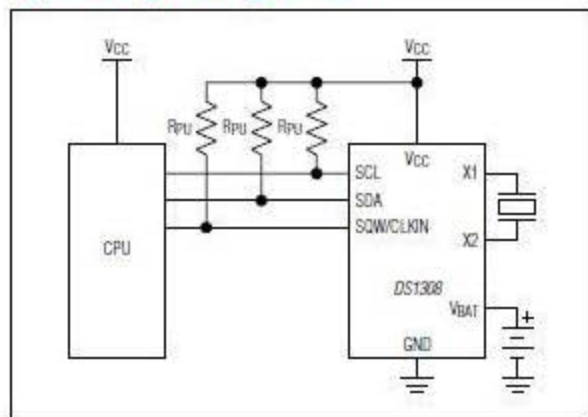
Applications

Handhelds (GPS, POS Terminal)
 Consumer Electronics (Set-Top Box, Digital Recording, Network Appliance)
 Office Equipment (Fax/Printer, Copier)
 Medical (Glucometer, Medicine Dispenser)
 Telecommunications (Router, Switcher, Server)
 Other (Utility Meter, Vending Machine, Thermostat, Modem)

Benefits and Features

- Compatible with Crystal ESR Up to 100kΩ Allows a Crystal to be Optimized for Cost and Space
- Low-Power Operation Extends Battery Backup Run Time
 - Low Timekeeping Current of 250nA (typ)
 - Automatic Power-Fail Detect and Switch Circuitry
- Completely Manages All Timekeeping Functions
 - Real-Time Clock Counts Seconds, Minutes, Hours, Date of the Month, Month, Day of the Week, and Year with Leap-Year Compensation Valid Up to 2400
 - External Clock Source for Synchronization Clock Reference (e.g., 32kHz, 50Hz/60Hz Powerline, GPS 1PPS)
 - 56-Byte, Battery-Backed, General-Purpose RAM with Unlimited Writes
 - Programmable Square-Wave Output Signal
- Simple Serial Port Interfaces with Most Microcontrollers
 - I²C Serial Interface
- Industrial Temperature Range: -40°C to +85°C Supports Operation in a Wide Range of Applications
- Underwriters Laboratories (UL®) Recognized

Typical Operating Circuit



Ordering Information appears at end of data sheet.

UL is a registered trademark of Underwriters Laboratories Inc.

Absolute Maximum Ratings

(All voltages relative to ground.)

Voltage Range on V _{CC} or V _{BAT}	-0.3V to +6.0V
Voltage on Any Non-Power Pin.....	-0.3V to (V _{CC} + 0.3V)
Operating Temperature Range.....	-40°C to +85°C

Junction Temperature Maximum.....	+150°C
Storage Temperature Range.....	-55°C to +125°C
Lead Temperature (soldering, 10s).....	+300°C
Soldering Temperature (reflow).....	+260°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Package Thermal Characteristics (Note 1)

μSOP

Junction-to-Ambient Thermal Resistance (θ_{JA})206.3°C/W

Junction-to-Case Thermal Resistance (θ_{JC})42°C/W

Note 1: Package thermal resistances were obtained using the method described in JEDEC specification JESD51-7, using a four-layer board. For detailed information on package thermal considerations, refer to www.maximintegrated.com/thermal-tutorial.

Recommended Operating Conditions

(T_A = -40°C to +85°C, unless otherwise noted.) (Note 2)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Operating Voltage Range	V _{CC}	DS1308-18	1.71	1.8	5.5	V
		DS1308-3	2.7	3.0	5.5	
		DS1308-33	3.0	3.3	5.5	
Battery Voltage	V _{BAT}		1.3		5.5	V
Logic 1 Input	V _{IH}		0.7 x V _{CC}		V _{CC} + 0.3	V
Logic 0 Input	V _{IL}		-0.3		0.3 x V _{CC}	V

DC Electrical Characteristics

(V_{CC} = V_{CCMIN} to V_{CCMAX}, V_{BAT} = V_{BATMIN} to V_{BATMAX}, T_A = -40°C to +85°C, unless otherwise noted.) (Note 2)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Power-Supply Active Current (Note 3)	I _{CCA}	f _{SCL} = 400kHz			325	μA
Power-Supply Standby Current (Note 4)	I _{CCS}	-33: V _{CC} = 3.63V			125	μA
		-3: V _{CC} = 3.3V			125	
		-18: V _{CC} = 1.89V			100	
		V _{CC} = V _{CCMAX}			200	
Battery Leakage Current	I _{BATLKG}	V _{CC} ≥ V _{PF}	-100	25	+100	nA
Input Leakage (SCL)	I _I	V _{IN} = 0V to V _{CC}	-0.1		+0.1	μA
I/O Leakage (SDA, SQW/CLKIN)	I _{IO}	I ² C bus inactive, ECLK = 1	-0.1		+0.1	μA
Output Logic 0 (SDA, SQW/CLKIN), V _{OL} = 0.4V	I _{OL}	V _{CC} ≥ V _{CCMIN}	3.0			mA
		V _{BAT} ≥ 1.3V ≥ V _{CC} + 0.2V	250			μA
Power-Fail Trip Point	V _{PF}	-33	2.70	2.82	3.00	V
		-3	2.45	2.55	2.70	
		-18	1.45	1.62	1.70	