



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Diseño de una estación meteorológica de bajo coste orientada al internet de las cosas

Low-cost Weather Station Design Focused on the Internet of Things

Autor

**Jonathan Chamba Benítez**

Director

César Asensio Chaves

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia

Noviembre 2022





**Escuela Universitaria  
Politécnica** - La Almunia  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

## **MEMORIA**

Diseño de una estación meteorológica de bajo  
coste orientada al internet de las cosas

Low-cost Weather Station Design Focused on  
the Internet of Things

424.21.14

Autor: Jonathan Chamba Benítez

Director: César Asensio Chaves

Fecha: 11 2022



# DEDICATORIA

A mis padres Carmen y Marco, gracias a su esfuerzo, paciencia y apoyo incondicional he conseguido lograr esta meta.

A mis abuelos María y César, mis segundos padres, que pese a la distancia siempre están presentes en mi corazón.

A mis profesores César y David, por haber sido mi guía y sustento en la redacción del TFG.

A mis familiares y amigos, por su apoyo y aliento brindado.



## INDICE DE CONTENIDO BREVE

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	3
3. INTRODUCCIÓN	5
4. ESTADO DEL ARTE	8
5. DESARROLLO	77
6. RESULTADOS	140
7. CONCLUSIONES	173
8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	176
9. BIBLIOGRAFÍA	178

## INDICE DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
1.1. PALABRAS CLAVE	2
2. ABSTRACT	3
2.1. KEY WORDS	4
3. INTRODUCCIÓN	5
4. ESTADO DEL ARTE	8
4.1. ANTECEDENTES	8
4.1.1. Estación meteorológica basada en microcontrolador Arduino [5]	8
4.1.2. Design and implementation of a low-cost IoT-based agroclimatic monitoring system for greenhouses [6]	10
4.1.3. IoT Based Low-cost Weather Station and Monitoring System for Precision Agriculture in India [8]	14
4.1.4. Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring [9]	17

4.1.5. <i>A Very Low Cost, Open, Wireless, Internet of Things (IoT) Aire Quality Monitoring Platform</i> [10]	19
4.1.6. <i>Medición y adquisición de datos para una estación meteorológica alimentada con energía solar</i> [11]	21
4.1.7. <i>Desarrollo de una red punto a punto con tecnología LoRa y servidor Web</i> [12]	23
4.1.8. <i>Design and Calibration of a 3D-Printed Cup-Vane Wireless Sensor Node</i> [13]	26
4.1.9. <i>Elementos comerciales</i>	31
4.1.9.1. Estación meteorológica Sainlogic FT0300 [14]	32
4.1.9.2. Estación meteorológica Explore Scientific WSX-1001 [15]	33
4.1.9.3. Estación meteorológica Netatmo [16]	34
4.2. MARCO TEÓRICO	37
4.2.1. <i>Anemómetro de cazoletas</i>	37
4.2.1.1. Parámetros y características principales de un anemómetro	38
4.2.1.2. Modelo analítico para el estudio del comportamiento del anemómetro de tres cazoletas.	39
4.2.1.3. Concepto de la derivada en un punto	44
4.2.2. <i>Placa de Desarrollo</i>	46
4.2.2.1. ESPDUINO-32	47
4.2.3. <i>Sensores</i>	49
4.2.4. <i>Alimentación</i>	59
4.2.4.1. Paneles Solares	60
4.2.4.1.1. Regulador de tensión	64
4.2.4.2. Baterías	66
4.2.4.2.1. BMS	69
4.2.5. <i>Comunicaciones</i>	70
4.2.5.1. Protocolo I2C	70
4.2.5.2. Protocolo SPI	72
4.2.5.3. Protocolo UDP	73
4.2.5.4. Plataforma IoT ThingSpeak	75
<b>5. DESARROLLO</b>	<b>77</b>



5.1. ESTUDIO DE REQUERIMIENTOS Y NECESIDADES _____	78
5.2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA _____	79
5.3. DISEÑO DE ANEMÓMETRO DE CAZOLETAS ASIMÉTRICO _____	83
5.3.1. Preparación del equipo _____	84
5.3.1.1. Comunicación AS5048A y ESPDUINO-32 _____	91
5.3.1.2. Comunicación ESPDUINO-32 y LabVIEW _____	96
5.3.1.2.1. Diagrama de bloques _____	96
5.3.1.2.2. Panel frontal _____	103
5.3.2. Ensayos y verificaciones _____	104
5.3.2.1. Primer ensayo _____	105
5.3.2.2. Segundo ensayo _____	109
5.3.2.2.2. Recolección de información _____	111
5.3.2.2.3. Calibración de la velocidad _____	111
5.3.2.2.4. Sistema de clasificación _____	112
5.3.2.2.5. Validación del sistema de clasificación _____	115
5.4. DESARROLLO DE CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN _____	116
5.4.1. Descripción del funcionamiento del código fuente _____	116
5.5. CONFIGURACIÓN DE THINGSPEAK _____	125
5.5.1. Interfaz de usuario _____	128
5.5.2. Aplicación móvil Thingview _____	130
5.6. SISTEMA AUTÓNOMO DE ENERGÍA _____	131
5.6.1. Requerimientos _____	131
5.6.2. Desarrollo de sistema _____	131
<b>6. RESULTADOS _____</b>	<b>140</b>
6.1. ANEMÓMETRO ASIMÉTRICO _____	140
6.1.1. Primer ensayo _____	140
6.1.1.1. Diseño de rotor 1 _____	143
6.1.1.2. Diseño de rotor 2 _____	146

INDICES

6.1.2. Segundo ensayo	149
6.1.2.1. Calibración de velocidad	149
6.1.2.2. Sistema de clasificación	155
6.1.2.2.1. Primer sistema de clasificación	156
6.1.2.2.2. Segundo sistema de clasificación	158
6.1.2.2.3. Validación de sistemas de clasificación	161
6.2. PROTOTIPO DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA	166
6.2.1. Monitorización de los parámetros atmosféricos	167
6.3. ESTIMACIÓN DE COSTES	170
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>173</b>
7.1. TRABAJOS A FUTURO	175
<b>8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE</b>	<b>176</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>178</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. (Izq.) Módulo interior; (Der.) Módulo exterior. [5]	10
Ilustración 2. Diagrama de disposición de interruptores y resistencias en la veleta de la estación SEN-08942. Elaboración propia, basada en [7]	12
Ilustración 3. Ejemplo de interfaz de circuito de veleta. Elaboración propia, basada en [7]	13
Ilustración 4. Modelo conceptual del sistema de monitorización de variables agroclimáticas propuesto basado en IoT. [6]	13
Ilustración 5. Diagrama de bloques de la estación meteorológica [8]	16
Ilustración 6. Montaje experimental [8]	16
Ilustración 7. Componentes de la estación meteorológica automática de bajo coste [9]	18
Ilustración 8. (Izq.) Estación meteorológica automática de bajo coste. (Der.) Estación meteorológica profesional [9]	19

Ilustración 9. Sistema de medición de variables climatológicas. [11] .....	22
Ilustración 10. Esquema del sistema de alimentación de energía solar autónomo. [11] .....	23
Ilustración 11. Espacio de experimentación. [12] .....	25
Ilustración 12. Página web desarrollada. [12] .....	26
Ilustración 13. Diseño de instrumento de anemómetro de cazoleta y veleta: (a) diseño de anemómetro y su vista en sección (A-A); y (b) diseño de veleta y su vista en sección (B-B) [13] .....	27
Ilustración 14. Ensamblaje virtual de la copa-aleta: (a) ensamblaje completo; (b) lista de piezas y (c) vista en sección (C-C). [13] .....	28
Ilustración 15. Esquema electrónico del nodo sensor inalámbrico. [13] .....	29
Ilustración 16. Instrumento copa-veleta terminado: (a) laboratorio, todos los sensores instalados; y (b) conjunto terminado. [13] .....	29
Ilustración 17. Sensor HCM5883L diseñado en sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario (después de la calibración). [13] .....	31
Ilustración 18. Esquema de conexión de la estación meteorológica FT0300. [14] .....	33
Ilustración 19. Estación meteorológica Explore Scientific WSX-1001. [15] .....	33
Ilustración 20. Estación meteorológica Netatmo. [16] .....	35
Ilustración 21. Características técnicas estación meteorológica Netatmo. ....	36
Ilustración 22. Anemómetro de copa Riso. La altura es de 0.26m. [17] .....	37
Ilustración 23. Parámetros y características principales del anemómetro. Elaboración propia. ....	38
Ilustración 24. Esquema de las copas y de las geometrías de los rotores ensayados. Dimensiones en mm. Elaboración propia, basada en [20]. ....	41
Ilustración 25. Coeficiente de fuerza normal aerodinámica, $c_N$ , en función de los diferentes tipos de cazoletas: cónica, elíptica y porosa. Trazada en relación con la dirección del viento respecto a la cazoleta, $\alpha$ . [19]. ....	43
Ilustración 26. Definición gráfica de la derivada como función (1). Elaboración propia, basada en [21]. ....	45

Ilustración 27. Definición gráfica de la derivada como función (2). Elaboración propia, basada en [21].	46
Ilustración 28. Placa de desarrollo ESPDUINO-32.	47
Ilustración 29. Diagrama de bloques funcional de microprocesador ESP32. [22]	48
Ilustración 30. Diagrama de pines ESPDUINO-32.	49
Ilustración 31. Sensor BME688 [23].	50
Ilustración 32. Variación de la resistencia de gas en función de la presencia de gases contaminantes. Elaboración propia.	52
Ilustración 33. Placa de conexión PI3G BME688 V1.1 [25].	55
Ilustración 34. Diagrama de bloques de AS5048A. Elaboración propia basada en [28].	57
Ilustración 35. Encoder magnético AS5048: (izq.) Disposición sobre la superficie de la placa; (der.) Distribución típica del imán y del flujo magnético [28].	58
Ilustración 36. Configuración de pines de AS5048A [28].	59
Ilustración 37. Configuración de sistema autónomo. Elaboración propia, basada en [29]	60
Ilustración 38. Estructura de la célula solar [30].	61
Ilustración 39. Constitución de un panel solar. Principales características [30].	62
Ilustración 40. Asociación de células solares [30].	64
Ilustración 41. Conexiones del regulador en una instalación fotovoltaica [30].	65
Ilustración 42. Conexión en serie de cuatro baterías (4S) [31].	68
Ilustración 43. Conexión en paralelo de cuatro baterías (4P) [31].	68
Ilustración 44. Conexión serie/paralelo de cuatro baterías (2s2p) [31].	69
Ilustración 45. Mecanismos de acción del BMS [33].	70
Ilustración 46. Esquema de conexión I2C. [34]	71
Ilustración 47. Esquema de conexión SPI. [35]	72
Ilustración 48. Sistema IoT implementado con ThingSpeak. [38].	75
Ilustración 49. Diagrama de bloques de la estación meteorológica.	80

Ilustración 50. Funcionamiento de ADC y del calentador del sensor de gas [23]. .....	81
Ilustración 51. Anemómetro de tres cazoletas. (izq.) Vista general; (der.) Vista superior del rotor. La altura es de 85mm. ....	84
Ilustración 52. Anemómetro de 3 cazoletas 3D diseñado en el software CAD Fusion 360. ....	84
Ilustración 53. Ensamblaje virtual de anemómetro de 3 cazoletas: (a) Ensamblaje completo; (b) Lista de piezas; (c) Vista en sección (A-A). ....	85
Ilustración 54. Encoder AS5048A. (izq.) PCB; (der.) Ubicación en el interior de la base del anemómetro. ....	86
Ilustración 55. Comparación de rotores asimétricos impresos en 3D vs. un rotor simétrico. (izq.) Rotor simétrico; (centro) Diseño 1; (der.) Diseño 2. ....	89
Ilustración 56. Anemómetro asimétrico: montaje virtual 3D del diseño 2 en software CAD. ....	89
Ilustración 57. Diagrama de bloques de conexión entre AS5048A, ESPDUINO-32 y Labview. ....	90
Ilustración 58. Conexión ESPDUINO-32 y AS5048A. ....	91
Ilustración 59. Diagrama UML: Setup de la comunicación AS5048A, ESPDUINO-32 y LabVIEW. ....	92
Ilustración 60. Diagrama UML: Loop en la comunicación AS5048A, ESPDUINO-32 y LabVIEW ....	94
Ilustración 61. Diagrama UML: funcionamiento conceptual de LabVIEW. ....	96
Ilustración 62. Inicio de conexión UDP en LabVIEW. ....	97
Ilustración 63. Diagrama UML: Procesamiento de datos en LabVIEW. ....	98
Ilustración 64. Bucle de adecuación de datagrama de datos en LabVIEW. ....	99
Ilustración 65. Derivada numérica con salvado de discontinuidad, umbral mínimo y puerta de error en LabVIEW. ....	101
Ilustración 66. Creación de formas de ondas y guardado de datos en LabVIEW. ....	102
Ilustración 67. Interfaz de configuración para el almacenamiento de datos en LabVIEW. ....	103

Ilustración 68. Formas de onda en LabVIEW: (superior) Posición angular en grados; (inferior) Derivada numérica sin salvado de discontinuidad. ....	104
Ilustración 69. Interfaz de usuario en LabVIEW. ....	104
Ilustración 70. Disposición de anemómetro asimétrico para ensayo de los cuatro puntos cardinales. (a) Norte; (b) Este; (c) Sur; (d) Oeste .....	106
Ilustración 71. Disposición de anemómetro asimétrico en una prueba de campo. ....	107
Ilustración 72. Diagrama UML: procesamiento de información del Ensayo 1 en Matlab.....	108
Ilustración 73. Anemómetro digital BT-866A.....	110
Ilustración 74. Interfaz de usuario del software Anemometer.....	110
Ilustración 75. Diagrama UML: creación de sistema de clasificación en MATLAB .....	113
Ilustración 76. Diagrama UML: funcionamiento conceptual del software del prototipo .....	117
Ilustración 77. Diagrama UML: Setup del código de programación general. ...	120
Ilustración 78. Diagrama UML: Loop de código de programación general. ....	122
Ilustración 79. Interfaz para iniciar sesión en ThingSpeak. [42] .....	126
Ilustración 80. Configuración del canal en ThingSpeak. [42] .....	127
Ilustración 81. Pestaña API Keys en ThingSpeak. [42] .....	128
Ilustración 82. Pestaña Apps en ThingSpeak. [42] .....	129
Ilustración 83. Ejemplos para visualizar la información en ThingSpeak. ....	129
Ilustración 84. Visualizaciones creadas para presentar la información en ThingSpeak. ....	130
Ilustración 85. Configuración de aplicación móvil Thingview .....	130
Ilustración 86. Diagrama de bloques de sistema autónomo de energía. ....	132
Ilustración 87. Consumo de energía ESPDUINO-32 (sin cargas). ....	133
Ilustración 88. Medición del consumo de energía de la estación meteorológica. (izq.) Transmisión de datos desactivada; (der.) Transmisión de datos activada. ....	133
Ilustración 89. Paneles solares monocristalinos CNC165X165-6.....	134

Ilustración 90. Módulo de carga de baterías TP4056 [45] .....	136
Ilustración 91. Baterías LiitoKala.....	137
Ilustración 92. Convertidor elevador de voltaje.....	138
Ilustración 93. Comparación de señales con y sin filtro en MATLAB. ....	140
Ilustración 94. Señal filtrada de orden 1 en MATLAB.....	141
Ilustración 95. Señal filtrada de orden 19 en MATLAB. ....	141
Ilustración 96. Ejemplo de representación en plano polar en MATLAB. ....	142
Ilustración 97. Ejemplo de identificación de máximos y mínimos locales en la señal de velocidad y posición angular en MATLAB. ....	142
Ilustración 98. Diseño de rotor 1: posiciones de máximos y mínimos en planos polares (v1).....	143
Ilustración 99. Diseño de rotor 1: posiciones de máximos y mínimos en planos polares (v2).....	145
Ilustración 100. Diseño de rotor 2: posiciones de máximos y mínimos en planos polares (v1).....	147
Ilustración 101. Diseño de rotor 2: posiciones de máximos y mínimos en planos polares (v2).....	148
Ilustración 102. Comparación de velocidades dirección Norte .....	151
Ilustración 103. Comparación de velocidades dirección Este.....	151
Ilustración 104. Comparación de velocidades dirección Oeste.....	152
Ilustración 105. Comparación de velocidades dirección Sur.....	152
Ilustración 106. Gráfica de velocidades promedio.....	154
Ilustración 107. Histograma de posiciones angulares de los máximos locales del sistema de clasificación 1.....	156
Ilustración 108. Imagen de la matriz de generadores del sistema de clasificación 1. ....	157
Ilustración 109. Ajuste de sensor en la base del anemómetro. (izq.) Manera incorrecta; (der.) Manera correcta.....	158
Ilustración 110. Histograma de posiciones angulares de los máximos locales del sistema de clasificación 2.....	159

Ilustración 111. Imagen de matriz de generadores del sistema de clasificación 2. .....	160
Ilustración 112. Gráfica de validación del sistema de clasificación.....	161
Ilustración 113. Validación de sistema 1: señal de velocidad en dirección Este, velocidad 20km/h.....	163
Ilustración 114. Validación de sistema 1: máximos (verdes) y mínimos (rojos) locales de dirección Este, velocidad 20km/h. ....	163
Ilustración 115. Validación de sistema 1: histograma de vector dirección Este, velocidad 20km/h.....	164
Ilustración 116. Montaje físico del prototipo en una placa de pruebas.....	166
Ilustración 117. Interfaz de usuario en ThingSpeak (1).....	168
Ilustración 118. Interfaz de usuario en ThingSpeak (2).....	169
Ilustración 119. Interfaz de usuario en app móvil Thingview.....	170
Ilustración 120. Peso de rotores impresos en 3D. (izq.) Diseño 1; (der.) Diseño 2. .....	171

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sensores ambientales. [5].....	9
Tabla 2. Sensores ambientales. [6].....	11
Tabla 3. Valores de resistencia en función de la dirección y voltaje. Elaboración propia basada en [7]. ....	12
Tabla 4. Sensores ambientales [8].....	15
Tabla 5. Sensores ambientales [9].....	18
Tabla 6. Matriz de correlación. Elaboración propia, basada en [10] .....	21
Tabla 7. Resultados de los módulos emisor y receptor. [12] .....	25
Tabla 8. Precios disponibles de estación meteorológica Netatmo [16].....	36
Tabla 9. Especificaciones de consumo de energía de la ESP32. [22] .....	49



Tabla 10. Características de sensor BME688. Elaboración propia, basada en [23] .....	50
Tabla 11. Modos de funcionamiento del sensor de gas empleando librerías BSEC. [23] .....	51
Tabla 12. Clasificación del Índice de Calidad de Aire Interior y código de colores. Elaboración propia basada en [23].....	52
Tabla 13. Salidas del sensor BME688 empleando librerías BSEC. Elaboración propia basada en [23] .....	53
Tabla 14. Mezcla de COV en respiración con nitrógeno como gas portador. Elaboración propia basada en [23].....	54
Tabla 15. Diferencias entre los paneles según la tecnología de fabricación [30]. .....	63
Tabla 16. Características de los principales tipos de baterías [30]. .....	67
Tabla 17. Resumen características de la ESP32 [22].....	82
Tabla 18. Valores de Rc y Rrc de rotores diseñados .....	87
Tabla 19. Especificaciones del filamento PETG [39] .....	88
Tabla 20. Discontinuidad en la salida aplicando la expresión (14) de derivada numérica. ....	100
Tabla 21. Relación entre componentes de matriz y dirección de viento. ....	124
Tabla 22. Parámetros atmosféricos enviados a ThingSpeak.....	125
Tabla 23. Valores de consumo de energía de la estación meteorológica. ....	133
Tabla 24. Valores de consumo de energía totales de la estación meteorológica. .....	134
Tabla 25. Horas de sol útiles. [44] .....	135
Tabla 26. Características de módulo de carga [45] .....	136
Tabla 27. Características de batería LiitoKala [46].....	137
Tabla 28. Convertidor elevador [47] .....	138
Tabla 29. Diseño de rotor 1: diferencia de posición angular de mínimos locales en función de la dirección ( $v_1$ ) .....	144

Tabla 30. Diseño de rotor 1: diferencia de posición angular de mínimos locales en función de la dirección (v2) .....	146
Tabla 31. Diseño de rotor 2: diferencia de posición angular de mínimos locales en función de la dirección (v1) .....	147
Tabla 32. Diseño de rotor 2: diferencia de posición angular de mínimos locales en función de la dirección (v2) .....	149
Tabla 33. Valores promedio de velocidades en función de la dirección. ....	150
Tabla 34. Parámetros de las ecuaciones de la recta .....	154
Tabla 35. Parámetros promedios de las ecuaciones de la recta .....	154
Tabla 36. Calibración de velocidad y error relativo. ....	155
Tabla 37. Resultados de la validación del sistema de clasificación 1. ....	162
Tabla 38. Resultados de la validación del sistema de clasificación 2. ....	165
Tabla 39. Estimación de costes .....	171

## 1. RESUMEN

El presente trabajo fin de grado (TFG) tiene como finalidad diseñar una estación meteorológica autónoma de bajo coste que implemente el uso de tecnologías IoT para la transmisión de los parámetros atmosféricos (temperatura, humedad, presión atmosférica, calidad de aire, velocidad y dirección del viento).

En vista del elevado coste que suponen los dispositivos que integran tecnología capaz de realizar mediciones de la velocidad y dirección del viento, como por ejemplo los anemómetros basados en ultrasonidos, se propone el diseño de un dispositivo de bajo coste que se basa en las propiedades físicas de los anemómetros de tres cazoletas. El dispositivo diseñado se lo denomina anemómetro asimétrico debido a que integra una cazoleta con dimensiones diferentes a las demás. En su desarrollo se hace uso de sistemas de adquisición, procesamiento y análisis de datos que permiten calibrar la velocidad del dispositivo y desarrollar un sistema para la clasificación de la dirección del viento.

Para la lectura de la temperatura, humedad, presión atmosférica y calidad de aire se recurre al uso de un sensor de última generación que aporta un bajo consumo energético y elevada fiabilidad.

En primer lugar, se realiza el estudio de requerimientos y necesidades del prototipo, permitiendo definir los objetivos a alcanzar. A continuación, se presenta el desarrollo y validación del anemómetro asimétrico. Posteriormente se desarrolla un código fuente que permite la integración de los diferentes sistemas que componen la estación meteorológica. En cuarto lugar, se indica la configuración de la plataforma IoT ThingSpeak que permite la visualización de los parámetros atmosféricos. Por último, se presenta el estudio de un sistema autónomo de energía.

Para concluir, se realiza la presentación de los resultados obtenidos en el desarrollo de la estación meteorológica, así como la estimación de su coste de implementación.

## 1.1. PALABRAS CLAVE

Estación meteorológica, bajo coste, anemómetro asimétrico, BME688, Internet de las cosas (IoT).

## 2. ABSTRACT

The present undergraduate thesis targets the purpose of designing an autonomous low-cost weather station, within the implementation of IoT technologies towards the transmission of atmospheric parameters (temperature, humidity, atmospheric pressure, air quality, wind and speed and direction).

Taking into consideration the elevated cost of applied technologies capable of measuring wind speed and direction, the design of a low-cost artifact (device) is proposed based on the physical properties of three cup anemometer.

Thus, the designed device is called asymmetrical anemometer because one of the cups has different measurements than the others. Within its design the usage of acquisition systems, data analysis and processing is incorporated in order to calibrate the speed of the device and designing a wind direction classification system.

For the temperature, humidity, atmospheric pressure and air quality a next (latest) generation sensor is used so the ensemble meets the needs of low consumption and elevated reliability.

First, a prototype requirements and necessities is conducted, defining the goals and purposes of the study. Afterwards the design and validation of the asymmetrical anemometer is presented. Subsequently the source code is designed in order to integrate the different weather station components. Next is elaborated the configuration analysis of the IoT platform ThingSpeak which allows the visualization of atmospherical parameters. Lastly, the autonomous energy harvesting system study is presented.

To conclude, the obtained weather station results are presented, along with the estimated implementation costs.

## 2.1. KEY WORDS

Weather station, low cost, asymmetrical anemometer, BME688,  
Internet of Things (IoT).

### 3. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la información basada en Internet permite el intercambio de bienes y servicios entre todos los elementos, equipos y objetos conectados a la red. La IoT (Internet of things – Internet de las cosas) se refiere a la interconexión en red de todos los objetos cotidianos que a menudo están equipados con algún tipo de inteligencia.

La IoT introduce un cambio radical en la vida de las personas, ofreciendo una gran cantidad de nuevas oportunidades de acceso a datos, servicios específicos en la educación, en seguridad, asistencia sanitaria o en el transporte, entre otros campos. Entre los beneficios que aporta el IoT, se resalta la oportunidad de crear nuevos dispositivos interconectados inteligentes, abriendo las puertas a nuevas formas de acceder a la información por medio de la optimización de equipos y recursos, traducándose a un ahorro en el coste que supone implementar esta tecnología. [1]

Por otra parte, las temperaturas anormales causadas por el cambio climático son responsables de un gran número de desastres los cuales afectan de manera directa e indirecta tanto a la vida humana como animal y vegetal. Las condiciones meteorológicas que antes cambiaban en cuestión de meses ahora pueden cambiar a cualquier hora del día. Estos cambios repentinos en las condiciones climáticas traen consigo graves problemas de enfermedades para las personas.

Existen diversos estudios que presentan datos importantes sobre el impacto del cambio climático, a continuación, se resumen algunos de ellos.

En primer lugar, en [2] se presenta un estudio empírico de 732 lugares en 43 países para estimar las cargas de mortalidad asociadas con la exposición adicional al calor que ha resultado del reciente

calentamiento inducido por el hombre, durante el periodo 1991-2018. En todos los países del estudio se encontró que el 37,0% (rango 20,5 - 76,3%) de las muertes relacionadas con el calor en la estación cálida pueden atribuirse al cambio climático antropogénico y que el aumento de la mortalidad es evidente en todos los continentes. Las cargas variaron geográficamente, pero fueron del orden de docenas a cientos de muertes por año en muchos lugares. Sus hallazgos apoyan la necesidad urgente de estrategias de mitigación y adaptación más ambiciosas para minimizar los impactos del cambio climático en la salud pública.

En segundo lugar, en [3] se indica que el cambio climático no solo afecta a la humanidad, sino también a todo su entorno, siendo el sector agrícola uno de los más afectados, esto debido a que el ciclo de vida de un cultivo depende de muchas variables ambientales, cuyo comportamiento es aleatorio si no existe un sistema que lo pueda monitorear. Debido a lo anterior, concibe a las estaciones meteorológicas como una herramienta de suma importancia que permite al agricultor aprovechar los diferentes recursos naturales, físicos, económicos y en sí mismo el recurso humano, todo con el fin de alcanzar la llamada "Agricultura de Precisión" la cual se enfoca en desarrollar zonas de cultivo con ambientes controlados que buscan obtener cultivos de calidad.

Por último, en [4] se señala que en Europa más del 60% de la población vive en áreas urbanas y son responsables del 85% del PIB. A lo largo de toda Europa el incremento del tráfico rodado es un fenómeno común. Estas circunstancias crean una situación adversa en la que las externalidades creadas (congestiones, polución, estrés, inequidades sociales, etc.) conducen a las ciudades en una espiral de degradación. Al mismo tiempo, el cambio climático es reconocido como un problema.

Una estrategia para contribuir a la mitigación del impacto del cambio climático es el poder prever las variaciones del clima, permitiendo así a las personas tomar medidas preventivas, ya sea en un escenario urbano,



agrícola u otro. Además, se da importancia al control de la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> al que la sociedad está expuesta, por lo que conocer el índice de calidad del aire resulta necesario.

Una solución a los problemas que se plantean anteriormente es la implementación de estaciones meteorológicas, sin embargo, hoy en día las estaciones meteorológicas pueden llegar a ser complicadas y costosas para un uso individual, algunas resultan ser muy sofisticadas, tanto que quizá por su elevado precio no permiten el despliegue masivo de estas, limitando la lectura de los factores climatológicos a una zona en específico.

El objetivo del presente trabajo fin de grado es el desarrollo de un prototipo funcional de una estación meteorológica autónoma de bajo coste que permita monitorear parámetros ambientales (temperatura, humedad, presión atmosférica, calidad de aire, velocidad y dirección del viento) y los comunique a una plataforma IoT por medio del protocolo IEEE 802.11.

El documento se estructurará de la siguiente forma:

- Revisión bibliografía y estudio del estado del arte.
- Estudio de requerimientos y necesidades para el desarrollo de la estación meteorológica.
- Diseño del prototipo de un dispositivo de bajo coste que realice la medición de la velocidad y dirección del viento.
- Desarrollo del código fuente.
- Configuración de la interfaz de usuario para visualizar la información.
- Diseño de sistema autónomo de energía.
- Resultados obtenidos con el prototipo desarrollado.

## 4. ESTADO DEL ARTE

Para realizar un diseño adecuado de la estación meteorológica resulta idóneo efectuar una correcta revisión bibliográfica de proyectos, estudios y tecnologías actuales ya existentes. A continuación, en el presente apartado se exponen los antecedentes más relevantes, así como las bases teóricas requeridas, los cuales en conjunto permitirán un correcto desarrollo del prototipo.

### 4.1. ANTECEDENTES

Desde hace años la necesidad de conocer los cambios en el tiempo atmosférico ha venido aumentando, como consecuencia se ha desarrollado diversos estudios y diseños de estaciones meteorológicas, cada uno diferente a otro, pero siempre convergiendo a un fin en específico, mismo que es obtener lecturas del clima que permitan la toma de decisiones sobre una actividad determinada. Algunos de los diseños se detallan a continuación.

#### *4.1.1. Estación meteorológica basada en microcontrolador Arduino [5]*

En [5] se presenta una estación meteorológica autosuficiente, de bajo coste y duradera. Está compuesta por dos módulos: exterior e interior. El exterior es el encargado de leer los sensores, recoger los datos y analizarlos. En cambio, el interior guarda y permite visualizar los datos.

En el módulo exterior se emplea como microcontrolador un Arduino nano, el modelo de menor tamaño y potencia dentro de la familia Arduino. Este se encarga de leer los sensores, así como del control y

gestión de la información. Además, permite realizar modos de suspensión o ahorro de energía para prolongar la duración de la batería que integra.

Los sensores ambientales utilizados se presentan en la siguiente tabla.

*Tabla 1. Sensores ambientales. [5]*

Elemento del clima	Sensor
Temperatura	BME280
Presión atmosférica	BME280
Humedad relativa	BME280
Velocidad del viento	Anemómetro
Dirección del viento	Veleta
Precipitación	Módulo MH-RD
Radiación solar	LM8511
Ruido	MAX9814
Luminosidad	LDR / fotorresistor
CO2 (dióxido de carbono)	CCS811
COV (carbono orgánico total)	CCS811

También dispone de un reloj DS3231 y una antena de radiofrecuencia nF24L01, el primero marca el tiempo de muestreo y el segundo permite el envío de información desde el módulo exterior hasta módulo interior con un alcance cercano a 800m.

Finalmente, para la generación de energía se hace uso de las placas solares modelo YD-107X61, alcanzado un valor de salida de 10V, por lo que empleando un reductor (Buck Converter) se ajusta la salida a los 5V del microcontrolador. La energía se almacena en baterías de litio-ion recargables, las cuales alimentan el circuito cuando este no dispone de la energía solar suficiente para alcanzar la potencia requerida.

Por otra parte, el módulo interior cuenta con un Arduino RF-nano y un Arduino Mega Pro, el primero actúa como receptor capaz de leer la información enviada desde el módulo exterior y el segundo, recibe los datos del receptor mediante comunicación cableada para guardarlos y posteriormente presentarlos en una pantalla LCD de forma cíclica y continuada.

Por último, mencionar el uso de diseño e impresión 3D en la fabricación de la caseta meteorológica y que el coste total de la estación asciende a los 116,25€.



*Ilustración 1. (Izq.) Módulo interior; (Der.) Módulo exterior. [5]*

#### *4.1.2. Design and implementation of a low-cost IoT-based agroclimatic monitoring system for greenhouses [6]*

El cambio climático es uno de los principales causantes de las variaciones medioambientales que afectan a los cultivos de la agricultura en todo el mundo, además se espera que estas variaciones aumenten poniendo en riesgo la producción agrícola futura y la seguridad alimentaria. Para solventar el problema [6] propone un sistema de monitorización agroclimática para invernaderos compuesto por tres partes principales: estaciones de monitorización, una red de comunicación inalámbrica y una plataforma de procesamiento y visualización de datos.

El sistema [6] consta de varias estaciones de monitorización dentro y fuera del invernadero, con múltiples sensores para medir la

temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, velocidad y dirección del viento, la precipitación, radiación, el pH y la electro conductividad del agua. Los sensores empleados se presentan a continuación.

*Tabla 2. Sensores ambientales. [6]*

<b>Elemento del clima</b>	<b>Sensor</b>
Temperatura	DHT21
Presión atmosférica	DHT21
Humedad del suelo	Odyssey Soil Moisture Logger
Velocidad del viento	SEN-08942
Dirección del viento	SEN-08942
Precipitación	SEN-08942
Radiación solar	ML8511
Electro conductividad y pH del agua	A1005

Según se menciona en [7], la estación SEN-08942 integra un anemómetro de copa y una veleta. El anemómetro mide la velocidad de viento cerrando un contacto cuando un imán pasa por un interruptor. Una velocidad de viento de 1,492MPH (2,4km/h) hace que el interruptor se cierre una vez por segundo. Por otra parte, la veleta dispone de ocho interruptores, cada uno conectado a una resistencia libre. El imán de la veleta puede cerrar dos interruptores a la vez, lo que permite indicar hasta 16 posiciones diferentes. Una resistencia externa puede utilizarse para formar un divisor de tensión, produciendo una salida de tensión que puede medirse con un convertidor analógico-digital. La disposición del interruptor y la resistencia se muestra en el siguiente diagrama.

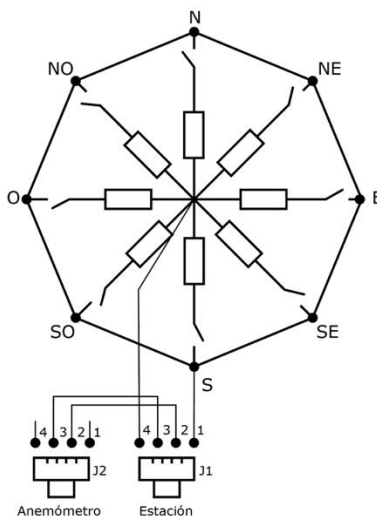


Ilustración 2. Diagrama de disposición de interruptores y resistencias en la veleta de la estación SEN-08942. Elaboración propia, basada en [7]

Los valores de resistencia para las posiciones intermedias mostradas en el diagrama son el resultado de dos resistencias adyacentes conectadas en paralelo cuando el imán de la veleta activa dos interruptores simultáneamente. Los valores de resistencia para las 16 posiciones posibles se indican en la siguiente tabla:

Tabla 3. Valores de resistencia en función de la dirección y voltaje. Elaboración propia basada en [7].

Dirección (grados)	Resistencia (Ohmios)	Voltaje (V=5v, R=10K)
0	33k	3,48
22.5	6,57k	1,98v
45	8,2k	2.25v
67.5	891	0.41v
90	1k	0.45v
112.5	688	0.32v
135	2.2k	0.9v
157.5	1.41k	0.62v
180	3.9k	1.40v
202.5	3.14k	1.19v
225	16k	3.08v
247.5	14.12k	2.93v
270	120k	4.62v
292.5	42.12k	4.04v
315	64.9k	4.78v
337.5	21.88k	3.43v

En la siguiente ilustración se indica un ejemplo de interfaz de la veleta.

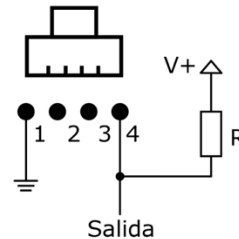


Ilustración 3. Ejemplo de interfaz de circuito de veleta. Elaboración propia, basada en [7]

Posteriormente, la información generada por los sensores se procesa previamente y se almacena temporalmente en el microcontrolador LinkIt Smart 7688 Duo. A continuación, esta información se envía de forma inalámbrica a través del módulo Wi-Fi incorporado en las estaciones a la plataforma Thingier.io, donde los datos se procesan, analizan y presentan en tiempo real en forma de gráfico. Los usuarios autorizados tienen acceso a esta plataforma y pueden visualizar los datos recogidos desde cualquier dispositivo electrónico con acceso a internet.

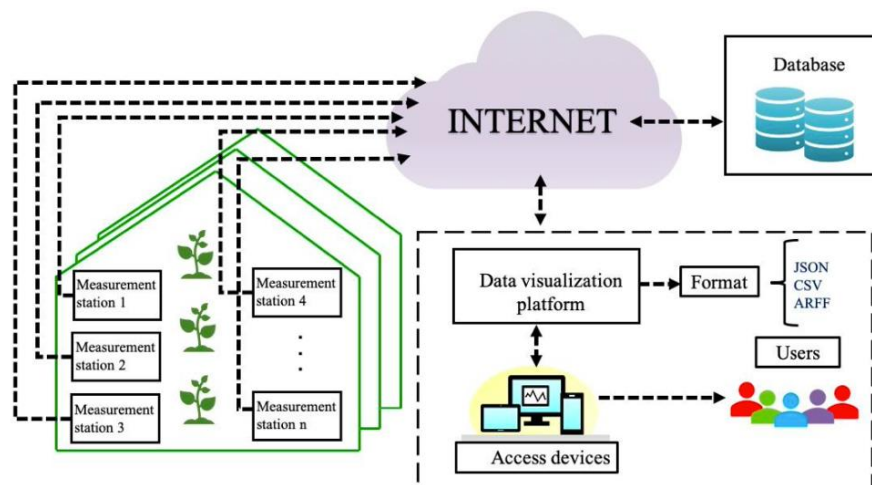


Ilustración 4. Modelo conceptual del sistema de monitorización de variables agroclimáticas propuesto basado en IoT. [6]

El sistema de monitorización de invernaderos de bajo coste está compuesto por seis estaciones de monitorización internas, una estación

de monitorización externa y una estación de monitorización portátil. El coste del equipo es de 2.180 dólares americanos (2113,53€ aproximadamente). [6]

Para comprobar el funcionamiento, el sistema fue implementado en un invernadero de 5000 metros cuadrados con cultivos de melón, donde se hizo uso de tecnología Wi-Fi para mejorar la cobertura de la red. Asimismo, se evaluó los valores máximos, mínimos y medios de medición para determinar los niveles críticos registrados por los diferentes sensores de las variables agroclimáticas durante el periodo de estudio. El sistema propuesto demostró que puede ayudar a prevenir con antelación las variaciones climáticas no deseadas, garantizando así las condiciones adecuadas y reduciendo las pérdidas en la producción.

#### *4.1.3. IoT Based Low-cost Weather Station and Monitoring System for Precision Agriculture in India [8]*

India es el país que ocupa la segunda posición en la lista de países más poblados del mundo. Además, se prevé que en 2030 India superará a China para ocupar el primer puesto en términos de población. Actualmente la situación de la agricultura no es la más favorable, teniendo en cuenta que India es un país agrícola y pese a ello es incapaz de atender la creciente demanda de productos agrícolas debido al aumento exponencial de la población. [8]

La naturaleza impredecible y la variabilidad de las condiciones climáticas o meteorológicas hacen que la vida de los agricultores sea miserable, ya que no pueden tomar las decisiones adecuadas en el momento oportuno. Debido a lo anterior, [8] presenta como solución el desarrollo de una estación meteorológica local en tiempo real basada en el Internet de las cosas para la Agricultura de Precisión (AP),



proporcionando a los agricultores un medio para automatizar sus prácticas agrícolas (riego, fertilización, cosecha) en el momento adecuado. Con este sistema los agricultores se mantienen informados con suficiente antelación sobre las condiciones meteorológicas imperantes para que puedan tomar las decisiones adecuadas y salvar sus cultivos de las pérdidas.

El sistema propuesto emplea plataformas de hardware y software de código abierto. La parte hardware está conformada por un ESP32, el cual es un microcontrolador System On-Chip (SoC) de bajo coste y bajo consumo que tiene integrado Wi-Fi y Bluetooth de modo dual. El resto del hardware lo componen sensores de bajo coste, mismos que se presentan a continuación.

*Tabla 4. Sensores ambientales [8]*

Elemento del clima	Sensor
Temperatura	DHT22
Humedad relativa	DHT22
Presión atmosférica	BMP180
Precipitación	YL-83 + LM393

Los sensores detectan los parámetros respectivos y envían los datos al módulo ESP32, donde una vez procesados se muestran en una pantalla gráfica OLED de 0,96 pulgadas.

La parte software consiste en un código abierto empleando el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de Arduino, donde la programación se realiza utilizando lenguaje C/C++. Por otra parte, se utiliza la plataforma de código abierto ThingSpeak para recoger, almacenar, visualizar y analizar los datos de los sensores. Para esto último la plataforma hace uso de MATLAB. Además, ThinkSpeak ayuda con el envío de notificaciones ya sea en forma de Tweet o de correo electrónico a los usuarios cuando los parámetros ambientales cruzan los niveles de umbral establecidos.

El diagrama de bloques del sistema se muestra a continuación.

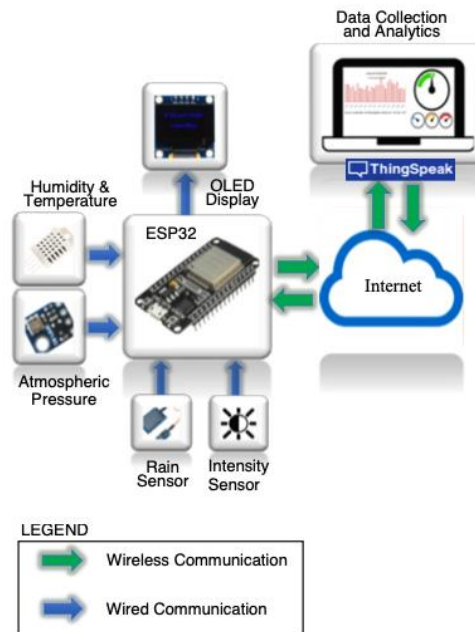


Ilustración 5. Diagrama de bloques de la estación meteorológica [8]

El montaje experimental se puso a prueba en un laboratorio, donde los parámetros meteorológicos fueron recogidos con precisión en tiempo real. Además, el uso de la plataforma ThingSpeak resultó de gran ayuda para la visualización y tratamiento de datos, ya que al trabajar en conjunto con MATLAB se pueden aplicar análisis predictivos.



Ilustración 6. Montaje experimental [8]

#### *4.1.4. Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring [9]*

Para el Cemaden – Centro Nacional de Monitorización y Alerta Temprana de Desastres Naturales de Brasil, resulta un reto el poder desplegar estaciones meteorológicas profesionales debido al elevado coste que suponen, limitando el despliegue de estaciones en zonas vulnerables susceptibles de sufrir catástrofes naturales. En ese contexto, [9] propone el desarrollo de una Estación Meteorológica Automática de Bajo Coste desarrollada a partir de tecnologías del Internet de las cosas (IoT) de código abierto y comerciales, que proporciona mediciones tan fiables como una estación profesional.

El sistema está compuesto por un registrador de datos encargado de la adquisición de datos de los sensores, el almacenamiento local, la telemetría y la alimentación. Este contiene un receptor GPS que además de sincronizar la hora y posición de la estación, proporciona fuentes de datos para otras investigaciones como, por ejemplo, la correlación entre la relación señal-ruido (SNR) de diferentes satélites y las mediciones meteorológicas. También dispone de un controlador de carga, mismo que regula el voltaje y corriente suministrado por el panel solar (Yingli YL055P-17b 55W) y carga la batería de plomo-acido según la curva de carga. Debido a que la carcasa del registrador de datos no está sellada herméticamente, se instala un sensor BME280 para el control de humedad y temperatura interna. Por otra parte, para una mayor fiabilidad los datos meteorológicos recogidos por los sensores se almacenan en una tarjeta microSD de 2GB, y posteriormente se transmiten a un servidor remoto. Finalmente, cuenta con un Arduino Mega 2560 como microcontrolador, el cual se encarga de recuperar, almacenar y transmitir los datos de los sensores. Para ello se le acopla un módulo GPRS SIM900, con el cual es capaz de enviar los datos a un servidor remoto.

Los sensores empleados se indican a continuación.

Tabla 5. Sensores ambientales [9]

Elemento del clima	Sensor
Temperatura	BME280
Humedad relativa	BME280
Presión atmosférica	BME280
Precipitación	Pluviómetro con sensor magnético
Velocidad de viento	Anemómetro con sensor magnético
Dirección de viento	Veleta con sensor magnético

La ubicación de los componentes y del registrador de datos de la estación meteorológica tienen la siguiente distribución.

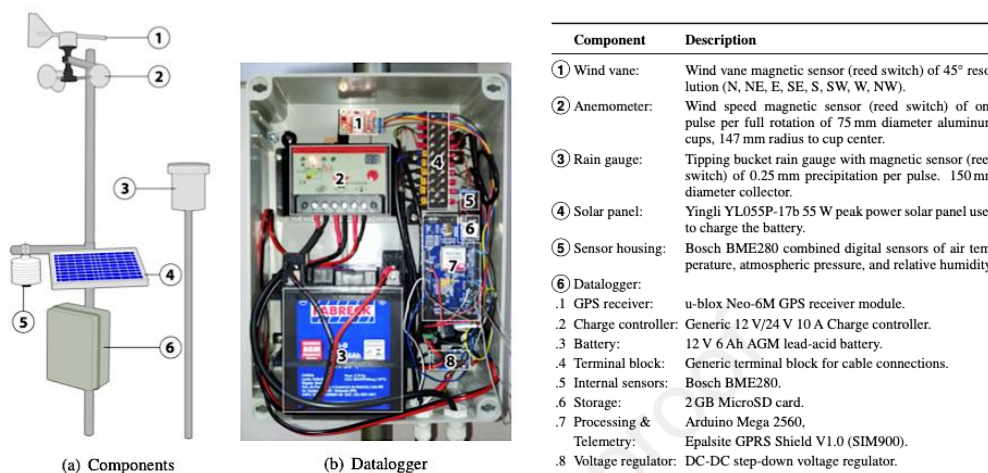


Ilustración 7. Componentes de la estación meteorológica automática de bajo coste [9]

El software del sistema se basa en una arquitectura cliente-servidor, donde la parte de la estación se compone de un programa con rutinas desplegadas en el registrador de datos. En el lado del servidor, los servicios en la nube son proporcionados por programas y rutinas para procesar y corregir los datos desplegados en la nube.



*Ilustración 8. (Izq.) Estación meteorológica automática de bajo coste. (Der.) Estación meteorológica profesional [9]*

Como resultado final, los valores obtenidos por la estación meteorológica de bajo coste resultaron congruentes, asemejándose en gran medida a los resultados de la estación meteorológica profesional. Por otra parte, se encontraron puntos a mejorar como diseñar una carcasa para el registrador de datos que disponga de un mayor aislamiento térmico y protección contra la luz solar directa. También mejorar el ciclo de vida de la batería, ya que aproximadamente después de seis meses no pudo mantener suficiente energía durante la noche. Por último, en el software se requiere solucionar problemas de bloqueo del microcontrolador Arduino, lo cual requería un reinicio manual y ocurría una vez al mes. [9]

#### *4.1.5. A Very Low Cost, Open, Wireless, Internet of Things (IoT) Air Quality Monitoring Platform [10]*

El aire es una de las principales necesidades humanas y una atmósfera respirable es, de hecho, uno de los aspectos vitales que hacen que la Tierra sea habitable y se diferencie de otros planetas del sistema

solar. Sin embargo, pese a conocer la gravedad de la contaminación a nivel mundial ha existido falta de medidas rápidas para contrarrestar los efectos.

Pakistán es un país donde el control y la gestión de la calidad del aire son un problema reconocido, sin embargo, no se ha trabajado lo suficiente a nivel local para dar un paso adelante y ofrecer a la población productos que ayuden en ese sentido. En [10] se propone una solución basada en el Internet de las Cosas, que es una alternativa rentable a los sistemas de monitorización de la calidad del aire. El sistema está compuesto por un microcontrolador ESP8266 que contiene Wi-Fi integrado, lo cual permite el envío de datos a la red donde puede visualizarse desde un dispositivo electrónico con conexión a internet. También implementa un sensor de gas multicanal para detectar la presencia de monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Además, incluye un sensor de temperatura y humedad (DHT) y un sensor GPS capaz de obtener la geolocalización del módulo en el que se instala. A medida que los sensores capturan los datos del entorno, estos son recibidos por el microcontrolador para posteriormente enviar una petición en formato HTML cada hora con los datos a la web. Una vez los datos llegan al servidor, son almacenados en Google Sheets y posteriormente un script web extrae los datos y realiza los cálculos pertinentes.

Tras el despliegue del prototipo se recolectó alrededor de 25000 muestras con las cuales se observó que la humedad y la temperatura están negativamente correlacionadas con el NO<sub>2</sub> y además afectan intrínsecamente a su equilibrio en el aire, lo cual ocurre porque el NO<sub>2</sub> es un gas soluble en agua, la concentración de este gas disminuye gracias a la alta humedad generada por la lluvia. Además, se comprobó que la concentración de NO<sub>2</sub> era relativamente menor durante el día, debido principalmente a su absorción por las plantas a través de las hojas.

Tabla 6. Matriz de correlación. Elaboración propia, basada en [10]

	Temperature	Humidity	CO_AQI	NO2_AQI
Temperature	1.000000	0.167627	0.303176	-0.350311
Humidity	0.167627	1.000000	0.154211	-0.248852
CO_AQI	0.303176	0.154211	1.000000	-0.286331
NO2_AQI	-0.350311	-0.248852	-0.28852	1.000000

El prototipo permitió comprobar que la contaminación del aire es un problema importante en todo el mundo, además de que el uso de metodología IoT permite desarrollar soluciones baratas y eficaces. También, la clasificación y presentación de los Índices de Calidad del Aire sobre un mapa geográfico facilita a la interpretación de los datos al usuario. Por último, se debe tener en cuenta la elección del modelo de indexación de la calidad del aire estándar, ya que el empleado corresponde a los EE. UU. puesto que Pakistán no dispone de una norma propia, sin embargo, existe variedad de modelos de indexación para presentar los datos de la calidad del aire, por lo que es recomendable explorarlos para seleccionar el más adecuado para la atmósfera del país de estudio. [10]

#### *4.1.6. Medición y adquisición de datos para una estación meteorológica alimentada con energía solar [11]*

Debido a la necesidad de disponer de información meteorológica confiable y representativa en la ejecución de proyectos de energías renovables, [11] presenta el desarrollo de un sistema de medición y adquisición de datos para una estación meteorológica empleando software y hardware libre, además de alimentar dicho sistema mediante energía solar fotovoltaica.

Entre los sensores empleados en el sistema se encuentra el sensor digital DHT22, el cual es de bajo coste y lleva a cabo la tarea de medir

temperatura y humedad relativa del ambiente. De igual manera se emplea una celda solar de 7 V de salida para la medición de la radiación solar, inicialmente se caracterizó y calibró con el solarímetro Solar Power Meter PCE-SPM1 para posteriormente emplearla como un sensor analógico.

La gestión de los datos recogidos por los sensores es realizada por una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328 (ARDUINO UNO) para posteriormente almacenarlos en una memoria SD. El software empleado para programar es el Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino.

En la siguiente ilustración se observa de manera global un diagrama de bloques del sistema.



*Ilustración 9. Sistema de medición de variables climatológicas. [11]*

Por otra parte, la estación cuenta con un sistema de generación de energía renovable, el cual almacena la energía generada durante las horas de sol. Dicho sistema consta de los siguientes elementos.





*Ilustración 10. Esquema del sistema de alimentación de energía solar autónomo. [11]*

El sistema propuesto funciona de manera similar a una estación meteorológica con la ventaja de que los componentes son de bajo coste, además de poder ser configurada de acuerdo con los requerimientos del usuario.

#### *4.1.7. Desarrollo de una red punto a punto con tecnología LoRa y servidor Web [12]*

Se propone un sistema de comunicación inalámbrico que hace uso del protocolo LoRa (Long Range – Largo Alcance), el cual se emplea para la tecnología LPWAN (Low Power Wide Area Networks – Redes de bajo consumo y área extensa) y aporta grandes ventajas para los proyectos IoT que utilizan dispositivos alimentados por batería.

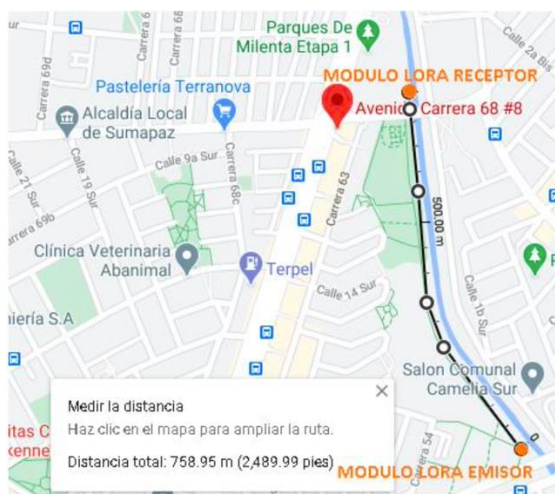
En el desarrollo se hace uso de dos placas de desarrollo Heltec WiFi LoRa 32, estas emplean como chip principal el Lexin ESP32. Además, cuenta con un módulo transceptor de largo alcance LoRa basado en el chip SX1276, el cual genera una comunicación de amplio espectro, inmunidad contra interferencias y reduce el consumo de corriente. También se emplea un sensor digital DS18B20, el cual proporciona mediciones de temperatura ambiental. [12]

En el funcionamiento del sistema un módulo LoRa 32 es empleado como transmisor para enviar los datos de la temperatura recogidos por el sensor DS18B20 y el otro módulo LoRa actúa como receptor, encargándose de recibir los datos. El receptor envía al servidor web las lecturas del sensor, la última conexión realizada y el RSSI (Received Signal Strength Indicator – Indicador de Fuerza de la Señal Recibida).

El receptor LoRa ejecuta un servidor web asíncrono y los datos los almacena en un sistema de archivos ESP32 SPIFFS, el cual funciona en memorias flash unidas por SPI en dispositivos embebidos que tienen poca RAM.

El uso del servidor web brinda espacio y estructura para almacenar la información y transmitirla por medio de HTTP (Protocolo de transferencia hipertexto). Para obtener la web asíncrona se realiza el control de un mecanismo de petición/respuesta, donde el navegador genera una petición y el receptor LoRa envía una respuesta con los datos.

Para la realización de las pruebas de funcionamiento del sistema se empleó baterías portátiles como fuentes de alimentación para los módulos. Primero se colocó en un punto fijo el módulo emisor conectado con el sensor de temperatura DS18B20. Por otra parte, la posición del módulo receptor se fue modificando para realizar diferentes mediciones, intentando mantener la conexión LoRa por medio de las antenas de los módulos. La banda de frecuencia empleada en el desarrollo corresponde a la 915 MHz, misma que es utilizada en Colombia, para España la banda legal a usar es la de 868MHz.



*Ilustración 11. Espacio de experimentación. [12]*

En los resultados obtenidos se observa que la conectividad LoRa entre los módulos es buena desde 44 metros hasta 352 metros. A medida que aumenta la distancia del módulo receptor la pérdida de paquetes es mayor, como se puede apreciar a continuación.

*Tabla 7. Resultados de los módulos emisor y receptor. [12]*

Distancia (m)	EMISOR		RECEPTOR			RESULTADOS	
	Temperatura	Cantidad de paquetes	Temperatura	Cantidad de paquetes	RSSI	Paquetes perdidos	Dif. Temperatura
44	25,3	5	23,97	8	-99	3	1,33
88	29,1	18	25,1	14	-112	4	4
132	29,6	24	27,5	20	-120	4	2,1
176	27,9	31	30,2	26	-126	5	2,3
220	30,6	37	28,9	31	-113	6	1,7
264	32,8	48	31,2	38	-136	10	1,6
308	32,6	50	32,2	42	-134	8	0,4
352	31,6	56	32,7	47	-137	9	1,1
396	29,6	63	32,1	48	-137	15	2,5
440	26,6	69	28,8	50	-139	19	2,2
484	24,8	78	25,8	52	-141	26	1
528	27,7	82	25,5	53	-138	29	2,2
572	24,3	86	24,7	55	-143	31	0,4
616	26,5	95	24,3	56	-136	39	2,2
660	32,4	102	24,4	57	-136	45	8
704	33,1	108	32,6	60	-136	48	0,5
758	33,8	114	32,6	60	-135	54	1,2

La distancia máxima de comunicación obtenida fue de 758 metros y la interfaz de la página web desarrollada presenta la siguiente información.



*Ilustración 12. Página web desarrollada. [12]*

La página está programada para actualizarse cada segundo con el fin de visualizar la lectura de la temperatura en tiempo real.

#### *4.1.8. Design and Calibration of a 3D-Printed Cup-Vane Wireless Sensor Node [13]*

En [13] se presenta el diseño y calibración de un instrumento inalámbrico impreso en 3D para la recogida de datos sobre el viento.

El instrumento desarrollado está conformado por un anemómetro de cazoleta y una veleta. Se ha elegido el anemómetro de cazoleta frente a otros tipos de anemómetros como sonar y LiDAR debido a que es ampliamente aceptado como el instrumento estándar para medir la velocidad de viento. Además, grandes empresas especializadas en el desarrollo de anemómetros de cazoleta y veletas se han situado en entre las mejores en el servicio del mercado de recogida de datos eólicos.

Para el diseño del instrumento se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Geometría de copas: la calibración del anemómetro de copa depende de la geometría de su rotor. Para maximizar la

separación del flujo de aire, es deseable que las copas del instrumento sean cónicas.

- Peso de anemómetro: los anemómetros de cazoleta ligeros son los menos propensos al problema del exceso de velocidad. También son más sensibles al viento en movimiento.
- Diseño de veleta: se busca una hoja de cola ligera y con una forma que responda a velocidades de viento de alrededor de 1 m/s para reducir el efecto de volteo de la pluma causado por el exceso de sensibilidad.

El software empleado para diseñar el anemómetro de copas y la veleta es Autodesk Inventor. El diseño con las partes principales se presenta a continuación.

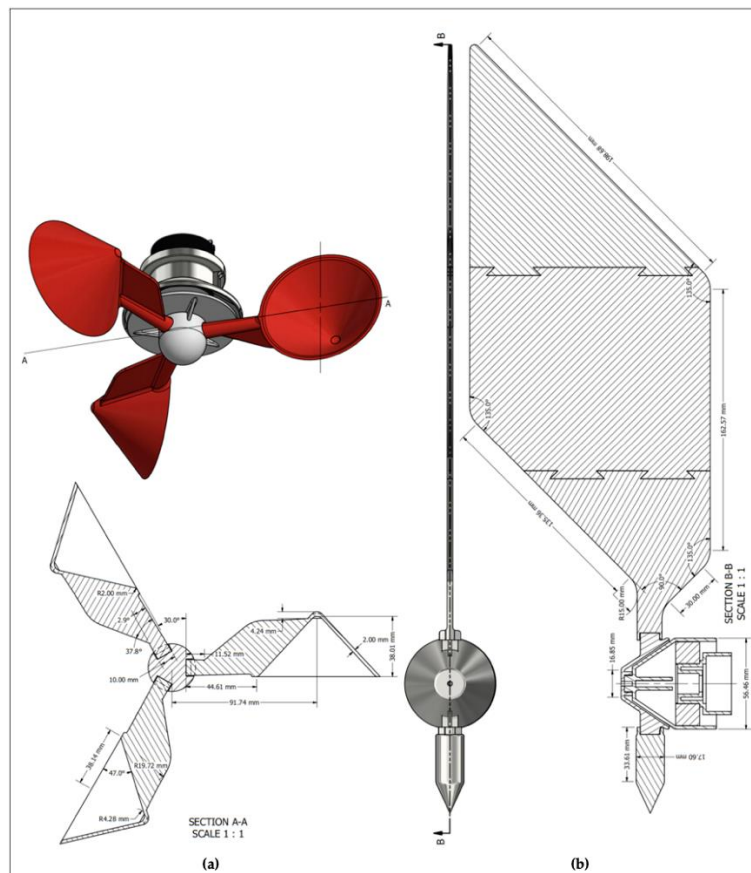


Ilustración 13. Diseño de instrumento de anemómetro de cazoleta y veleta: (a) diseño de anemómetro y su vista en sección (A-A); y (b) diseño de veleta y su vista en sección (B-B) [13]

Sin embargo, era necesario diseñar un cuerpo que mantuviera unido el diseño de la copa-veleta, así como los sensores de temperatura, humedad, presión y altitud. Por lo tanto, el cuerpo de la cúpula se diseñó teniendo en cuenta los sensores y sistemas integrados de apoyo que debían instalarse. En la siguiente ilustración se muestra el montaje virtual del instrumento completo de la cúpula.

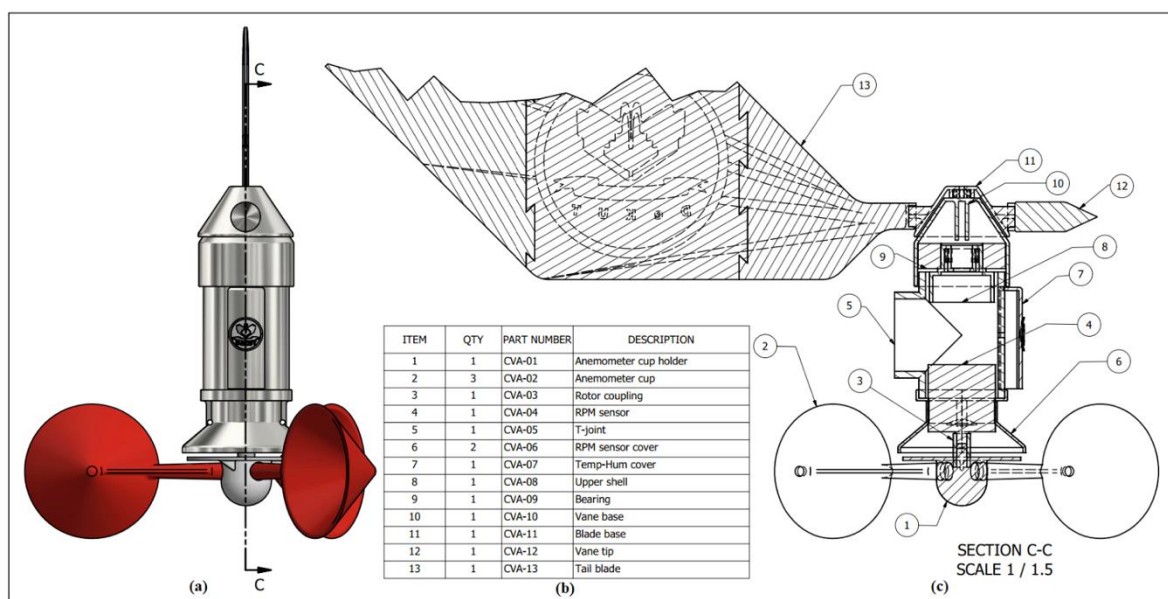


Ilustración 14. Ensamblaje virtual de la copa-aleta: (a) ensamblaje completo; (b) lista de piezas y (c) vista en sección (C-C). [13]

Para el sistema embebido del instrumento se consideró implementar un transmisor de datos inalámbrico rentable en un factor de forma pequeño. También se tuvo en cuenta el consumo de energía. El resultado fue emplear un microcontrolador Atmega328P-AU, un radio XBee que transmitía los datos a través del protocolo ZigBee IEEE 812.15.4, a una estación central situada a 100 m de distancia. A continuación, se muestra una representación simplificada del esquema electrónico utilizado.

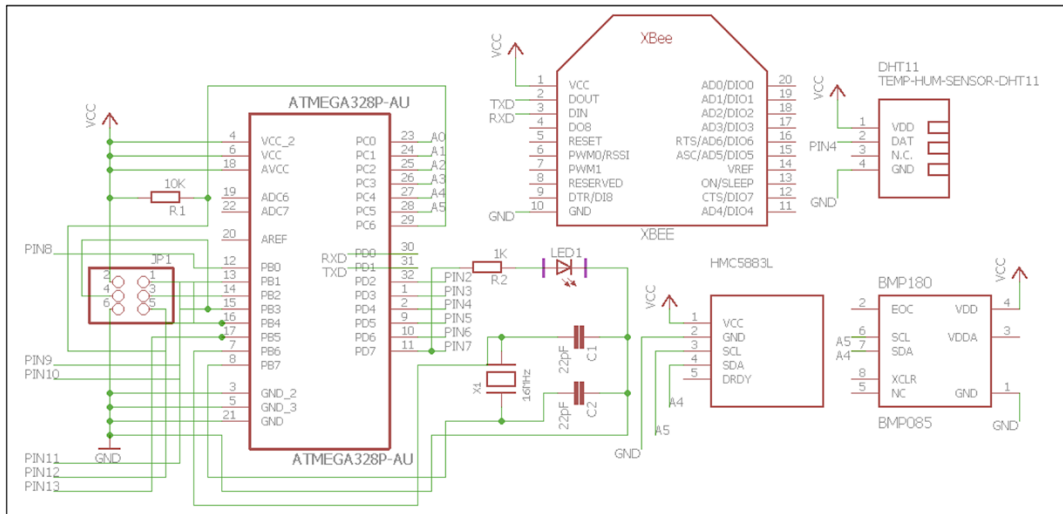


Ilustración 15. Esquema electrónico del nodo sensor inalámbrico. [13]

EL algoritmo se preparó en un entorno de desarrollo ANSI C/C++, con el cual se configura los sistemas integrados de la estación para recoger los sensores y enviarlos a la estación principal de post-procesamiento situada lejos de ella.

Una vez impresas las piezas 3D con ayuda de la impresora 3D MakerBotTM, se ensamblaron e instalaron los sensores en su interior. Posteriormente se instaló las cazoletas del anemómetro y la pala de cola de la veleta. A continuación, se pintó y pulió el conjunto, quedando tal como se muestra a continuación.

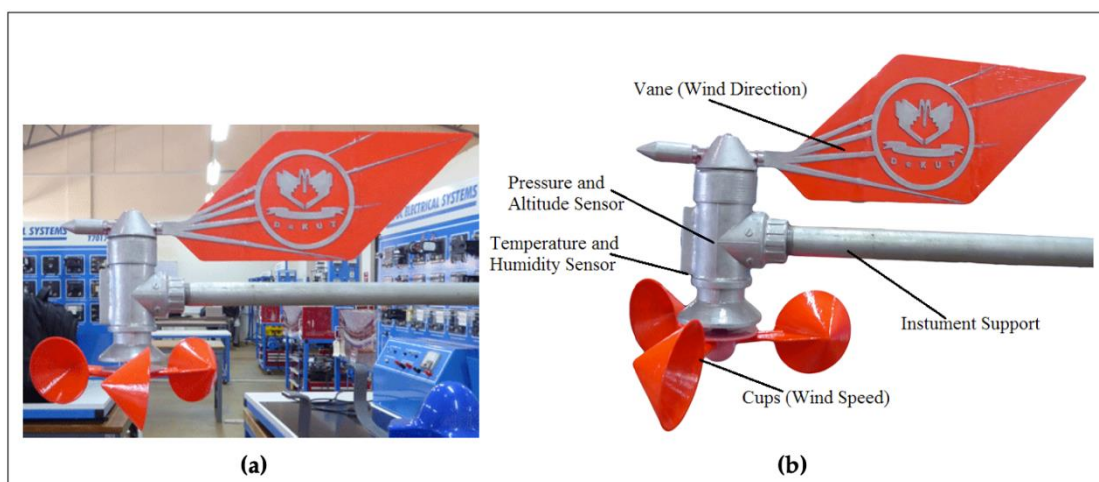


Ilustración 16. Instrumento copa-veleta terminado: (a) laboratorio, todos los sensores instalados; y (b) conjunto terminado. [13]

Para la calibración del instrumento se empleó un túnel de viento ArmfieldTM C15, con el cual se pudo encontrar la relación entre el anemómetro de referencia y el instrumento copa-veleta diseñado. Se trazó un gráfico de las RPM del instrumento diseñado frente a la velocidad del viento del anemómetro de referencia.

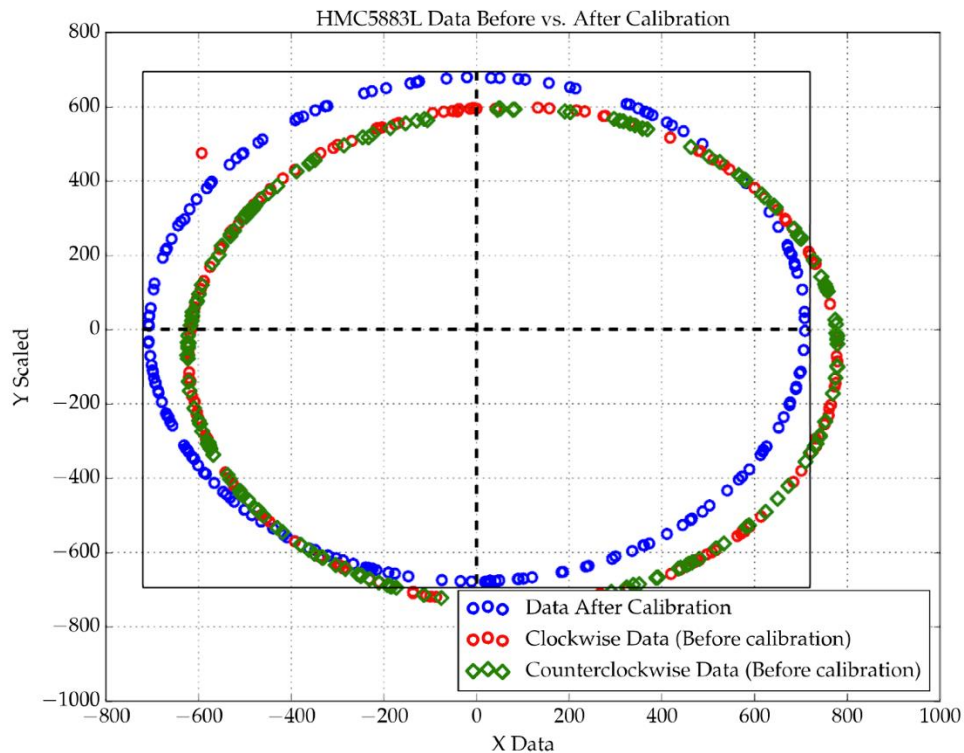
Posteriormente, se calculó una función polinómica que se ajustaba mejor a los datos trazados de forma dispersa y se reprodujeron los resultados utilizando un programa de Python. Para trazar la línea de tendencia, se calcularon los puntos de la función polinómica. También se calculó el coeficiente de correlación entre los puntos trazados y el polinomio de mejor ajuste. El resultado de la calibración fue positiva, obteniéndose la función de transferencia de la velocidad resultante para el instrumento copa-veleta diseñado.

Por último, se puso a prueba el anemómetro de copas diseñado en el túnel de viento donde se observó que presentaba datos fiables después de la calibración, mostrando la verdadera velocidad del viento.

Por otra parte, fue necesario calibrar el sensor de brújula digital HMC5883L utilizado en la veleta. Este sensor emplea el protocolo de comunicación I2C y fue montado en un conector de anillo deslizante de 360° para permitir una libre rotación de 360°. Se utilizó un programa Python para la configuración junto con una Raspberry Pi 3. Para calibrar la veleta se necesitó datos del sensor (HMC5883L) en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario. Se obtuvo una representación de los datos similares en ambos sentidos. También se corrigió el error de desplazamiento, para lo cual se calculó la cantidad de desplazamiento utilizando el programa en Python, éste capturó los datos máximos y mínimos mientras el sensor giraba hacia adelante y hacia atrás a través de 360 grados. Los valores de offset se incorporaron a la fórmula del programa, y se recolectó nuevamente los datos mientras el sensor se giraba en ambos sentidos. Finalmente se consiguió ajustar los datos al



centro. El último factor a tener en cuenta fue la declinación magnética variable, factor que se incluyó en el algoritmo de trabajo. En la siguiente ilustración se visualiza los resultados de calibración del sensor de la veleta.



*Ilustración 17. Sensor HCM5883L diseñado en sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario (después de la calibración). [13]*

#### 4.1.9. Elementos comerciales

En el mercado existen variedad de estaciones meteorológicas disponibles, se ha considerado relevante presentar algunas de ellas para conocer los parámetros ambientales que miden, así como su diseño, tecnología de comunicación y presentación de datos y por último, pero no menos importante su precio, ya que si bien este puede fluctuar con el tiempo, servirá como referencia al momento de diseñar la estación meteorológica.

#### 4.1.9.1. Estación meteorológica Sainlogic FT0300

[14]

Se trata de una estación meteorológica compuesta por tres elementos: un módulo con 7 sensores para el exterior, un módulo con un sensor para el interior y una pantalla LCD de 8 pulgadas a color para visualizar las funciones e información.

Los sensores del módulo exterior permiten recoger información sobre la temperatura, la humedad del aire, la presión del aire, la velocidad y la dirección del viento, así como la precipitación y la radiación ultravioleta. Además, cuenta con un sistema autónomo de energía mismo que emplea paneles solares para recargar unas baterías.

El módulo interior es un termohigrómetro que permite conocer la temperatura y humedad dentro de un espacio cerrado.

La pantalla o estación base cuenta con hasta 8 canales para conectar múltiples sensores y así monitorear desde varias ubicaciones.

Emplea una conexión Wi-Fi para transferir los datos de manera inalámbrica al sitio Weather Underground, permitiendo visualizarlos ya sea desde la pantalla proporcionada por el fabricante o desde algún dispositivo con conexión a internet. La distancia máxima de transmisión es de 100m.

La conexión y funcionamiento del sistema en conjunto se presenta a continuación.



Ilustración 18. Esquema de conexión de la estación meteorológica FT0300. [14]

El precio de la estación meteorológica con descuento del 22% es de 206,11€ y sin descuento el precio habitual es de 263,98€.

#### 4.1.9.2. Estación meteorológica Explore Scientific WSX-1001 [15]

Explore Scientific WSX-1001 es una estación meteorológica que cuenta con un módulo exterior y una pantalla de LCD a color. El módulo integra 5 sensores que permiten realizar lectura de la temperatura, humedad, precipitación, velocidad y dirección de viento, intensidad de luz y el índice UV.



Ilustración 19. Estación meteorológica Explore Scientific WSX-1001. [15]

La estación recopila los datos y los carga mediante Wi-Fi automáticamente en los sitios web Weather Underground y Weathercloud. Posteriormente pueden ser visualizados desde la pantalla LCD o desde un dispositivo con conexión a internet.

Se incluye en la pantalla LCD funciones de calibración, alarma, salida y puesta de sol y fase lunar. La distancia máxima de transmisión de los datos es de 150m.

Para su funcionamiento se requiere el uso de baterías debido a que no implementa un sistema autónomo de energía.

El precio de la estación meteorológica es de 102,16€.

#### 4.1.9.3. Estación meteorológica Netatmo [16]

Se trata de una estación meteorológica con un diseño minimalista compuesta por tres módulos exteriores separados y un módulo interior. Entre los módulos exteriores se encuentra un módulo que permite la lectura de la temperatura, humedad, calidad del aire, nivel de ruido y presión barométrica. Otro módulo es un pluviómetro con el cual se realiza mediciones del nivel de precipitaciones. El último módulo es un anemómetro ultrasónico que indica la velocidad y la dirección del viento. Por otra parte, el módulo interior actúa como base receptora de los módulos exteriores y además permite de igual manera realizar la lectura de la temperatura, humedad, calidad del aire, nivel de ruido y presión barométrica.

El módulo exterior que realiza la lectura de temperatura, humedad, y demás parámetros, no cuenta con protección al agua, por lo que debe ubicarse bajo techo. Por otra parte, los tres módulos externos no pueden estar ubicados a más de 100m del módulo interior.



*Ilustración 20. Estación meteorológica Netatmo. [16]*

La estación emplea Wi-Fi para realizar el envío de datos a la nube donde son gestionados y dispuestos para ser visualizados en la aplicación web del fabricante desde un dispositivo con conexión a internet. También permite la conexión con Apple Homekit y Amazon Alexa para la aplicación de domótica en el hogar.

Las características técnicas proporcionadas por el fabricante se indican a continuación.

<b>Sensores y mediciones</b>	Módulo exterior waterproof Previsiones meteorológicas en 7 días
<b>Frecuencia de las mediciones</b>	Cada 5 minutos
<b>Unidad temperatura</b>	°C, °F
<b>Unidades barométricas</b>	mbar, inHg
<b>Conectividad</b>	• Compatible con wifi 802.11 b/g/n (2,4 GHz) • Protocolos de seguridad soportados: abierto/WEP/WPA/WPA2-personal (TKIP y AES) • Conexión inalámbrica entre los Módulos.
<b>Compatibilidad</b>	iOS 12 mínimo requerido Android 5.0 mínimo requerido PC & Mac a través de la aplicación web (disponible para las dos últimas versiones de: Chrome, Safari, Firefox e Internet Explorer) Apple Homekit & Amazon Alexa
<b>Módulo interior</b>	0°C-50°C / 32°F-112°F; ± 0.3°C / ± 0.54°F
<b>Módulo exterior</b>	- 40°C-65°C / - 40°F-150°F; ± 0.3°C / ± 0.54°F
<b>CO2</b>	0-5000 ppm; ± 100 ppm (de 0 à 1000 ppm) ou ± 10% (de 1000 à 5000 ppm)
<b>Sonómetro</b>	35dB-120dB
<b>Higrometría</b>	0-100% : ± 3%
<b>Barómetro</b>	260-1160 mbar / 7.7-37.2 inHg ; ± 1 mbar / ± 0.03 inHg

*Ilustración 21. Características técnicas estación meteorológica Netatmo.*

La energía empleada por los módulos exteriores e interior proviene de baterías, las cuales deben ser reemplazadas cada cierto periodo de tiempo.

El precio de la estación meteorológica varía en función de los módulos que se adquiera, en la siguiente tabla se presentan los valores.

*Tabla 8. Precios disponibles de estación meteorológica Netatmo [16]*

Nombre de estilo	Precio (€)
Estación Meteo	161,49
Estación Meteo + Anemómetro	254,98
Estación Meteo + Pluviómetro	229,48
Estación Meteo + Pluviómetro + Anemómetro	322,97

## 4.2. MARCO TEÓRICO

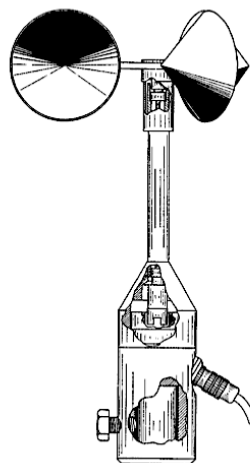
En el presente apartado se expone aquellos aspectos teóricos necesarios para un correcto desarrollo del trabajo.

### 4.2.1. Anemómetro de cazoletas

En [13] se menciona que, el anemómetro de cazoletas resulta ser ampliamente aceptado como el instrumento estándar para medir la velocidad de viento, por lo que es atractivo a la hora de implementar en el diseño de la estación meteorológica.

El anemómetro de cazoletas fue inventado en el año 1846 por el astrónomo irlandés Thomas Romney Robinson, y actualmente con casi el mismo diseño estándar se sigue utilizando. [17]

En la siguiente ilustración se muestra un anemómetro de tres cazoletas.



*Ilustración 22. Anemómetro de copa Riso. La altura es de 0.26m. [17]*

Según [18], el anemómetro de copa tiene tres buenas propiedades:

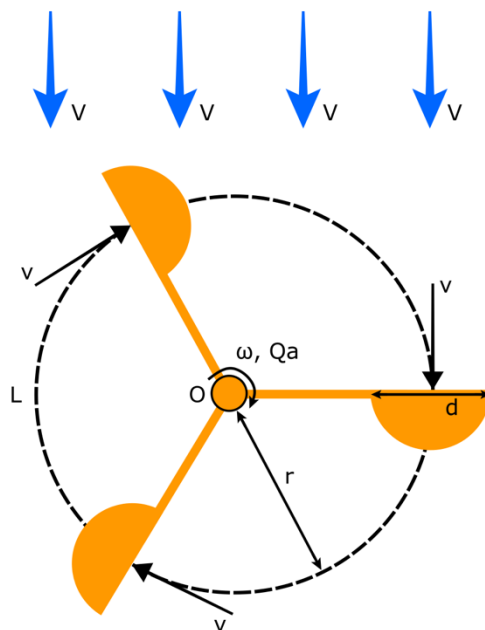
En primer lugar, es omnidireccional; al montar el instrumento, sólo es necesario asegurarse de que el eje apunta en la dirección vertical.

En según lugar, un buen anemómetro de cazoleta con una calibración lineal filtra la velocidad del viento en el espacio, a lo largo de la dirección del viento, y no en el tiempo. Esta es una propiedad muy útil en las mediciones de turbulencia, ya que las fluctuaciones turbulentas con un grado de precisión muy alto (al de la hipótesis de Taylor) pueden considerarse fenómenos espaciales y no temporales.

Por último, el anemómetro de copa es robusto y fácil de manejar.

#### 4.2.1.1. Parámetros y características principales de un anemómetro

En la siguiente ilustración se presentan algunas características y parámetros a considerar en un anemómetro.



*Ilustración 23. Parámetros y características principales del anemómetro. Elaboración propia.*

Donde  $\omega$  es la velocidad angular,  $Q_a$  Torque aerodinámico,  $O$  es el centro de movimiento del rotor,  $V$  es la velocidad del viento,  $v$  es la



velocidad tangencial de las copas,  $d$  el diámetro de la copa,  $r$  el radio de la copa hasta el centro del rotor  $O$  y  $L$  el lugar de los centros de las copas.

Se sabe que la velocidad tangencial ( $v$ ) es igual a la velocidad angular ( $\omega$ ) por el radio de giro ( $r$ ).

$$v = \omega \cdot r \quad (1)$$

La velocidad angular en radianes se puede obtener a partir de la siguiente fórmula:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2)$$

donde la frecuencia  $f$  se relaciona con el periodo:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta t} \quad (3)$$

Cuando el anemómetro se expone a una velocidad de viento horizontal que en un momento dado cambia de un valor a otro, habrá un par distinto de cero en el rotor y  $\frac{d\omega}{dt}$  será diferente de cero hasta que  $\omega$  haya obtenido una magnitud tal que el par sea de nuevo cero. Esta situación de estado estacionario suele establecerse en menos de 1 segundo. La velocidad de rotación se mantendrá constante mientras la velocidad del viento sea constante. Es una función creciente de la velocidad del viento y, por tanto,  $\omega$  es una medida de la velocidad del viento. [18]

#### 4.2.1.2. Modelo analítico para el estudio del comportamiento del anemómetro de tres cazoletas.

En [19] se menciona que el primer modelo del anemómetro de cazoletas diseñado por Robinson tenía cuatro cazoletas en vez de tres, la última es la configuración estandarizada hoy en día gracias al trabajo de

Patterson, quien demostró que el anemómetro de tres cazoletas era claramente superior al de cuatro cazoletas debido a una respuesta más rápida y uniforme, y con un par motor aerodinámico superior.

Puesto que la cazoleta muestra un comportamiento lineal, entonces, la función de transferencia que relaciona la velocidad del viento,  $V$ , y la frecuencia de salida del anemómetro,  $f$ , puede ser expresada a través de una función lineal:

$$V = A \cdot f + B \quad (4)$$

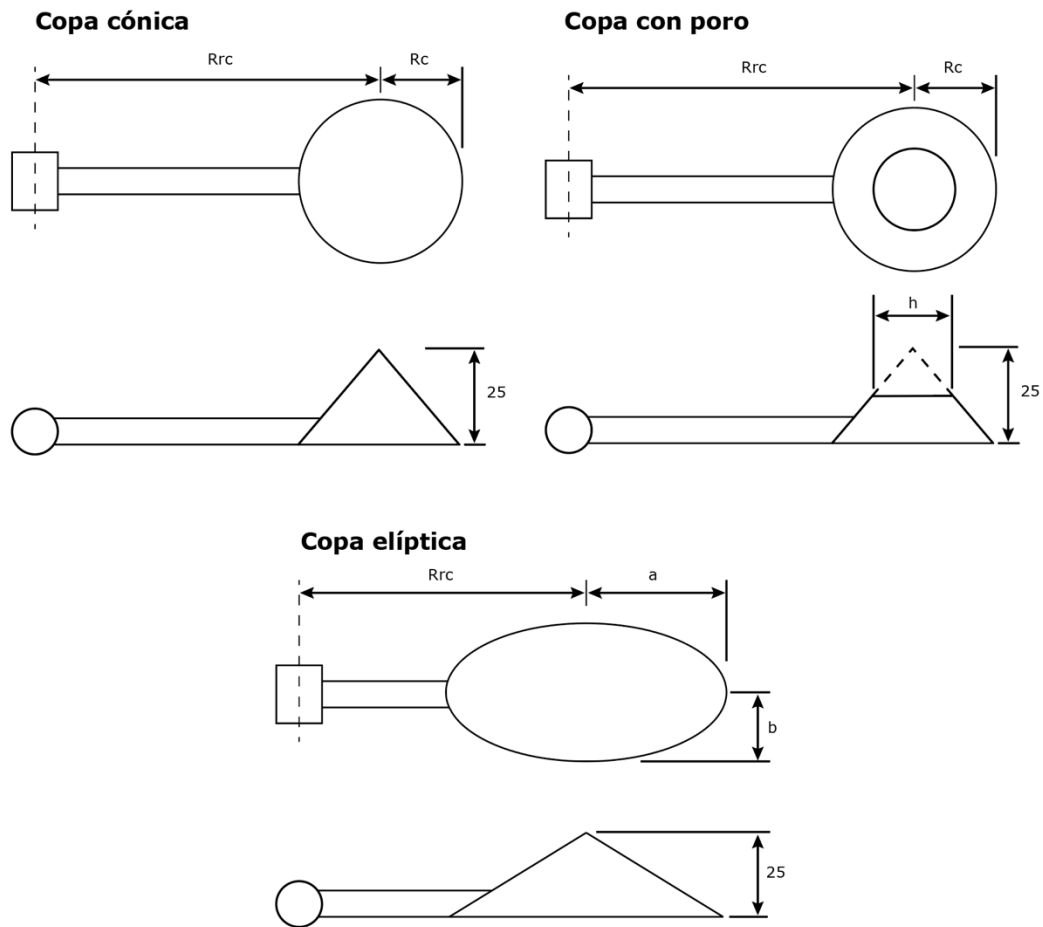
Donde  $A$  (pendiente) y  $B$  (velocidad de arranque) son los coeficientes de ajuste definidos a través de un proceso de calibración.

En busca de una expresión con un significado físico más claro, la función de transferencia puede reescribirse en función de términos de la frecuencia de rotación del anemómetro,  $f_r$ , en lugar de la frecuencia de salida,  $f$ :

$$V = A_r \cdot f_r + B \quad (5)$$

Donde  $A_r$  es el resultado de multiplicar la constante de calibración  $A$  por el número de pulsos por revolución dados por el anemómetro,  $N_p$ . El número de pulsos es diferente dependiendo del sistema interno para traducir la rotación en pulsos eléctricos. Los sistemas basados en un imán generan de 1 a 3 pulsos por revolución, mientras que los sistemas basados en la optoelectrónica originan normalmente un mayor número de pulsos por revolución, de 6 a 44. [20]

En [20] se menciona un estudio realizado en más de 20 modelos comerciales de anemómetros de copas. El resultado expuso una correlación lineal entre los coeficientes  $A_r$  y el radio de rotación del centro de la copa,  $R_{rc}$ . Este parámetro,  $R_{rc}$ , es la distancia entre el centro de las copas y el eje de rotación del anemómetro (indicado en la Ilustración 24 para las diferentes copas analizadas en el estudio).



*Ilustración 24. Esquema de las copas y de las geometrías de los rotores ensayados.*

*Dimensiones en mm. Elaboración propia, basada en [20].*

Por otra parte, el coeficiente de calibración  $B$  de los modelos de anemómetros estudiados no parecen estar correlacionados con el radio de rotación del centro de la copa,  $R_{rc}$ , ni con el área frontal de las copas,  $S_c$ . [20]

A raíz del estudio [20], se planificó una investigación para comprobar los resultados anteriores utilizando calibraciones sistemáticas del anemómetro, variando el tamaño de las copas (con la misma forma cónica, escalando las copas para obtener diferentes tamaños) y el radio de rotación de la copa. Como resultado, se comprobó que la constante  $A_r$  se ajustaba a la siguiente expresión:

$$A_r = \frac{dA_r}{dR_{rc}} \cdot R_{rc} - S_c \cdot (\delta + \eta \cdot S_c^{-\xi}) \quad (6)$$

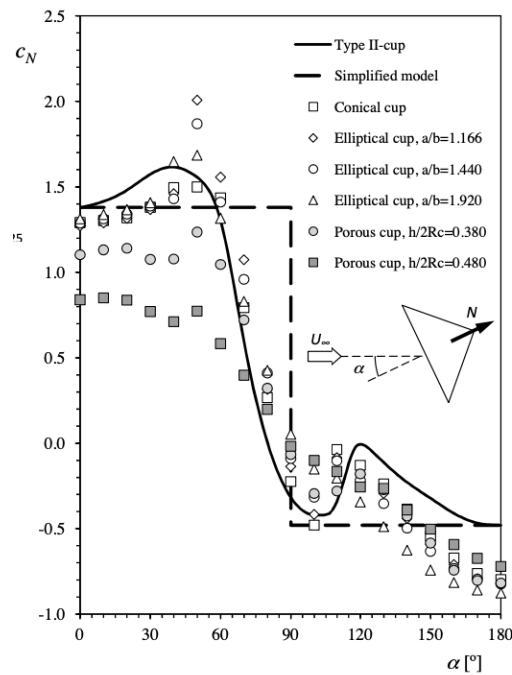
donde  $\delta, \eta$  y  $\xi$  son coeficientes que dependen específicamente del anemómetro (y podrían depender de otros efectos como el sistema de cojinetes, la interacción entre el diámetro del "cuello" del anemómetro y el rotor, o la inercia del sistema de generación de la señal de salida). Esta ecuación pone de manifiesto la contribución del área frontal de las copas,  $S_c$ , a la pendiente de la función de transferencia del anemómetro. Otro resultado obtenido fue que, en todos los casos, la pendiente de la Expresión (6),  $\frac{dA_r}{dR_{rc}}$ , fue la misma para todos los tamaños de copa, lo que revela una relación directa entre la mencionada pendiente y la forma de las copas. Estos resultados concuerdan con los modelos analíticos, basados en los coeficientes de fuerza normal de la copa,  $c_N$ , que lógicamente son iguales si la forma de las copas es la misma, con solo el tamaño escalado.

Por otra parte, se sabe que la respuesta de un anemómetro de copa puede derivarse de la siguiente expresión:

$$I \frac{d\omega}{dt} = Q_A + Q_f \quad (7)$$

donde  $I$  es el momento de inercia del rotor,  $Q_A$  es el par aerodinámico, y  $Q_f$  es el par de fricción, que depende de la temperatura del aire,  $T$ , y la velocidad de rotación,  $\omega$ . Se sabe que  $Q_f = B_0(t) + B_1(T) \cdot \omega + B_2(T) \cdot \omega^2$ , donde los coeficientes  $B_0, B_1, B_2$  son negativos. Por lo tanto, el par de fricción,  $Q_f$ , puede ser despreciado, ya que normalmente es muy pequeño en comparación con el par aerodinámico. La torsión aerodinámica,  $Q_A$ , se puede derivar de las fuerzas aerodinámicas del rotor, que normalmente son medidas en un túnel de viento en configuración "estática", es decir, medir las fuerzas en una cazoleta aislada y fija inmersa en un flujo de aire a velocidad constante y sin tener en cuenta cualquier velocidad de rotación. [19]

En la siguiente ilustración se observa el coeficiente de fuerza aerodinámica normal de la cazoleta,  $c_N$ , medido en varios anemómetros de diferentes tipos en configuración "estática", en relación con el ángulo del viento con respecto a la cazoleta,  $\alpha$ .



*Ilustración 25. Coeficiente de fuerza normal aerodinámica,  $c_N$ , en función de los diferentes tipos de cazoletas: cónica, elíptica y porosa. Trazada en relación con la dirección del viento respecto a la cazoleta,  $\alpha$ . [19].*

El modelo analítico de tres cazoletas se desarrolla a través de la integración de la fuerza normal aerodinámica en las tres cazoletas en todo un giro. [19] La siguiente expresión puede ser derivada por el movimiento del rotor:

$$I \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_c R_{rc} V_r^2(\theta) c_N(\alpha(\theta)) + \frac{1}{2} \rho S_c R_{rc} V_r^2(\theta + 120^\circ) c_N(\alpha(\theta + 120^\circ)) + \frac{1}{2} \rho S_c R_{rc} V_r^2(\theta + 240^\circ) c_N(\alpha(\theta + 240^\circ)) \quad (8)$$

donde  $V_r$  es la velocidad del viento con respecto a las cazoletas,  $c_N$  es el coeficiente de fuerza normal aerodinámica,  $\alpha$  es la dirección del viento local con respecto a cada una de las cazoletas,  $\theta$  es el ángulo del rotor con respecto a una línea de referencia, y  $S_c$  es el área frontal de las

cazoletas ( $S_c = \pi \cdot R_c^2$ ). La velocidad del viento  $V_r$ , relativa al ángulo del rotor  $\theta$  con respecto a la línea de referencia, se expresa como:

$$V_r(\theta) = \sqrt{V^2 + (\omega \cdot R_{rc})^2 - 2 \cdot V \cdot \omega \cdot R_{rc} \cdot \cos(\theta)}, \quad (9)$$

#### 4.2.1.3. Concepto de la derivada en un punto

El anemómetro de cazoleta permite obtener la velocidad del viento, y para su cálculo es necesario recordar el concepto de derivada ya que como se sabe, la velocidad es la primera derivada de la posición con respecto al tiempo.

En [21] se define la derivada en un punto de la siguiente manera:

Sea  $f$  una función y sea  $c$  un número en el dominio de  $f$ , se llama derivada de  $f$  en  $x = c$  al límite:

$$\lim_{x \rightarrow c} \frac{f(x) - f(c)}{x - c}, \quad (10)$$

si este límite existe. Si el límite no existe se dice que la función no es derivable en  $x = c$ . A su vez, la derivada de  $f$  en  $x = c$  se denota por  $f'(c)$ . Esto es:

$$f'(c) = \lim_{x \rightarrow c} \frac{f(x) - f(c)}{x - c}, \quad (11)$$

Ahora, si en lugar de  $x$  se escribe  $c + h$ , es decir  $x = c + h$  entonces cuando  $x \rightarrow c$  se tiene que  $h \rightarrow 0$  y la derivada se puede escribir ahora como:

$$f'(c) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(c + h) - f(c)}{h}, \quad (12)$$

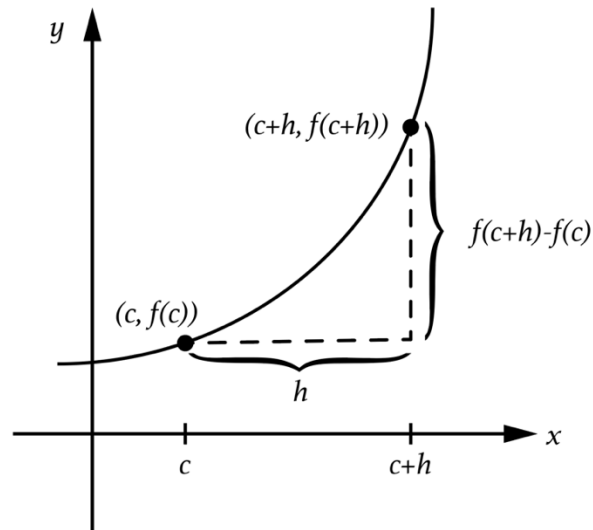


Ilustración 26. Definición gráfica de la derivada como función (1). Elaboración propia, basada en [21].

Puesto que en la segunda forma no se hace referencia explícita a la variable independiente  $x$  de la función. Esto permite obtener la siguiente definición:

Sea  $f$  una función y suponga que la derivada de  $f$  existe para todo  $x$  en un cierto dominio. Si a cada  $x$  le asociamos la derivada  $f'(x)$  se obtiene una nueva función  $f'$  que se llama función derivada de  $f$  y se tiene:

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}, \quad (13)$$

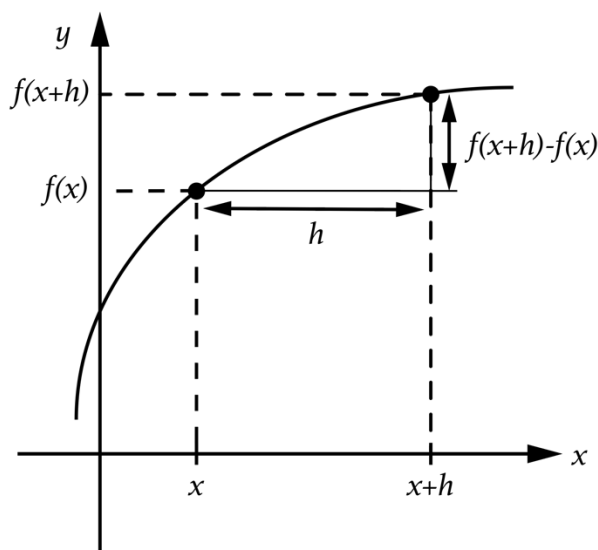


Ilustración 27. Definición gráfica de la derivada como función (2). Elaboración propia, basada en [21].

Empleando la definición de derivada de una función se puede realizar aproximaciones numéricas, entre ellas para todo  $h > 0$  serán:

Diferencias hacia adelante:

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}, \quad (14)$$

Diferencias hacia atrás:

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0) - f(x_0 - h)}{h}, \quad (15)$$

#### 4.2.2. Placa de Desarrollo

En el mercado existe gran variedad de placas de desarrollo de diversos fabricantes por lo que se ha considerado los siguientes parámetros para su elección:

- Bajo consumo.
- Bajo coste.
- Capacidad de procesamiento



- Conectividad IoT.

Las placas de desarrollo Arduino UNO y MEGA tienen un bajo coste y la posibilidad de alcanzar un bajo consumo, sin embargo, la capacidad de procesamiento es limitada pues cuentan con un procesador de 8 bits. Por otra parte, no integra ninguna conectividad IoT, es necesario utilizar un módulo ya sea WiFi o LoRa lo cual supone un incremento del espacio, coste y consumo.

La placa ESPDUINO-32 es una elección idónea en términos de consumo energético, coste y complejidad de hardware ya que incorpora conexión WiFi sin necesidad de módulos externos. Además, tiene una capacidad de procesamiento elevada gracias a la integración de un MCU de 32 bits.

#### 4.2.2.1. ESPDUINO-32

La ESPDUINO-32 es una placa basada en el nodo microcontrolador ESP32, con la diferencia de presentar una PCB similar a Arduino UNO. La ESP32 fue creada por Espressif Systems bajo la denominación de una familia de chips SoC (System On Chip) de bajo coste y consumo de energía, con tecnología Wi-Fi y Bluetooth de modo dual integrada.



*Ilustración 28. Placa de desarrollo ESPDUINO-32*

El ESPDUINO-32 integra un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de doble núcleo de 32 bits que puede operar a 160 y 240MHz y un co-procesador de ultra baja energía. En la siguiente ilustración se presenta un diagrama de bloques funcional [22].

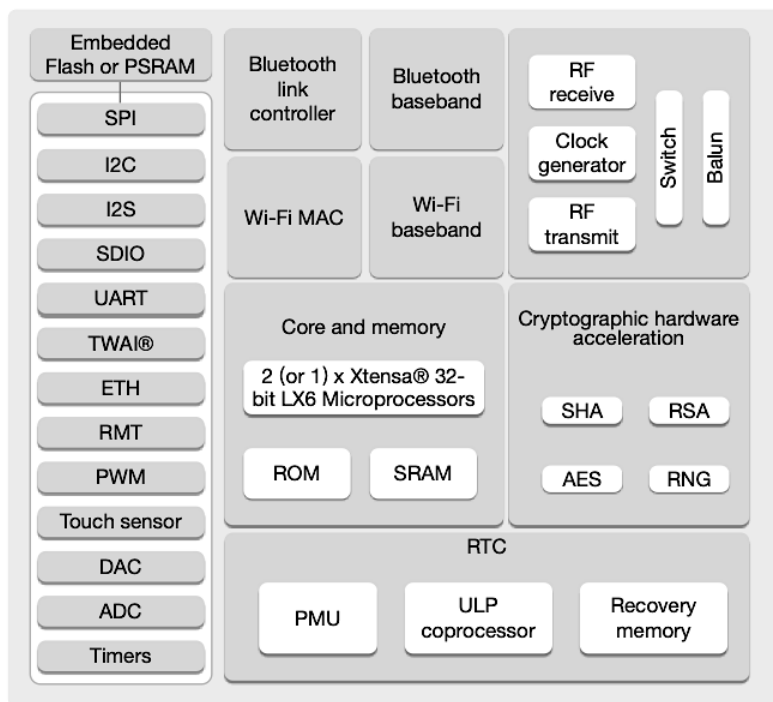


Ilustración 29. Diagrama de bloques funcional de microprocesador ESP32. [22]

La tensión de funcionamiento del MCU ESP32 oscila entre 2.3V y 3.6V. Cuando se emplea una fuente de alimentación única, el voltaje recomendado de la fuente de alimentación es de 3.3V. Asimismo, cuando se utiliza una batería como fuente de alimentación se recomienda un supervisor de la tensión de alimentación, de modo que se evite un fallo de arranque debido a la baja tensión. El MCU ESP32 implementa un protocolo TCP/IP y MAC WiFi 802.11b/g/n completo. [22]

La placa ESPDUINO-32 puede alimentarse de una conexión USB o de una fuente DC de 5-12V. La corriente media de consumo es de 80mA y puede operar entre 40-85 grados Celsius. El diagrama de pines de la placa se presenta a continuación.

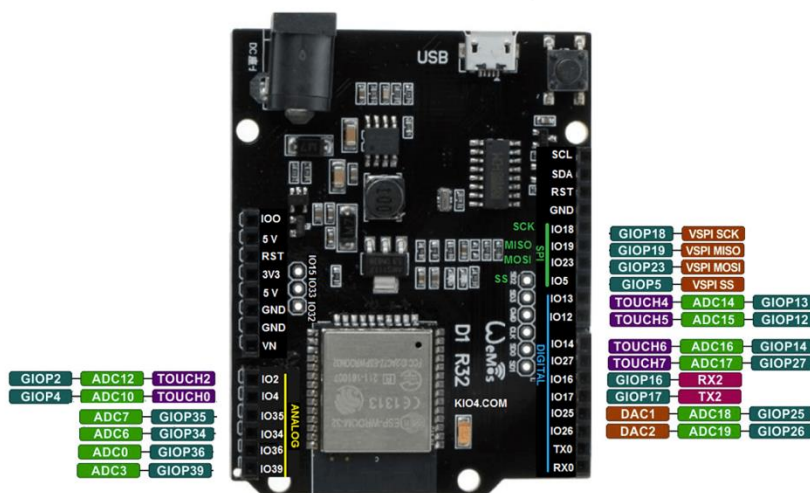


Ilustración 30. Diagrama de pines ESPDUINO-32.

En la hoja de datos del fabricante se presenta las especificaciones de los consumos de la ESP32.

Tabla 9. Especificaciones de consumo de energía de la ESP32. [22]

Modo / Parámetro	Valor típico
Transmisión 802.11 b, DSSS 1 Mbps, POUT = +19.5 dBm	240 mA
Transmisión 802.11 g, OFDM 54 Mbps, POUT = +16 dBm	190 mA
Transmisión 802.11 n, OFDM MCS7, POUT = +14 dBm	180 mA
Recibidor 802.11 b/g/n	95 – 100 mA
$I_{OH}$	40 mA
$I_{OL}$	28 mA

### 4.2.3. Sensores

A la hora de seleccionar los sensores para medir la temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, calidad del aire (CO2), velocidad y dirección del viento, se debe considerar varios aspectos como el consumo energético, el tamaño, el coste del dispositivo y la confiabilidad.

En los antecedentes se ha podido apreciar el uso de variedad de sensores, algunos tenían la particularidad que realizaban la medición de dos o tres parámetros al mismo tiempo, como el DHT21 o BME280 respectivamente. Esta característica supone una ventaja crucial ya que

se disminuye el uso de espacio utilizado, el consumo de energía y el coste.

Actualmente se encuentra disponible el sensor BME688, es fabricado por BOSCH y es descrito como un sensor 4 en 1, ya que integra sensores de temperatura, humedad, presión y gas, además cuenta con una IA (Inteligencia Artificial) que permite programarlo para detectar gases y alcoholes específicos. Es el primer sensor de su tipo ya que los sensores se alojan en un robusto pero compacto paquete que ha sido desarrollado especialmente para aplicaciones donde el tamaño y el bajo consumo de energía son requisitos primordiales. El sensor de gas puede detectar Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Componentes Sulfurados Volátiles (CSV) y otros gases como Monóxido de Carbono (CO) e Hidrógeno (H) en un rango de partes por billón (ppb).[23]

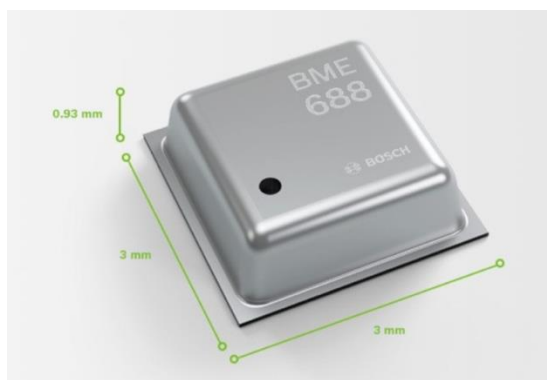


Ilustración 31. Sensor BME688 [23].

En la siguiente tabla se presentan características del sensor.

Tabla 10. Características de sensor BME688. Elaboración propia, basada en [23]

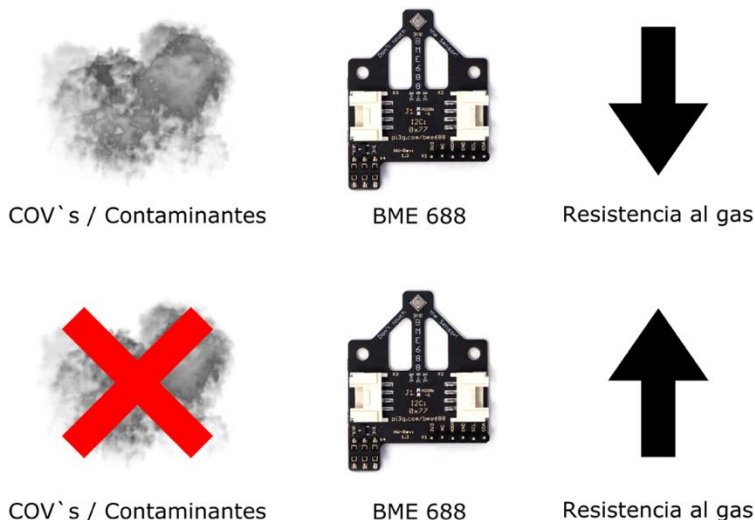
Características	BME 688
Parámetros de medición	Temperatura, presión, humedad, gas
Rango y precisión de temperatura	-40...+85°C +/-0,5°C
Rango y precisión de humedad relativa (r.H.)	0...100% r.H. +/-3% r.H
Rango y precisión de presión	300...1100 hPa 0,25%
Desviación sensor-to-sensor (IAQ)	+/-15% +/-15 IAQ
Voltaje de alimentación (VDD)	1.71V - 3.6V
Interfaz	I2C (max 3.4MHz) y SPI (max 10MHz)
Package	3.0mmx3.0mmx0,93mm metal lid LGA
Precio (€)	8,79

El BME688 dispone de las librerías de programación BSEC las cuales son proporcionadas por Bosch. Estas permiten implementar diferentes modos de funcionamiento de acuerdo con la aplicación. Cada modo tiene un tiempo de muestreo específico, así como una corriente de consumo medio diferente. Se indican a continuación.

*Tabla 11. Modos de funcionamiento del sensor de gas empleando librerías BSEC. [23]*

<b>BSEC - Modo de funcionamiento</b>	<b>Tasa de actualización</b>	<b>Consumo medio de corriente</b>
Modo de escaneo de gas estándar (scan)	1 / 10.8s	3.96 mA
Modo de ultra bajo consumo (ULP)	3.3 mHz	0.09 mA
Modo rápido de ultra bajo consumo (q-ULP)	0.33 Hz (T, p, h) / 3.3 mHz (IAQ)	0.1 mA
Modo de bajo consumo (LP)	0.33 Hz	0.9 mA
Modo continuo (solo para fines de prueba)	1 Hz	12 mA

El sensor BME688 permite obtener la denominada Resistencia al Gas, a partir de esta se puede calcular el Índice de Calidad de Aire Interior (IAQ), aunque también puede ser empleado en exteriores. La resistencia al gas es inversamente proporcional a la presencia de COV's y otros gases contaminantes, es decir, a mayor presencia de gases la resistencia disminuye, de igual manera, cuando no existe presencia de gases contaminantes, la resistencia aumenta.



*Ilustración 32. Variación de la resistencia de gas en función de la presencia de gases contaminantes. Elaboración propia.*

Considerando la clasificación del IAQ (Indoor Air Quality) aportada por el fabricante BOSCH, se obtendría la siguiente tabla:

*Tabla 12. Clasificación del Índice de Calidad de Aire Interior y código de colores. Elaboración propia basada en [23].*

Índice IAQ	Calidad del aire	Impacto (largos periodos de exposición)
0 - 50	Excelente	Aire puro, lo mejor para el bienestar
51 - 100	Buena	Sin irritación ni impacto en el bienestar
101 - 150	Ligeramente contaminado	Posible reducción del bienestar
151 - 200	Moderadamente contaminado	Irritación significativa posible
201 - 250	Muy contaminado	La exposición podría causar efectos como dolores de cabeza dependiendo del tipo de COV's
251 - 350	Gravemente contaminado	Posible problema de salud más grave si hay presencia de COV's nocivos
>351	Extremadamente contaminado	Dolores de cabeza, posibles efectos neurotóxicos adicionales

Según la hoja de datos del BME688, por medio de las librerías BSEC se pueden obtener entre otros los siguientes parámetros de salida:

*Tabla 13. Salidas del sensor BME688 empleando librerías BSEC. Elaboración propia basada en [23]*

Salida	Descripción
Presión sin procesar (Pa)	Datos sin procesar de la API del sensor desviados a la salida BSEC
Temperatura sin procesar	Datos sin procesar de la API del sensor desviados a la salida BSEC
Humedad relativa sin procesar	Datos sin procesar de la API del sensor desviados a la salida BSEC
Resistencia al gas sin procesar	Datos sin procesar de la API del sensor desviados a la salida BSEC
Temperatura compensada por el sensor (°C)	Temperatura compensada por las influencias cruzadas internas causadas por el sensor BME
Humedad relativa compensada por el sensor (%)	Humedad relativa compensada por las influencias cruzadas internas causadas por el sensor BME
Resistencia al gas compensada por el sensor (Ohm)	Resistencia al gas sin procesar compensada por la influencia de la temperatura y humedad
Precisión de IAQ (0 – 3)	Precisión del estado de IAQ
IAQ (0-500)	Índice de calidad de aire, recomendado especialmente para dispositivos en movilidad, puesto que el algoritmo de autorregulación se adapta a los diferentes entornos.
IAQ Estable ("s-IAQ")	Índice de calidad de Aire "Estable", recomendado especialmente para dispositivos fijos o estacionarios. (No implementa el algoritmo de autorregulación).
CO2 equivalente (ppm)	Estimación del nivel de CO2 en ppm. El sensor no mide el CO2 directamente, sino que se deriva de la correlación media entre los COV's y el CO2 exhalado por los humanos.
Equivalentes de COV's respirados	Conversión de los COV's respirados en ppm. La escala se deriva de pruebas de laboratorio con la mezcla de respiración COV descrita en la Tabla 14.

El sensor de gas MOX que integra el BME688 requiere un tiempo para calibrarse de acuerdo con el entorno, el estado de calibración se proporciona con un parámetro denominado precisión del índice de calidad

de aire. Este parámetro refleja la situación del proceso de calibración y puede adoptar un valor de 0 a 3. Un valor 0 indica que el sensor acaba de iniciar y está estabilizándose. Un 1 significa que, debido a la estabilidad de los datos del sensor, la librería BSEC no ha podido definir claramente sus referencias. Esto puede suceder debido a que el entorno es estable. Un 2 indica que la librería BSEC encontró nuevos datos de calibración y actualmente está calibrándose, y por último un valor 3 significa que BSEC se calibró correctamente. La duración efectiva del proceso de calibración del sensor depende de los estímulos que capta del entorno. [24]

Los valores de la mezcla de COV en respiración con nitrógeno como gas portador empleados en las pruebas de laboratorio se presentan a continuación:

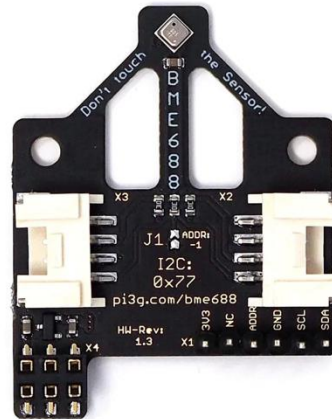
*Tabla 14. Mezcla de COV en respiración con nitrógeno como gas portador. Elaboración propia basada en [23]*

<b>Fracción molar</b>	<b>Compuesto</b>	<b>Tolerancia de producción</b>	<b>Precisión certificada</b>
5 ppm	Etano	20%	5%
10 ppm	Isopreno / 2-metil-1, 3-butadieno	20%	5%
10 ppm	Etanol	20%	5%
50 ppm	Acetona	20%	5%
15 ppm	Monóxido de carbono	10%	2%

De acuerdo con las directrices emitidas por la Agencia Federal Alemana de Medio Ambiente, superar los 25mg/m<sup>3</sup> (20.83ppm) de COV totales puede provocar dolores de cabeza y un mayor impacto neurotóxico en la salud. El software BSEC calibra automáticamente las concentraciones bajas y altas aplicadas durante las pruebas a IAQ de 50 y 200, respectivamente. [23]

Existen placas de conexión entre el sensor BME688 y la placa ESPDUINO-32, por ejemplo, la PI3G BME688 Breakout V1.1.





*Ilustración 33. Placa de conexión PI3G BME688 V1.1 [25].*

Se trata de una placa que incorpora el sensor BME688 a un extremo de esta, separándolo así del resto de componentes y evitando influencia del posible calor y humedad que se genere. Se conecta a la placa por medio de una conexión I2C, y su tensión de alimentación es de 3.3V. Incorpora dos agujeros para facilitar su montaje. [25]

Por otra parte, para la medición de la velocidad y dirección de viento existen diversas alternativas. Comúnmente se emplean encoders (codificadores rotatorios) que pueden implementar tanto tecnología óptica como magnética. Los encoder magnéticos destacan por su resistencia al polvo, grasa, humedad y a otros contaminantes comunes en ambientes industriales. Entre sus variedades se encuentran los de reluctancia variable que detectan cambios en el campo magnético causado por la presencia o movimiento de un objeto ferromagnético, y se denominan magnetos recolectores cuando un carrito enrolla un imán permanente. También están aquellos que utilizan un imán permanente y un efecto Hall o dispositivo magneto resistivo para producir un cambio en cualquier voltaje o resistencia eléctrica en presencia de material ferromagnético. Están disponibles tanto en forma rotativa como lineal.

Asimismo, existen encoder de codificación incremental y absoluta. Los primeros proveen un número específico de pulsos equitativamente espaciados por revolución (PPR) o por pulgada o milímetro de movimiento lineal. Pueden utilizar un solo canal de salida para aplicaciones donde el sentido de la dirección no es importante (unidireccional), o pueden emplear una salida en cuadratura (bidireccional), con dos canales de 90 grados eléctricos fuera de la fase. En cambio, un encoder absoluto genera mensajes digitales lo cual representa la posición actual del encoder, así como su velocidad y dirección del movimiento. Si la energía se pierde, su salida será corregida cada vez que la energía sea restablecida. No es necesario ir a una posición referencial como ocurre con los encoder de tipo incremental. La comunicación del encoder absoluto es por medio de un mensaje en multi-bits. [26]

Los dispositivos empleados para medir la velocidad y dirección del viento en los antecedentes son diversos, por ejemplo, en el apartado 4.1.2. emplean una estación meteorológica SEN-08942 que integra un anemómetro y veleta de viento. El anemómetro emplea un imán que cierra un interruptor en función de la velocidad del viento, se trata de un magneto recolector. En cambio, la veleta está constituida por un circuito de interruptores, resistencias y un imán. En el apartado 4.1.8. se propone el uso de dos sensores HMC5883L para la medición de la velocidad y dirección del viento.

El sensor HMC5883L [27] es un encoder magneto resistivo anisotrópico y direccional, está diseñado para la detección magnética de bajo campo con una interfaz digital para aplicaciones como brújula y la magnetometría de bajo coste. El sensor permite medir la dirección y magnitud de los campos magnéticos de la Tierra, desde el orden de mili-gauss hasta 8 gauss. La resolución de sensor es de 12 bits, tiene una precisión de 1 a 2 grados y emplea una conexión I2C.

En el mercado también se encuentra disponible el encoder de rotación magnético AS5048. Este sensor por lo general suele emplearse para realizar la medición de la velocidad o la dirección del viento, es decir para medir un único parámetro atmosférico tal como se empleó el HMC5883L en el apartado 4.1.8. El AS5048 es un sensor de posición angular de 360° con una salida de alta resolución de 14 bits. Posee una máxima precisión de 0.05°, asumiendo que la linealización y promedio son realizados por el microcontrolador externo. El sensor mide la posición absoluta del ángulo de rotación del imán y consta de sensores Hall, convertidor digital analógico y procesamiento de señales digitales. El sensor tolera la desalineación, las variaciones del entrehierro, los cambios súbitos de temperatura y también los campos magnéticos externos. Esta robustez y el amplio rango de temperatura (-40°C hasta +150°C) del AS5048A hacen que sea ideal para la detección de ángulos de rotación en entornos difíciles. La información de la posición absoluta del imán es accesible directamente a través de una salida PWM y puede leerse a través de una interfaz SPI o I2C. Un regulador de voltaje interno permite que funcione con suministros de 3,3 V o 5 V y una corriente de alimentación de 15mA. [28]

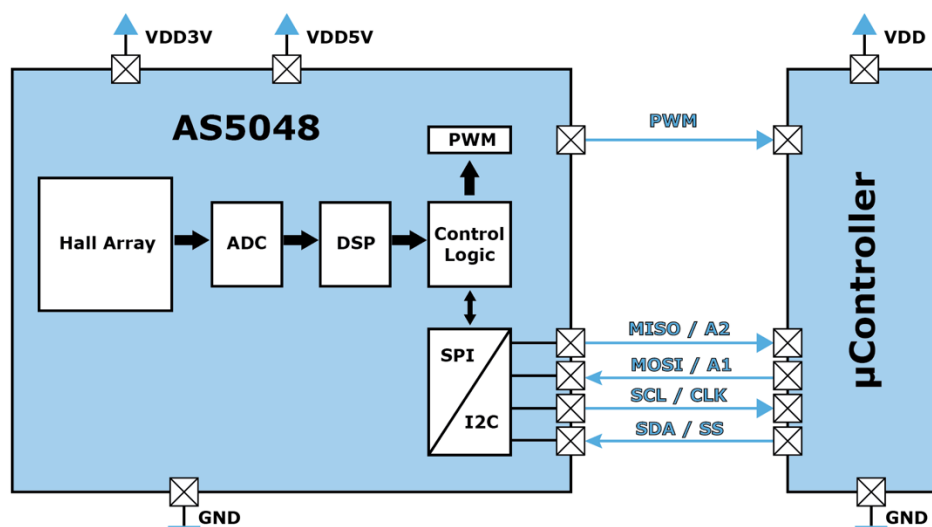
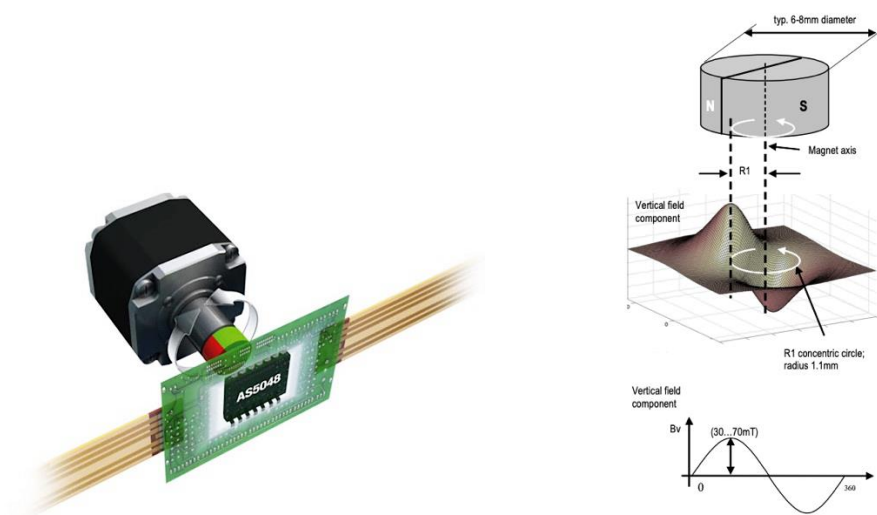


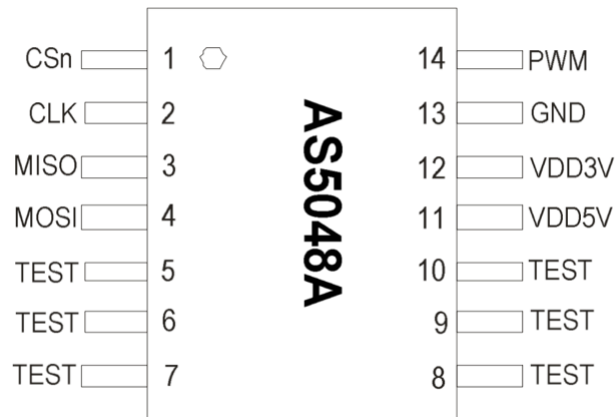
Ilustración 34. Diagrama de bloques de AS5048A. Elaboración propia basada en [28].

El AS5048 emplea los sensores Hall para medir las componentes del campo magnético perpendicular a la superficie del chip. Para ello se coloca un pequeño imán estándar diametralmente magnetizado (de dos polos), el cual proporciona la información de la posición angular absoluta. En base a los requisitos del sistema, es posible utilizar diferentes diámetros de imán. Un imán típico podría tener un diámetro de 6-8mm y una altura mayor o igual a 2.5mm. La intensidad de campo magnético perpendicular a la superficie de la placa debe que estar en el rango de  $\pm 30mT \dots \pm 70mT$  (pico).



*Ilustración 35. Encoder magnético AS5048: (izq.) Disposición sobre la superficie de la placa; (der.) Distribución típica del imán y del flujo magnético [28].*

La configuración de pines del sensor AS5048 depende del modelo, el A funciona con el protocolo SPI y el B empleando I2C.



*Ilustración 36. Configuración de pines de AS5048A [28].*

#### 4.2.4. Alimentación

Debido a que la estación meteorológica requiere de un suministro de energía constante, y considerando la hipótesis de que no es posible en la mayoría de las situaciones conectarla a la red eléctrica, se dispone a implementar un sistema autónomo de energía, aportando autosuficiencia y por ende la facilidad en el despliegue geográfico.

Según [29], un sistema fotovoltaico autónomo (SFA) produce energía eléctrica para satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, empleando un sistema de acumulación energético para hacer frente a los periodos en los que la generación es inferior al consumo.

Una posible configuración para el sistema autónomo por diseñar es la siguiente:

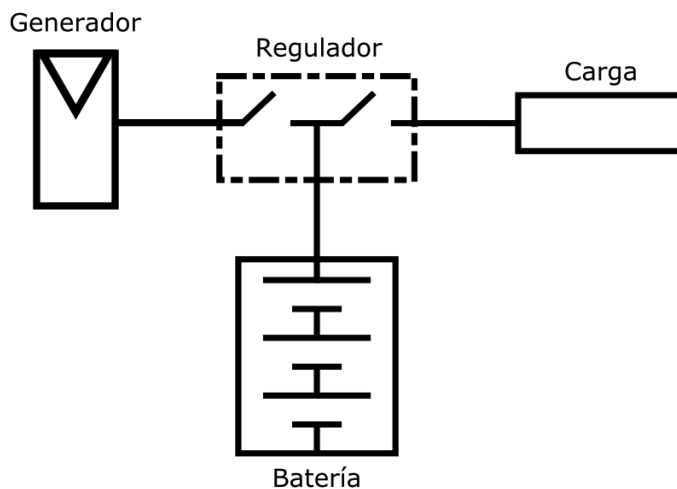


Ilustración 37. Configuración de sistema autónomo. Elaboración propia, basada en [29]

El sistema está compuesto por el generador, en esta aplicación, los paneles solares. La energía generada se transfiere a un regulador de tensión, este actúa como un punto de unión a partir del cual se provee energía a la carga (circuito) y a la batería para su correspondiente almacenamiento. A su vez, la batería al estar fabricada por compuestos químicos requiere un BMS (Battery Management System / Sistema de Gestión de Baterías) para protegerla tanto de corriente como de tensión, asegurando de esta manera su correcto funcionamiento.

#### 4.2.4.1. Paneles Solares

La célula solar es el elemento principal de una instalación de energía solar, se caracteriza por convertir directamente en electricidad los fotones provenientes de la luz del sol. Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico.

Una célula solar se comporta como un diodo: la parte expuesta a la radiación solar es la N, y la parte situada en la zona de obscuridad, la P. Los terminales de conexión de la célula se hallan sobre cada una de estas partes del diodo: la cara correspondiente a la zona P se encuentra metalizada por completo (no tiene que recibir luz), mientras que en la

zona N el metalizado tiene forma de peine, a fin de que la radiación solar llegue al semiconductor. [30]

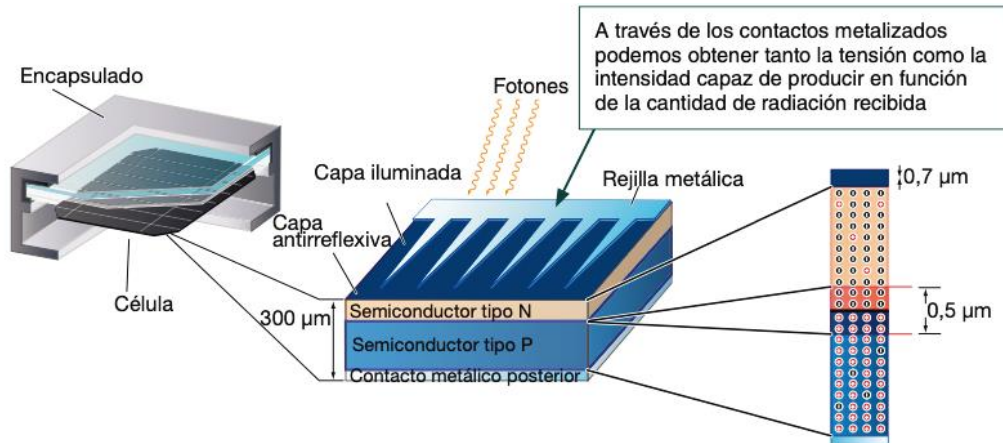


Ilustración 38. Estructura de la célula solar [30].

La célula solar tiene los siguientes parámetros [30]:

- Corriente de iluminación ( $I_L$ ): corriente generada cuando incide la radiación solar sobre la célula.
- Corriente de oscuridad: es debida a la recombinación de los pares electrón-hueco que se produce en el interior del semiconductor.
- Tensión de circuito abierto ( $V_{OC}$ ): la máxima tensión que se obtiene en los extremos de la célula solar, que se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica del material con el que está construida la célula.
- Corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ): máximo valor de corriente que puede circular por la célula solar. Se da cuando sus terminales están cortocircuitados.

Cuando una célula solar es conectada a una carga, los valores de tensión e intensidad varían. Existirán dos de ellos para los cuales la potencia entregada sea máxima:  $V_m$  (tensión máxima) e  $I_m$  (intensidad

máxima), que siempre serán menores que  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$ . En función de estos valores, la potencia máxima que puede entregar la célula solar será:

$$P_m = V_m * I_m \quad (16)$$

Esto nos permite definir un parámetro de la célula solar que recibe el nombre de factor de forma (FF) y que se calcula mediante la fórmula:

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{OC} * I_{SC}} \quad (17)$$

Así pues, el factor de forma es el cociente entre la máxima potencia que puede entregar la célula y el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. En las células solares más habituales, los valores típicos de FF son 0,7 o 0,8. [30]

El panel solar o módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de células, conectadas eléctricamente, encapsuladas, y montadas sobre una estructura de soporte o marco. Proporciona en su salida de conexión una tensión continua, y se diseña especialmente para valores concretos de tensión (6V, 12V, 24V...), que definirán la tensión a la que va a trabajar el sistema fotovoltaico. [30]

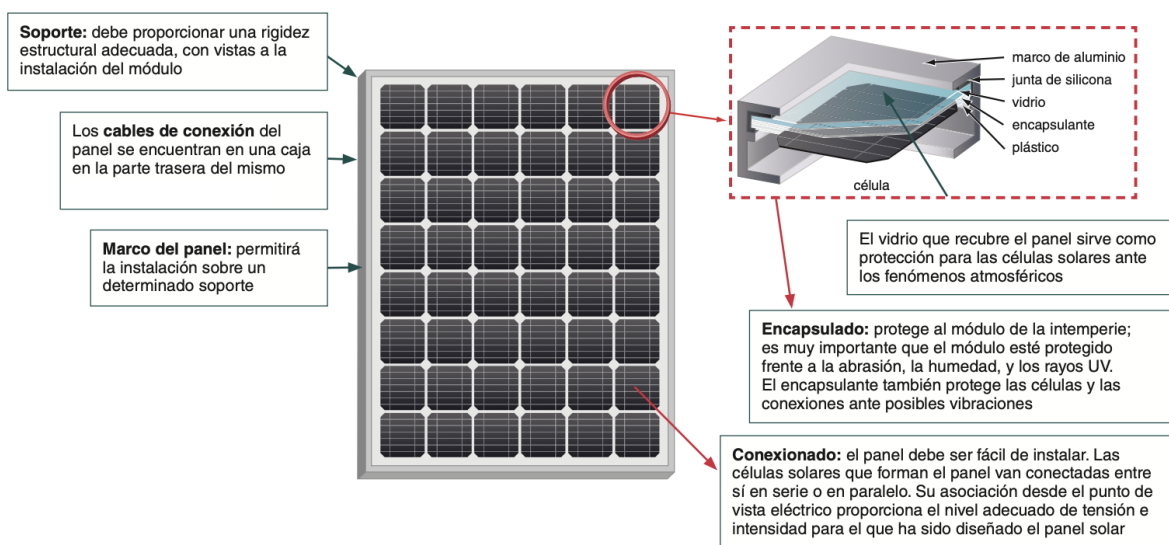


Ilustración 39. Constitución de un panel solar. Principales características [30].


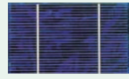
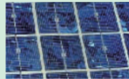


Los tipos de paneles solares vienen dados por la tecnología de fabricación de las células, y son fundamentalmente:

- Silicio cristalino (monocristalino y policristalino).
- Silicio amorfo.

En la siguiente tabla se aprecia las diferencias que existen entre ellos.

*Tabla 15. Diferencias entre los paneles según la tecnología de fabricación [30].*

Células	Silicio	Rendimiento laboratorio	Rendimiento directo	Características	Fabricación
	Monocristalino	24 %	15 - 18 %	Son típicos los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralski).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	Policristalino	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	Amorfo	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

A la hora de emplear paneles solares sobre una instalación, uno de los puntos esenciales a tratar es la potencia de la célula solar. La potencia que genera una célula de tamaño estándar (por ejemplo 10 x 10 cm) es muy pequeña (en torno a 1 o 2 W), por lo que generalmente será necesario tener que asociar varias de ellas con el fin de proporcionar la potencia necesaria al sistema fotovoltaico de la instalación. A partir de este hecho surge el concepto de panel solar o módulo fotovoltaico, cuyos elementos y características se explicaron anteriormente.

Según la conexión eléctrica empleada para las células, se pueden encontrar con diferentes posibilidades:

- Conexión en serie: permite aumentar la tensión final en los extremos de la célula equivalente.
- Conexión en paralelo: permite aumentar la intensidad total del conjunto.

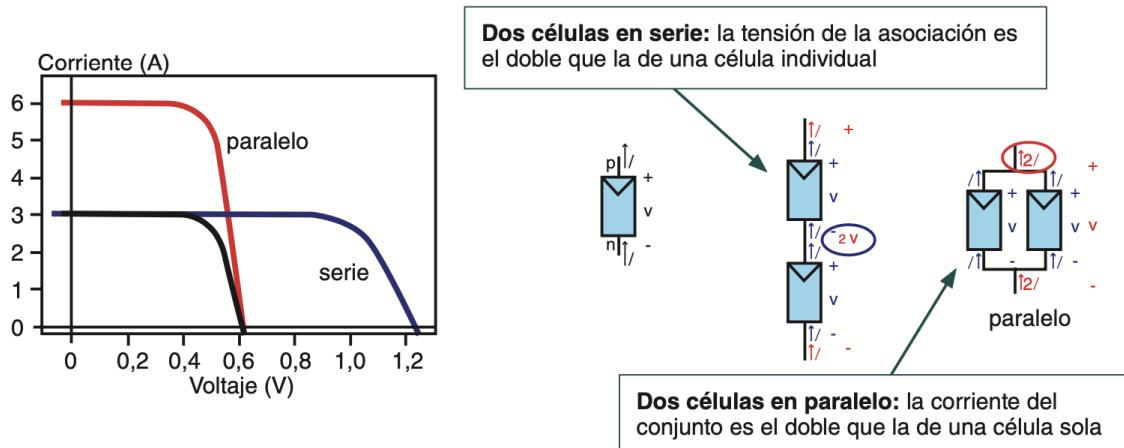
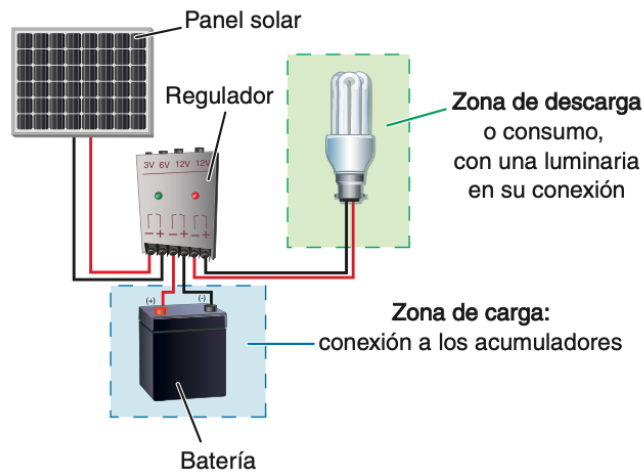


Ilustración 40. Asociación de células solares [30].

#### 4.2.4.1.1. Regulador de tensión

Para un correcto funcionamiento de la instalación, se debe implementar un sistema de regulación de carga en la unión entre los paneles solares y las baterías. Este elemento recibe el nombre de regulador y tiene como misión evitar situaciones de carga y sobrecarga de la batería, con el fin de alargar su vida útil. [30]

Por lo tanto, el regulador trabaja en dos zonas. En la parte relacionada con la carga, su misión es la de garantizar una carga suficiente al acumulador de energía y evitar las situaciones de sobrecarga, y en la parte de descarga se ocupará de asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de la batería. [30]



*Ilustración 41. Conexiones del regulador en una instalación fotovoltaica [30].*

Puesto que los módulos solares tienen una tensión nominal mayor que la de la batería, si no existiera el regulador se podrían producir sobrecargas.

El motivo de que esta tensión nominal de los paneles sea así se debe fundamentalmente a dos razones [30]:

- Atenuar posibles disminuciones de tensión por el aumento de la temperatura.
- Asegurar la carga correcta de la batería. Para ello la tensión  $V_{OC}$  del panel deberá ser mayor que la tensión nominal de la batería.

El dimensionado de la instalación solar se realiza de manera que se asegure el suministro de energía en las peores condiciones de luminosidad del sol. Por ello se toman como referencia los valores de irradiación en invierno. Esto puede provocar que en verano la energía aportada por los módulos solares sea en ocasiones casi el doble de los cálculos estimados, por lo que, si no se conecta el regulador entre los paneles y las baterías, el exceso de corriente podría llegar incluso a hacer hervir el electrolito de los acumuladores, con el riesgo que ello conlleva. [30]

#### 4.2.4.2. Baterías

Las baterías son dispositivos capaces de transformar la energía química en eléctrica. El funcionamiento en una instalación fotovoltaica es el siguiente:

*Energía eléctrica (generación) → Energía química (almacenamiento) → Energía eléctrica (consumo)*

Las baterías son recargadas desde la electricidad producida por los paneles solares, a través de un regulador de carga, y pueden entregar su energía a la salida de la instalación, donde será consumida. [30]

Tres son las misiones que tienen las baterías en las instalaciones fotovoltaicas:

- Almacenar energía durante un determinado número de días.
- Proporcionar una potencia instantánea elevada.
- Fijar la tensión de trabajo de la instalación.

Uno de los parámetros más importantes de tener en cuenta a la hora de elegir un acumulador es la capacidad. Se define como la cantidad de electricidad que puede lograrse en una descarga completa del acumulador partiendo de un estado de carga total del mismo. Se mide en amperios hora (Ah), y se calcula como el producto de la intensidad de descarga del acumulador durante el tiempo en el que está actuando [30]:

$$C = t * I \quad (18)$$

Además de la capacidad, se debe considerar otros parámetros en los acumuladores que se emplean en una instalación fotovoltaica:

- Eficiencia de carga: relación entre la energía empleada para recargar la batería y la energía realmente almacenada. Interesa que sea un valor lo más alto posible. Si la eficiencia es baja, será necesario aumentar el número de paneles solares para obtener los resultados deseados.

- Autodescarga: proceso mediante el cual el acumulador, sin estar en uso, tiende a descargarse.
- Profundidad de descarga: cantidad de energía, en tanto por ciento, que se obtiene de la batería durante una determinada descarga, partiendo del acumulador totalmente cargado. Está relacionada con la duración o la vida útil del acumulador. Si los ciclos de descarga son cortos (en torno al 20%, por ejemplo), la duración del acumulador será mayor que si se le somete a descargas profundas (por ejemplo, del 80%).

Además de los parámetros eléctricos, las características que serían deseables para las baterías a utilizar son:

- Buena resistencia al ciclado (proceso de carga-descarga).
- Bajo mantenimiento.
- Buen funcionamiento a corrientes pequeñas.
- Amplia reserva de electrolito.

Existen diferentes tipos de baterías, estas se clasifican en función de la tecnología de fabricación y de los electrolitos utilizados. En la siguiente tabla se compara los principales tipos de baterías que hay en el mercado, considerando sus características básicas.

*Tabla 16. Características de los principales tipos de baterías [30].*

Tipo de batería	Tensión por vaso (V)	Tiempo de recarga	Autodescarga por mes	N.º de ciclos	Capacidad (por tamaño)	Precio
Plomo-ácido	2	8-16 horas	< 5 %	Medio	30-50 Wh/kg	Bajo
Ni-Cd (níquel-cadmio)	1,2	1 hora	20 %	Elevado	50-80 Wh/kg	Medio
Ni-Mh (níquel-metal hydride)	1,2	2-4 horas	20 %	Medio	60-120 Wh/kg	Medio
Li ion (ión litio)	3,6	2-4 horas	6 %	Medio - bajo	110-160 Wh/kg	Alto

Las baterías pueden conectarse de tres maneras: en serie, paralelo y serie/paralelo.

Una conexión en serie permite obtener voltajes más altos. En la siguiente ilustración se observa un paquete de baterías con cuatro celdas

de iones de litio de 3.6V en serie, también conocidas como 4S, para producir 14.4V nominales. [31]



Ilustración 42. Conexión en serie de cuatro baterías (4S) [31].

Por otra parte, la conexión en paralelo se emplea cuando se necesita una intensidad más alta y no se dispone de baterías más grandes o no se ajustan a las limitaciones del diseño. La mayoría de las baterías permiten configuraciones en paralelo con pocos efectos secundarios. En la siguiente ilustración se observa cuatro baterías conectadas en paralelo en una disposición P4. El voltaje nominal ilustrado sigue siendo de 3.60V, pero la capacidad (Ah) y el tiempo se cuadruplican. [31]

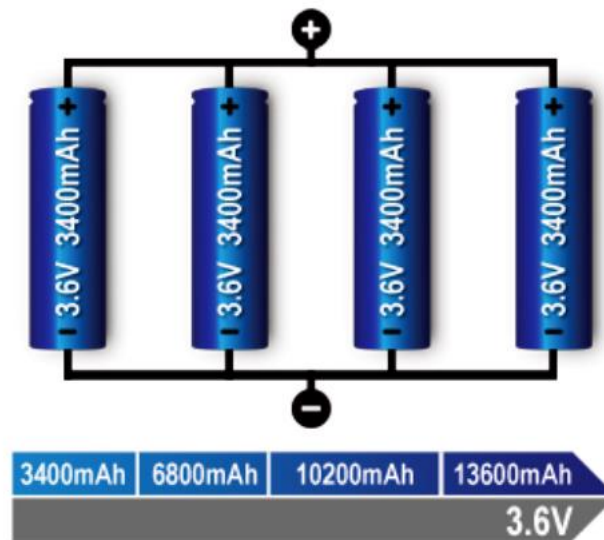


Ilustración 43. Conexión en paralelo de cuatro baterías (4P) [31].

Por último, existe la configuración en serie/paralelo la cual se indica a continuación. Esta aporta flexibilidad en el diseño y se consigue los valores nominales de tensión y corriente deseados con un tamaño de celda estándar. La potencia total es el producto de la tensión por la

corriente; una célula de 3,6V (nominal) multiplicada por 3.400mAh produce 12,24Wh. Cuatro baterías 18650 de 3.400mAh cada una pueden conectarse en serie y en paralelo como se muestra para obtener 7,2V nominales y un total de 48,96Wh. [31]

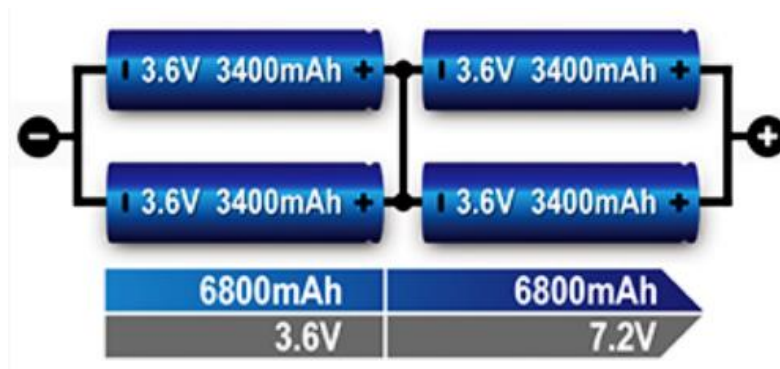


Ilustración 44. Conexión serie/paralelo de cuatro baterías (2s2p) [31].

Las baterías de ion de litio se adaptan bien a la configuración serie/paralelo, pero las células necesitan ser supervisadas para mantenerse dentro de los límites de tensión y corriente. Existen circuitos integrados (CI) para diversas combinaciones de baterías que permiten supervisar hasta 13 baterías de iones de litio. [31]

#### 4.2.4.2.1. BMS

Los BMS son circuitos integrados (CI) cuyo propósito es [32]:

- Proporcionar seguridad y longevidad a la batería, algo imprescindible para el Li-ion.
- Revelar el estado de funcionamiento en forma de estado de carga y estado de salud (capacidad).
- Avisar con antelación y dar servicio. Puede tratarse de alta temperatura, desequilibrio de la célula o calibración.
- Indicar el fin de la vida útil cuando la capacidad cae por debajo del umbral fijado por el usuario.

No todos los BMS ofrecen todas las funciones anteriores. Las funciones más básicas son la protección de la batería y la indicación del estado de carga (SoC).

En el siguiente diagrama se indica los posibles mecanismos de fallo de las baterías, sus consecuencias y las acciones necesarias que debe tomar el Sistema de Gestión de Baterías (BMS).

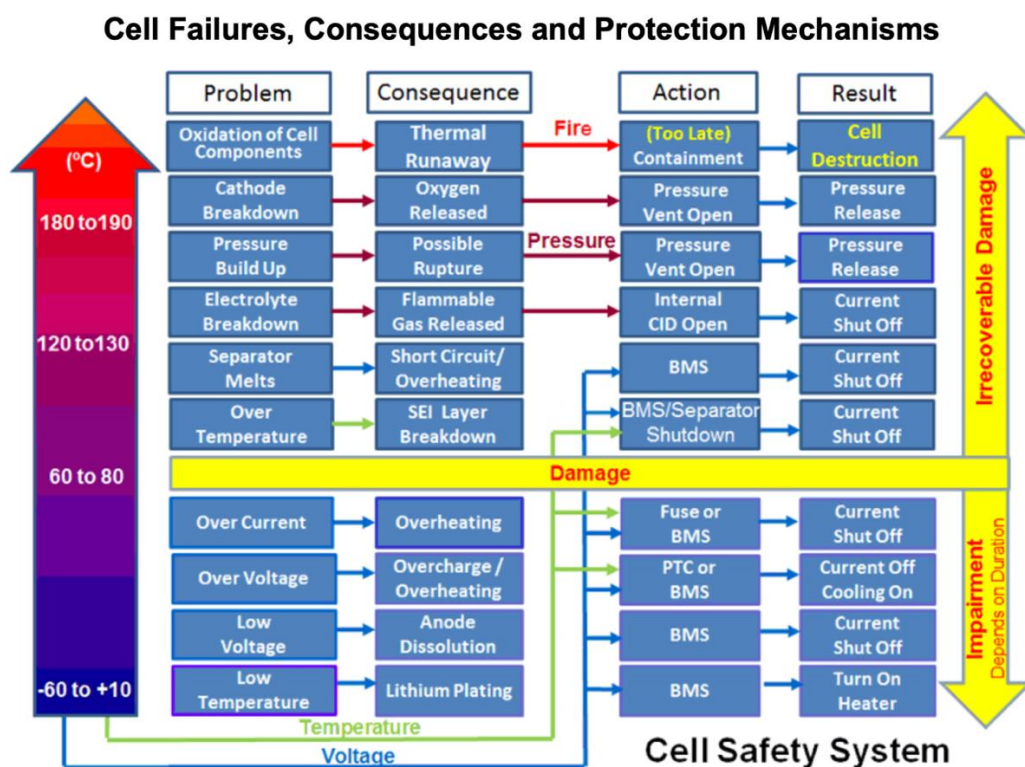


Ilustración 45. Mecanismos de acción del BMS [33].

## 4.2.5. Comunicaciones

Existen diversos protocolos con los cuales los dispositivos se comunican y transmiten la información, a continuación, se resumen aquellos a emplear en el diseño de la estación meteorológica.

### 4.2.5.1. Protocolo I2C



Es un protocolo de comunicación serial desarrollado por Phillips Semiconductors en la década de los 80s. Funciona con una arquitectura maestro-esclavo (master-slave), donde existen dos tipos de dispositivos [34]:

- Maestro (Master) o Controlador (Controller): son los que inician y coordinan la comunicación.
- Esclavos (Slave) o Periféricos (Peripheral): son los dispositivos que están a la espera de que algún maestro se comunique con ellos. Casos comunes son los sensores y actuadores que soportan este protocolo, aunque también es posible, y en ocasiones necesario, que un microcontrolador se comporte como un esclavo.

En la siguiente ilustración se aprecia el esquema de conexión habitual para conectar dispositivos empleando el protocolo I2C.

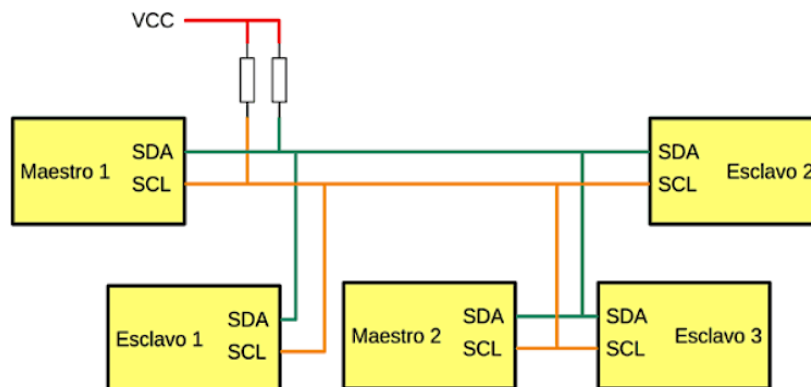


Ilustración 46. Esquema de conexión I2C. [34]

Únicamente se precisa de dos pines para la comunicación, es decir, todos los dispositivos se conectan a los mismos cables:

- SDA (Serial Data): utilizado para el intercambio de datos.
- SCL (Serial Clock): empleado como señal de reloj.

Se destaca la importancia de las resistencias Pull-up ubicado en ambos pines, gracias a estas la comunicación funciona correctamente, ya

que el I2C es un bus de colector abierto. La velocidad de comunicación de datos va de 100 kbps hasta 3,4Mbps.

#### 4.2.5.2. Protocolo SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) es un bus de tres líneas, sobre el cual se transmiten paquetes de información de 8 bits. Cada una de estas tres líneas porta la información entre los diferentes dispositivos conectados al bus. Cada dispositivo conectado al bus puede actuar como transmisor y receptor al mismo tiempo, por lo que este tipo de comunicación serial es full dúplex. Dos de estas líneas transfieren los datos (una en cada dirección) y la tercera línea es la de reloj.

Los dispositivos conectados al bus son definidos como maestros y esclavos. Un maestro es aquel que inicia la transferencia de información sobre el bus y genera las señales de reloj y control. Un esclavo es un dispositivo controlado por el maestro. Cada esclavo es controlado sobre el bus a través de una línea selectora llamada Chip Select o Select Slave, por lo tanto, el esclavo es activado solo cuando esta línea es seleccionada.

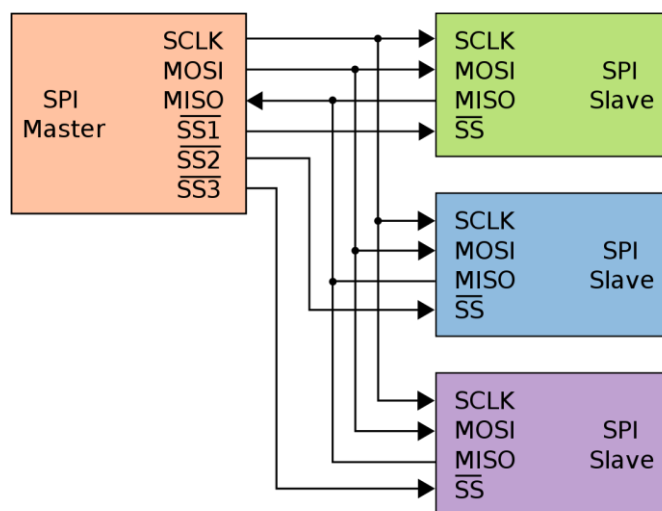


Ilustración 47. Esquema de conexión SPI. [35]

Para la sincronización y transmisión de datos se emplea las siguientes líneas [35]:

- SCLK (Clock): Es el pulso que marca la sincronización. Con cada pulso de este reloj, se lee o se envía un bit.
- MOSI (Master Output Slave Input): Salida de datos del Master y entrada de datos al Esclavo.
- MISO (Master Input Slave Output): Salida de datos del Esclavo y entrada al Master.
- SS / Select: Permite seleccionar un Esclavo, o permite al Master ordenar activar a un Esclavo.

La velocidad de transmisión de datos es fijada por el reloj de MCU, puede alcanzar hasta 60Mbps.

#### 4.2.5.3. Protocolo UDP

El Protocolo de datagrama de usuario (UDP) es un protocolo ligero de transporte de datos que funciona sobre IP. Este protocolo proporciona un mecanismo para detectar datos corruptos en paquetes, pero no intenta resolver otros problemas que surgen con paquetes, como cuando se pierden o llegan fuera de orden. Sin embargo, en comparación con otros protocolos que funcionan sobre IP, el protocolo UDP es simple pero rápido. A menudo se usa para aplicaciones sensibles al tiempo (como *streaming* de video en tiempo real) donde la velocidad es más importante que la precisión. [36]

Según [37], los paquetes UDP consisten en una cabecera (*header*) y los datos reales del usuario. La cabecera UDP contiene toda la información necesaria para transmisión de datos utilizando el protocolo de transporte y hace que un paquete UDP se pueda identificar como tal. La cabecera

consta de 4 campos y está dividida en 2 bloques de 32 bits con la siguiente estructura:

	<b>Bits 0-15</b>	<b>Bits 16-31</b>
cero	Puerto de origen	Puerto de destino
32	Longitud del mensaje	Suma de verificación

Los primeros 16 bits de la cabecera identifican el puerto de origen desde el que se ha enviado un datagrama concreto. El receptor necesita esta información para poder responder al paquete. Ya que UDP funciona sin conexiones físicas y básicamente no requiere ninguna comunicación entre el emisor y el receptor, el campo de puerto de origen es opcional.

En el siguiente campo se especifica el puerto de destino, es decir, se indica el servicio solicitado. Esta información es obligatoria, al contrario que el puerto de origen, porque si no, no sería posible asignar correctamente el datagrama.

El campo longitud define la longitud del datagrama o mensaje, se compone de la longitud de la cabecera (8 bytes) y el tamaño de los datos de usuario (máximo teórico: 65.535 bytes). Cuando se utiliza IPv4, el límite real para los datos de usuario es de 65.507 bytes, tras deducir las cabeceras IP y UDP. En IPv6 se aceptan paquetes (llamados jumbogramas) que superan ese límite. [37]

La cabecera UDP se completa con la *checksum* o suma de verificación, que se utiliza para detectar errores durante la transmisión. De esta manera, se puede detectar si los datos han sufrido alguna alteración en el camino. No obstante, los paquetes detectados se descartan y no se cursa una nueva solicitud. Para generar la suma, se utilizan partes de la cabecera UDP, de los datos de usuario y de la conocida como pseudocabecera (que contiene información sobre la cabecera IP). [37]

#### 4.2.5.4. Plataforma IoT ThingSpeak

ThingSpeak es un servicio de plataforma IoT para el análisis de datos que permite: agregar, visualizar y analizar flujos de datos en directo en la nube. La plataforma proporciona visualizaciones instantáneas de los datos publicados por los dispositivos previamente programados. La particularidad de ThingSpeak es que permite ejecutar código MATLAB, realizándose análisis y procesamiento de datos en línea a medida que llegan. Esta plataforma está empleada a menudo en prototipos y pruebas de concepto de sistemas IoT que requiere análisis, por lo que resulta muy interesante y favorable su implementación en la estación meteorológica. [38]

Numerosos sistemas IoT que implementen ThingSpeak pueden describirse mediante el siguiente diagrama:

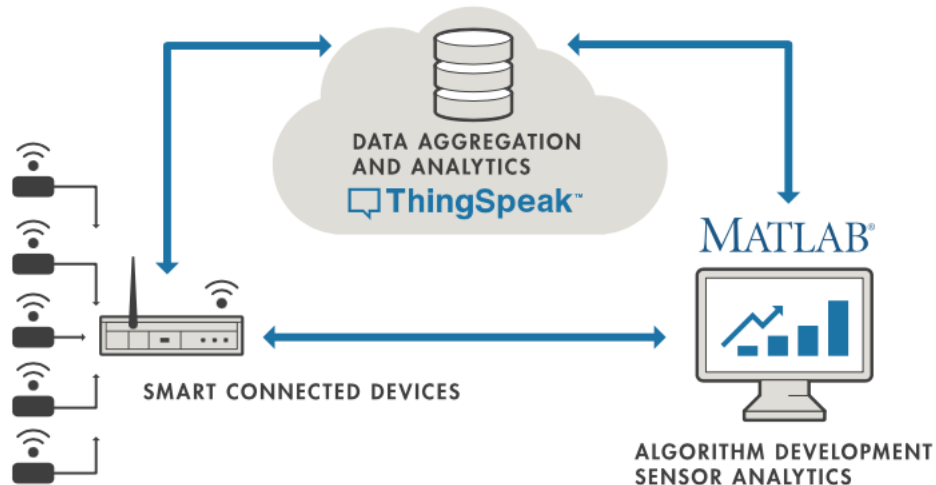


Ilustración 48. Sistema IoT implementado con ThingSpeak. [38]

A la izquierda se encuentran los dispositivos inteligentes, estos recopilan datos e incluyen elementos como sensores de temperatura inalámbricos, monitores de ritmo cardiaco, etc.

En el centro está la nube o servidores, donde los datos de muchas fuentes se agregan y analizan en tiempo real.

En el lado derecho del diagrama se representa el desarrollo de algoritmos asociado a la aplicación IoT. Aquí un ingeniero o científico trata de obtener información sobre los datos recogidos realizando un análisis histórico de los mismos.

Un sistema IoT incluye todos los elementos anteriores. ThingSpeak encaja en la parte de la nube del diagrama y proporciona una plataforma para recoger y analizar rápidamente los datos de los sensores conectados a la red.

Algunas de las capacidades clave de ThingSpeak incluyen la posibilidad de:

- Configurar fácilmente los dispositivos para que envíen datos a ThingSpeak utilizando protocolos IoT populares.
- Visualizar los datos de los sensores en tiempo real.
- Agregar datos bajo demanda de fuentes de terceros.
- Utilizar la potencia de MATLAB para dar sentido a los datos de IoT.
- Ejecutar los análisis de IoT de forma automática basándose en horarios o eventos.
- Crear prototipos y sistemas IoT sin necesidad de configurar servidores o desarrollar software web.
- Actuar automáticamente sobre sus datos y comunicarse mediante servicios de terceros como Twilio o Twitter.

## 5. DESARROLLO

El desarrollo del prototipo de la estación meteorológica se inicia con el estudio de los requerimientos y necesidades del diseño. Entre los puntos a contemplar se encuentran las funciones del prototipo, el sistema de alimentación y el método de comunicación y presentación de la información al usuario.

La estación meteorológica consiste en un sistema conformado por elementos diferenciados, por lo tanto, se considera oportuno realizar el desarrollo de la siguiente manera.

En primer lugar, el diseño se centra en el desarrollo de un dispositivo de bajo coste que permita obtener las mediciones de la velocidad y dirección del viento.

En segundo lugar, se detalla la integración del dispositivo diseñado anteriormente, así como del sensor encargado de la medición de los parámetros atmosféricos (temperatura, humedad, presión, calidad de aire) a la placa de desarrollo ESPDUINO-32. También se realiza la implementación de la conexión con la plataforma ThingSpeak.

En tercer lugar, se explica la configuración de la plataforma ThingSpeak para la visualización y procesamiento de datos.

En cuarto lugar, se diseña el sistema autónomo de energía puesto que en este punto es viable determinar el consumo energético de la estación meteorológica, ergo, es factible dimensionar los componentes para obtener un sistema autónomo eficiente y eficaz.

Por último, se plantea un esquema eléctrico de la estación meteorológica.

## 5.1. ESTUDIO DE REQUERIMIENTOS Y NECESIDADES

Para un desarrollo correcto de un dispositivo, previamente se requiere conocer el problema y las necesidades a solventar, así como las funciones que precisa realizar y los requisitos.

El problema por solucionar con este dispositivo es poner al alcance de las personas una estación meteorológica de bajo coste que permita la recolección de parámetros meteorológicos de manera precisa y exacta en medida de lo posible, que implemente el uso del internet de las cosas y sea independiente de la red eléctrica.

Para la medición de la velocidad y dirección del viento actualmente existen diversas soluciones. El sistema convencional consiste en emplear dos dispositivos: un anemómetro de cazoletas y una veleta. También existen dispositivos que por medio de tecnologías como LiDAR, SoDAR y ultrasonidos miden tanto la velocidad como la dirección del viento, sin embargo, su coste resulta ser muy elevado. Debido a lo anterior surge la necesidad de disponer de un dispositivo de bajo coste que realice la medición de la velocidad y dirección del viento.

Por otra parte, para la medición de la temperatura, humedad, presión y calidad de aire es importante minimizar el número de dispositivos utilizados para reducir tanto el consumo energético como el espacio utilizado, pero sin dejar de lado la fiabilidad en las medidas y el coste económico que supone su adquisición.

Para calibrar los dispositivos en caso de ser necesario, se opta por recurrir a la comparación de las lecturas con sistemas de referencia.

Las funciones por implementar en la estación meteorológica proceden de lo mencionado anteriormente. Todo el sistema converge a un único fin y es tener la capacidad de proporcionar una visualización de parámetros climáticos fiables las 24 horas del día.



Para finalizar, se presenta los requisitos mínimos a implementar:

- Realizar la medición de la velocidad y dirección del viento con un único dispositivo de bajo coste.
- Realizar la lectura de parámetros del tiempo atmosférico como temperatura, humedad, presión y calidad de aire con un dispositivo que aporte bajo coste, bajo consumo energético, y confiabilidad en sus mediciones.
- Proporcionar un sistema *energy harvesting* o de recolección de energía ambiental que elimine la dependencia del dispositivo de la red de suministro eléctrico.
- Presentar la información al usuario a través una interfaz amigable, intuitiva y portable, haciendo del IoT.

## 5.2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

En la Ilustración 49 se presenta un diagrama de bloques del sistema. En él se observa los distintos componentes que conforman la estación meteorológica, así como los elementos o sistemas necesarios para realizar la transmisión de los datos hasta la plataforma IoT ThingSpeak.

El prototipo incorpora la placa de desarrollo ESPDUINO-32, los sensores BME688 y AS5048A y el sistema autónomo de energía. El módulo se ubica a la intemperie para la recolección de datos. Posteriormente los envía a la plataforma IoT ThingSpeak a través de una conexión IEEE 802.11 (WiFi).

A la derecha del esquema se observa que a la plataforma IoT pueden acceder todos aquellos dispositivos que dispongan de una conexión a internet.

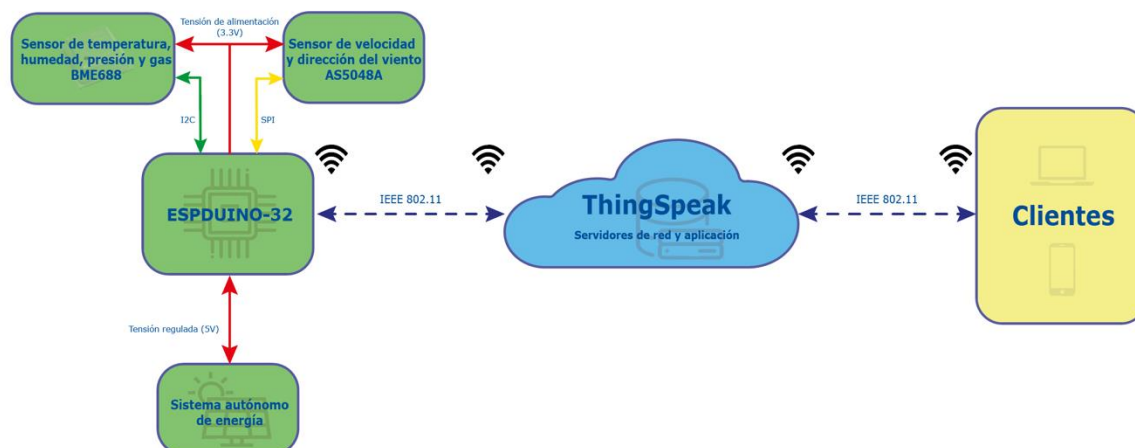


Ilustración 49. Diagrama de bloques de la estación meteorológica.

Para la lectura de los valores de temperatura, humedad, presión y gas se emplea la placa de desarrollo PI3G BME688 Breakout Board V1.1, la cual integra el sensor BME688 y se comunica por medio de I2C. La placa funciona a 3.3V, por lo que es posible conectarla directamente a la ESPDUINO-32.

El sensor de gas que integra el BME688 [23] cumple con la norma estándar ISO16000-29 denominada “Métodos de testeo para detección de COV”. La intensidad de la señal suele ser proporcional a la reactividad de los gases a los que se encuentra expuesto. El sensor reacciona a la mayoría de los compuestos volátiles, así como a muchos gases que contaminan el aire, a excepción de aquellos gases que son químicamente inertes como el nitrógeno.

A diferencia de los sensores selectivos para un componente específico, el BME688 es capaz de medir la suma de COV’s/contaminantes en el aire circundante. Esto se traduce a que es capaz de detectar, por ejemplo, las emisiones de basura, niveles elevados de COV debidos a la combustión, entre otros. El sensor tiene tres modos de funcionamiento: el modo *sleep*, modo forzado y modo paralelo. En el primero el sensor permanece inactivo con un consumo mínimo de energía, en el segundo realiza una lectura de los cuatro parámetros (temperatura, humedad,

presión y resistencia al gas) y luego cambia al modo *sleep*. En el tercero realiza la lectura de los cuatro parámetros las veces que se lo indique.

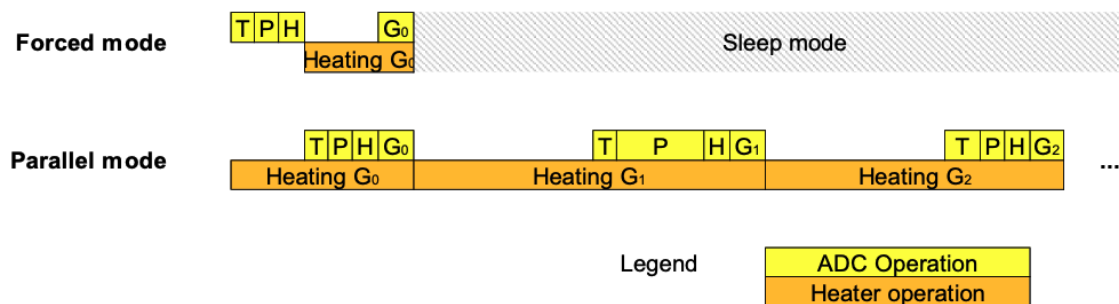


Ilustración 50. Funcionamiento de ADC y del calentador del sensor de gas [23].

La resolución de los datos de la temperatura y presión dependen del filtro IIR (*Infinite Impulse Response* o Respuesta infinita al impulso) y de la configuración del sobre muestreo. Cuando se encuentra activado el filtro, la resolución es de 20 bits y cuando está desactivado es de 16 bits. Por otra parte, la resolución de la humedad es de 16 bits.

Para la lectura de la velocidad y dirección del viento se ha diseñado un anemómetro de cazoletas asimétrico con base en el encoder magnético rotativo absoluto AS5048, en específico el modelo A. Este se comunica mediante el protocolo SPI a la placa de desarrollo. Se ha elegido este sensor debido a su elevada resolución de 14 bits, así como su elevada velocidad de comunicación. El SPI [28] se activa cuando el CS<sub>n</sub> se pone a nivel bajo, permitiendo leer el valor digital de la entrada MOSI con cada flanco descendente del CLK y escribe su salida MISO con el flanco ascendente. La señal de interfaz del AS5048A cuando se encuentra en el modo de 4 hilos, modo de conexión 1, solo admite el modo de funcionamiento de esclavo. Por lo tanto, el CLK para la comunicación, así como la señal CS<sub>n</sub> son proporcionados por la placa de desarrollo. Los datos se envían y leen con el primer MSB (Most Significant Bit – Bit más significativo). En la hoja de datos se indica que la velocidad de comunicación del periodo del reloj serial ( $T_{CLK}$ ) debe ser como mínimo 100ns, ergo, puede funcionar con una frecuencia máxima de 10MHz.

La placa de desarrollo elegida es la ESPDUINO-32, está inspirada en los módulos de desarrollo ESP32, es de bajo coste y consumo, aporta facilidad a la hora de programar ya que es compatible con el IDE (entorno de desarrollo) de Arduino y además su uso es masivo por lo que existe variedad de soporte en la web. En la siguiente tabla se resumen sus características:

*Tabla 17. Resumen características de la ESP32 [22]*

Características	Valor
MCU	Xtensa Dual-Core 32 bit LX6 600 DMIPS
Memoria	ROM: 448 KB Flash: externa SPI ampliable hasta 16MB SRAM: 520 KB y 16KB en RTC
WiFi	802.11 b/g/n - HT40
Bluetooth	4.2 y anteriores - BLE
Interfaces	SPI: 4 I2C: 2 I2S: 2 UART: 2
Velocidad de reloj	160MHz - 240MHz
GPIO (Entradas y salidas de propósito general)	34
ADC	12-bit
Tensión	2.3V - 3.6V

Puesto que el AS5048A es empleado para medir la velocidad y dirección del viento, previo a su integración en el prototipo final de la estación se realizará un estudio individual del diseño del anemómetro asimétrico. El estudio consiste en recopilar, analizar y procesar la señal obtenida del sensor empleando el entorno de desarrollo LabVIEW y MATLAB. Para la conexión entre la placa de desarrollo y Labview se utiliza el protocolo UDP, la información se guarda en un archivo con formato de libro de Excel para posteriormente importarlo a MATLAB y realizar el análisis de la señal. Una vez calibrado el anemómetro asimétrico, se procede a implementarlo al prototipo final.

Integrados los dos sensores a la placa de desarrollo, se envía la información periódicamente a la plataforma ThingSpeak por medio del protocolo IEEE 802.11, denominado comúnmente WiFi.

## 5.3. DISEÑO DE ANEMÓMETRO DE CAZOLETAS ASIMÉTRICO

Este apartado se dedica a explicar a detalle el desarrollo de un anemómetro de cazoletas asimétrico de bajo coste para medir la velocidad y dirección del viento.

Para el diseño del dispositivo se ha tomado como punto de partida el anemómetro de tres cazoletas debido a las excelentes propiedades físicas que presenta, mismas que se han mencionado anteriormente en el apartado 4.2.1.

El diseño se basa en la modificación del diámetro de una de las tres cazoletas, esta es la razón por la cual se lo denomina anemómetro asimétrico. Al tratarse de un nuevo concepto se prevé variaciones en la precisión y exactitud de los resultados.

El desarrollo del anemómetro asimétrico puede realizarse por medio de tres enfoques: analítico, experimental y numérico. El método elegido es el experimental partiendo de las bases teóricas. Este enfoque permite la construcción física del anemómetro a una escala real y por medio de ensayos se puede obtener mediciones detalladas del fenómeno de interés: el viento.

El diseño del anemómetro está conformado por dos partes: preparación del equipo y ensayos y verificaciones.

### 5.3.1. Preparación del equipo

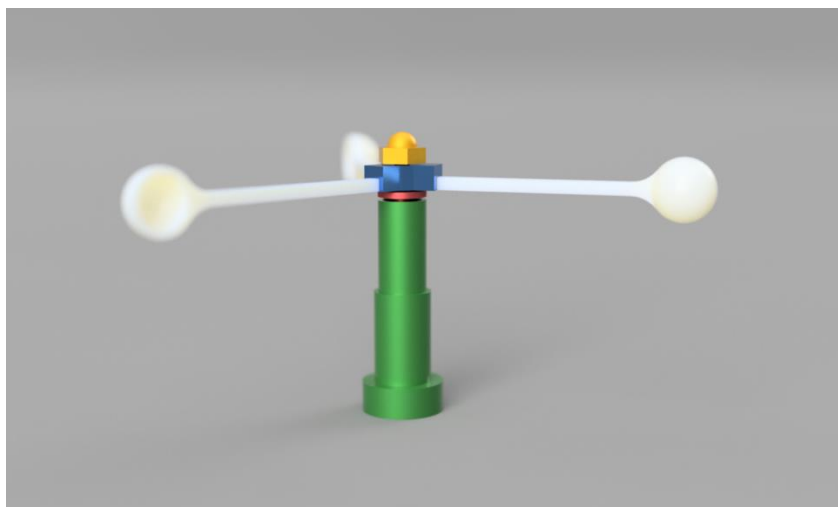
El anemómetro asimétrico se recrea a partir del siguiente anemómetro de tres cazoletas.



*Ilustración 51. Anemómetro de tres cazoletas. (izq.) Vista general; (der.) Vista superior del rotor. La altura es de 85mm.*

El dispositivo está fabricado en plástico, a excepción de sus partes móviles mecánicas que son de metal.

Para indicar sus componentes de una mejor manera se ha procedido a replicar su diseño (con ligeras variaciones) en un software CAD. En la siguiente ilustración se presenta una vista en 3D.



*Ilustración 52. Anemómetro de 3 cazoletas 3D diseñado en el software CAD Fusion 360.*

Los componentes que lo integran se indican a continuación:

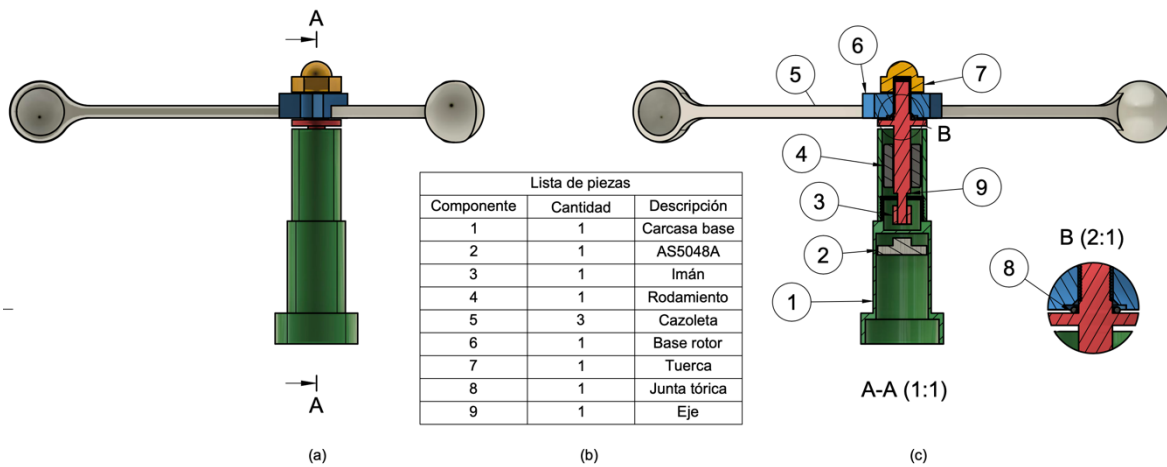
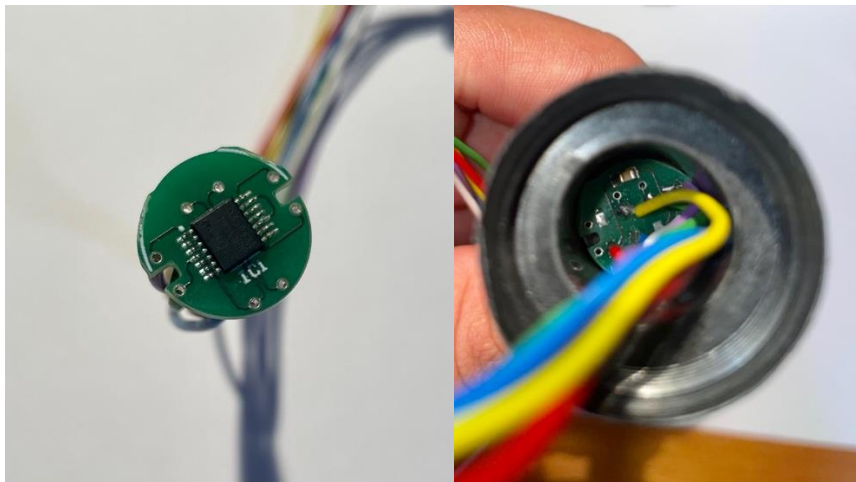


Ilustración 53. Ensamblaje virtual de anemómetro de 3 cazoletas: (a) Ensamblaje completo; (b) Lista de piezas; (c) Vista en sección (A-A).

En la Ilustración 53 se observan 9 componentes diferenciados. El componente 1 es la carcasa base, la cual está integrada a su vez por dos piezas: carcasa superior e inferior. Las dos carcasas se ajustan por medio de un sistema de sujeción de rosca. En el interior de la carcasa superior se encuentra ajustado un rodamiento axial sobre el cual se sujeta el eje. En el extremo superior del eje va ubicada la base del rotor y sobre esta las tres cazoletas simétricas, a su vez el rotor se asegura por medio de una tuerca. Este sistema permite remover el rotor con facilidad. Asimismo, en el extremo inferior del eje se ajusta un imán. Por otra parte, la carcasa base es completamente hueca, esto es debido a que en su interior debe ir colocado el sensor AS5048A, el cual está integrado en una PCB circular.



*Ilustración 54. Encoder AS5048A. (izq.) PCB; (der.) Ubicación en el interior de la base del anemómetro.*

Cuando el rotor gira, el eje gira y por ende el imán. El giro del imán crea una variación en el campo magnético, mismo que será captado y procesado por el sensor AS5048A para posteriormente transmitir los datos a la placa de desarrollo vía SPI.

Por medio del estudio mencionado en [20], se determinó la Ecuación (6), misma que declara la contribución del área frontal de las copas,  $S_c$ , a la pendiente de la función de transferencia. Debe recalcar que en este artículo se realizó la variación del radio de las copas ( $R_c$ ) y la distancia del eje al centro de las copas ( $R_{rc}$ ), manteniendo las tres copas siempre simétricas.

En la Ecuación (8) se define un modelo analítico para un anemómetro de tres cazoletas simétricas, en el cual se observa que el par aerodinámico viene influenciado entre otros parámetros, por el área frontal de las cazoletas  $S_c$ , además de la distancia del eje al centro de las copas  $R_{rc}$ .

Cuando un anemómetro conserva sus tres cazoletas simétricas, el giro del rotor genera que el campo magnético producido sea uniforme. Esto se traduce a una forma de onda uniforme en periodo y amplitud. Sin embargo, en un anemómetro asimétrico se altera los valores de  $S_c$  y  $R_{rc}$



de una de las copas, por lo que se tiene como expectativa obtener una perturbación en el giro del rotor y por ende en el campo magnético, obteniéndose una forma de onda no uniforme. Se plantea la hipótesis de que esta perturbación cambie en función de la dirección del viento.

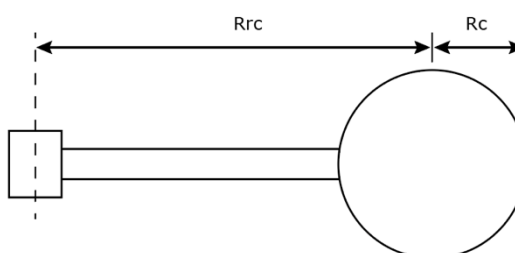
Anteriormente se mencionó que el anemómetro de tres cazoletas cuenta con un sistema de sujeción de rosca para el rotor, por lo que se ha considerado oportuno emplear la carcasa base, así como los componentes móviles que aloja en su interior y únicamente centrarse en el rediseño del rotor para su posterior impresión en 3D.

Se realizó dos diseños del rotor manteniendo dos cazoletas iguales y una diferente. Las dimensiones empleadas en los diseños se indican en la siguiente tabla.

*Tabla 18. Valores de Rc y Rrc de rotores diseñados*

Diseño	Cazoleta/as	Rc (mm)	Rrc (mm)
1	normales	14	60
	amorfa	10	55,5
2	normales	20	90
	amorfa	10	

Donde Rc y Rrc corresponden a las siguientes medidas.



En la Tabla 18 se observa que el radio (Rc) de las copas normales del diseño 2 es mayor respecto al diseño 1, y de igual forma la distancia (Rrc) es significativamente mayor en el diseño 2. El motivo de un radio (Rc) y distancia (Rrc) mayor es conseguir un mayor empuje por parte del flujo de viento en las copas normales respecto de la copa amorfa, esto se deriva en un aumento del par aerodinámico según la Ecuación (8).

El diseño del rotor fue realizado por partes, obteniendo en total 4 piezas: la base del rotor, dos cazoletas simétricas y una cazoleta amorfa. El motivo para separarlo en piezas es la impresión en 3D. Debido a que el rotor incluye componentes con formas variadas, resulta complicado imprimir una única pieza en conjunto, además, se requiere al inicio del proceso de adición que la superficie del diseño sea plana debido a que actúa como base para el resto del proceso.

El material empleado en la impresión 3D es el filamento PETG (Polietileno Tereftalato modificado con Glicol), una variación del plástico PET el cual es el más utilizado en el mundo. Se ha elegido este material debido a sus especificaciones.

*Tabla 19. Especificaciones del filamento PETG [39]*

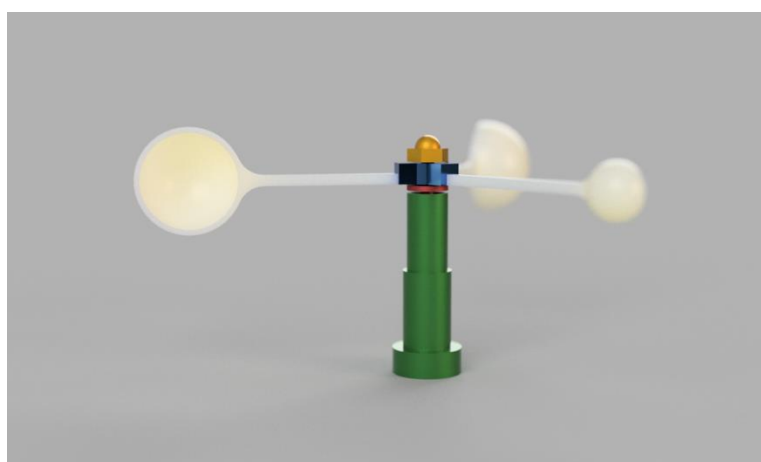
Especificación	Propiedad	Valoración
Características	Durabilidad	Alta
	Costos de material	Bajo
	Fuerza	Alta
	Flexibilidad	Baja
Resistencia	Resistencia al calor	Media
	Resistencia química	Alta
	Resistencia a la fatiga	Alta
	Resistencia al agua	Alta

Una vez impresas las piezas se procede a ensamblar los rotores. Se presenta a continuación una comparación con el rotor simétrico.



*Ilustración 55. Comparación de rotores asimétricos impresos en 3D vs. un rotor simétrico. (izq.) Rotor simétrico; (centro) Diseño 1; (der.) Diseño 2.*

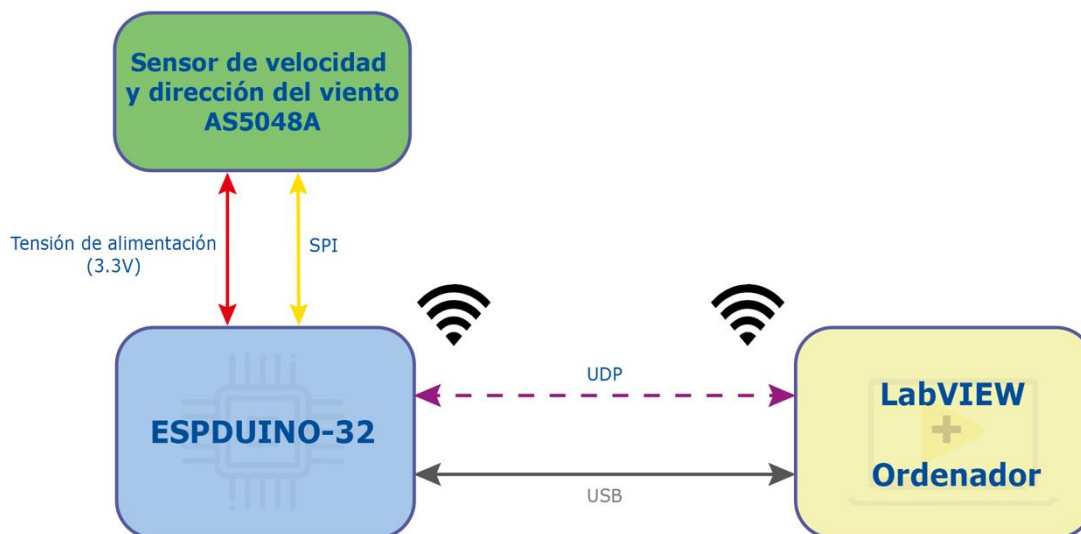
El anemómetro asimétrico configurado con el diseño 2 se observaría de la siguiente manera.



*Ilustración 56. Anemómetro asimétrico: montaje virtual 3D del diseño 2 en software CAD.*

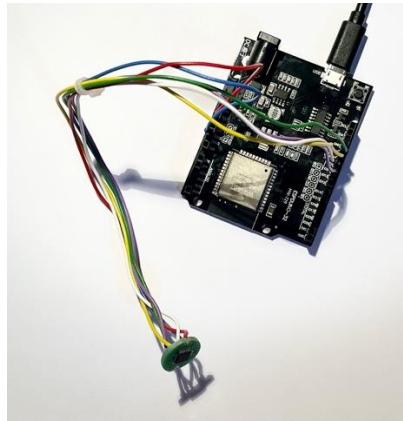
Con la parte mecánica del anemómetro preparada, se procede a realizar la comunicación entre el sensor AS5048A, la placa de desarrollo ESPDUINO-32 y LabVIEW. El utilizar la placa ESPDUINO-32 aporta ventaja en la manipulación del sensor AS5048A ya que no se recurre a emplear una placa de prototipo.

Las conexiones por realizar en el sistema se indican en el siguiente diagrama de bloques.



*Ilustración 57. Diagrama de bloques de conexión entre AS5048A, ESPDUINO-32 y Labview.*

Para implementar las comunicaciones se emplea un ordenador. Por un lado, a este se conecta vía USB la placa de desarrollo ESPDUINO-32, y a su vez, esta se comunica con el sensor AS5048A mediante el protocolo SPI. El ordenador permitirá subir el código de programación a la placa de desarrollo por medio del IDE de Arduino, además proveerá una tensión de alimentación. Por otra parte, en el ordenador se emplea un código desarrollado en el entorno de desarrollo de LabVIEW que permite recibir la información enviada desde la placa ESPDUINO-32 a través del protocolo UDP. En caso de que no sea posible proveer energía a la ESPDUINO-32 por medio del ordenador, se puede utilizar una fuente de 5-12V, no siendo necesario la conexión USB puesto que el envío de datos se realiza de manera inalámbrica.



*Ilustración 58. Conexión ESPDUINO-32 y AS5048A.*

### 5.3.1.1. Comunicación AS5048A y ESPDUINO-32

Por medio del entorno de desarrollo de Arduino se realiza un código de programación el cual se carga en la placa ESPDUINO-32. Este código permite la comunicación con el encoder AS5048A. Además, incluye las instrucciones para el envío de paquetes de datos al entorno de desarrollo de LabVIEW. En el siguiente diagrama UML se describe el comportamiento del *Setup* implementado:

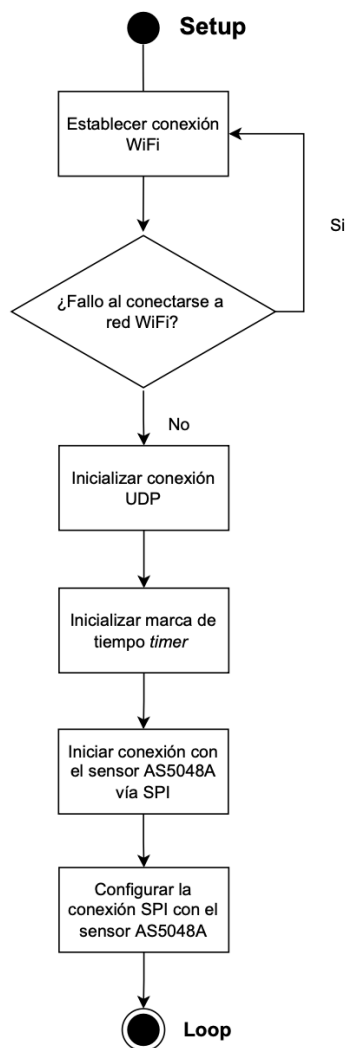


Ilustración 59. Diagrama UML: Setup de la comunicación AS5048A, ESPDUINO-32 y LabVIEW.

Los pasos del diagrama UML son los siguientes:

- Establecer la conexión a una red WiFi debido a que como se mencionó en el apartado 4.2.5.3, el protocolo UDP funciona sobre IP. Mientras no exista conexión WiFi el software entra en un bucle.
- Inicializar la conexión UDP eligiendo el puerto 7000 como puerto de origen (el puerto 7001 es el puerto de destino empleado posteriormente).
- Crear la marca de tiempo *timer* para guardar en microsegundos el instante en el cual se inició la conexión UDP.

- Iniciar la conexión y configuración SPI entre la ESPDUINO-32 y el AS5048A. La velocidad máxima de comunicación establecida es de 1MHz, se emplea el modo de conexión SPI 1 por lo que se inicia desde el primer bit más significativo.

Una vez finaliza el *Setup*, se da inicio al *Loop*, que es la parte del programa que se ejecuta en bucle. Su comportamiento se indica en el siguiente diagrama UML.

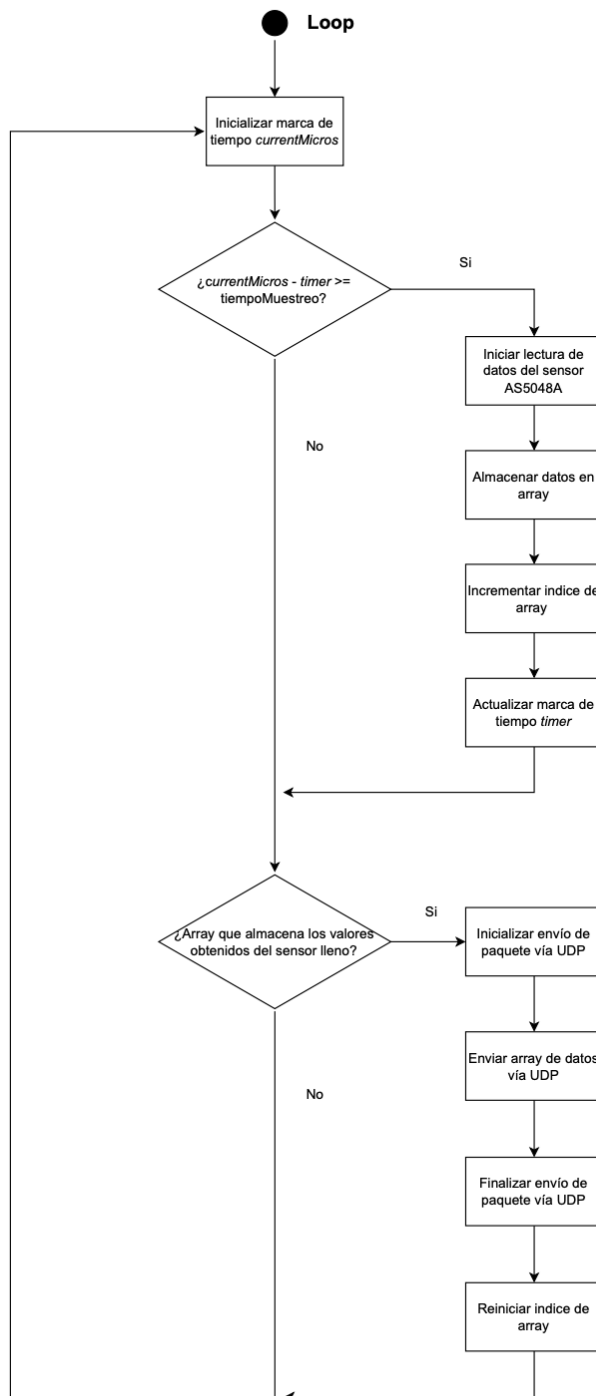


Ilustración 60. Diagrama UML: Loop en la comunicación AS5048A, ESPDUINO-32 y LabVIEW

En la Ilustración 60 el diagrama UML presenta los siguientes pasos:

- Crear una marca de tiempo *currentMicros*, esta guarda en microsegundos el instante desde que se inicia el *Loop*.



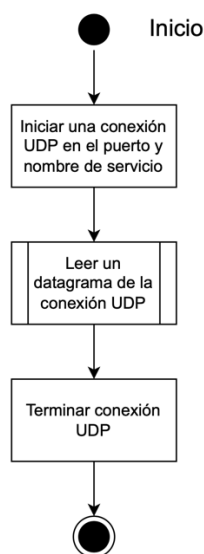
- Comparar si:  $currentMicros - timer \geq tiempoMuestreo$ . Esta comparación permite implementar el tiempo de muestreo deseado para la lectura de los datos del sensor. El tiempo de muestreo es un valor constante, se eligió una frecuencia de muestreo de 200Hz, que equivale a 5ms o 5000 microsegundos. Si no se cumple el tiempo de muestreo se salta al siguiente paso.
- Si se cumple el tiempo de muestreo se procede a:
  - Realizar la lectura del sensor AS5048A.
  - Almacenar la información en un array (vector). El tamaño del array es de 10 posiciones, y cada nuevo valor obtenido del encoder utiliza una posición. Para saber la posición se inicializa un índice desde 0, el cual incrementa en una unidad según se almacenan los valores en el array.
  - Actualizar la marca de tiempo *timer* para poder realizar una posterior comparación y ceñirse al tiempo de muestreo.
  - Consultar si el array (de 10 posiciones) se ha completado, esto se determina al comparar el índice con el número 10 ya que si son iguales indicaría que el ultimo valor ingresado en el array se ubica en la última posición. En caso de que no esté completo el array, se repite el bucle *Loop*.
- Si se ha completado el array se procede a:
  - Inicializar el envío del paquete vía UDP empleando la dirección IP del WiFi hacia el puerto de destino 7001.
  - Enviar un datagrama con el paquete de datos (array).
  - Finalizar el envío UDP.
  - Reiniciar el índice a 0 para nuevamente volver a realizar el ciclo.

### 5.3.1.2. Comunicación ESPDUINO-32 y LabVIEW

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas con un lenguaje de programación visual. Cada programa VI de LabVIEW consta de dos partes diferenciadas: el panel frontal y el diagrama de bloques. El panel frontal es la interfaz del usuario, se utiliza para interactuar con el programa cuando se está ejecutando. En cambio, el diagrama de bloques es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad. [40]

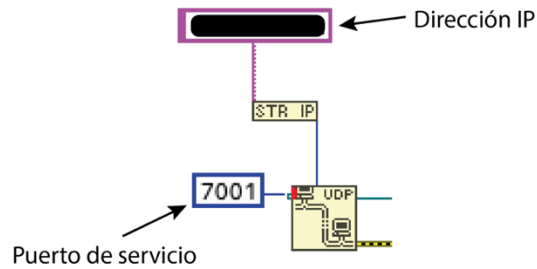
#### 5.3.1.2.1. Diagrama de bloques

El funcionamiento del código en el diagrama de bloques implementado en LabVIEW para el procesamiento de datos se resume en el siguiente UML.



*Ilustración 61. Diagrama UML: funcionamiento conceptual de LabVIEW.*

El diagrama de bloques inicia abriendo el puerto UDP, para ello se asigna el puerto de servicio 7001 que es donde se reciben los datos enviados desde la ESPDUINO-32. Además, se indica la dirección IP de la red WiFi (debe ser la misma dirección que se utiliza en el código de la ESPDUINO-32).



*Ilustración 62. Inicio de conexión UDP en LabVIEW.*

Una vez abierto el puerto UDP, dentro de un bucle *While* se realiza la lectura del datagrama y se procesa los datos. Leído el datagrama, se cierra la conexión con el puerto UDP.

El código implementado en el apartado de la lectura del datagrama se indica en el diagrama UML de la Ilustración 63.

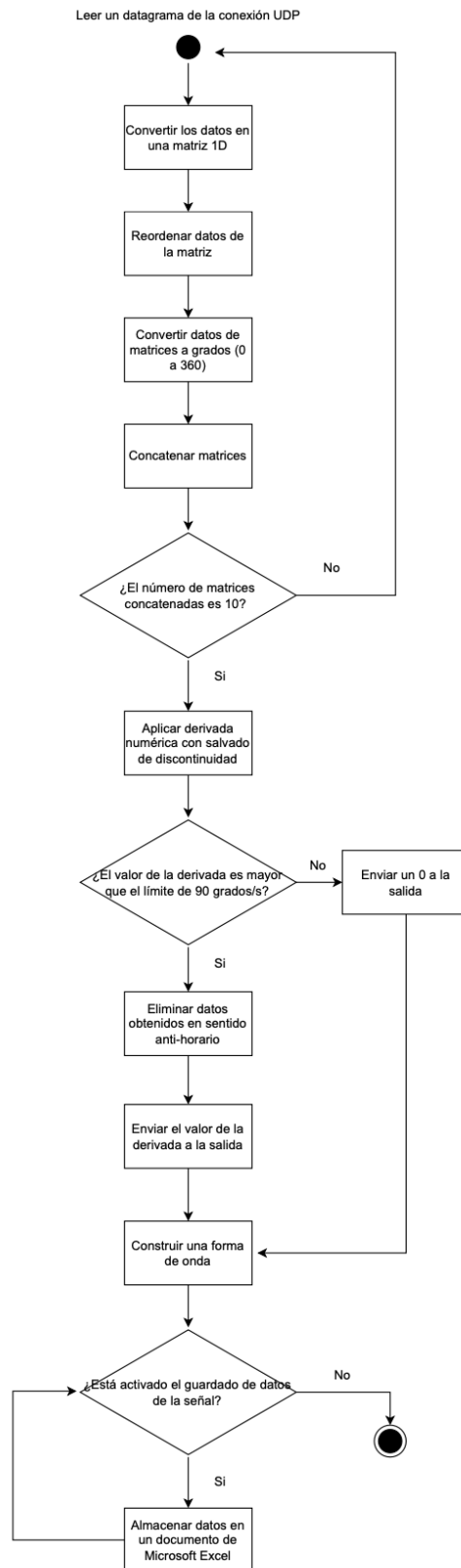
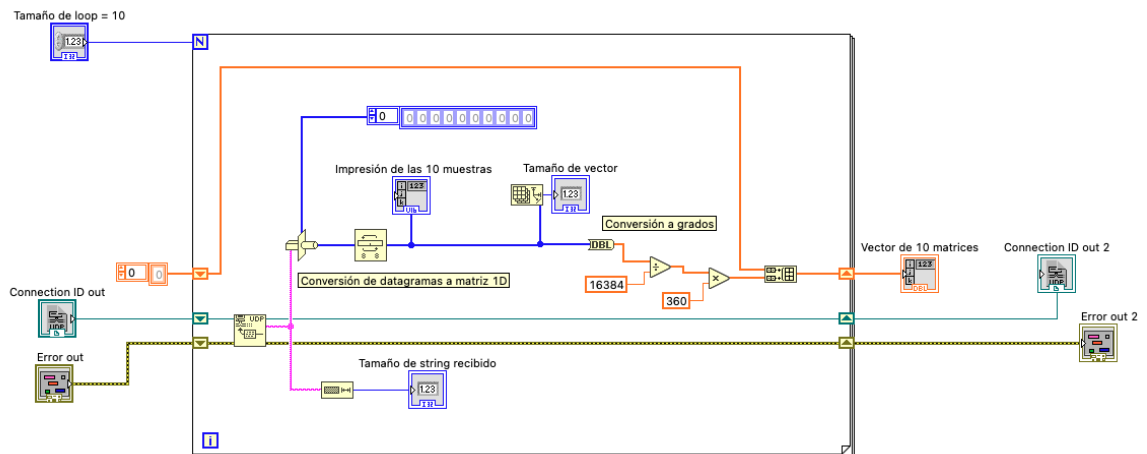


Ilustración 63. Diagrama UML: Procesamiento de datos en LabVIEW.

El diagrama UML inicia con la lectura del datagrama enviado desde la ESPDUINO-32, los pasos siguientes son:

- Convertir los datos en una matriz 1D con el fin de agruparlos y reordenarlos.
- Debido a que los valores de lectura del sensor AS5048A van de 0 a  $2^{14}$ , se procede a convertirlos a grados (0 a 360).
- Para poder detectar las perturbaciones en el anemómetro asimétrico es necesario un elevado número de muestras. La ESPDUINO-32 tiene un tiempo de muestreo de 5ms, que corresponden a obtener 200 muestras por segundo. En LabVIEW se emplea el mismo tiempo de muestreo. Para incrementar el número de muestras a analizar en el programa se concatenan las matrices hasta alcanzar un valor de 10. Esto con el fin de obtener paquetes de 100 muestras para posteriormente procesar. Para concatenar las 10 matrices se aplica un bucle.



*Ilustración 64. Bucle de adecuación de datagrama de datos en LabVIEW.*

- Empleando la expresión (14) de derivada numérica se procede a obtener la derivada de las muestras, esto corresponde a la velocidad de giro del rotor en unidades de grados/s. Debido a que el encoder AS5048A indica la posición absoluta, cuando existe un cambio de 0 a 360 se produce una discontinuidad en la salida,

obteniendo una alteración en velocidad y señal sinusoidal. En la siguiente tabla se indican los resultados obtenidos cuando existe discontinuidad.

Tabla 20. Discontinuidad en la salida aplicando la expresión (14) de derivada numérica.

$f(x_0 - h)$	$f(x_0)$	$f(x_0 + h)$	$h$	$f'(x_0)$
2	1	0	0,005	-200
1	0	360		72000
0	360	359		-200

Debido a la disposición de las cazoletas, el rotor gira en sentido horario. En la Tabla 20 se observa que los valores del encoder van de 360 a 0. Con valores continuos se obtiene como resultado -200 grados/s. Sin embargo, cuando existe la discontinuidad se alcanzan los 72000 grados/s, un valor erróneo. Para solventar este inconveniente se implementa un código que salve la discontinuidad, permita obtener resultados positivos a la salida y elimine aquellos valores de derivada del orden de 72000 grados/s o superior.

- Para obtener lecturas a la salida se establece un umbral mínimo de velocidad de 90 grados/s, este umbral asegura que exista una velocidad de viento significativa y puede interpretarse como la velocidad necesaria para que el rotor gire 90 grados en un segundo. Si no se supera el umbral de velocidad, se devuelve a la salida un 0. En caso de superar el umbral, se elimina los valores obtenidos en sentido anti-horario con una puerta de error.
- Enviar el valor obtenido de la derivada a la salida.

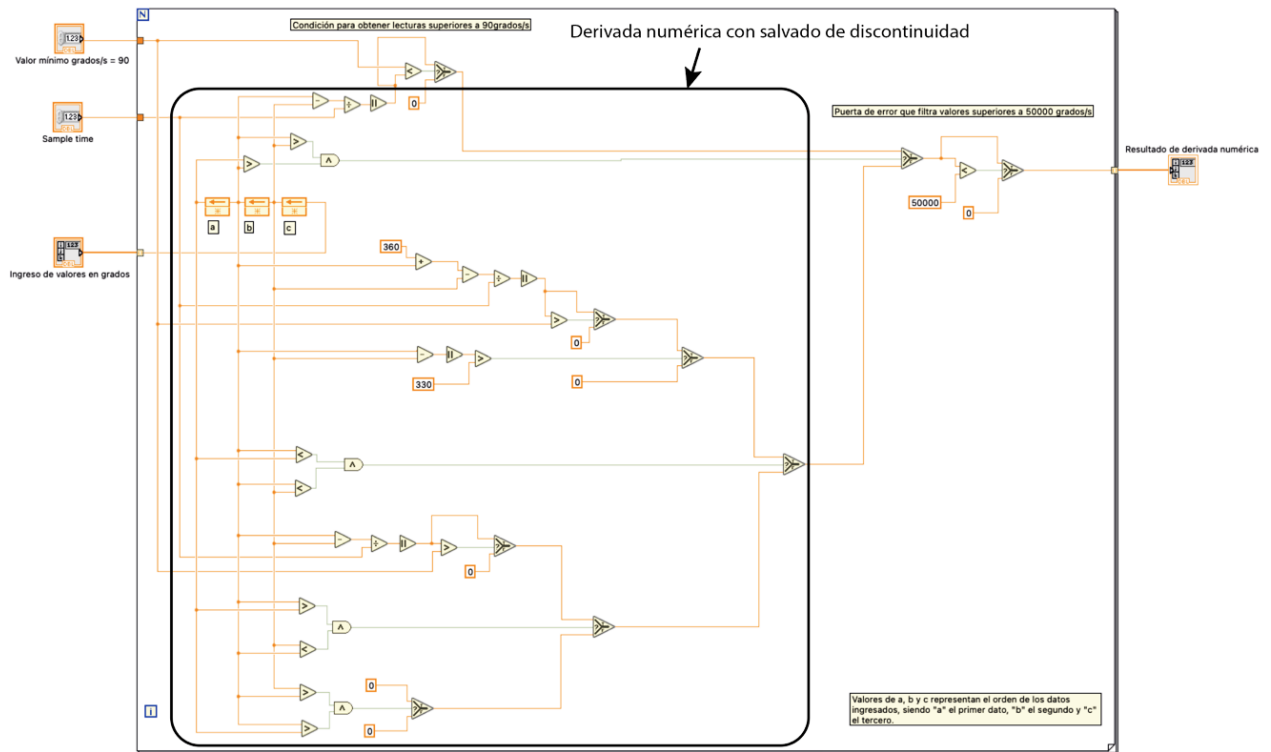


Ilustración 65. Derivada numérica con salvado de discontinuidad, umbral mínimo y puerta de error en LabVIEW.

- Construir una forma de onda para visualizarla en el panel frontal.

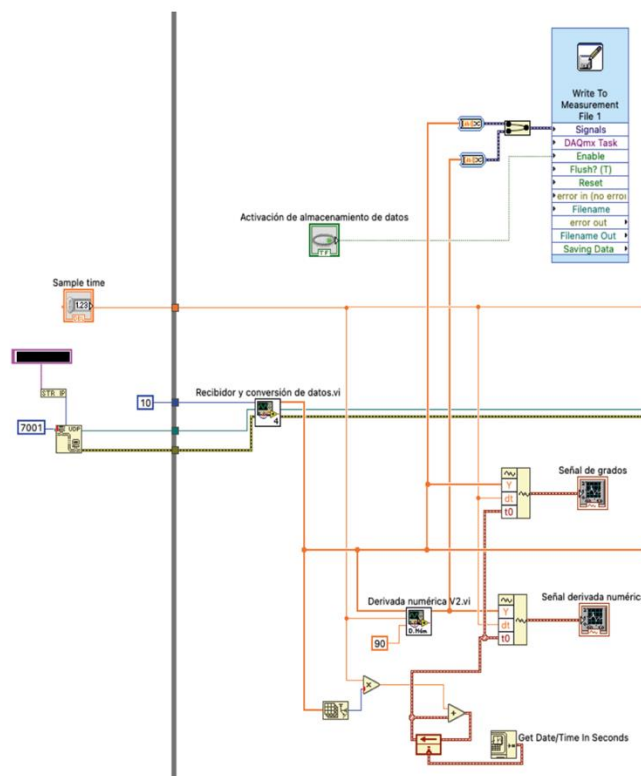


Ilustración 66. Creación de formas de ondas y guardado de datos en LabVIEW.

Cuando se activa el almacenamiento de datos, la información se guarda en el directorio designado a la hora de configurar el bloque *Write To Measurement File 1*.



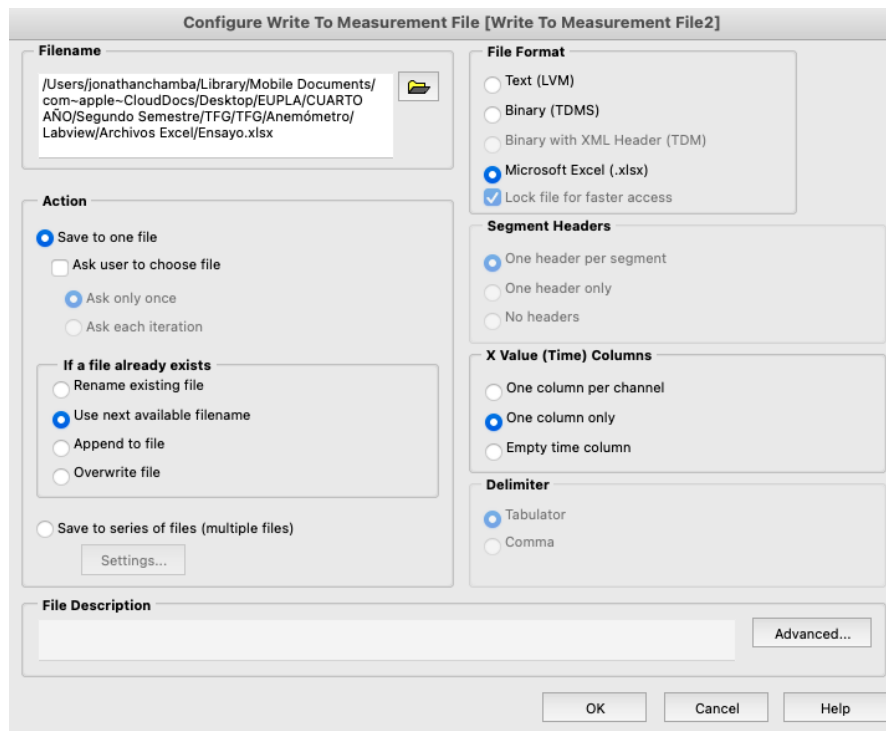


Ilustración 67. Interfaz de configuración para el almacenamiento de datos en LabVIEW.

- Consultar si el guardado de datos de la señal esta activado, en caso de que este activado se procede a almacenarlos en un fichero de Microsoft Excel, caso contrario, se finaliza el proceso. El almacenamiento de los datos en este formato permite posteriormente analizar e interpretar los resultados.

#### 5.3.1.2.2. Panel frontal

El panel frontal permite visualizar al usuario las formas de onda de los grados y el resultado de la derivada numérica. También implementa la configuración del tiempo de muestreo y la activación y desactivación del almacenamiento de datos.

En la Ilustración 68 se presenta la señal obtenida aplicando la derivada numérica sin salvado de discontinuidad, en donde se aprecia claramente un cambio súbito de la señal en el paso de 0 a 360 grados. Por otra parte, se observa que la posición angular genera una onda de diente de sierra.

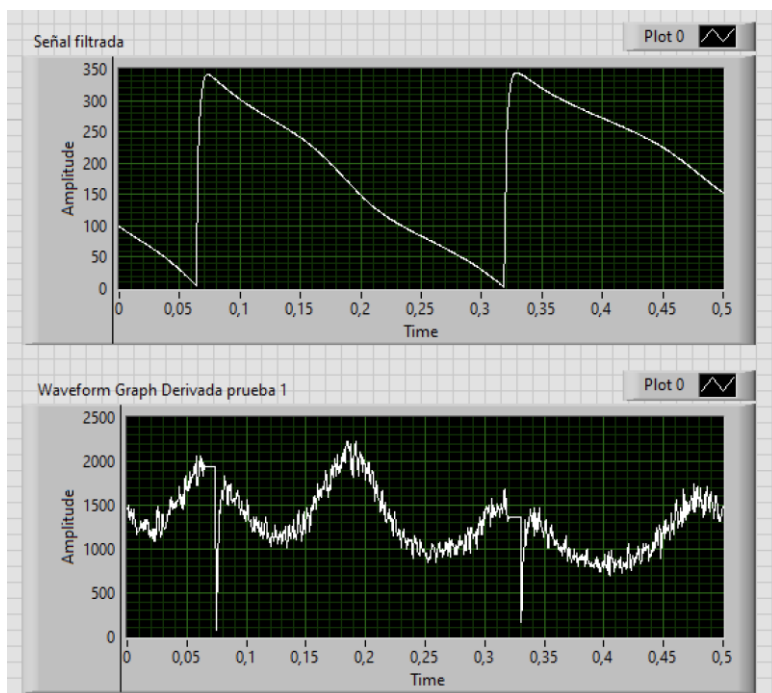


Ilustración 68. Formas de onda en LabVIEW: (superior) Posición angular en grados; (inferior) Derivada numérica sin salvado de discontinuidad.

En cambio, en la Ilustración 69 se presenta una señal de velocidad continua gracias a la aplicación de la derivada numérica. Además, indica una forma de onda de dientes de sierra más estable. La variación de la forma de onda de la posición angular, y por ende de la velocidad, viene influenciado por causas que se detallará más adelante.

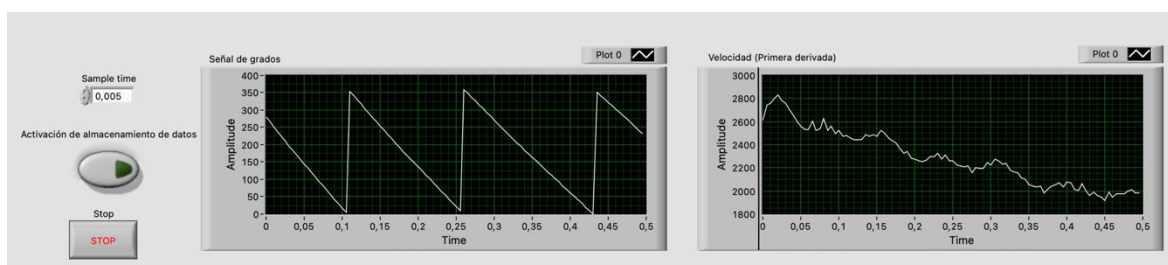


Ilustración 69. Interfaz de usuario en LabVIEW.

### 5.3.2. Ensayos y verificaciones

Los anemómetros se calibran formalmente por medio de un túnel de viento. Se colocan en una cámara de ensayos y se los somete al flujo de aire que el túnel genera. Sin embargo, debido a la imposibilidad de contar

con un túnel de viento se ha optado por recurrir al uso del viento aparente.

El viento aparente es el viento que nota un observador que está en un objeto en movimiento (coche, bicicleta, barco, ...). Y se opone al "viento real", que es el viento percibido por el mismo observador en reposo. [41] Se ha empleado un vehículo como objeto en movimiento.

Debe mencionarse que la metodología empleada en los posteriores ensayos no es la más apropiada debido a los errores sistemáticos y accidentales que pueden ocurrir a causa de no tener un control preciso sobre el entorno, sin embargo, es la metodología que se encuentra al alcance con los recursos disponibles.

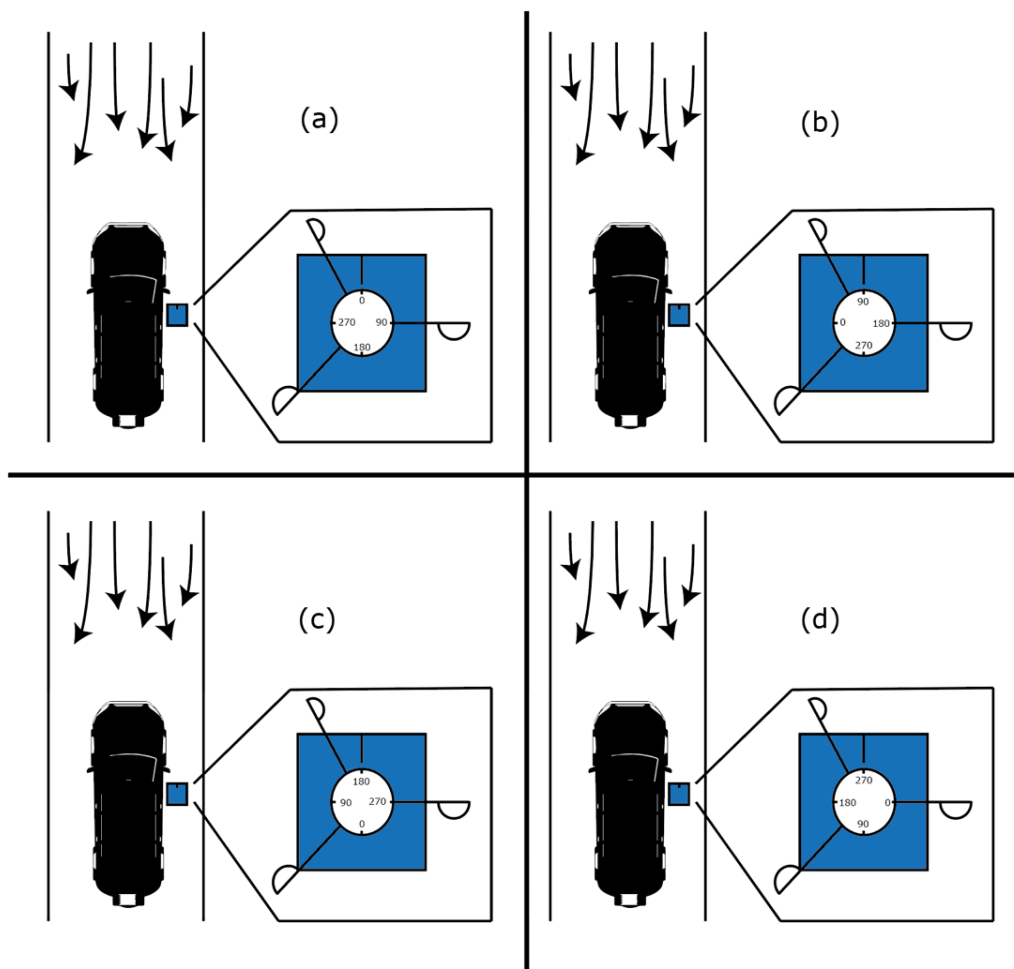
### 5.3.2.1. Primer ensayo

El objetivo del primer ensayo consistía en determinar si existe influencia de la copa asimétrica en la señal obtenida del anemómetro. Para este ensayo se empleó el diseño 1 y 2 del rotor.

Para llevarla a cabo se consideró la siguiente metodología:

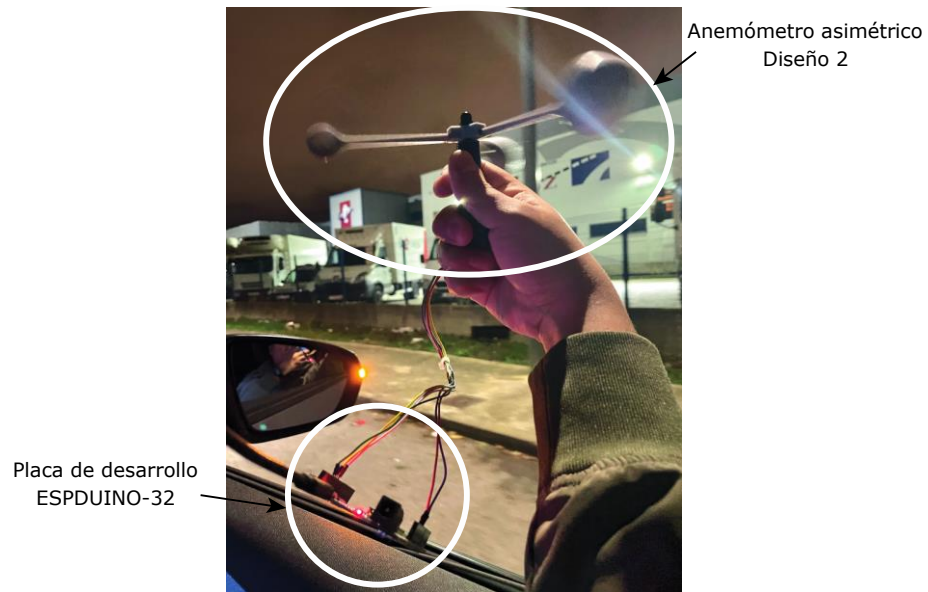
- Ubicar el vehículo en una carretera recta.
- Ajustar el anemómetro asimétrico de tal manera que su orientación señale el punto cardinal a ensayar y esté alineado al sentido de avance del vehículo. Para el ajuste se mantiene inmóvil el rotor mientras se gira la base del anemómetro hasta observar en LabVIEW el grado de dirección correspondiente a ensayar: Norte: 0 grados; Este: 90 grados; Sur: 180 grados; Oeste: 270 grados.
- Sacar el anemómetro por la ventana y hacer rodar el vehículo a una velocidad constante.
- Almacenar los datos en un fichero Excel.

En la siguiente ilustración se presenta como ejemplo la disposición del anemómetro asimétrico para los distintos puntos cardinales.



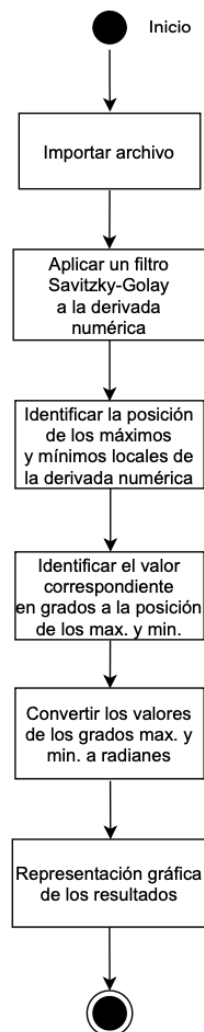
*Ilustración 70. Disposición de anemómetro asimétrico para ensayo de los cuatro puntos cardinales. (a) Norte; (b) Este; (c) Sur; (d) Oeste*

En la Ilustración 70 se observa que, para la medición de los diferentes puntos cardinales, el anemómetro debe orientarse a la dirección correspondiente de ensayo y a su vez ubicarse de frente al flujo del aire.



*Ilustración 71. Disposición de anemómetro asimétrico en una prueba de campo.*

Recopilada la información se la importó a MATLAB donde por medio de las distintas herramientas que ofrece se realizó un código de programación para procesar las señales. El código se explica en el siguiente diagrama UML:



*Ilustración 72. Diagrama UML: procesamiento de información del Ensayo 1 en Matlab.*

El diagrama UML consiste en lo siguiente:

- Aplicar un filtro Savitzky-Golay a la señal de la velocidad en grados/s. Este es un filtro de suavizado de respuesta al impulso finito (FIR) que permite obtener una señal más legible para analizar e interpretar.
- Identificar los máximos y mínimos locales de la señal de velocidad en cada periodo de vuelta.
- Identificar la posición angular de los máximos y mínimos locales.
- Convertir la posición angular de los máximos y mínimos a radianes.

- Graficar las señales de velocidad (grados/s) y de posición angular absoluta, así como la posición angular de los máximos y mínimos en un plano polar.

### 5.3.2.2. Segundo ensayo

El segundo ensayo tenía como objetivo recopilar los datos necesarios para la calibración de la velocidad y dirección del viento. Para este ensayo se utilizó únicamente el diseño 2 del rotor debido a que presentaba una mayor asimetría en su diseño.

En primer lugar, la velocidad se calibró comparando los valores de la derivada numérica del anemómetro asimétrico con un sistema de referencia.

En segundo lugar, para determinar la dirección del viento fue necesario crear un sistema de clasificación en función de las posiciones angulares de los máximos locales a diferentes direcciones.

En un principio se intentó emplear la velocidad del vehículo como sistema de referencia. Sin embargo, debido a las fluctuaciones de las corrientes de aire se determinó por medio de un anemómetro comercial que la velocidad del vehículo no correspondía con la velocidad real del flujo de aire.

Debido a lo anterior se optó por utilizar el anemómetro comercial como nuevo sistema de referencia y así poder obtener una mejor calibración.

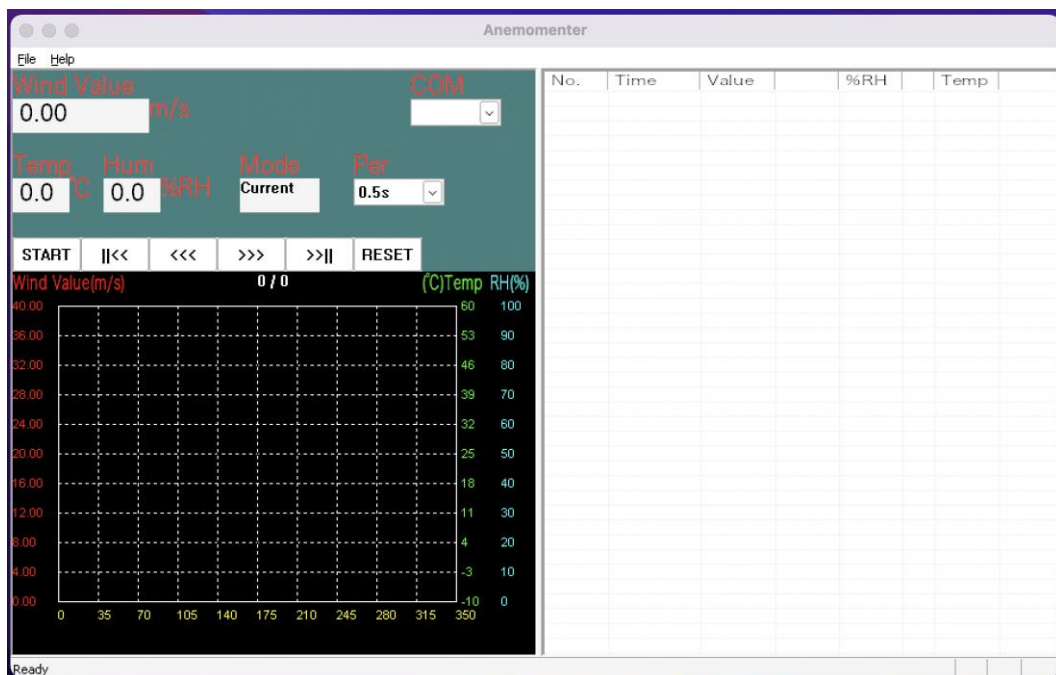
El anemómetro comercial es el BT-866A, el cual tiene las siguientes características:

Parámetro	Rango	Resolución	Precisión
Velocidad de viento	0,80 – 30,00 m/s	0,01 m/s	±2,0 %
	1,40 – 108,00 Km/h	0,01 m/h	±2,0 %
Temperatura	-10°C – 60°C	0,1°C	±1,5 °C
Humedad relativa	20 – 80 % RH	0,1 % RH	±3 % RH a 25°C



*Ilustración 73. Anemómetro digital BT-866A.*

Además, el BT-866A dispone de conexión USB y un software específico para la visualización y recopilación de información por medio de un ordenador.



*Ilustración 74. Interfaz de usuario del software Anemometer.*



#### 5.3.2.2.2. Recolección de información

La recolección de información es la base de la calibración del anemómetro asimétrico debido a que a partir de ella se obtendrá la ecuación de la recta (4) y el sistema de clasificación.

El ensayo se realizó a las siguientes velocidades constantes: 20km/h, 40km/h y 60km/h. Por cada velocidad se realizó cuatro ensayos correspondientes a los cuatro puntos cardinales: Norte, Sur, Este y Oeste. Para lo cual se siguió el criterio mencionado en el Primer ensayo e indicado en la Ilustración 70.

La metodología del ensayo se resume en los siguientes puntos:

- Ubicar el vehículo en una carretera recta.
- Ajustar la disposición del anemómetro (Norte, Este, Oeste o Sur) según corresponda al ensayo.
- Sacar por la ventana los dos anemómetros: asimétrico y BT-866A.
- Hacer rodar el vehículo a una velocidad constante (20km/h, 40km/h o 60km/h) según corresponda al ensayo.
- Proceder a almacenar los datos recopilados por los anemómetros.
- Repetir el procedimiento para el resto de las disposiciones y velocidades.

#### 5.3.2.2.3. Calibración de la velocidad

Para la calibración de la velocidad se utilizaron en total 12 ficheros que corresponden a los 4 puntos cardinales, con 3 velocidades de ensayo cada uno. Se realizó la media aritmética de todas las velocidades (derivadas numéricas) en cada uno de los 12 ficheros. De igual manera

se calculó la media aritmética de las velocidades de los ficheros proporcionados por el anemómetro comercial BT-866A.

Posteriormente se siguieron los siguientes pasos para cada fichero:

- Convertir la velocidad media angular ( $\omega$ ) de grados/segundo a radianes/segundos considerando la siguiente relación:

$$1\text{grad}/\text{segundo} = \frac{\pi}{180}\text{radianes}/\text{segundo}$$

- Calcular la velocidad tangencial ( $v$ ) empleando la ecuación (1):

$$v = \omega * r$$

donde  $r$  es el radio de giro el cual se indicó en la Tabla 18 y equivale a  $90\text{mm} = 0,09\text{m}$ . Las unidades de la velocidad son en m/s.

- Convertir la velocidad tangencial a km/h.
- Graficar los valores promedio del BT-866A en función de los valores medios del anemómetro asimétrico, considerando en el eje de las abscisas la velocidad del anemómetro asimétrico y el de las ordenadas la velocidad del BT-866A.

Se llevó a cabo la metodología anterior para los diferentes ficheros, se obtuvo la media aritmética de los parámetros de la recta pendiente y se definió la ecuación de la recta general para el prototipo. También se calculó el error cometido en las medidas aplicando la ecuación general obtenida.

#### 5.3.2.2.4. Sistema de clasificación

El sistema de clasificación consiste en una matriz de proyección obtenida en base a la posición angular de los máximos (o mínimos) locales de cada dirección (Norte, Sur, Este y Oeste) para una misma velocidad. Se eligió los máximos locales de los ensayos a la velocidad de 40km/h.

Para la creación del sistema de clasificación se implementó un código en MATLAB. Se lo indica en el siguiente diagrama UML.

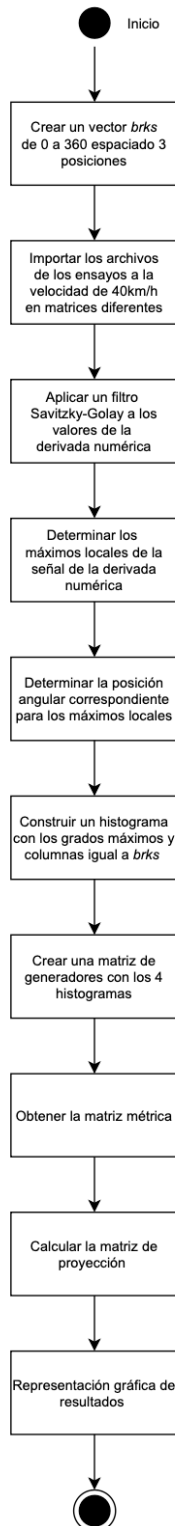


Ilustración 75. Diagrama UML: creación de sistema de clasificación en MATLAB

El diagrama UML consiste en los siguientes pasos:

- Se inicia creando un vector *brks* para la posición angular que inicia desde 0 hasta 360, con intervalos de 3 posiciones. Se obtuvo un vector de 120 columnas en total.
- Se importan los cuatro archivos correspondientes a los ensayos de 40km/h en las direcciones Norte, Sur, Este y Oeste. Se almacenan los archivos en matrices, obteniéndose un total de 4 matrices, cada una con 3 columnas: Tiempo, Posición angular, Velocidad (derivada numérica).
- Se aplica un filtro Savitzky-Golay a los valores de la derivada numérica de las cuatro matrices.
- Se determina los máximos locales de la señal de derivada numérica. Un punto es máximo si sus dos puntos vecinos son más pequeños.
- Se determina la posición angular correspondiente para los máximos locales de cada una de las matrices.
- Se construye un histograma de 120 columnas. Este histograma permite establecer las frecuencias absolutas de las posiciones angulares de los máximos locales.
- Se crea una matriz de generadores  $M[4][120]$  con los valores de los cuatro histogramas obtenidos de cada dirección. Se transpone la matriz  $M[4][120]$ , de esta manera sus columnas corresponden a cada uno de los puntos cardinales: N-E-W-S. Las dimensiones de la matriz  $M$  final son  $M[120][4]$ .
- Se obtiene una matriz métrica  $G[4][4]$ , donde  $G = M' * M$ .
- Se calcula la matriz de proyección  $D[4][120]$ , donde  $D = inv(M) * M'$ .

- Por último, se representan gráficamente los histogramas obtenidos, así como la matriz de generadores.

### 5.3.2.2.5. Validación del sistema de clasificación

Obtenida la matriz de clasificación es necesario validarla para determinar su precisión y confiabilidad. Para la validación se empleó ficheros distintos a los utilizados en la creación del sistema de clasificación.

Para el proceso de validación se reutiliza parte del código de MATLAB empleado en el apartado anterior, pero con ligeras variaciones, la metodología a seguir es:

- Importar un nuevo archivo de la velocidad y dirección que corresponda. Se guarda el archivo en una matriz.
- Aplicar el filtro Savitzky-Golay a la señal de la derivada numérica.
- Determinar los máximos locales de la derivada numérica.
- Determinar la posición angular correspondiente para los máximos locales.
- Construir un histograma con las posiciones angulares de los máximos locales.
- Crear una matriz generadora  $d[1][120]$  para posteriormente transponerla, obteniendo  $d[120][1]$ .
- Realizar la proyección de la matriz generadora:  $p[4][1] = D[4][120] * d[120][1]$ . La matriz resultante es  $p[4][1]$ , donde la mayor componente indica la dirección del viento (Norte, Este, Oeste, Sur).
- Obtener la norma de la matriz  $p[4][1]$ .

## 5.4. DESARROLLO DE CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

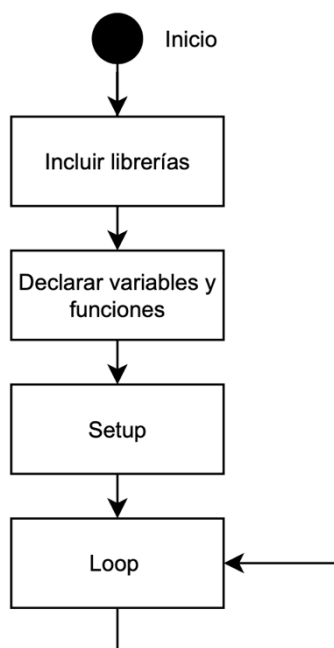
En este apartado se describe el proceso de comunicación de los sensores BME688 y AS5048A a la placa de desarrollo ESPDUINO-32, así como el proceso de envío de datos hacia la plataforma ThingSpeak. Se empleó el IDE de Arduino para el desarrollo del código del proyecto.

### *5.4.1. Descripción del funcionamiento del código fuente*

El código desarrollado realiza tres funciones en general:

- Configura, inicializa y supervisa la comunicación con los sensores y la plataforma IoT.
- Recibe y procesa la información enviada por parte de los sensores BME688 y AS5048A.
- Envía la información a la plataforma ThingSpeak.

En el siguiente diagrama UML se observa las partes principales del código. En el Anexo 1.1 se puede consultar el código de programación completo.



*Ilustración 76. Diagrama UML: funcionamiento conceptual del software del prototipo*

El diagrama UML puede describirse de la siguiente manera:

Se inicia incluyendo las librerías del sensor BME688 y la de ThingSpeak, así como aquellas que permiten la conexión WiFi, I2C, SPI y acceso a la memoria Flash (EEPROM). Las librerías son gratuitas y se encuentran disponibles en GitHub.

La memoria flash de la ESP32 es un equivalente a la memoria EEPROM que incorporan los microcontroladores Arduino, ambas son memorias no volátiles. Gracias a la compatibilidad es posible utilizar la biblioteca EEPROM para la ESP32. La memoria no volátil se emplea para almacenar el estado de calibración del sensor BME688, de esta manera si el sensor alcanza una precisión del índice de calidad de aire de 3 en un tiempo, por ejemplo de 4 días, cuando el sistema se reinicie, se cargará esa calibración en el sensor permitiendo alcanzar una precisión de 3 en cuestión de minutos.

La versión de Arduino utilizada es la 1.8.19, para poder emplear la librería BSEC, previamente se realizó una modificación en el archivo

*platform.txt* del IDE de Arduino. Esta adaptación permite al IDE encontrar la librería en el ordenador. El proceso de modificación se detalla en el Anexo 4.

La librería BSEC ofrece ejemplos de códigos de programación para el BME688, entre ellos se optó por elegir el denominado: *basic\_config\_state\_ULP\_LP*. Este permite configurar el sensor en dos modos de funcionamiento: Bajo consumo (LP) y Ultra bajo consumo (ULP). En la Tabla 11 se menciona que en LP la frecuencia es de 0.33 Hz con un consumo mínimo de 0.9mA, y el ULP tiene una frecuencia de 0.0033Hz y consumo de 0.09mA.

Posteriormente se declara las variables y funciones a emplear en el código. Por un lado, se encuentran aquellas que vienen predefinidas por la librería BSEC y que requieren una configuración previa como, por ejemplo:

```
/* Configure the BSEC library with information about the sensor
   18v/33v = Voltage at Vdd. 1.8V or 3.3V
   3s/300s = BSEC operating mode, BSEC_SAMPLE_RATE_LP or
BSEC_SAMPLE_RATE_ULP
   4d/28d = Operating age of the sensor in days
generic_18v_3s_4d
generic_18v_3s_28d
generic_18v_300s_4d
generic_18v_300s_28d
generic_33v_3s_4d
generic_33v_3s_28d
generic_33v_300s_4d
generic_33v_300s_28d
*/
#include "config/generic_33v_3s_4d/bsec_iaq.txt"
};
```

El código anterior permite ajustar el funcionamiento del sensor BME688 según las necesidades. Además, se define el periodo de tiempo



para almacenar el estado de calibración del sensor en la memoria flash, así como las funciones que realizan las tareas de supervisar el estado del sensor, detectar errores en la alimentación o comunicación y cargar la configuración del sensor almacenado en la flash en cada reinicio del sistema.

Por otra parte, están las variables y funciones definidas para la configuración de la conectividad WiFi, ThingSpeak y del sensor AS5048A.

Para la conectividad WiFi es necesario proporcionar el nombre de la red y la contraseña en caso de ser privada.

La configuración de ThingSpeak requiere el ID y la clave de escritura del canal al cual se enviará la información.

Para el sensor AS5048A se incluye la matriz de proyección obtenida previamente en el apartado de diseño del anemómetro asimétrico, también se declara variables, constantes, vectores, matrices y funciones que en conjunto permiten el tratamiento de la señal para determinar la velocidad y dirección del viento. La dirección del viento se establece acorde a la posición angular, de manera que: Norte = 0 grados; Este = 90 grados; Sur = 180 grados; Oeste = 270 grados.

En el *Setup* (código que se ejecuta una vez tras el arranque del sistema) se inicializa todas las conexiones y comunicaciones requeridas, así como las configuraciones de los sensores y declaración de marcas de tiempo que posteriormente permiten establecer los tiempos de muestreo necesarios.

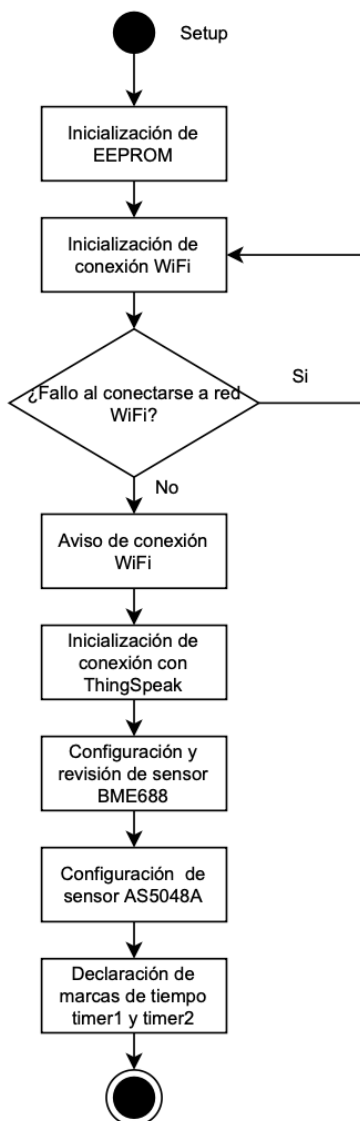


Ilustración 77. Diagrama UML: Setup del código de programación general.

En la Ilustración 77 se observa que el *Setup* empieza inicializando la EEPROM, se establece la dirección para el almacenamiento del estado de calibración del BME688. A continuación, se inicializa la conexión WiFi, en caso de no conectarse a la red el sistema permanece en un bucle. Al establecerse la conexión se informa de ello a través del parpadeo del led integrado en la ESPDUINO-32. También se inicializa el enlace con ThingSpeak.

Posteriormente se establece la conexión y configuración con el BME688, a la vez que se determina si es posible cargar un estado calibración almacenado en la memoria flash.

Es importante mencionar que para iniciar la conexión I2C entre el BME688 y la ESPDUINO-32, la línea predefinida de la librería BSEC es la siguiente:

```
iaqSensor.begin(BME680_I2C_ADDR_PRIMARY, Wire);
```

Sin embargo, ha sido necesario modificarla y colocar la dirección I2C que emplea la placa de conexión Pi3G del BME688, obteniendo:

```
iaqSensor.begin(0x77, Wire);
```

Luego se declara una lista de los parámetros de salida que se desea obtener con el BME688, son aquellos mencionados en la Tabla 13.

También es fundamental considerar que, en función del modo de funcionamiento elegido (LP o ULP), es necesario modificar el *BSEC\_SAMPLE\_RATE* en el *Setup*:

```
iaqSensor.updateSubscription(sensorList, 10, BSEC_SAMPLE_RATE_LP);
```

```
iaqSensor.updateSubscription(sensorList, 10, BSEC_SAMPLE_RATE_ULP);
```

Después se procede a configurar la conexión SPI del sensor AS5048A en modo 1, con una velocidad máxima de 1MHz.

Finalmente se declaran dos marcas de tiempo que posteriormente permitirán cumplir con los tiempos de muestreo en el *Loop*.

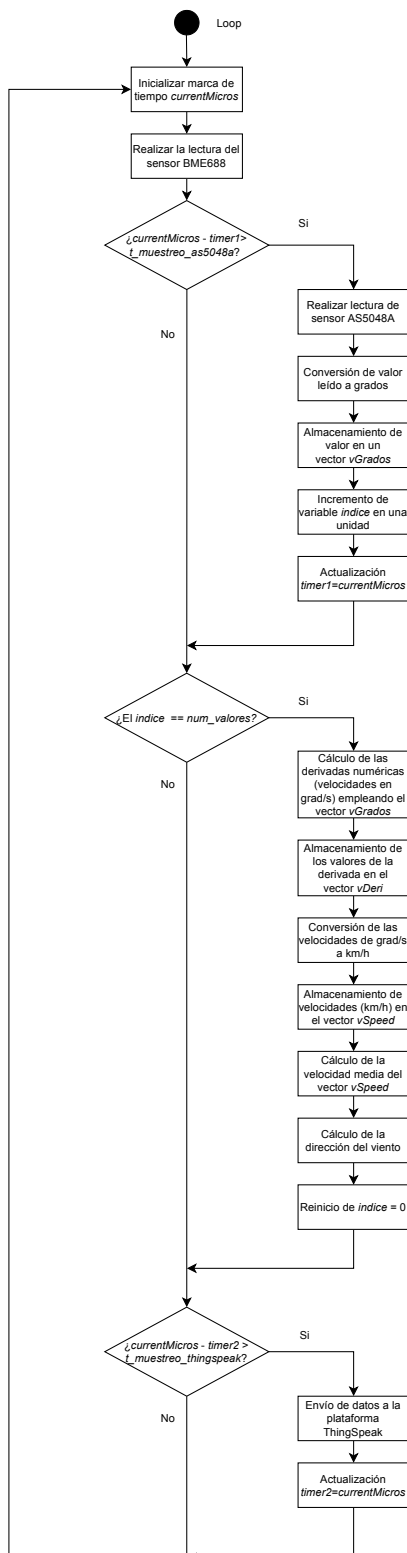


Ilustración 78. Diagrama UML: Loop de código de programación general.

El *Loop* es la parte del código que se ejecuta en bucle. Aquí se realiza la de lectura y procesamiento de la información de los sensores, así como el envío de esta a ThingSpeak en función del tiempo de muestreo establecido.

El bucle inicia con la declaración de una variable que almacena en microsegundos el tiempo de funcionamiento del sistema. A continuación, se hace un llamado a la función que establece si se obtiene lectura del sensor BME688. La lectura se realizará acorde al modo de funcionamiento elegido anteriormente, en este caso para el modo de bajo consumo cada 3 segundos.

Después se verifica si se ha cumplido el tiempo de muestreo de 200Hz para el sensor AS5048A. En caso de cumplirse se procede a obtener una lectura del sensor, se la convierte a grados y se la almacena en una posición del vector *vGrados*, mismo que varía su tamaño en función de la constante *num\_valores*, en este caso es de 400 muestras. Por cada lectura del sensor se incrementa la variable *indice* en una unidad, además se actualiza la marca de tiempo para ceñirse el tiempo de muestreo.

Terminado el proceso lectura del AS5048A, se consulta si ha alcanzado el total de las 400 muestras. En caso de haberse alcanzado se procede a llamar a la función encargada de realizar la derivada numérica para todas las muestras. El código de derivada numérica en C/C++ es el equivalente al utilizado en LabVIEW (Ilustración 65), por lo tanto, se contempla la discontinuidad, sentido de giro, velocidad mínima de giro y puerta de error. Los valores obtenidos de la derivada numérica se almacenan en un vector *vDeri*. Después se realiza la conversión de grados/segundos a kilómetros/hora aplicando la ecuación de la recta general obtenida anteriormente. Se almacena las nuevas velocidades en un vector *vSpeed* para posteriormente calcular el valor promedio de velocidad del viento.

A continuación, se calcula la dirección del viento por medio de funciones diseñadas a partir del código de MATLAB. La primera función realiza el filtrado de la señal de derivada numérica por medio de la aplicación de una media móvil, la cual consiste en establecer un punto de partida (posición 0 del vector  $vDeri$ ) y recorrer el vector hasta alcanzar 16 muestras. Se suma las 16 muestras y se obtiene la media, este nuevo valor se almacena en otro vector. Seguido se establece un nuevo punto de partida (posición 1 del vector  $vDeri$ ) y se repite el proceso para el resto de las muestras.

Posteriormente se llama a la función que identifica los máximos locales del vector que almacena los valores filtrados. Después se llama a una función que determina la posición angular de aquellos valores máximos. Seguido se obtiene la frecuencia de las posiciones angulares máximas en un vector de 120 posiciones, cada posición con un rango de 3, resultando un total de 360 posiciones. Se calcula la norma del vector de frecuencias y se deduce el vector generador. Finalmente se realiza la multiplicación de la matriz de proyección con el vector generador obtenido. El resultado es una matriz  $[4][1]$ , se determina la componente máxima y con ella la dirección del viento.

*Tabla 21. Relación entre componentes de matriz y dirección de viento.*

Componente de matriz <b>[4][1]</b>	Dirección
Primera	Norte
Segunda	Este
Tercera	Oeste
Cuarta	Sur

Para finalizar el procesamiento de la señal del AS5048A se reinicia la variable *índice* a cero.

El proceso final consiste en determinar si se ha cumplido el tiempo de muestreo para el envío de los datos a ThingSpeak. La plataforma permite con una cuenta gratuita subir información al canal cada 15

segundos, por lo que si se cumple dicho tiempo se realiza el envío. Además, solo se cuenta con la posibilidad de subir 8 parámetros por canal.

Los parámetros enviados a ThingSpeak son los siguientes:

*Tabla 22. Parámetros atmosféricos enviados a ThingSpeak.*

<b>Parámetro enviado</b>
Temperatura compensada por el sensor BME688
Humedad relativa compensada por el sensor BME688
Presión atmosférica
Índice de calidad de aire (estático)
Equivalentes de COV's respirados
Precisión del ICA
Velocidad del viento
Dirección del viento

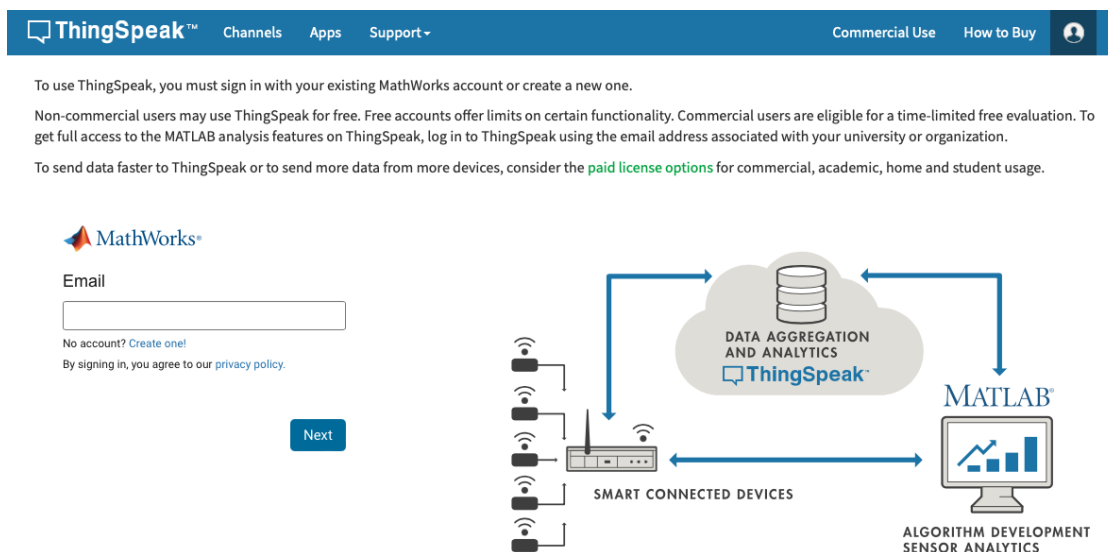
El proceso de envío de datos a la plataforma IoT finaliza con la actualización de la marca de tiempo.

Llegado a este punto, el bucle se repite nuevamente de manera indefinida, sin embargo, puede detenerse si el sistema detecta algún fallo en la conexión del sensor BME688.

## 5.5. CONFIGURACIÓN DE THINGSPEAK

En este apartado se explica el proceso de configuración de la plataforma IoT ThingSpeak para ofrecer una interfaz amigable e intuitiva al usuario.

Primeramente, para crear un usuario es necesario contar previamente con una cuenta en MathWorks, si no se dispone de una se la puede crear en el momento.



The image shows the ThingSpeak login page on the left and a system architecture diagram on the right. The login page includes the MathWorks logo, an email input field, a 'Next' button, and a 'Create one!' link. The diagram illustrates the data flow: 'SMART CONNECTED DEVICES' send data to a cloud labeled 'DATA AGGREGATION AND ANALYTICS ThingSpeak'. From the cloud, data is sent to 'MATLAB' for 'ALGORITHM DEVELOPMENT SENSOR ANALYTICS'.

*Ilustración 79. Interfaz para iniciar sesión en ThingSpeak. [42]*

Una vez se ingresa se procede a crear un nuevo canal y configurarlo de acuerdo con las necesidades. Para la estación meteorológica se estableció la siguiente configuración.



## Estación Meteorológica

Channel ID: 1860043  
Author: mwa0000017924432  
Access: Public

Medición de parámetros atmosféricos con los sensores BME688 y AS5048A

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys Data Import / Export

### Channel Settings

**Percentage complete** 50%

**Channel ID** 1860043

**Name** Estación Meteorológica

**Description** Medición de parámetros atmosféricos con los sensores BME688 y AS5048A

**Field 1** Temperatura

**Field 2** Humedad relativ.

**Field 3** Presión atmosfér

**Field 4** Static IAQ

**Field 5** b-VOC

**Field 6** Precisión de IAQ

**Field 7** Velocidad del vie

**Field 8** Dirección del vier

**Metadata**

**Tags**

(Tags are comma separated)

**Link to External Site** http://

**Link to GitHub** https://github.com/

**Elevation** 524,476

**Show Channel Location**

**Latitude** 42.81687

**Longitude** -1.64323

**Show Video**

+ YouTube  
- Vimeo

**Video URL** http://

**Show Status**

Save Channel

### Help

Channels store all the data that a ThingSpeak application collects. Each channel includes eight fields that can hold any type of data, plus three fields for location data and one for status data. Once you collect data in a channel, you can use ThingSpeak apps to analyze and visualize it.

### Channel Settings

- Percentage complete:** Calculated based on data entered into the various fields of a channel. Enter the name, description, location, URL, video, and tags to complete your channel.
- Channel Name:** Enter a unique name for the ThingSpeak channel.
- Description:** Enter a description of the ThingSpeak channel.
- Field#:** Check the box to enable the field, and enter a field name. Each ThingSpeak channel can have up to 8 fields.
- Metadata:** Enter information about channel data, including JSON, XML, or CSV data.
- Tags:** Enter keywords that identify the channel. Separate tags with commas.
- Link to External Site:** If you have a website that contains information about your ThingSpeak channel, specify the URL.
- Show Channel Location:**
  - Latitude:** Specify the latitude position in decimal degrees. For example, the latitude of the city of London is 51.5072.
  - Longitude:** Specify the longitude position in decimal degrees. For example, the longitude of the city of London is -0.1275.
  - Elevation:** Specify the elevation position meters. For example, the elevation of the city of London is 35.052.
- Video URL:** If you have a YouTube™ or Vimeo® video that displays your channel information, specify the full path of the video URL.
- Link to GitHub:** If you store your ThingSpeak code on GitHub®, specify the GitHub repository URL.

### Using the Channel

You can get data into a channel from a device, website, or another ThingSpeak channel. You can then visualize data and transform it using ThingSpeak Apps.

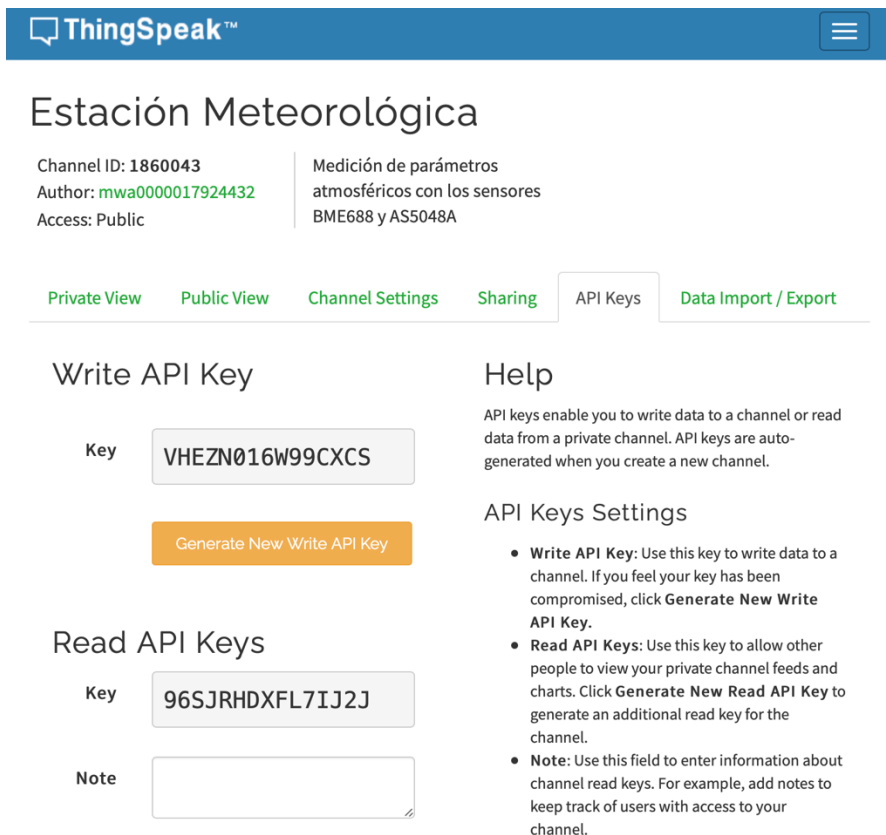
See [Get Started with ThingSpeak™](#) for an example of measuring dew point from a weather station that acquires data from an Arduino® device.

[Learn More](#)

Ilustración 80. Configuración del canal en ThingSpeak. [42]

En la ilustración se observa el nombre del canal, su ID y una breve descripción. También están rellenos los 8 campos que se dispone con los nombres de las variables que almacenarán. La plataforma también permite establecer la ubicación geográfica del dispositivo de manera exacta por medio de la latitud, longitud y elevación.

En la pestaña API Keys se encuentran las contraseñas que permiten la escritura y lectura del canal.



The screenshot shows the 'API Keys' tab in the ThingSpeak interface for a channel named 'Estación Meteorológica'. The channel ID is 1860043, the author is mwa0000017924432, and the access is public. The channel is used for measuring atmospheric parameters with BME688 and AS5048A sensors. The 'API Keys' tab is selected, showing a 'Write API Key' section with a key 'VHEZN016W99CXCS' and a 'Generate New Write API Key' button. Below it is a 'Read API Keys' section with a key '96SJRHDXFL7IJ2J' and a 'Note' field. To the right, there is a 'Help' section explaining API keys and an 'API Keys Settings' section with three bullet points: 'Write API Key', 'Read API Keys', and 'Note'.

Ilustración 81. Pestaña API Keys en ThingSpeak. [42]

### 5.5.1. Interfaz de usuario

La interfaz del usuario debe ser clara, informativa e intuitiva, para lo cual se hace uso de las herramientas que proporciona ThingSpeak.

Para visualizar los datos vienen por defecto ventanas que indican los valores de los parámetros en función de tiempo, pero también se pueden crear nuevas ventanas de visualización y Widgets.



Las ventanas de visualización pueden ser creadas en la pestaña de Apps, en la opción de *MATLAB Visualizations*.

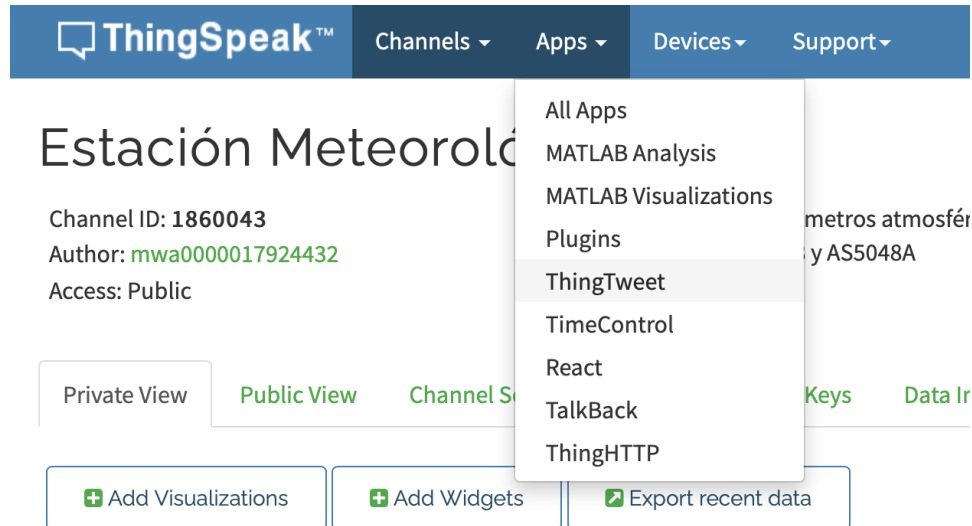


Ilustración 82. Pestaña Apps en ThingSpeak. [42]

En *MATLAB Visualizations* se dispone de diversos ejemplos para presentar la información.

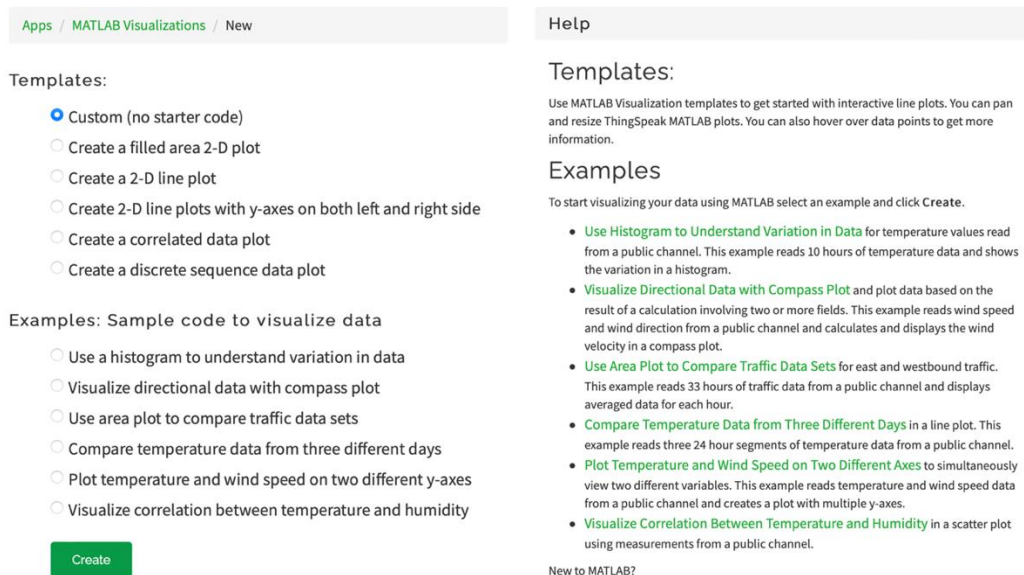


Ilustración 83. Ejemplos para visualizar la información en ThingSpeak.

Entre ellos se ha elegido la representación de la dirección del viento en un diagrama polar, la correlación entre la temperatura y humedad y un histograma para comprender la variación de la temperatura.

The screenshot shows the 'MATLAB Visualizations' page in ThingSpeak. It features a 'New' button at the top left. Below it is a table with three rows of visualizations, each with a 'View' and 'Edit' button. To the right, there is a 'Help' section titled 'MATLAB Visualization' which includes instructions on using interactive plots and a list of 'Examples' such as 'Use Histogram to Understand Variation in Data' and 'Visualize Directional Data with Compass Plot'. There is also a 'New to MATLAB?' section with links to video tutorials and academies.

Name	Created
▣ Dirección del viento y dirección media	2022-11-16
▣ Correlación entre la temperatura y humedad	2022-11-16
▣ Uso de histogramas para comprender la variación de la Temperatura	2022-11-16

Ilustración 84. Visualizaciones creadas para presentar la información en ThingSpeak.

### 5.5.2. Aplicación móvil Thingview

Thingview se encuentra disponible de manera gratuita para los sistemas móviles Android y iOS en sus tiendas de aplicaciones. A través de esta es posible tener un rápido acceso a los datos de la estación meteorológica en tiempo real desde cualquier ubicación.

Para configurar la aplicación basta con rellenar los campos siguientes:

The screenshot shows the 'Add channel' configuration screen in the Thingview mobile app. It features a blue header with a back arrow and the text 'Add channel'. Below the header are four input fields: 'Server url' (containing 'https://thingspeak.com'), 'Enter your channel ID', a 'Public' toggle switch (currently turned off), and 'API Key'. A blue 'Search' button is located at the bottom center of the screen.

Ilustración 85. Configuración de aplicación móvil Thingview

## 5.6. SISTEMA AUTÓNOMO DE ENERGÍA

En este apartado se presenta el diseño del sistema autónomo de energía que alimentará la estación meteorológica. Se utilizan componentes comerciales debido a que ofrecen buenas características de tamaño, coste y consumo energético.

### *5.6.1. Requerimientos*

El sistema autónomo de energía es el encargado de mantener la estación meteorológica funcionando las 24 horas del día, por lo que resulta primordial que cuente con características que le permitan suplir el consumo de la estación en todo el año.

Entre los requerimientos del sistema se encuentran los siguientes:

- Recolectar la energía solar por medio de la tecnología de paneles solares.
- Almacenar la energía en baterías.
- Implementar un sistema de carga y protección de baterías.
- Tener la capacidad de proveer energía a la estación meteorológica en todo el año.

### *5.6.2. Desarrollo de sistema*

El sistema autónomo se compone de las siguientes partes:

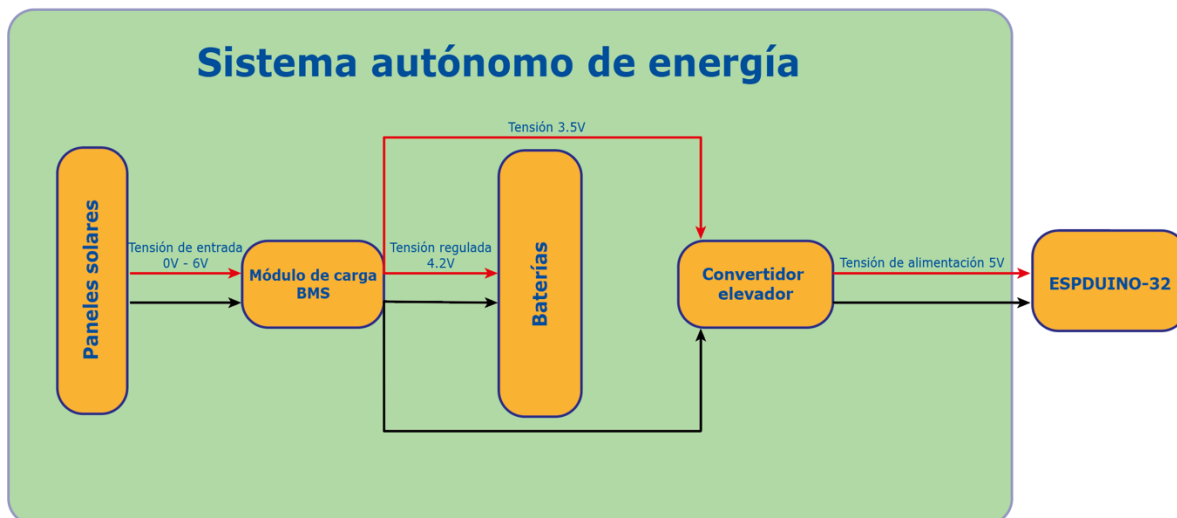


Ilustración 86. Diagrama de bloques de sistema autónomo de energía.

En el diagrama se observa como la energía recolectada por los paneles solares es enviada al módulo de carga, este envía una tensión regulada a las baterías para cargarlas, a la vez que integra un sistema BMS que las protege contra sobre descargas y sobre corrientes. Posteriormente, las baterías alimentan a un convertidor elevador el cual proporciona una tensión de 5V a la placa de desarrollo ESPDUINO-32.

El desarrollo comienza por definir el consumo de intensidad de la placa ESPDUINO-32 y los sensores. Debido a que la placa de desarrollo envía los datos a ThingSpeak a través del WiFi, presentará picos de consumo. En la Tabla 9 se indica que el consumo teórico de la ESP32 sin cargas conectadas es de 40mA y al activar el WiFi puede ascender de 100 hasta 240mA dependiendo del tipo de transmisión.

En la siguiente ilustración se observa el consumo de la placa sin conectarle los sensores. Su valor oscila entre 39.02mA, algo que se acerca al valor teórico de 40mA que proporciona el fabricante.

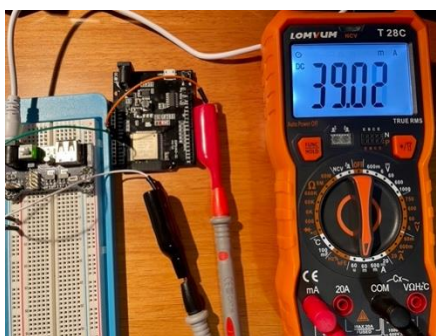


Ilustración 87. Consumo de energía ESPDUINO-32 (sin cargas).

Se conectan los sensores BME688 y AS5048A a la placa de desarrollo para determinar el consumo del sistema en conjunto.



Ilustración 88. Medición del consumo de energía de la estación meteorológica. (izq.) Transmisión de datos desactivada; (der.) Transmisión de datos activada.

En la siguiente tabla se presentan los valores de consumo del sistema.

Tabla 23. Valores de consumo de energía de la estación meteorológica.

Modo	Estado	Consumo
Transmisión de datos	Desactivada	65.4 mA
	Activada	111.1 mA

El consumo máximo registrado de la estación meteorológica es de 111.1mA con una duración de 2 segundos aproximadamente. El periodo de tiempo en el que ocurre este consumo varía según el tiempo de envío de los datos a ThingSpeak, mismo que se define en el código de programación. Después el consumo disminuye hasta 65.4mA.

Para el diseño del sistema autónomo de energía se considerará un consumo constante de 111.1 mA, de esta manera se establece un margen en beneficio de la estación meteorológica.

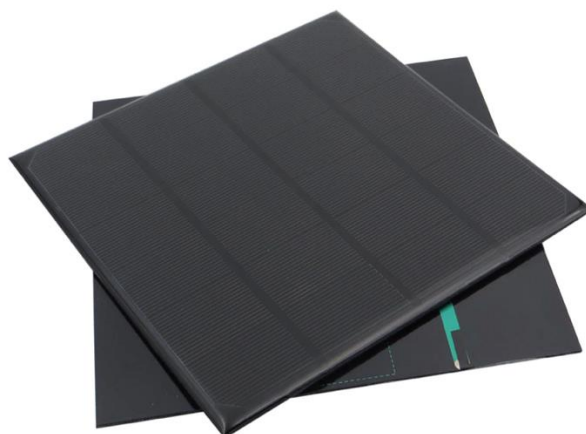
En la siguiente tabla se presenta los consumos totales de la estación en diferentes periodos de tiempo.

*Tabla 24. Valores de consumo de energía totales de la estación meteorológica.*

Concepto	Consumo
Consumo de energía por hora	112 mAh
Consumo de energía por día	2.688 mAh
Consumo de energía por mes	80.640 mAh
Consumo de energía por año	981.120 mAh

Para captar la energía solar se ha elegido un panel con tecnología de fabricación en silicio monocristalino debido a que presenta rendimientos más elevados respecto al silicio policristalino y amorfo.

El panel solar elegido es el modelo CNC165X165-6, tiene unas dimensiones de 165x165 mm y funcionando a 6V es capaz de alcanzar la potencia máxima de 4.5W [43]



*Ilustración 89. Paneles solares monocristalinos CNC165X165-6.*

Considerando los parámetros proporcionados por el fabricante [43], se determina el factor de forma (FF) por medio de la Expresión (17):



$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{OC} * I_{SC}} = \frac{6 * 750}{7.3 * 830} = 0.737$$

Por lo tanto, el FF del panel solar es aceptable, considerando que los valores típicos oscilan entre los 0,7 y 0,8.

A la hora de trabajar con paneles solares es fundamental determinar el ángulo de inclinación ( $\alpha$ ), este permitirá ajustar los paneles para obtener la mayor incidencia de radiación solar.

Para calcular  $\alpha$  se emplea la siguiente ecuación [44]:

$$\alpha = L + 10^\circ$$

donde L es la latitud del lugar de estudio, en este caso en Pamplona (Navarra)  $L = 42^\circ 48' 21,54352''$  N. Reemplazando se obtiene:

$$\alpha = 42^\circ + 10^\circ = 52^\circ$$

El ángulo resultante es de  $52^\circ$ , y la inclinación en dirección sur.

Por otra parte, el número de horas de sol útiles en los meses del año resulta ser un parámetro por considerar debido a que permitirá establecer una aproximación de la energía que los paneles serán capaces de generar.

Tabla 25. Horas de sol útiles. [44]

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
De $+25^\circ$ a $+45^\circ$ (Hemisf. Norte)	8	9	9	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9	9	8	7.5

Considerando el mes de diciembre puesto es donde existe menos horas útiles de sol se obtiene una estimación de la energía que el panel es capaz de generar en un día:

$$\text{Energía generada} = 4.5W * 7.5h = 33.75Wh = 5625mAh$$

La energía generada por los paneles solares es transferida al módulo de carga TP4056, el cual regula el voltaje de entrada, carga y protege las

baterías por medio de un sistema BMS que integra. Este módulo se encarga de alimentar a la estación.

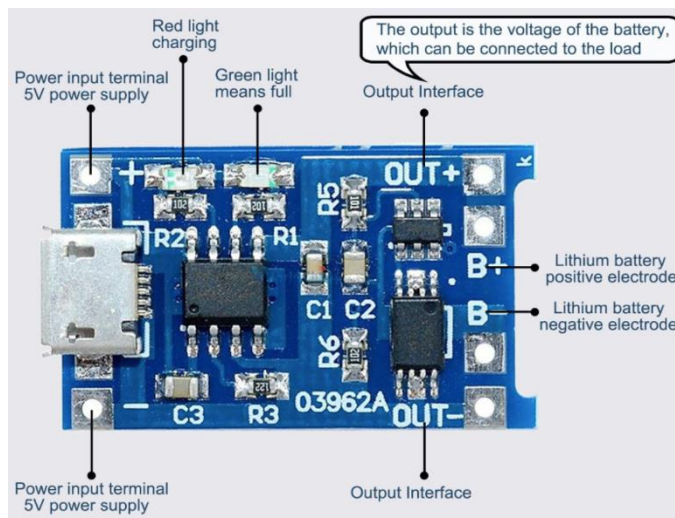


Ilustración 90. Módulo de carga de baterías TP4056 [45]

El módulo presenta las siguientes características:

Tabla 26. Características de módulo de carga [45]

Características	Valor
Voltaje de entrada	5 - 6V
Corriente de carga	1000 mA
Voltaje de corte de carga	4.2 ± 1%
Voltaje de protección contra sobre descarga	2.5 V
Corriente de protección contra sobre corriente	3 A
Tamaño	26 mm x 17 mm

Las baterías elegidas son de ion de Litio debido a que ofrecen según se indica en la Tabla 16, una baja autodescarga, aceptable número de ciclos y buena relación capacidad-peso, además requieren un bajo tiempo de recarga. El tipo de batería es 18650 y la marca elegida es la LiitoKala.



*Ilustración 91. Baterías LiitoKala*

Las características son las siguientes:

*Tabla 27. Características de batería LiitoKala [46]*

Características	Valor
Modelo	HG2
Capacidad	2800 – 3000 mAh
Resistencia interna	<30mΩ
Tiempos de carga	1000 veces
Voltaje de batería estándar	3.7 V
Voltaje de batería máximo	4.2 V
Voltaje mínimo de descarga	2.5 V

La tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ ) del panel solar es mayor que la tensión nominal de la batería, un requerimiento necesario para asegurar la carga correcta de las mismas.

Si se implementan cinco baterías conectadas en paralelo se alcanza una capacidad teórica total de 15.000mAh, lo que supondría una autonomía de 4 días y medio aproximadamente en el supuesto caso que no exista un buen tiempo y los paneles solares no puedan recargar las baterías.

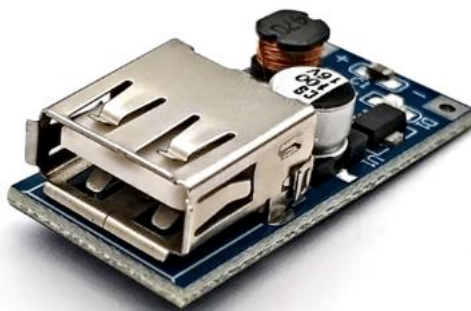
Considerando la energía que las placas solares producen en el mes de diciembre se puede calcular el tiempo que le tomaría cargar a las cinco baterías.

$$\text{Tiempo de carga} = \frac{15000mAh}{5625mAh} = 2.6 \text{ dias}$$

En total tardaría 2.6 días, sin embargo, debe tenerse en cuenta que, si la placa solar produce 5625mAh en un día, estaría cargando aproximadamente 2 baterías, un valor aceptable.

Por último, el sistema autónomo incluye un convertidor elevador de voltaje. Este se conecta al módulo de carga para aumentar la tensión a 5V, que es la requerida por la ESPDUINO-32.

El módulo elegido implementa una entrada USB para facilitar la conexión con la placa de desarrollo.



*Ilustración 92. Convertidor elevador de voltaje*

Las características se presentan a continuación:

*Tabla 28. Convertidor elevador [47]*

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Voltaje de entrada	0.9 – 5V
Voltaje de salida estable	5 V
Intensidad máxima de salida	600 mA
Rango de temperatura	-40°C hasta +85°C
Eficiencia de conversión	96%

La intensidad que proporciona el convertidor elevador es lo suficientemente alta para mantener funcionando la estación meteorológica.

Debe considerarse la existencia en el mercado de diferentes modelos de placas de desarrollo que integran la ESP32, algunas presentan mejores

características como por ejemplo un menor consumo energético, espacio y precio. Sin embargo, la ESPDUINO-32 aporta una característica interesante y es que en el supuesto caso que se tenga posibilidad de acceder a la red eléctrica es posible conectarle una fuente de 5-12V y ahorrarse el coste de la implementación del sistema autónomo de energía.

## 6. RESULTADOS

En este apartado se expone los diferentes resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del prototipo de la estación meteorológica.

### 6.1. ANEMÓMETRO ASIMÉTRICO

#### 6.1.1. Primer ensayo

Con los archivos importados en MATLAB se aplicó un filtro para obtener una señal de derivada numérica con menos ruido, tal como se observa a continuación.

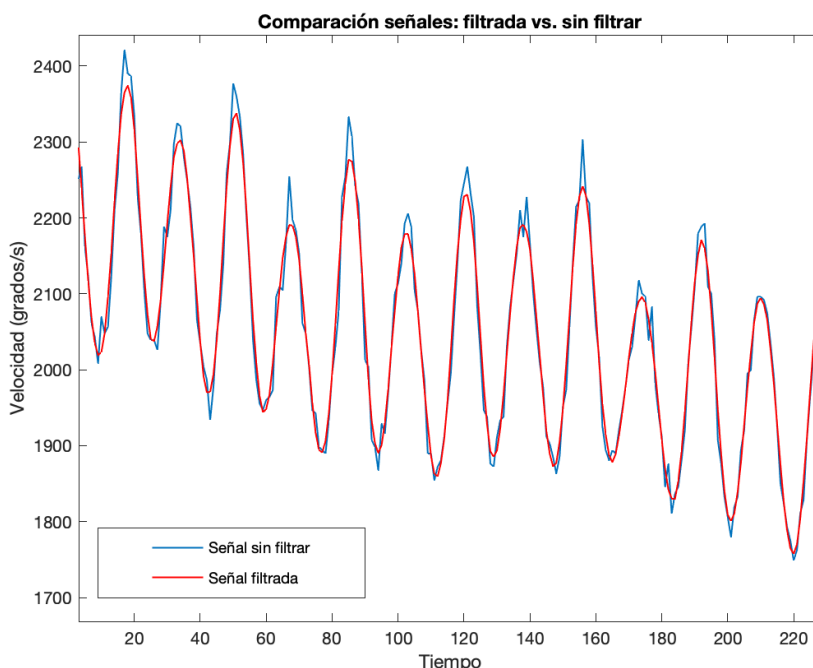
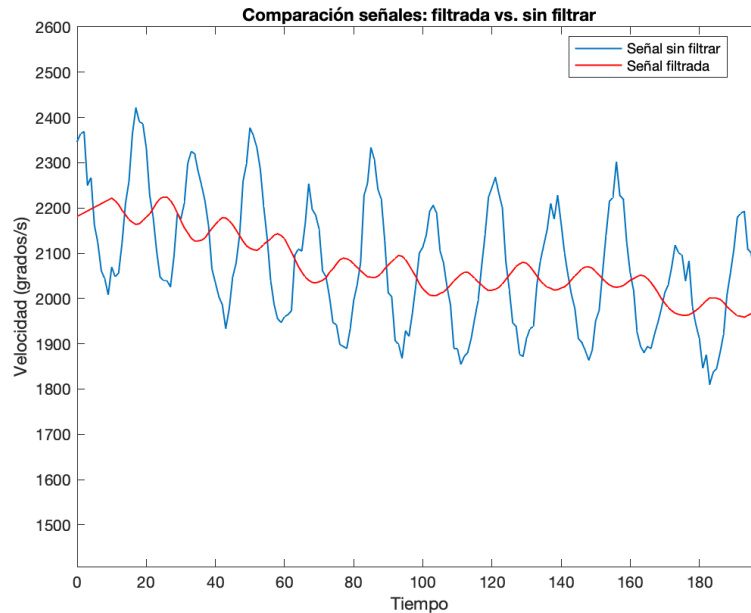


Ilustración 93. Comparación de señales con y sin filtro en MATLAB.

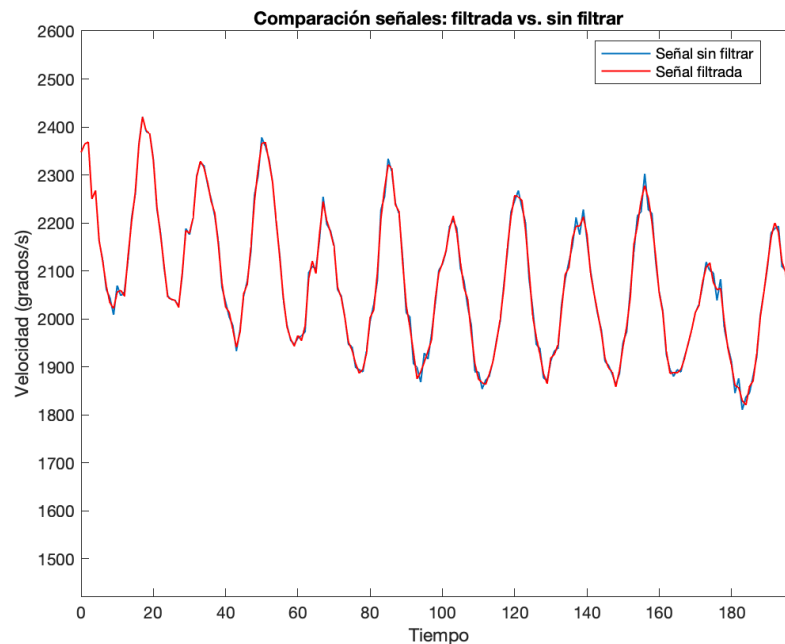
En la Ilustración 93 se observa cómo se suaviza los picos de la señal a la vez que se trata de minimizar la alteración de la señal. Para conseguir esto es importante ajustar el orden de la función *sgolayfilt*. Un orden

demasiado bajo puede ocasionar una alteración completa de la señal y ocasionar pérdida de información.



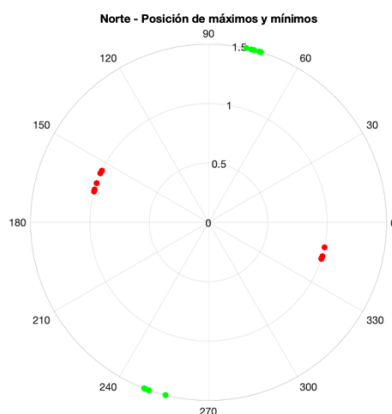
*Ilustración 94. Señal filtrada de orden 1 en MATLAB.*

Y un orden excesivamente elevado podría no disminuir el ruido de la señal.



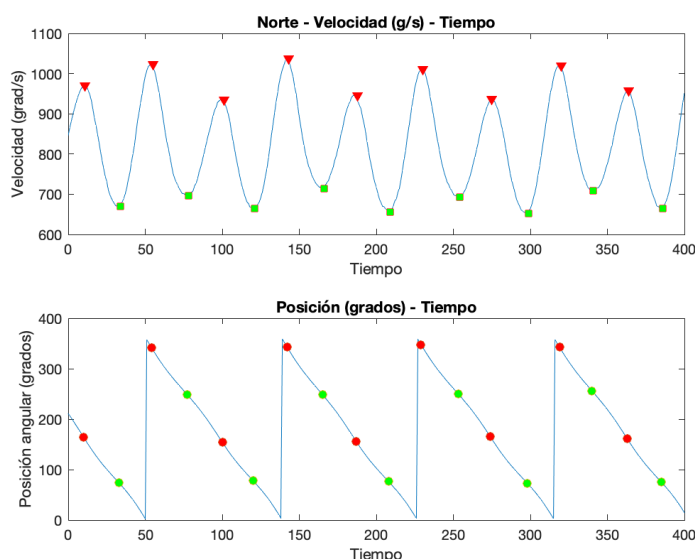
*Ilustración 95. Señal filtrada de orden 19 en MATLAB.*

Debido al elevado número de gráficos obtenidos se presentará únicamente la representación de los máximos y mínimos en el plano polar, ya que es el gráfico que proporciona mejor la información. En los planos polares los máximos locales se representan de color rojo y los mínimos locales de color verde.



*Ilustración 96. Ejemplo de representación en plano polar en MATLAB.*

Los gráficos con la identificación de los máximos y mínimos locales en la señal de la derivada numérica y posición angular pueden consultarse en los anexos, Apéndice 1.



*Ilustración 97. Ejemplo de identificación de máximos y mínimos locales en la señal de velocidad y posición angular en MATLAB.*

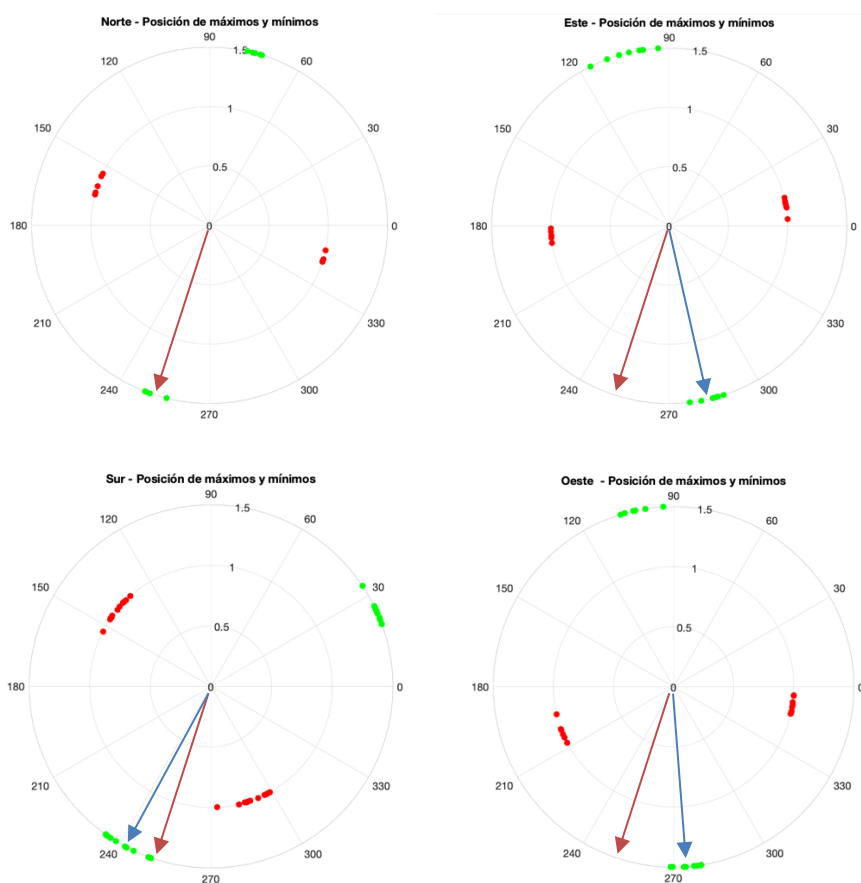


Es importante recordar que el sentido de giro del anemómetro es horario, y que los valores de la posición angular siguen el orden desde 360 hasta 0 grados.

Para el análisis se identificó con una flecha la ubicación del primer mínimo local de cada dirección, considerando el mínimo de la dirección Norte como punto de referencia.

### 6.1.1.1. Diseño de rotor 1

Se presentan los planos polares obtenidos en el ensayo empleando el diseño de rotor 1.



*Ilustración 98. Diseño de rotor 1: posiciones de máximos y mínimos en planos polares (v1)*

En los planos polares puede observarse las variaciones de ubicación entre los primeros mínimos locales en función de la dirección. En la

siguiente tabla se presenta la posición media de los mínimos locales y la diferencia que existe respecto al punto de referencia.

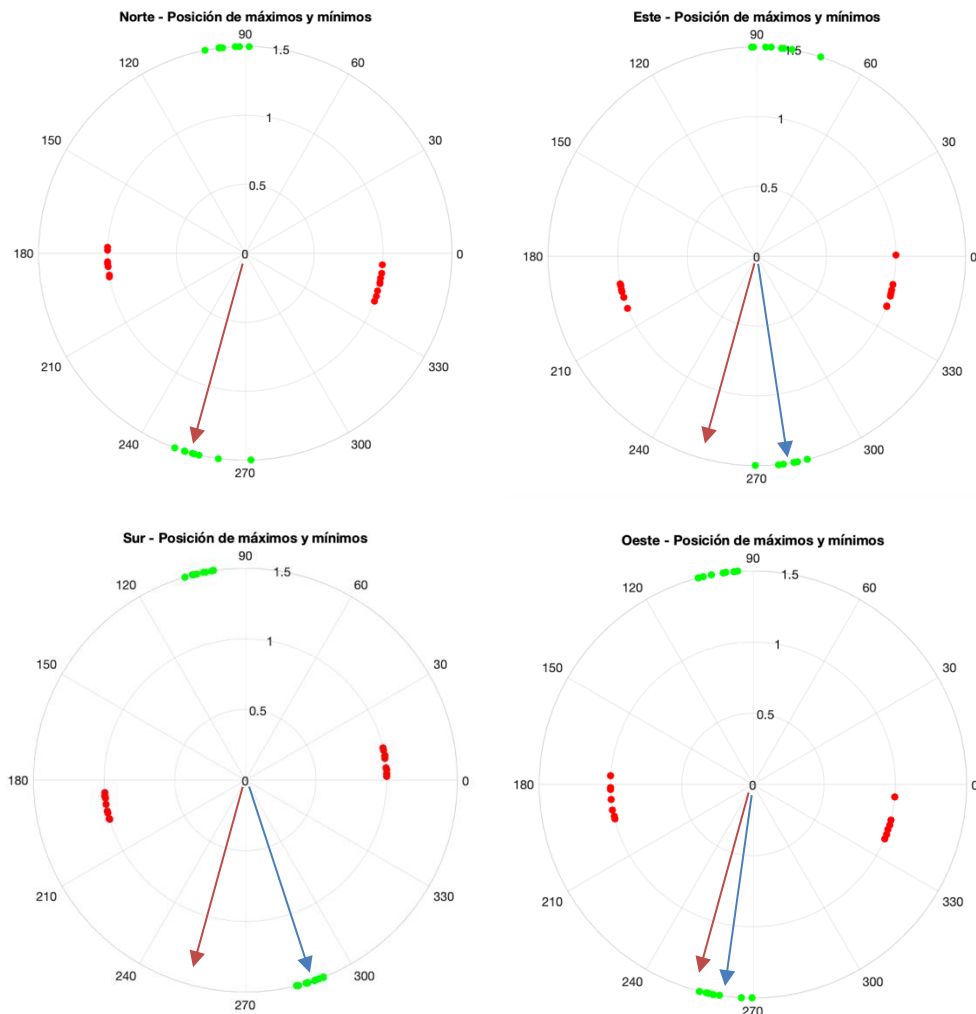
*Tabla 29. Diseño de rotor 1: diferencia de posición angular de mínimos locales en función de la dirección (v1)*

Dirección	Valor medio aprox. de primer mínimo local (grados)	Valor de referencia aprox. dirección Norte (grados)	Diferencia entre mínimos locales (grados)
Este	283	251	-32
Oeste	275		-24
Sur	241		10

En la tabla se observa que los mínimos locales de las direcciones Este y Oeste se encuentran adelantados a la dirección Norte 32 y 24 grados respectivamente. Por otra parte, la dirección Sur se ubica a 10 grados después del punto de referencia.

Estas variaciones indican que el emplear una copa asimétrica en el rotor genera una perturbación en la señal, y esa perturbación se ve reflejada en la posición angular de los mínimos locales de cada dirección.

Como se mencionó anteriormente, la metodología empleada en la realización de los ensayos no es la más apropiada debido a los errores accidentales y sistemáticos que puedan suceder. Estos errores se identificaron al realizar el ensayo por segunda ocasión.



*Ilustración 99. Diseño de rotor 1: posiciones de máximos y mínimos en planos polares (v2)*

Visualmente comparando los resultados obtenidos con los anteriores se observa un cambio en la posición angular de los mínimos y máximos locales.

Igual que antes, se obtuvo la diferencia de grados entre los mínimos locales considerando el Norte como punto de referencia.

*Tabla 30. Diseño de rotor 1: diferencia de posición angular de mínimos locales en función de la dirección (v2)*

Dirección	Valor medio aprox. de primer mínimo local (grados)	Valor de referencia aprox. dirección Norte (grados)	Diferencia entre mínimos locales (grados)
Este	278	255	-23
Oeste	260		-5
Sur	289		-34

En la Tabla 30 se observa que la posición angular del primer mínimo local de la dirección Norte permanece aproximadamente igual que la obtenida en la Tabla 29. Por otra parte, la ubicación de los mínimos de la dirección Este, Oeste y Sur ha cambiado significativamente. La posición angular de la dirección Este pasó de -34 a -23 grados, la dirección Oeste de -24 a -5 grados y la dirección Sur de +10 a -34 grados.

Por lo tanto, los mínimos de las direcciones Este y Oeste se mantienen adelantados respecto a la dirección Norte, y los mínimos de la dirección Sur han cambiado y ahora se ubican adelante de la dirección Norte.

Si bien estos resultados nos indican que la ubicación de los mínimos locales puede variar a causa de la metodología empleada, también nos demuestran que el diseño 1 del anemómetro asimétrico cumple con lo que se preveía, que era demostrar la influencia de la copa asimétrica en la señal de la velocidad y detectar variaciones en función de la dirección del viento.

### 6.1.1.2. Diseño de rotor 2

El procedimiento para analizar los resultados del diseño 2 es similar al realizado en el diseño 1. Se obtuvieron los siguientes planos polares.

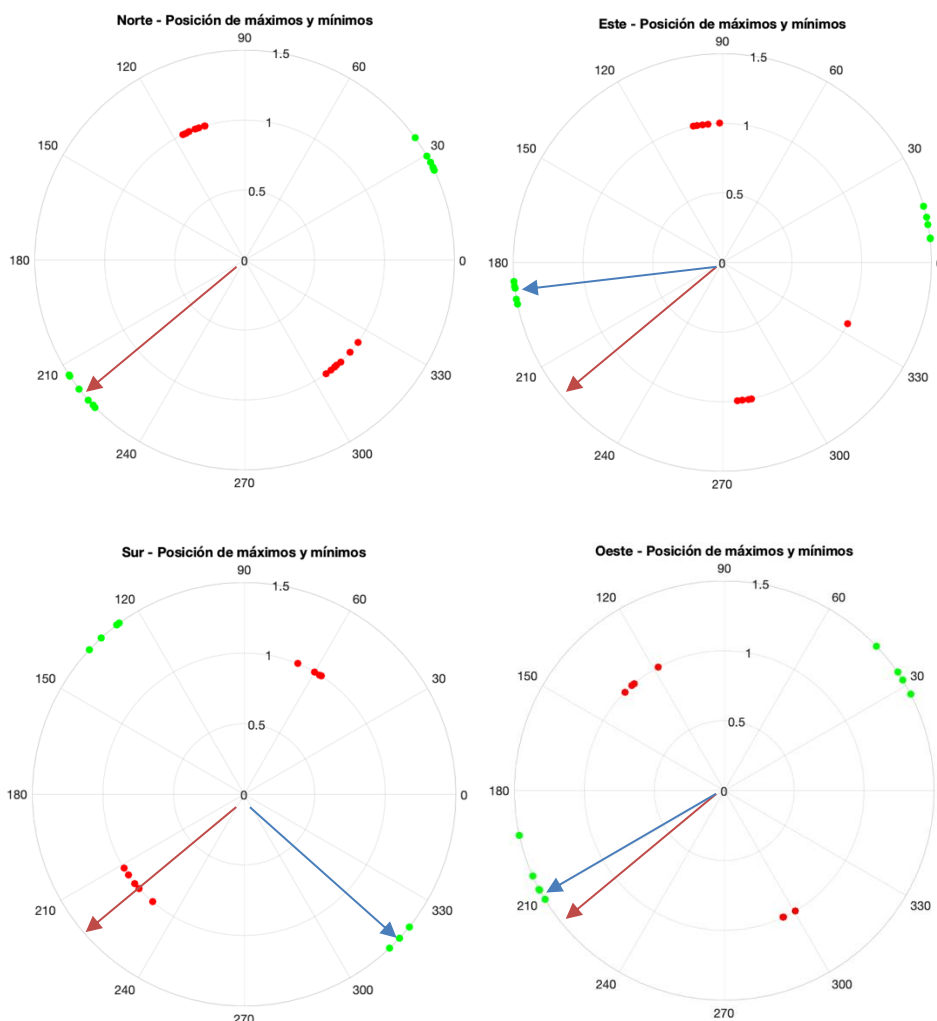


Ilustración 100. Diseño de rotor 2: posiciones de máximos y mínimos en planos polares (v1)

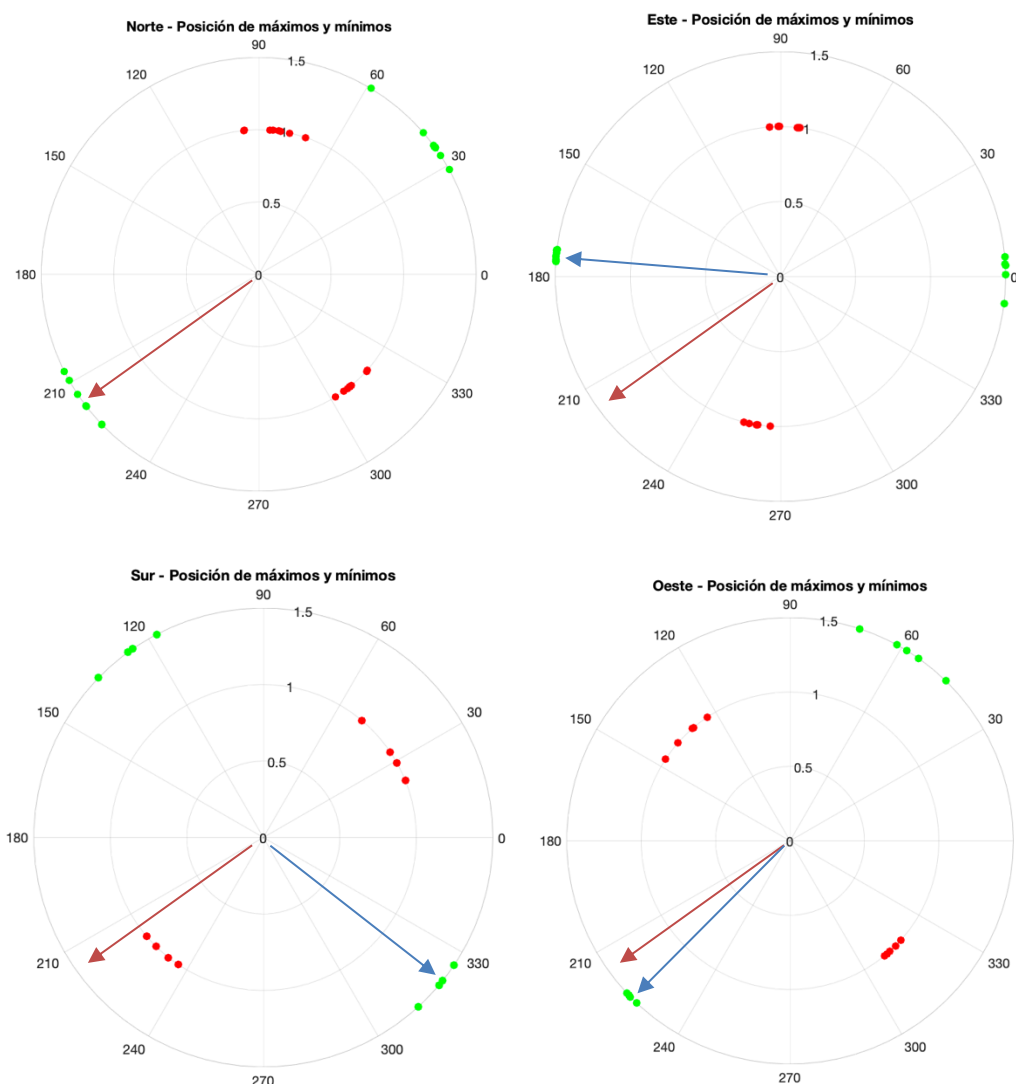
Comparando los planos polares del diseño 1 y diseño 2 se observa un cambio en la posición angular de los mínimos locales. Para ver esto a detalle se obtiene la tabla con la diferencia de grados entre mínimos.

Tabla 31. Diseño de rotor 2: diferencia de posición angular de mínimos locales en función de la dirección (v1)

Dirección	Valor medio aprox. de primer mínimo local (grados)	Valor de referencia aprox. dirección Norte (grados)	Diferencia entre mínimos locales (grados)
Este	187	219	32
Oeste	205		14
Sur	317		-98

Los resultados obtenidos indican en primer lugar que las posiciones de los mínimos de las direcciones Este y Oeste se encuentran atrasadas 32 y 14 grados respecto a la dirección Norte. Por otro lado, la dirección Sur se encuentra adelantada 98 grados respecto al punto de referencia.

Se realizó el ensayo con el diseño 2 por segunda ocasión para determinar si ocurren errores tal como sucedió en el diseño 1. Los planos polares obtenidos son los siguientes.



*Ilustración 101. Diseño de rotor 2: posiciones de máximos y mínimos en planos polares (v2)*

La ubicación en grados de los mínimos locales, así como su diferencia respecto al punto de referencia se presentan a continuación.

Tabla 32. Diseño de rotor 2: diferencia de posición angular de mínimos locales en función de la dirección (v2)

Dirección	Valor medio aprox. de primer mínimo local (grados)	Valor de referencia aprox. dirección Norte (grados)	Diferencia entre mínimos locales (grados)
Este	174	215	41
Oeste	225		-10
Sur	320		-105

Los valores obtenidos indican variación en la posición angular de los mínimos locales respecto a los de la Tabla 31. La variación por destacar es la dirección Oeste respecto al punto de referencia, antes se retrasaba 14 grados y ahora se adelanta 10 grados.

Sin embargo, si se compara la variación de la posición angular de los mínimos locales del diseño de rotor 1 y 2, con el diseño 2 se obtiene una variación inferior respecto al diseño 1. Esto significa que el diseño de rotor 2 presenta mejor estabilidad en la posición angular de los mínimos locales.

Cabe mencionar que se eligió para el análisis el primer mínimo local de manera indistinta, por lo que se espera resultados similares si se trabajase con el segundo mínimo o con los máximos locales.

### 6.1.2. Segundo ensayo

Debido a los resultados obtenidos en el ensayo anterior, se optó por emplear únicamente el diseño 2 del rotor. Se recuerda que por cada punto cardinal se realizó mediciones a las velocidades de 20, 40 y 60km/h.

#### 6.1.2.1. Calibración de velocidad

En este apartado se despliegan los resultados obtenidos en el proceso de cálculo de la recta pendiente,  $y = mx + b$ .

En el Apéndice 2 se encuentra disponible los valores de las velocidades empleados en la calibración.

En la siguiente tabla se presenta la velocidad promedio obtenida en cada punto cardinal en función de la velocidad del vehículo. La velocidad del anemómetro asimétrico ya ha sido convertida a km/h.

*Tabla 33. Valores promedio de velocidades en función de la dirección.*

Dirección	Velocidad de vehículo aproximada (km/h)	Velocidades promedio	
		Anemómetro asimétrico (km/h)	Anemómetro comercial BT-866A (km/h)
Norte	20	5,38	20,27
	40	10,59	36,79
	60	18,50	52,57
Este	20	5,62	18,91
	40	11,87	30,14
	60	18,84	52,64
Oeste	20	5,71	20,22
	40	11,35	33,97
	60	19,40	56,25
Sur	20	5,81	18,80
	40	10,31	35,65
	60	19,10	45,12

En las siguientes gráficas se presenta la comparación de velocidades entre el anemómetro asimétrico y el comercial, de acuerdo con cada una de las direcciones y considerando la velocidad del vehículo como referencia.



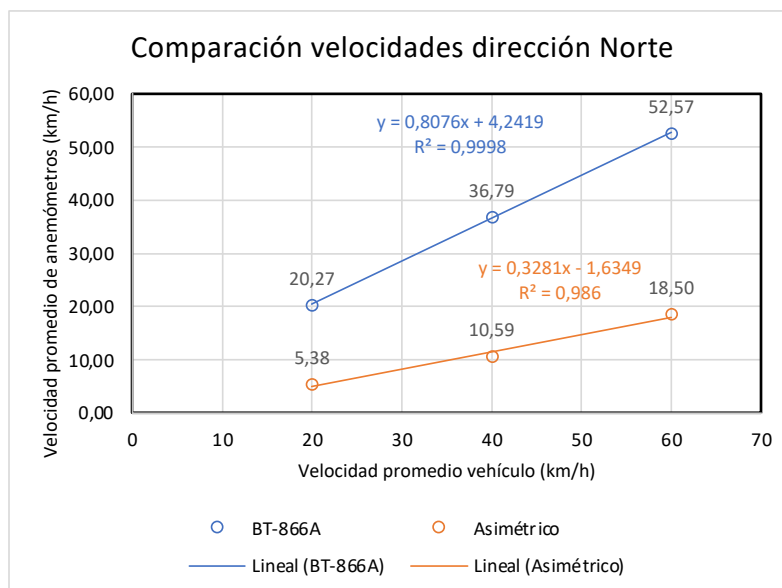


Ilustración 102. Comparación de velocidades dirección Norte

Para la dirección Norte se aprecia que las velocidades presentan un coeficiente de determinación elevado, por lo tanto, existe un buen ajuste.

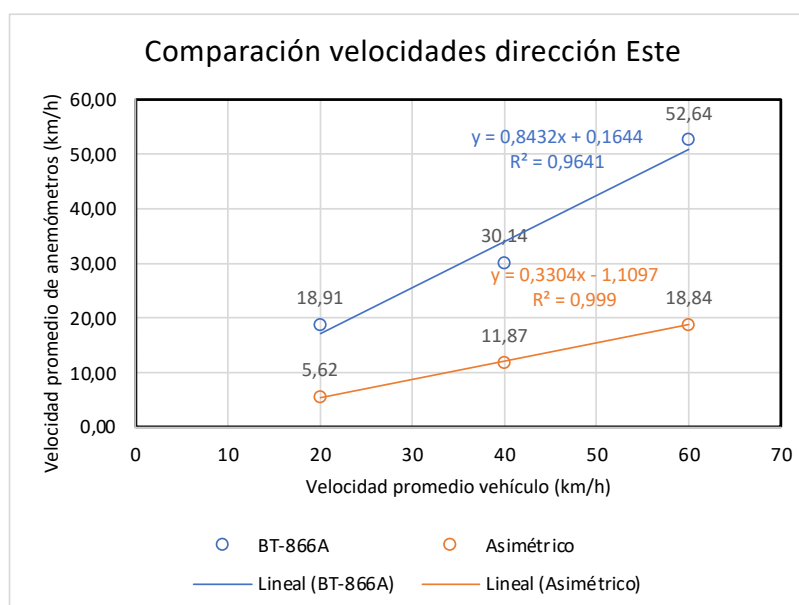


Ilustración 103. Comparación de velocidades dirección Este

En la dirección Este se presenta un ajuste casi perfecto por parte del anemómetro asimétrico, en cambio el anemómetro comercial tiene un ajuste menor. También se observa que la velocidad del anemómetro comercial tiende a variar más.

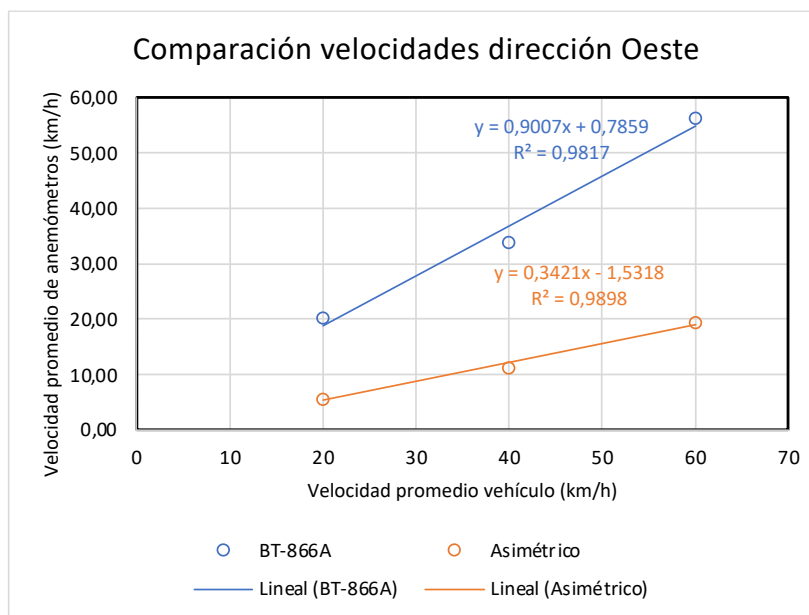


Ilustración 104. Comparación de velocidades dirección Oeste

Para la dirección Oeste se aprecia ajustes aceptables en las dos velocidades. El anemómetro comercial mantiene una menor linealidad respecto al anemómetro asimétrico.

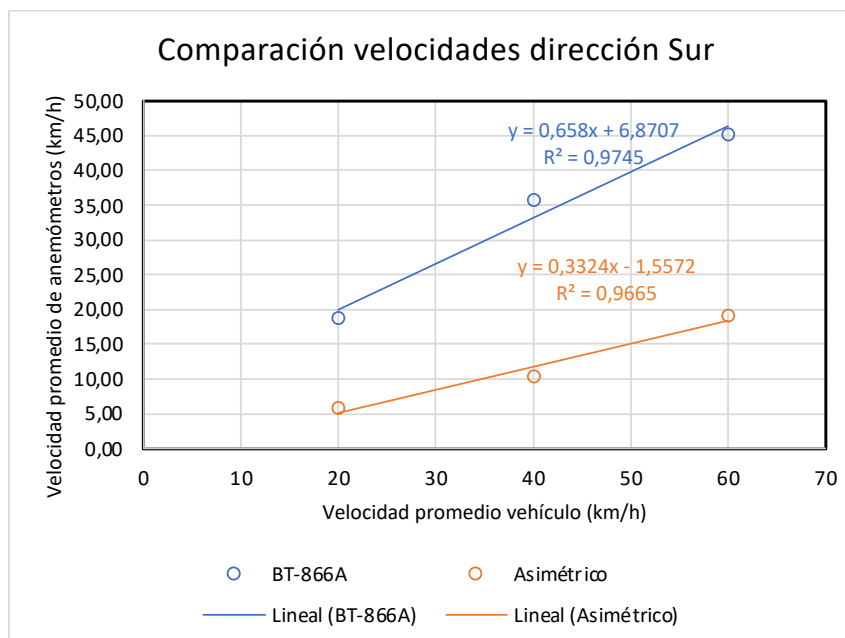


Ilustración 105. Comparación de velocidades dirección Sur

La dirección Sur indica un ajuste menor para el anemómetro asimétrico, por lo que en esta ocasión el anemómetro comercial se ajusta mejor a la velocidad del vehículo.

En los gráficos se observa en primer lugar que a una velocidad del vehículo de 20km/h, el anemómetro comercial se aproxima. Sin embargo, con el coche a una velocidad de 40 o 60km/h, el anemómetro BT-866A proporciona valores significativamente menores. Esto puede suceder por varios factores, como por ejemplo la influencia de las corrientes de aire contrarias al sentido de avance del vehículo. Así como la presencia de un posible error en el desarrollo del ensayo.

También se distingue una mayor linealidad en las velocidades del anemómetro asimétrico. Los dos dispositivos presentan buenos ajustes, siendo el del anemómetro asimétrico el mejor en la mayoría los casos.

Por otra parte, la velocidad del anemómetro asimétrico es muy inferior respecto a la del anemómetro comercial, por lo tanto, se requiere necesariamente una ecuación de la recta que calibre la salida del dispositivo.

Se ha procedido a graficar los datos de la Tabla 33 nuevamente, pero esta vez se representa la velocidad del anemómetro comercial en función del asimétrico, de esta manera se obtiene la línea de tendencia y la ecuación característica para cada dirección.

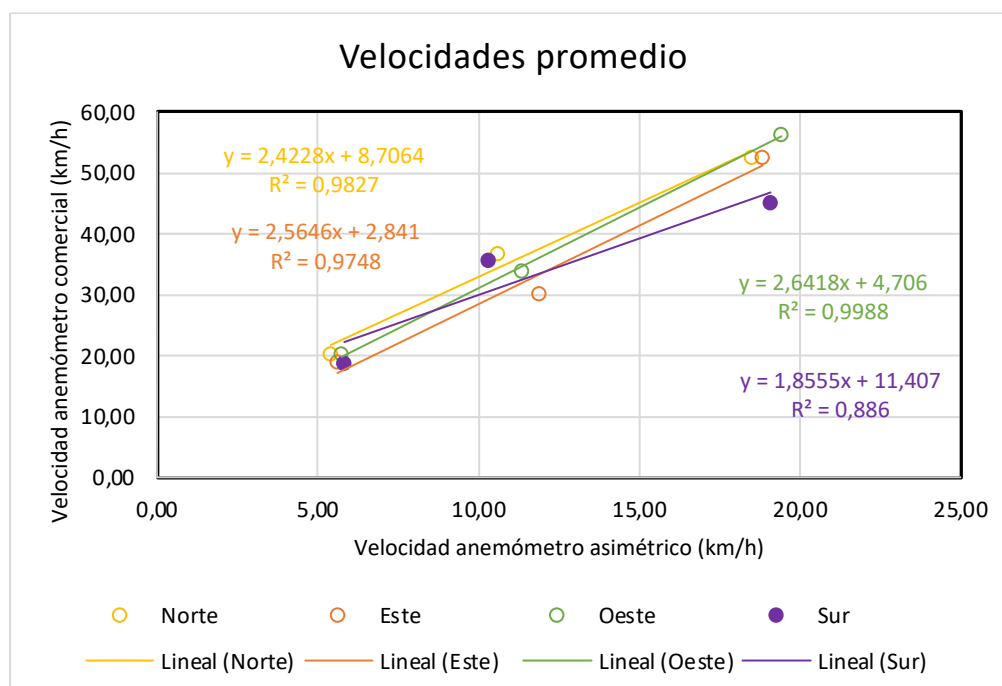


Ilustración 106. Gráfica de velocidades promedio.

Los parámetros de las ecuaciones de la recta de la Ilustración 106 se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 34. Parámetros de las ecuaciones de la recta

Dirección	m	b
Norte	2,4228	8,7064
Este	2,5646	2,841
Oeste	2,6418	4,706
Sur	1,8555	11,407

Los valores promedios de **m** y **b** definen la ecuación de la recta general a utilizar, y son:

Tabla 35. Parámetros promedios de las ecuaciones de la recta

Dirección	m	b
Ecuación de la recta	2,3712	6,9151

La ecuación de la recta general a emplear en el código de arduino viene definida de la siguiente manera:

$$y = 2,3712 * x + 6,9151$$

Donde  $x$  es la velocidad del anemómetro en km/h. Para realizar esta conversión de manera directa se puede utilizar el siguiente factor:

$$\text{factor de conversión} \frac{\text{grad}}{\text{s}} a \frac{\text{km}}{\text{h}} = 0,0056548667764616$$

Este factor se obtiene al unificar los diferentes pasos realizados para convertir los grados/s a km/h.

Aplicando la ecuación de la recta general a los valores de velocidad del anemómetro asimétrico es posible determinar el error que se comete.

Tabla 36. Calibración de velocidad y error relativo.

Dirección	Velocidades promedio			Error relativo (%)
	Anemómetro asimétrico (km/h)	Anemómetro asimétrico ajustado (km/h)	Anemómetro comercial BT-866A (km/h)	
Norte	5,38	19,67118521	20,27	3%
	10,59	32,01454806	36,79	13%
	18,50	50,79191818	52,57	3%
Este	5,62	20,23553188	18,91	-7%
	11,87	35,06334802	30,14	-16%
	18,84	51,57714684	52,64	2%
Oeste	5,71	20,46102775	20,22	-1%
	11,35	33,83094933	33,97	0%
	19,40	52,91323542	56,25	6%
Sur	5,81	20,68286485	18,80	-10%
	10,31	31,3649648	35,65	12%
	19,10	52,21406195	45,12	-16%

En la Tabla 36 se indica el ajuste de la velocidad del anemómetro asimétrico empleando la ecuación de la recta general. El mayor error cometido es de -16%, dicho error se comete debido a la baja linealidad que presentaba la velocidad del anemómetro comercial.

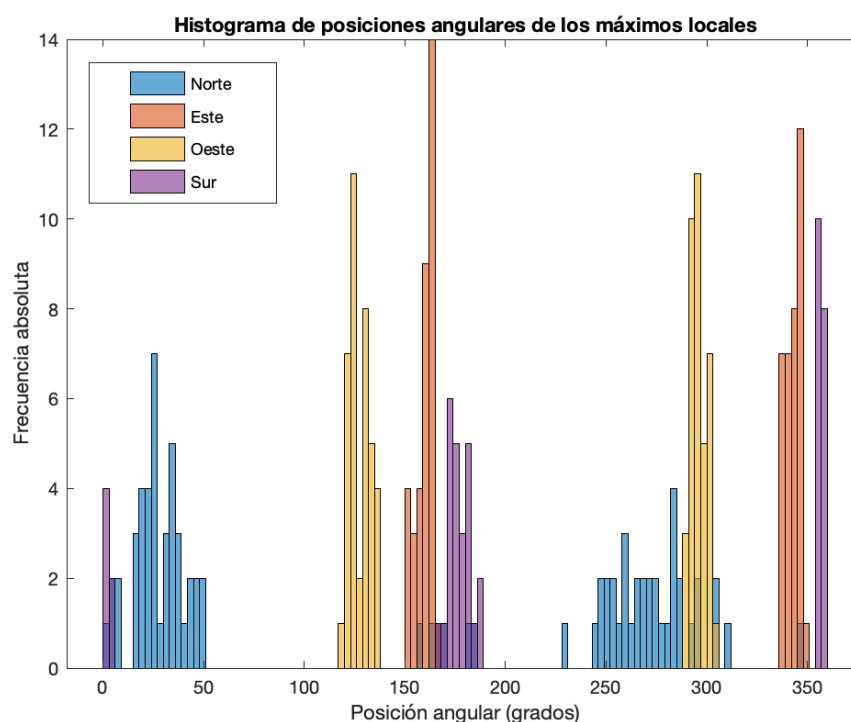
### 6.1.2.2. Sistema de clasificación

Para el sistema de clasificación se utilizaron varios datos recopilados en diferentes ensayos. Se obtuvo dos sistemas de clasificación para poder comparar los resultados. En la creación de cada sistema se utilizaron 4

ficheros de Excel que correspondían a los cuatro puntos cardinales a una velocidad de 40km/h.

### 6.1.2.2.1. Primer sistema de clasificación

Los histogramas obtenidos para el primer sistema se indican a continuación.



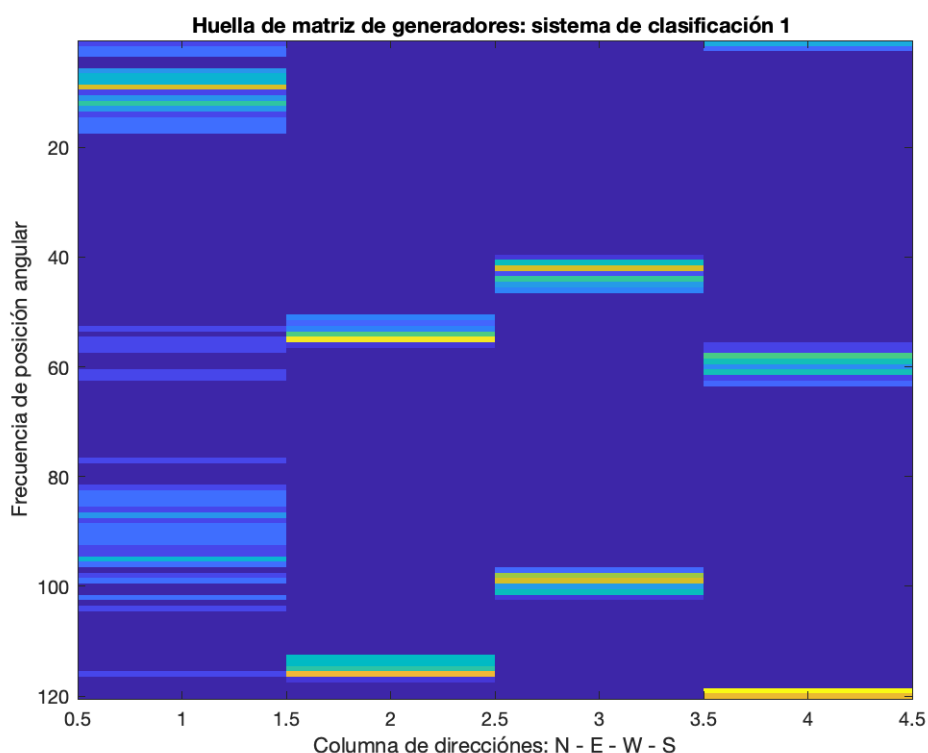
*Ilustración 107. Histograma de posiciones angulares de los máximos locales del sistema de clasificación 1.*

En el histograma correspondiente al sistema de clasificación 1 se puede apreciar la variación de la posición angular y frecuencia en función de la dirección del viento aparente. Esta representación es similar a la indicada en el Ensayo 1 con los planos polares, con la diferencia que permite determinar la frecuencia existente para cada ángulo y la superposición presente entre las direcciones.

Para la dirección Este y Oeste se observa una clara concentración de las posiciones angulares, además de ser las dos direcciones que mayor frecuencia tienen. Por otra parte, la dirección Norte tiene una mayor

dispersión, presenta una menor frecuencia y se superpone a la dirección Oeste. La dirección Sur tiene una concentración ajustada e indica una frecuencia variable.

Graficando la matriz de generadores obtenida a partir de la unión de los histogramas se obtiene la siguiente imagen, la cual indica una huella característica para cada una de las direcciones.



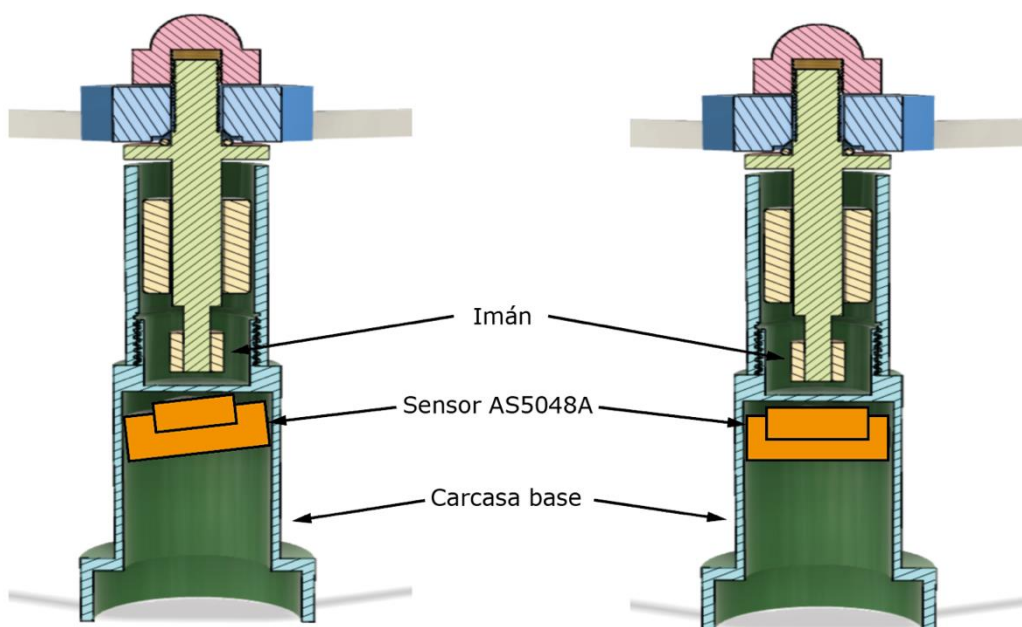
*Ilustración 108. Imagen de la matriz de generadores del sistema de clasificación 1.*

En la imagen se observa cuatro columnas que representan los cuatro puntos cardinales. El color azul oscuro representa un número "0" en la matriz de generadores, a medida que cambie el color se indica una variación en la frecuencia, utilizándose el color amarillo para revelar la máxima frecuencia registrada.

En la columna de la dirección Norte se obtiene mayor dispersión de la posición angular. Esta dispersión ocasiona la superposición con otras direcciones. Al existir una superposición con otra columna de dirección

podría significar que el sistema de clasificación no sea adecuado a causa de las fallas que pueda ocasionar.

La dispersión que se produce en la dirección Norte es ocasionada debido a errores accidentales. Específicamente sucede porque el sensor AS5048A no se encuentra correctamente ajustado en el interior de la base del anemómetro.



*Ilustración 109. Ajuste de sensor en la base del anemómetro. (izq.) Manera incorrecta; (der.) Manera correcta.*

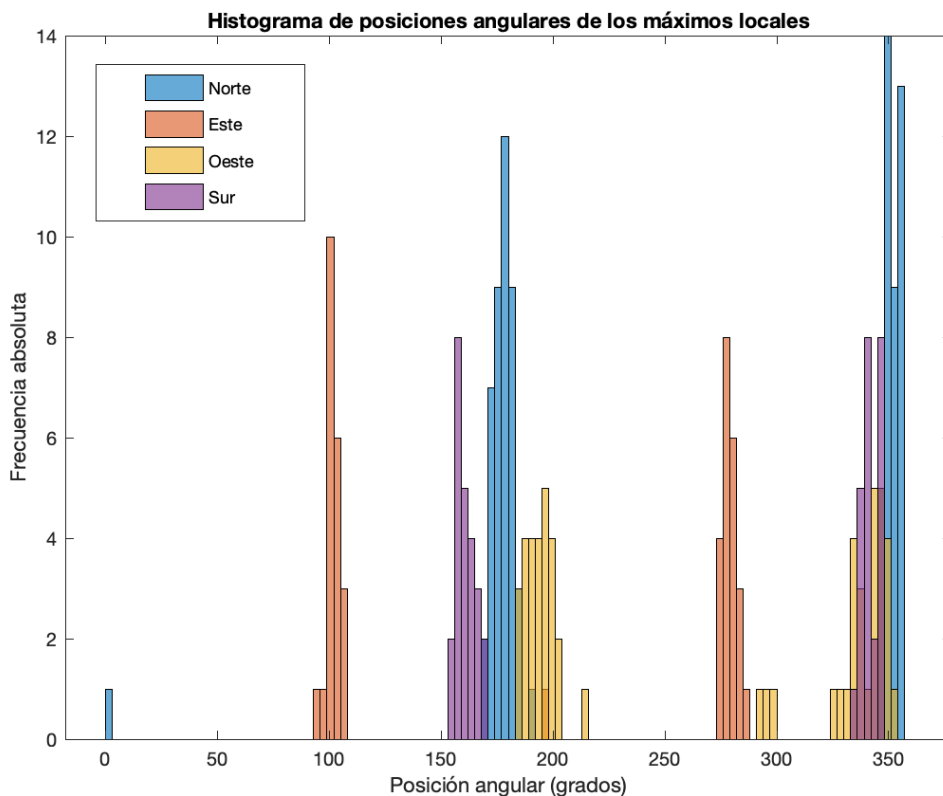
En la ilustración se observa como en la disposición izquierda el sensor se encuentra inclinado. Esta inclinación genera una lectura errónea del campo magnético que proporciona el imán cuando gira. Para solucionar este inconveniente es necesario mantener el sensor ajustado y correctamente fijo.

Las matrices obtenidas en el desarrollo del sistema de clasificación 1 se pueden consultar en el Apéndice 3.1

#### 6.1.2.2.2. Segundo sistema de clasificación

El histograma del segundo sistema de clasificación es el siguiente.

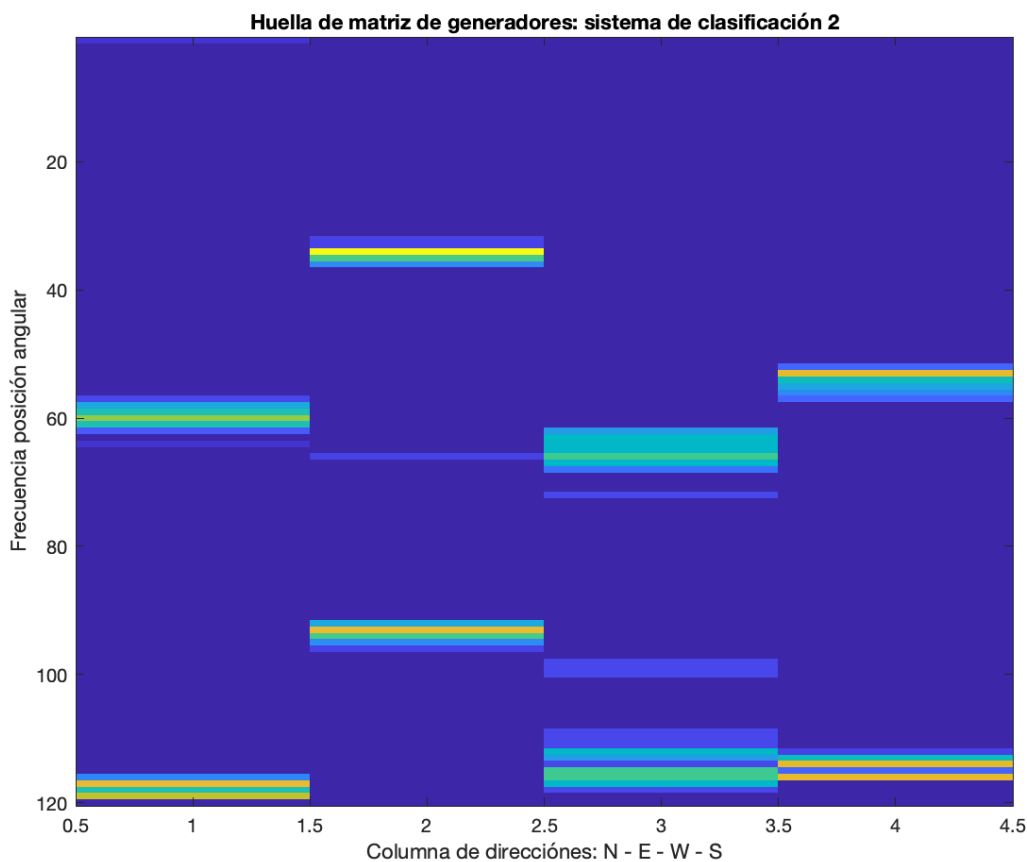




*Ilustración 110. Histograma de posiciones angulares de los máximos locales del sistema de clasificación 2.*

Se aprecia una distribución uniforme en cada dirección, a la vez que existe una mejor concentración. Sin embargo, se obtiene una mayor zona de superposición, en especial entre los 325 a 360 grados donde las direcciones Sur, Oeste y Norte se superponen significativamente.

La imagen de la matriz de generadores (M) del sistema es la siguiente.



*Ilustración 111. Imagen de matriz de generadores del sistema de clasificación 2.*

Si bien la huella presenta una mejor concentración de los máximos locales, en la zona inferior de la imagen, entre la fila 110 y 120 se observa desde otra perspectiva como las direcciones Norte, Oeste y Sur se encuentran superpuestas. Alguna en mayor medida, pero aun así nos advierte de un posible fallo en la clasificación. La dirección Este es la que mejor huella posee ya que no se superpone con ninguna dirección.

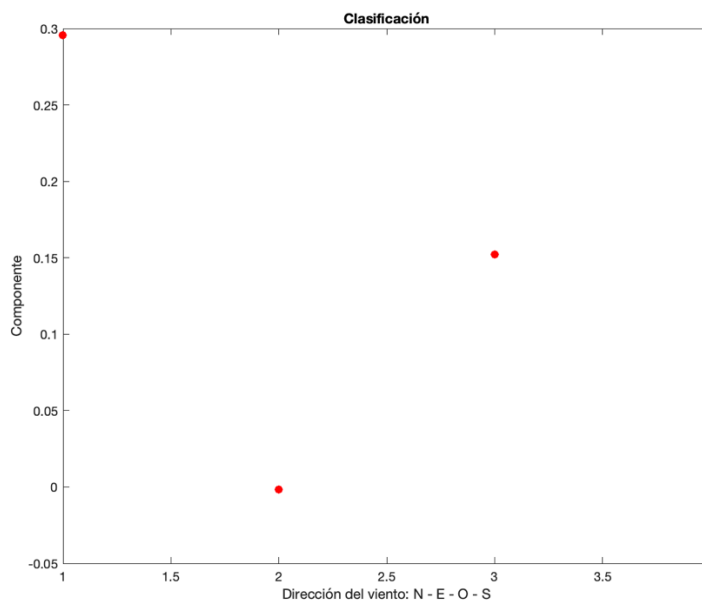
Por otra parte, se puede afirmar que en estos ensayos el sensor AS5048A si se ha ajustado correctamente en la base de la carcasa. A excepción de unas ligeras desviaciones en las direcciones Este y Oeste.

Igual que en el sistema de clasificación 1, las matrices del sistema de clasificación 2 se encuentran disponibles en el Apéndice 3.2.

### 6.1.2.2.3. Validación de sistemas de clasificación

Para la validación de cada sistema se utilizó diversos ficheros que engloban los cuatro puntos cardinales y las 3 velocidades del vehículo.

La gráfica resultante de la validación es como la que se presenta a continuación.



*Ilustración 112. Gráfica de validación del sistema de clasificación.*

Los puntos indican el valor de la componente en cada dirección. La mayor componente determina la dirección del viento.

En el sistema de clasificación (o matriz de proyección)  $D[4][120]$  los 4 histogramas se conforman por 120 divisiones o rejillas, esto matemáticamente se traduciría en un hiperplano de 4 dimensiones en un espacio de 120 dimensiones. Visto de un modo más práctico, cualquier histograma de entrada que se desee clasificar, se convierte en un vector con un espacio de 120 dimensiones. Lo que se realiza es la proyección de ese vector de 120 dimensiones en el subespacio de 4 dimensiones que corresponde al sistema de clasificación.

Calculando la norma del vector proyectado es posible determinar si el histograma proyectado sobre el sistema de clasificación se encuentra

perpendicular o inclinado. Si la norma es pequeña informa que el histograma está perpendicular y no corresponde con ninguna de las cuatro direcciones, y si es grande, indica que el histograma está inclinado y es susceptible de ser clasificado.

Los resultados obtenidos en las validaciones se resumen en las siguientes tablas. Las gráficas de validación obtenidas para cada dirección y sistema de clasificación se pueden consultar en el Apéndice 4.

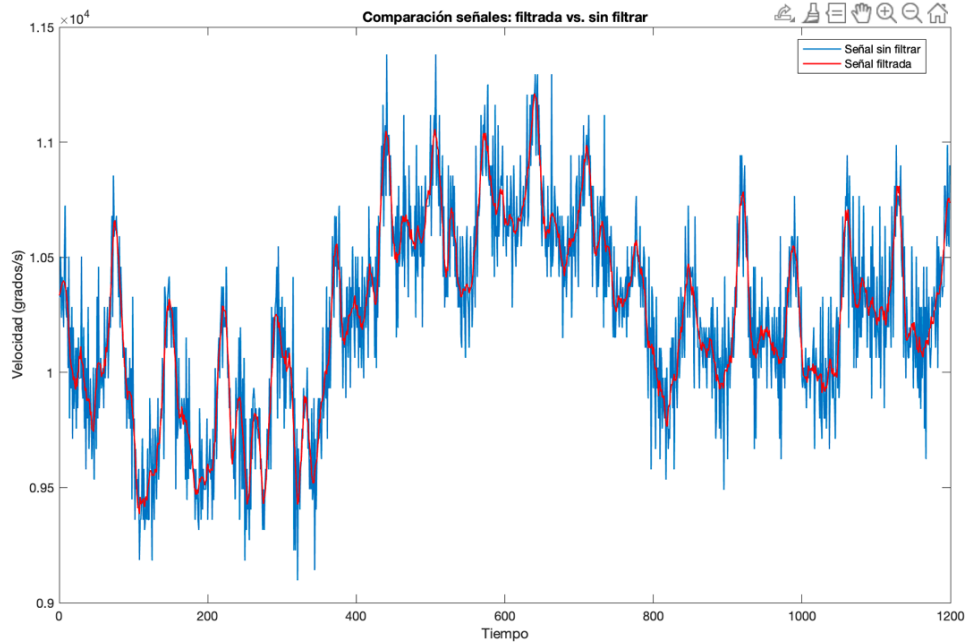
*Tabla 37. Resultados de la validación del sistema de clasificación 1.*

Dirección	Velocidad	Norma	Dirección clasificada	¿Dirección correcta?
Oeste	60	0.4573	O	Si
	20	0.3807	O	Si
Sur	60	0.7427	S	Si
	20	0.6554	S	Si
Norte	60	0.4258	N	Si
	20	0.5997	N	Si
Este	60	0.6070	E	Si
	20	0.4845	N	No
Precisión				87.5%

Para la validación del sistema de clasificación 1, en la Tabla 37 se observa que, para 8 ensayos distintos, la precisión alcanzada es del 87.5%. En esta validación se emplearon velocidades de 20 y 60km/h debido a que eran los archivos disponibles que no se habían empleado en el proceso de creación del sistema de clasificación.

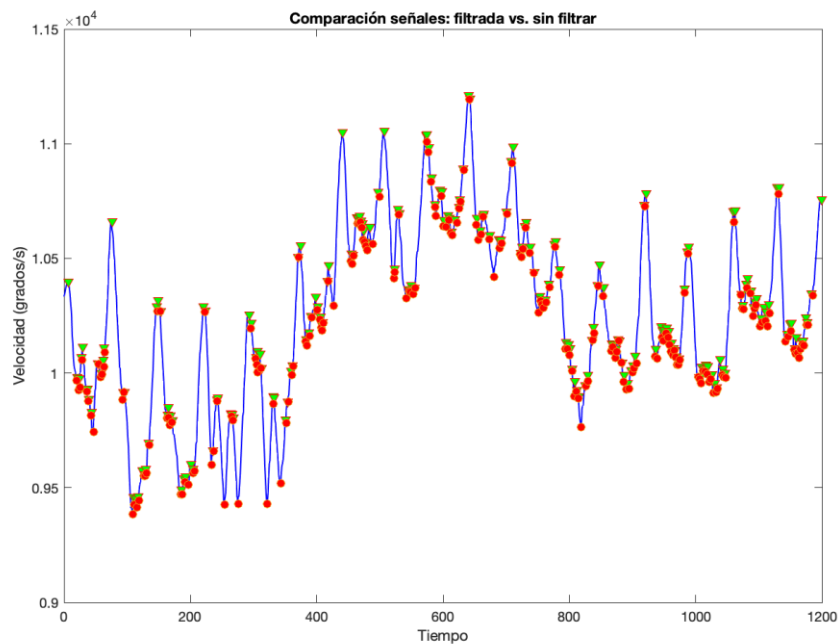
El sistema consigue clasificar todas las direcciones a excepción del Este a 20km/h. Esto puede verse ocasionado debido a la dispersión que presentaba el sistema de clasificación en la dirección Norte, tal como se indicó en la Ilustración 108, sin embargo, no es la causa en esta ocasión.

Si se grafica la señal de derivada numérica de la dirección Este a la velocidad de 20km/h, se obtiene:



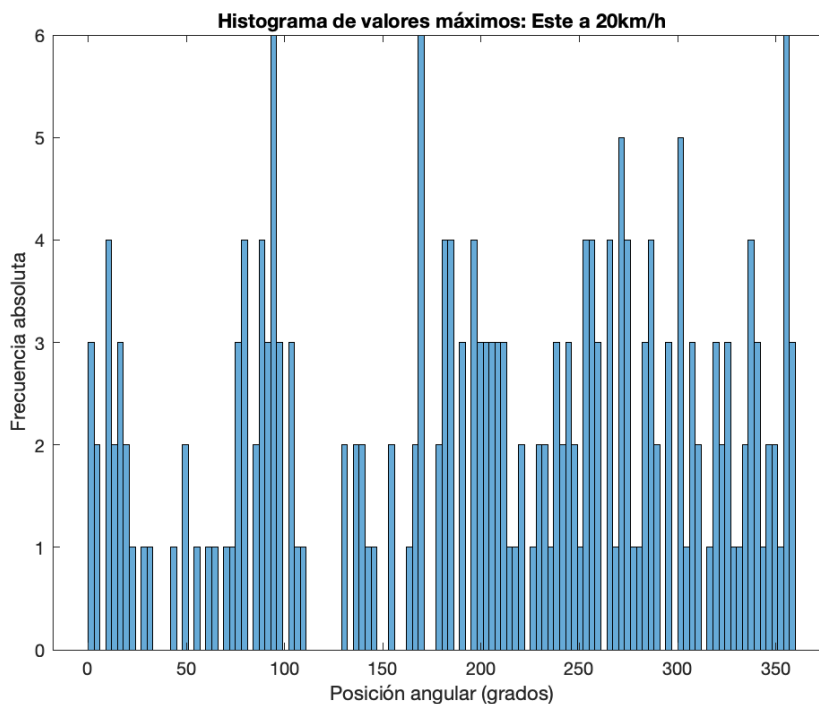
*Ilustración 113. Validación de sistema 1: señal de velocidad en dirección Este, velocidad 20km/h.*

Se aprecia una señal con ruido excesivo, incluso filtrando la señal es complicado definir un patrón. Este ruido ocasiona que al momento de determinar los máximos y mínimos se cometa errores.



*Ilustración 114. Validación de sistema 1: máximos (verdes) y mínimos (rojos) locales de dirección Este, velocidad 20km/h.*

Dichos errores también se manifiestan en el vector que se proyectará sobre el sistema de clasificación. El histograma que se obtiene indica una clara dispersión en todo el rango de giro de 0 a 360 grados, por lo tanto, el sistema es incapaz de determinar la dirección correcta.



*Ilustración 115. Validación de sistema 1: histograma de vector dirección Este, velocidad 20km/h.*

El ruido obtenido en la señal de la dirección Este es ocasionado a fallos accidentales. Lo más probable es que no se haya ajustado correctamente el sensor en el interior del anemómetro.

Considerando el porcentaje de aciertos del sistema de clasificación 1, 87,5%, se puede considerar como bueno. Sin embargo, sería conveniente realizar más validaciones para determinar si la precisión presenta variaciones.

Para el segundo sistema de clasificación se realizó más pruebas de validación gracias a la información recopilada en varias pruebas de campo.

Tabla 38. Resultados de la validación del sistema de clasificación 2.

Dirección	Velocidad	Norma	Dirección clasificada	¿Dirección correcta?
Oeste	60	0.4309	N	No
	40	0.6740	N	No
	20	0.7292	O	Si
	20	0.5769	O	Si
Sur	60	0.4063	S	Si
	60	0.5495	N	No
	40	0.3524	S	Si
	20	0.8966	N	No
	20	0.7440	N	No
Norte	60	0.6793	S	No
	60	0.6840	S	No
	40	0.8462	N	Si
	20	0.6861	N	Si
	20	0.4330	N	Si
Este	40	0.3658	E	Si
	60	0.0622	E	Si
	20	0.5690	E	Si
Precisión				58.82%

La precisión obtenida en la validación del sistema de clasificación 2 es de 58.82%. Este porcentaje significativamente menor respecto al obtenido en el sistema de clasificación 1 se debe a 2 factores.

El primero es la realización de la validación con un mayor número de muestras, en total se emplearon 17 archivos recopilados en las pruebas de campo, es más del doble de archivos utilizados para validar el sistema de clasificación 1, por lo tanto, existe mayor probabilidad de fallo.

El segundo factor es la superposición que se genera en las posiciones angulares de los máximos locales. Anteriormente en la Ilustración 110 ya se había comentado la posible influencia que tendría esta superposición en el sistema de clasificación, y con el proceso de validación ha sido posible demostrar su efecto.

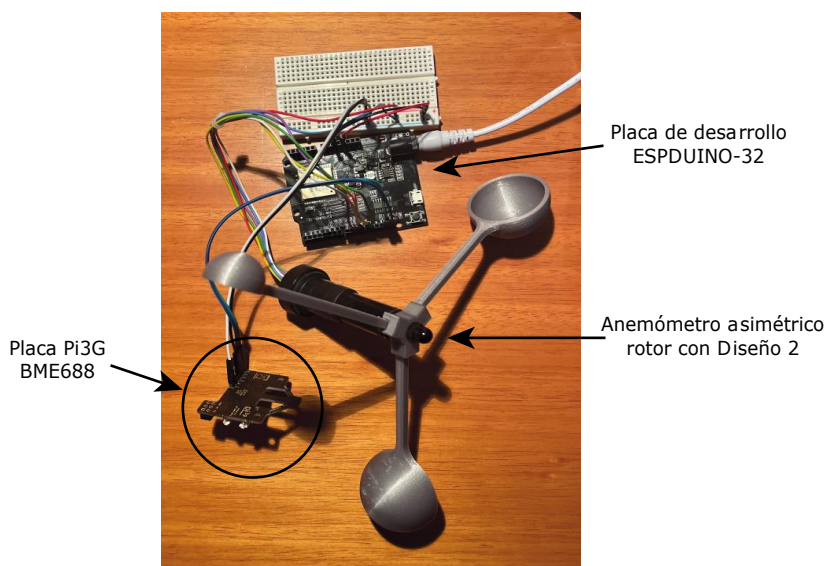
En la columna de las normas se observa que incluso cuando el sistema clasifica mal, la norma obtenida es elevada. Esto es de esperarse debido a que, si bien el vector del histograma que ingresa es proyectado con el sistema de clasificación, debido a la superposición generada puede

sucedir que el vector indique una proyección favorable (inclinada) pero no es seguro que dicha proyección sea sobre la dirección que le corresponde. Por lo tanto, la norma del vector únicamente nos permite conocer el grado de proyección mas no la precisión de esta.

Por lo tanto, la matriz de proyección (D) del segundo sistema de clasificación permite determinar la dirección del viento, pero su probabilidad de fallo es elevada. Sin embargo, tener la capacidad de acertar en un 58.82% es un porcentaje mejor que el azar.

## 6.2. PROTOTIPO DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Una vez integrados el hardware y software se obtiene el prototipo de la estación meteorológica. En la siguiente ilustración se observa la conexión de los sensores de los sensores a la ESPDUINO-32, misma que se encarga de gestionar y enviar la información a la plataforma ThingSpeak.



*Ilustración 116. Montaje físico del prototipo en una placa de pruebas.*

En la Ilustración 116 no se incluye el montaje físico del sistema autónomo de energía, sin embargo, en los anexos se puede consultar el



esquema eléctrico de la estación meteorológica con los componentes comerciales que se han empleado en su desarrollo.

La estación meteorológica podría implementarse con módulos comerciales siguiendo el esquema eléctrico, o se podría evolucionar el sistema electrónicamente y desarrollar una PCB.

En caso de crear un prototipo que unifique todos los elementos en una PCB, el convertidor elevador no se utilizaría y el gestor BMS debe estar integrado con la ESP32 para minimizar el consumo de energía total del sistema.

### *6.2.1. Monitorización de los parámetros atmosféricos*

La interfaz de usuario para la visualización de los datos es la siguiente.

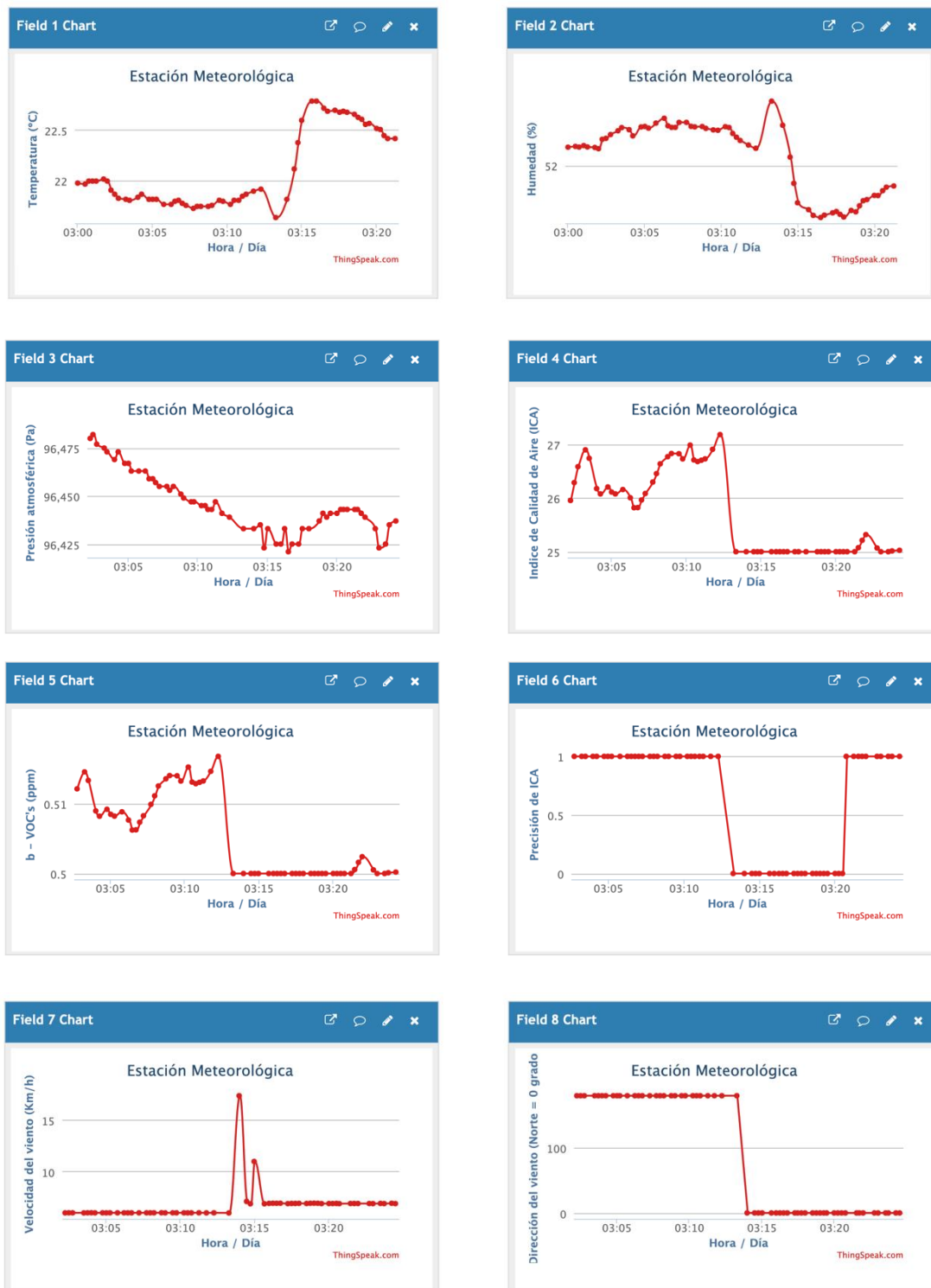


Ilustración 117. Interfaz de usuario en ThingSpeak (1).

Es posible visualizar en tiempo real de manera detallada las lecturas realizadas por los sensores. En la gráfica de la precisión del ICA, se

observa que se mantiene entre 1 y 0, por lo que está indicando que el BME688 aún está calibrando su sensor de gas.

También se ha utilizado Widgets para representar los parámetros de una manera más sencilla.

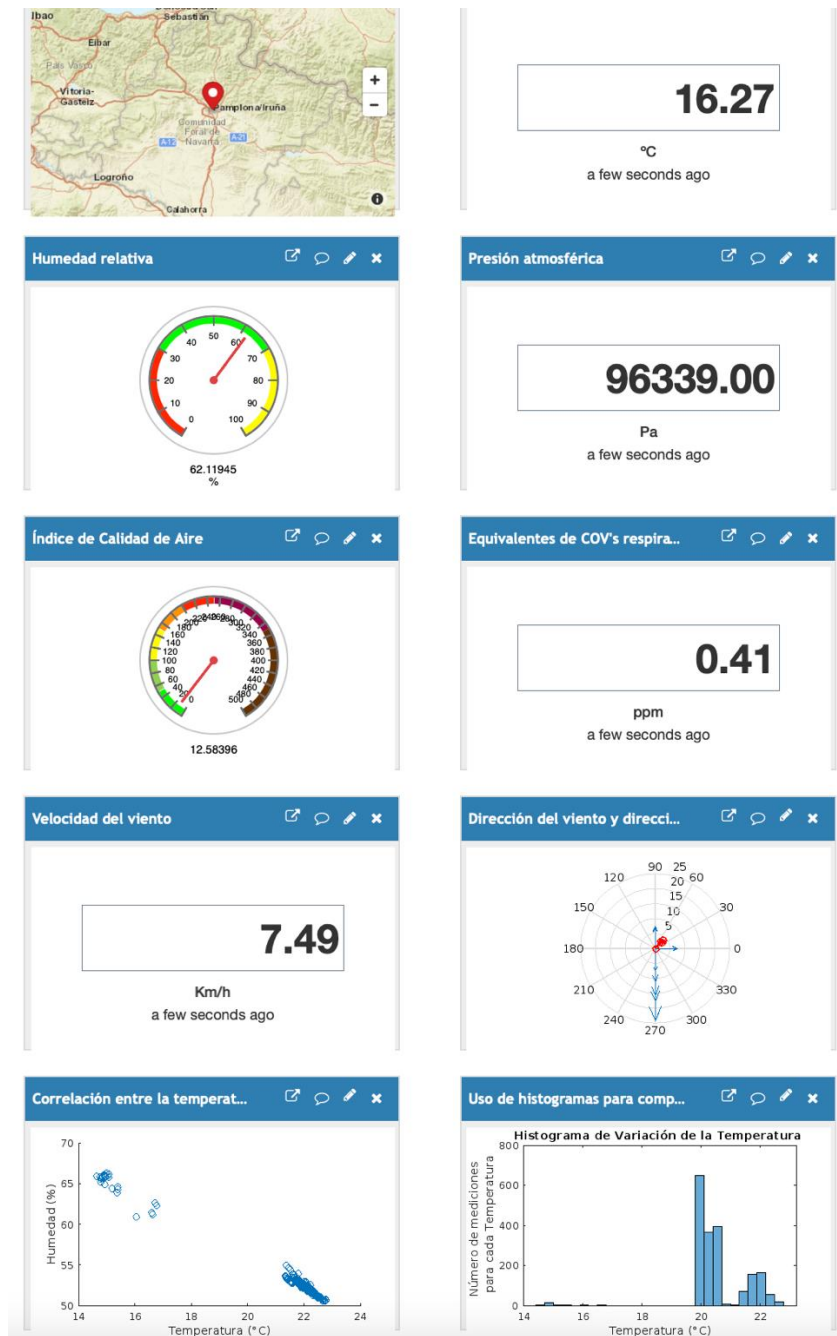


Ilustración 118. Interfaz de usuario en ThingSpeak (2).

Para el índice de calidad del aire se ha establecido los rangos y colores característicos siguiendo la Tabla 12, de esta manera es posible determinar rápidamente si la calidad del aire es apropiada.

Además, se implementó un plano polar que indica la intensidad y dirección del viento, así como la dirección media en tiempo real.

La representación de los datos en la aplicación móvil Thingview presenta la siguiente interfaz.

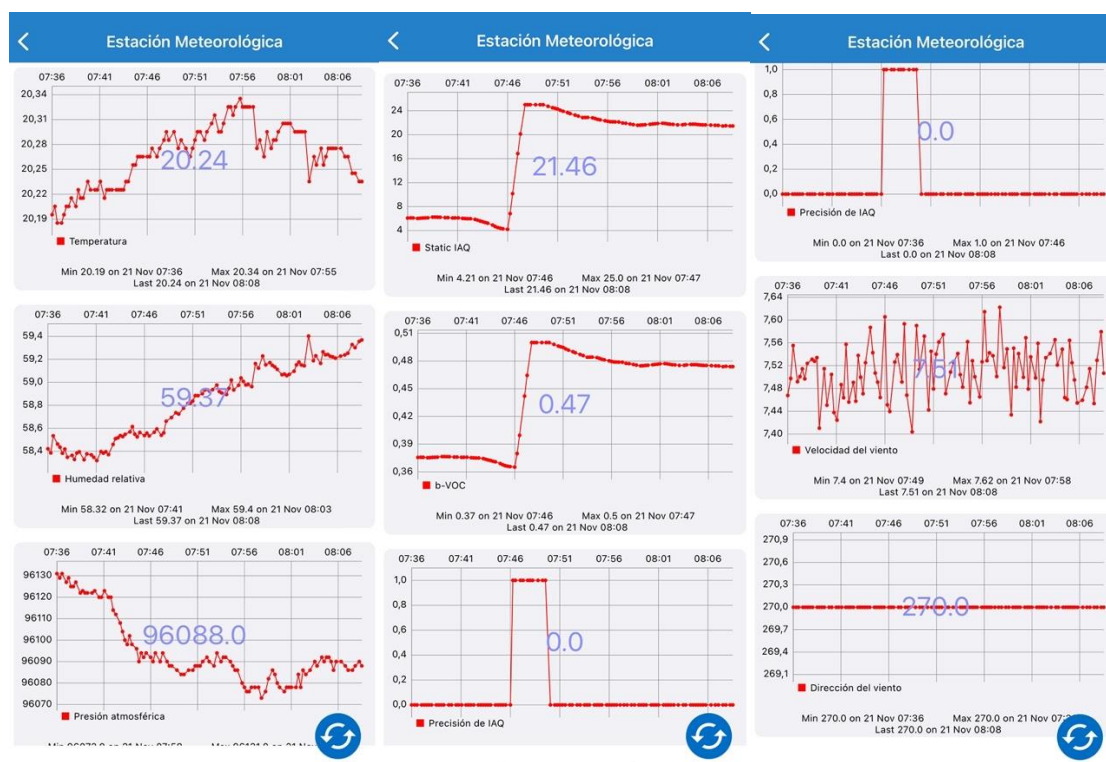


Ilustración 119. Interfaz de usuario en app móvil Thingview

### 6.3. ESTIMACIÓN DE COSTES

En este apartado se realiza una estimación del coste que puede suponer la implementación de la estación meteorológica.

El coste del anemómetro asimétrico no ha sido considerado puesto que no se ha realizado la impresión completa del mismo, además que

dependiendo de si la impresión se realiza a través de terceros o por cuenta propia el precio puede variar.

Sin embargo, si se considera que el precio de la impresión 3D es por gramo es posible determinar un coste aproximado. Los rotores presentan los siguientes pesos.



Ilustración 120. Peso de rotores impresos en 3D. (izq.) Diseño 1; (der.) Diseño 2.

Considerando que el precio de impresión cuesta [48] de 0,03€ a 0,06€ para impresoras SLA, y el peso obtenido en cada diseño de anemómetro es 10 y 19 gramos respectivamente. El total a pagar asciende a 0,60€ y a 1,14€. Suponiendo que el peso del anemómetro completo es de 80 gramos, el coste a apagar sería alrededor de 5€.

Tabla 39. Estimación de costes

Producto	Descripción	Unidades	Precio (€)
ESPDUINO-32	Placa de desarrollo	1	5,00
BME688	Sensor 4 en 1- placa de conexión	1	29,00
AS5048A	Encoder magnético	1	10,25
Panel solar	Modelo CNC 165x165-6	1	12,00
Módulo de carga	BMS con integrado TP4056	1	2,00
Baterías 18650	Marca LiitoKala - 3000mAh	5	12,80
Convertidor elevador	Módulo de aumento de tensión	1	2,00
<b>TOTAL</b>			<b>73,05</b>

El coste de los equipos que componen la estación meteorológica asciende a 73,05€. El dispositivo que supone un mayor gasto es la placa de conexión del sensor BME688. Este coste se puede reducir si se desarrolla una PCB y adquiere únicamente el sensor, cuyo valor asciende a 8,79€. El coste de la estación se reduciría a 52,84€. También, en caso de disponer acceso a la red de suministro eléctrico, el sistema autónomo podría no implementarse, reduciéndose aún más el precio. El nuevo valor ascendería a 24,04€. Un valor que, si se compara con los elementos comerciales presentados al inicio del trabajo, es significativamente menor.

Cabe mencionar que la estación debe contar con una caseta que la resguarde, así como bases para la instalación de los paneles solares. En caso de realizarla se optaría por fabricarla con tecnología de impresión 3D debido a la excelente relación calidad-precio que supone.

## 7. CONCLUSIONES

Se ha conseguido diseñar una estación meteorológica de bajo coste con conectividad IoT, que cuenta con un hardware y software trabajando en sinergia para proporcionar las lecturas de los parámetros atmosféricos.

En primer lugar, se consiguió implementar la medición de cuatro parámetros atmosféricos a través de un solo sensor, minimizándose de esta manera el consumo energético a la vez que se proporciona lecturas fiables. El módulo del sensor empleado no es de bajo coste, por lo que sería efectivo realizar la compra individual del sensor y desarrollar una PCB.

En segundo lugar, a través de un enfoque experimental y con base en estudios bibliográficos, se consiguió diseñar un dispositivo de bajo coste capaz de medir la velocidad y dirección del viento. Para la velocidad se calculó una ecuación de calibración y para la dirección se ha obtenido dos sistemas de clasificación que determinan los cuatro puntos cardinales principales. Debido a la limitación de los recursos no ha sido posible tener un control sobre los errores sistemáticos y accidentales, por lo que los sistemas de clasificación alcanzan precisiones del 87,5% y 58,8%. Sin embargo, en los resultados se demuestra la posibilidad de mejorar la precisión, para ello es necesario continuar investigando, y a ser posible en un entorno que proporcione mejores herramientas de trabajo.

En tercer lugar, se realizó el estudio de un sistema autónomo de energía capaz de mantener funcionando correctamente a la estación meteorológica a lo largo de un año.

Por último, gracias a la tecnología inalámbrica IEEE 802.11 la estación meteorológica pudo enviar correctamente los datos a la plataforma ThingSpeak, y a través de esta se pudo implementar una

interfaz de usuario intuitiva que permite la visualización de los datos en tiempo real desde cualquier dispositivo con acceso a internet.

Durante el estudio, desarrollo e implementación de los dispositivos, los diversos foros y tutoriales disponibles en la web han sido de muchísima ayuda. Por una parte, el soporte técnico que BOSCH proporciona por medio de una comunidad en línea ha permitido alcanzar un mayor grado de comprensión del sensor BME688, así como ha ayudado a solucionar diversos inconvenientes que se han presentado. Por otra parte, para la integración del sensor AS5048A en el anemómetro asimétrico, no existía información relacionada a la aplicación del sensor con una derivada numérica que permita medir la velocidad de giro, por lo que ha sido necesario desarrollarla desde cero alcanzándose con éxito su implementación.

A lo largo del desarrollo de la estación meteorológica se ha encontrado varios inconvenientes en el uso de los diversos programas de adquisición, procesamiento y análisis de datos, sin embargo, esto ha motivado a indagar a profundidad sobre las herramientas que proporcionan y se ha conseguido implementar soluciones ingeniosas, a la vez que se ha alcanzado un nuevo nivel de manejo de estos.

En definitiva, con el prototipo de la estación meteorológica se pone al alcance de las personas un sistema capaz de medir y proporcionar la visualización de seis parámetros ambientales por medio del IoT. El dispositivo encargado de la dirección del viento es susceptible de mejora, pero las bases del funcionamiento de su diseño han sido demostradas.



## 7.1. TRABAJOS A FUTURO

En primer lugar, se plantea una mejora de la fiabilidad del sistema de clasificación de la dirección del viento a través de la realización de un mayor número de ensayos, así como el ajuste de la concentración de las posiciones angulares de los máximos y mínimos locales, evitándose de esta forma la superposición entre estos.

En segundo lugar, se plantea el desarrollo de un sistema de *machine-learning* que permita el ajuste continuo del sistema de clasificación del anemómetro asimétrico. Para ello el sistema debe ser capaz de procesar a tiempo real los vectores de los histogramas de entrada y compararlos con una matriz o sistema de referencia.




En tercer lugar, se plantea el análisis del anemómetro asimétrico considerando un enfoque analítico o numérico, desarrollándose de esta manera expresiones matemáticas que expliquen su comportamiento y permita corroborar los resultados obtenidos con un enfoque experimental.

En cuarto lugar, se plantea la integración de los diferentes componentes a través del desarrollo de una PCB, así como el diseño de una caseta que resguarde el dispositivo y cuente con los soportes necesarios para la implementación de los paneles solares. También se agrega la posibilidad de disminuir el consumo del sistema por medio de la optimización del código fuente, haciendo uso de los sistemas de ahorro de energía que proporciona la ESP32.

Por último, se plantea un seguidor solar que permita ajustar la inclinación de los paneles y conseguir de manera óptima captar la mayor cantidad de energía solar disponible.

## 8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado están alineados con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y metas, de la Agenda 2030:

- Objetivo 3 - Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.  
• Meta 3.9 Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo.
- 
- Objetivo 7 - Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.  
• Meta 7.a De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo.
- 
- Objetivo 9 - Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.  
• Meta 9.1 Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.  
• Meta 9.4 De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de
- 

tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas

- Objetivo 13 - Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
- Meta 13.b Promover mecanismos para aumentar la capacidad para la planificación y gestión eficaces en relación con el cambio climático en los países menos adelantados y los pequeños Estados insulares en desarrollo, haciendo particular hincapié en las mujeres, los jóvenes y las comunidades locales y marginadas.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

[1] J. Salazar y S. Silvestre, *Internet de las cosas*. Techpedia. [En línea]. Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100921/LM08\\_R\\_ES.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100921/LM08_R_ES.pdf)

[2] A. M. Vicedo-Cabrera *et al.*, «The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change», *Nature Climate Change*, vol. 11, n.º 6, pp. 492-500, jun. 2021, doi: 10.1038/s41558-021-01058-x.

[3] Y. A. Sepúlveda Casadiego, «Importancia de las estaciones meteorológicas para la toma de decisiones en la agricultura.», may 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.33323.46886.

[4] P. Pfaffenbichler, L. Á. Guzmán, D. De la Hoz, y S. Shepherd, «Análisis de las tasas sobre emisiones de CO2 en el sector del transporte como medida de alcanzar escenarios sostenibles.», *VIII Congreso de Ingeniería de Transporte*, jul. 2008, Accedido: 2 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://oa.upm.es/1869/1/GUZMAN\\_PON\\_2008\\_01.pdf](https://oa.upm.es/1869/1/GUZMAN_PON_2008_01.pdf)

[5] U. Fernandez Gallego, «Estación meteorológica basada en microcontrolador arduino», Universidad del País Vasco, Bilbao, 2021. Accedido: 27 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/53442/TFG\\_UnaiFernandezGallego.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/53442/TFG_UnaiFernandezGallego.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[6] E. Collado, E. Valdés, A. García, y Y. Sáez, «Design and implementation of a low-cost IoT-based agroclimatic monitoring system for greenhouses», *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 5, n.º 4, pp. 251-283, nov. 2021, doi: 10.3934/electreng.2021014.

[7] Argent Data Systems, «Weather Sensor Assembly p/n 80422». Accedido: 26 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://www.mouser.es/datasheet/2/813/Weather\\_Sensor\\_Assembly\\_-2526258.pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/813/Weather_Sensor_Assembly_-2526258.pdf)

[8] R. K. M. Math y N. V. Dharwadkar, «IoT Based Low-cost Weather Station and Monitoring System for Precision Agriculture in India», en *2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, 2018, pp. 81-86. doi: 10.1109/I-SMAC.2018.8653749.

[9] G. F. L. R. Bernardes, R. Ishibashi, A. A. S. Ivo, V. Rosset, y B. Y. L. Kimura, «Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring», *Digital Communications and Networks*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.05.002>.

[10] H. Amer, R. Mumtaz, H. Anwar, y S. Poslad, «A Very Low Cost, Open, Wireless, Internet of Things (IoT) Air Quality Monitoring Platform», en *2018 15th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT (HONET-ICT)*, 2018, pp. 102-106. doi: 10.1109/HONET.2018.8551340.

[11] J. García Domínguez, J. A. Azuara Jiménez, A. P. Aranzolo Sánchez, y E. Campero Ángeles, «Medición y adquisición de datos para una estación meteorológica alimentada con energía solar», *RINDERESU*, vol. 5, n.º 2, sep. 2020, Accedido: 2 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/107>

[12] H. H. Forero Giraldo y D. C. Camberos Ortiz, «Desarrollo de una red punto a punto con tecnología LORA y servidor web», Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia, 2020. Accedido: 6 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en:

[https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/20540/4/2020\\_Desarrollo\\_LoRa\\_Web.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/20540/4/2020_Desarrollo_LoRa_Web.pdf)

[13] S. Kang'iri, C. Gradl, J. Byiringiro, y H. Ngetha, «Design and Calibration of a 3D-Printed Cup-Vane Wireless Sensor Node», *Designs*, vol. 2, n.º 3, 2018, doi: 10.3390/designs2030021.

[14] Amazon, «Estación meteorológica Sainlogic profi WLAN, estación meteorológica inteligente de Internet WiFi con pantalla grande a color de 8 pulgadas, alarma sincronizada, sensores para exteriores», *Amazon.es*, 28 de diciembre de 2019. [https://www.amazon.es/dp/B0836FVVYZ/ref=sspa\\_dk\\_detail\\_0?psc=1&pd\\_rd\\_i=B0836FVVYZ&pd\\_rd\\_w=cO18C&content-id=amzn1.sym.1831d79b-677b-428e-990a-c04cdbe213a7&pf\\_rd\\_p=1831d79b-677b-428e-990a-c04cdbe213a7&pf\\_rd\\_r=QEMA4TBH8GBMNBEQ88ZF&pd\\_rd\\_wg=fHHBB&pd\\_rd\\_r=0a83dec6-4b78-4e1f-824c-ab966f253718&s=lawn-garden&sp\\_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9kZXRhaWw&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUEyUVRRRWIVRNIRUNTIKJmVuY3J5cHRIZEIkPUEwODk2MTkzM0tTN1pWNTZTUFRMOSZlbnNyeXB0ZWRBZEIkPUEwOTU0NDg0MIBMSU5UVEY0S0NKVSZ3aWRnZXROYW1IPXNwX2RldGFpbCZHY3Rpb249Y2xpY2tSZWRpcmVjdCZkb05vdExvZ0NsaWNrPXRydWU=](https://www.amazon.es/dp/B0836FVVYZ/ref=sspa_dk_detail_0?psc=1&pd_rd_i=B0836FVVYZ&pd_rd_w=cO18C&content-id=amzn1.sym.1831d79b-677b-428e-990a-c04cdbe213a7&pf_rd_p=1831d79b-677b-428e-990a-c04cdbe213a7&pf_rd_r=QEMA4TBH8GBMNBEQ88ZF&pd_rd_wg=fHHBB&pd_rd_r=0a83dec6-4b78-4e1f-824c-ab966f253718&s=lawn-garden&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9kZXRhaWw&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUEyUVRRRWIVRNIRUNTIKJmVuY3J5cHRIZEIkPUEwODk2MTkzM0tTN1pWNTZTUFRMOSZlbnNyeXB0ZWRBZEIkPUEwOTU0NDg0MIBMSU5UVEY0S0NKVSZ3aWRnZXROYW1IPXNwX2RldGFpbCZHY3Rpb249Y2xpY2tSZWRpcmVjdCZkb05vdExvZ0NsaWNrPXRydWU=) (accedido 6 de agosto de 2022).

[15] Amazon, «EXPLORE SCIENTIFIC WSX-1001-Estación, Profesional WiFi 5 en 1, Pantalla LCD, aplicación de Flash meteorológica, Temperatura/Humedad Interior y Exterior, Color Negro, pequeño», *Amazon.es*. [https://www.amazon.es/SCIENTIFIC-WSX-1001-Estación-Profesional-meteorológica-Temperatura/dp/B0842TRY58/ref=sr\\_1\\_25?\\_\\_mk\\_es\\_ES=ÅMÅŽÕÑ&cri d=SGRJXEU4QJUW&keywords=estacion+meteorologica&qid=1659820101&sprefix=estacion+meteorologica%2Caps%2C323&sr=8-25](https://www.amazon.es/SCIENTIFIC-WSX-1001-Estación-Profesional-meteorológica-Temperatura/dp/B0842TRY58/ref=sr_1_25?__mk_es_ES=ÅMÅŽÕÑ&cri d=SGRJXEU4QJUW&keywords=estacion+meteorologica&qid=1659820101&sprefix=estacion+meteorologica%2Caps%2C323&sr=8-25) (accedido 6 de agosto de 2022).

[16] Amazon, «Netatmo - Estación Meteorológica Inalámbrica Interior Exterior con wifi + Pluviómetro + Anemómetro», *Amazon.es*, 20 de septiembre de 2018. [https://www.amazon.es/Netatmo-Estación-Meteorológica-Inalámbrica-Interior/dp/B01GD4CW7A/ref=sr\\_1\\_33?\\_\\_mk\\_es\\_ES=ÅMÅŽÕÑ&crd=3U4UVL4XL55YO&keywords=estación%2Bmeteorológica%2Bcon%2Blora&qid=1659823229&s=lawn-garden&prefix=estación%2Bmeteorologica%2Bcon%2Blora%2Clawngarden%2C128&sr=1-33&th=1](https://www.amazon.es/Netatmo-Estación-Meteorológica-Inalámbrica-Interior/dp/B01GD4CW7A/ref=sr_1_33?__mk_es_ES=ÅMÅŽÕÑ&crd=3U4UVL4XL55YO&keywords=estación%2Bmeteorológica%2Bcon%2Blora&qid=1659823229&s=lawn-garden&prefix=estación%2Bmeteorologica%2Bcon%2Blora%2Clawngarden%2C128&sr=1-33&th=1) (accedido 7 de agosto de 2022).

[17] Leif Kristensen, *Cups, Props and Vanes*. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1994. Accedido: 16 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: [http://windsensor.com/application/files/9214/2694/4640/Cups\\_Props\\_and\\_Vanes.pdf](http://windsensor.com/application/files/9214/2694/4640/Cups_Props_and_Vanes.pdf)

[18] L. Kristensen, *The Cup Anemometer and Other Exciting Instruments*. Lyngby, 1993. Accedido: 13 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://www.windsensor.com/application/files/7714/2694/4640/The\\_Cup\\_Anemometer\\_and\\_Other\\_Exciting\\_Instruments.pdf](https://www.windsensor.com/application/files/7714/2694/4640/The_Cup_Anemometer_and_Other_Exciting_Instruments.pdf)

[19] Á. Ramos Cenzano, «Análisis mediante cálculo numérico (CFD) del comportamiento de anemómetros de cazoletas», Madrid, 2014. Accedido: 16 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://oa.upm.es/32407/1/PFC\\_ALVARO\\_RAMOS\\_CENZANO.pdf](https://oa.upm.es/32407/1/PFC_ALVARO_RAMOS_CENZANO.pdf)

[20] S. Pindado, I. Pérez, y M. Aguado, «Fourier analysis of the aerodynamic behavior of cup anemometers», *Measurement Science and Technology*, vol. 24, n.º 6, p. 065802, may 2013, doi: 10.1088/0957-0233/24/6/065802.

[21] Á. Ruiz y H. Barrantes, *Elementos de cálculo diferencial: Límites y la derivada*, vol. 1. Costa Rica, 1996. Accedido: 21 de octubre

de 2022. [En línea]. Disponible en:  
<https://centroedumatematica.com/aruiz/libros/LibroCalculoVol1.pdf>

[22] Espressif Systems, «ESP32 Series - Datasheet». 2022. Accedido: 29 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

[23] Bosch, «BME688 - Digital low power gas, pressure, temperature & humidity sensor with AI». 7/22. Accedido: 15 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme688-ds000.pdf>

[24] Bosch Sensortec Community, «BME680: IAQ accuracy definition», BOSCH, 2019. <https://community.bosch-sensortec.com/t5/MEMS-sensors-forum/BME680-IAQ-accuracy-definition/td-p/5920>

[25] Pi3G, «PI3G BME688 BREAKOUT BOARD V1.1». Accedido: 21 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://pi3g.com/wp-content/uploads/2021/04/BME688-Breakout-Board-v1.1-datasheet-0.2.pdf>

[26] West - Instruments de México, S.A., «Manual de aplicación de encoders». Accedido: 26 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.acomee.com.mx/clasificaciones/ENCODERS.pdf>

[27] Honeywell, «3-Axis Digital Compass IC HMC5883L». febrero de 2013. Accedido: 26 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.es/es/datasheets/honeywellmicroelectronicsprecision-sensors/honeywell-microelectronics-precision-sensors-hmc5883l>

[28] ams AG, «AS5048A / AS5048B». [En línea]. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/560470/AMSCO/AS5048A.html>



[29] O. Perpiñán Lamigueiro, «Sistemas Fotovoltaicos Autónomos - Conceptos Generales y Componentes». Accedido: 16 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://oscarperpinan.github.io/esf/SFA\\_Componentes.pdf](https://oscarperpinan.github.io/esf/SFA_Componentes.pdf)

[30] T. Díaz Corcobado y G. Carmona Rubio, *Instalaciones solares fotovoltaicas*, 1.<sup>a</sup> ed. España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2018. Accedido: 16 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

[31] I. Buchmann, «BU-302: Series and Parallel Battery Configurations», *Battery University*, 2022. <https://batteryuniversity.com/article/bu-302-series-and-parallel-battery-configurations> (accedido 17 de agosto de 2022).

[32] I. Buchmann, «BU-908: Battery Management System (BMS)», *Battery University*, 2022. <https://batteryuniversity.com/article/bu-908-battery-management-system-bms> (accedido 17 de agosto de 2022).

[33] Woodbank Communications Ltd., «Battery Management systems (BMS)», *Battery and Energy Technologies*, 2005. <https://mpoweruk.com/bms.htm>

[34] J. Guerra Carmenate, «Comunicación I2C con Arduino lo mejor de dos mundos», *Programarfacil*, 2022. <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/comunicacion-i2c-con-arduino/> (accedido 12 de agosto de 2022).

[35] Wikipedia, «Serial Peripheral Interface», *Wikipedia - La enciclopedia libre*, 22 de abril de 2022. [https://es.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://es.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface) (accedido 12 de agosto de 2022).

[36] P. Fox, «Protocolo de datagrama de usuario (UDP)», *Khan Academy*, 2022. <https://es.khanacademy.org/computing/ap-computer->

science-principles/the-internet/x2d2f703b37b450a3:transporting-packets/a/user-datagram-protocol-udp (accedido 17 de agosto de 2022).

[37] Digital Guide IONOS, «UDP: ¿qué es el protocolo UDP?», *Digital Guide IONOS*, 5 de junio de 2022. <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/udp-user-datagram-protocol/> (accedido 17 de agosto de 2022).

[38] The MathWorks, «Learn More About ThingSpeak», *ThingSpeak*. [https://thingspeak.com/pages/learn\\_more](https://thingspeak.com/pages/learn_more) (accedido 19 de octubre de 2022).

[39] Tractus 3D, «Filamento de PETG», *TRACTUS 3D*, 2020. <https://tractus3d.com/es/materials/petg/>

[40] Colaboradores de Wikipedia, «LabVIEW», *Wikipedia, La enciclopedia libre*, 4 de abril de 2022. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=LabVIEW&oldid=142702785> (accedido 7 de noviembre de 2022).

[41] Colaboradores de Wikipedia, «Viento aparente», *Wikipedia, La enciclopedia libre*, 9 de septiembre de 2019. [https://es.wikipedia.org/wiki/Viento\\_aparente](https://es.wikipedia.org/wiki/Viento_aparente) (accedido 6 de noviembre de 2022).

[42] MathWorks, «ThingSpeak», *ThingSpeak*, 2022. <https://thingspeak.com/channels/1860043>

[43] YucoSolar Store, «Panel de batería solar monocristalino, 6V, 4,5 W, 720mA», *AliExpress*. [https://es.aliexpress.com/item/32287187961.html?aff\\_fcid=2d371c5dbb334953aaf89fe48dce2b0e-1668295007995-09608-f2FybQV&aff\\_fsk=f2FybQV&aff\\_platform=link-c-tool&sk=f2FybQV&aff\\_trace\\_key=2d371c5dbb334953aaf89fe48dce2b0e-1668295007995-09608-f2FybQV&terminal\\_id=5d21636e0711435d9c006610783eff60&gateway](https://es.aliexpress.com/item/32287187961.html?aff_fcid=2d371c5dbb334953aaf89fe48dce2b0e-1668295007995-09608-f2FybQV&aff_fsk=f2FybQV&aff_platform=link-c-tool&sk=f2FybQV&aff_trace_key=2d371c5dbb334953aaf89fe48dce2b0e-1668295007995-09608-f2FybQV&terminal_id=5d21636e0711435d9c006610783eff60&gateway)

Adapt=glo2esp

[44] Departamento de Física, Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia de Doña Godina, «Ingeniería Térmica y Tecnología Energética, apuntes de clase 28813».

[45] Great IT electronic components co., LTD, «Micro/tipo-c/Mini 18650 TP4056, módulo de cargador de batería de litio, placa de carga con protección, funciones duales», *AliExpress*.  
[https://es.aliexpress.com/item/32930640893.html?spm=a2g0o.detail.1000014.1.6b1e22a7dhIE7N&gps-id=pcDetailBottomMoreOtherSeller&scm=1007.40000.267768.0&scm\\_id=1007.40000.267768.0&scm-url=1007.40000.267768.0&pvid=d6348c60-f16d-4416-9f29-83ef04626892&\\_t=gps-id:pcDetailBottomMoreOtherSeller,scm-url:1007.40000.267768.0,pvid:d6348c60-f16d-4416-9f29-83ef04626892,tpp\\_buckets:668%232846%238110%23319&pdp\\_ext\\_f=%7B%22sku\\_id%22%3A%2212000021578610071%22%2C%22sceneId%22%3A%2230050%22%7D&pdp\\_npi=2%40dis%21EUR%211.68%211.38%21%21%21%21%21%40211b5e2016683008060836719ecb41%2112000021578610071%21rec](https://es.aliexpress.com/item/32930640893.html?spm=a2g0o.detail.1000014.1.6b1e22a7dhIE7N&gps-id=pcDetailBottomMoreOtherSeller&scm=1007.40000.267768.0&scm_id=1007.40000.267768.0&scm-url=1007.40000.267768.0&pvid=d6348c60-f16d-4416-9f29-83ef04626892&_t=gps-id:pcDetailBottomMoreOtherSeller,scm-url:1007.40000.267768.0,pvid:d6348c60-f16d-4416-9f29-83ef04626892,tpp_buckets:668%232846%238110%23319&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000021578610071%22%2C%22sceneId%22%3A%2230050%22%7D&pdp_npi=2%40dis%21EUR%211.68%211.38%21%21%21%21%21%40211b5e2016683008060836719ecb41%2112000021578610071%21rec)

[46] LiitoKala, «LiitoKala-baterías recargables de litio para Dron, 3,7 v, 18650 HG2, 3000mAh, descarga continua, 30A», *AliExpress*.  
[https://es.aliexpress.com/item/32793701336.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.3875669dFfSFkV&algo\\_pvid=191df037-0b07-4186-8d53-321f54f13924&algo\\_exp\\_id=191df037-0b07-4186-8d53-321f54f13924-24&pdp\\_ext\\_f=%7B%22sku\\_id%22%3A%2212000027820549474%22%7D&pdp\\_npi=2%40dis%21EUR%21190.6%2180.06%21%21%21%21%21%402100bddb16682769442374642e234f%2112000027820549474%21sea&curPageLogUid=aTWH4u5KEC8r](https://es.aliexpress.com/item/32793701336.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.3875669dFfSFkV&algo_pvid=191df037-0b07-4186-8d53-321f54f13924&algo_exp_id=191df037-0b07-4186-8d53-321f54f13924-24&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000027820549474%22%7D&pdp_npi=2%40dis%21EUR%21190.6%2180.06%21%21%21%21%21%402100bddb16682769442374642e234f%2112000027820549474%21sea&curPageLogUid=aTWH4u5KEC8r)

[47] Yikeshu Store, «Convertidor elevador DC-DC, salida USB», *AliExpress*.

[https://es.aliexpress.com/item/1005002900577123.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.2807bb76dBAFLT&algo\\_pvid=a9670c0a-ce3b-460b-8a51-2b9fbdfef1f61&aem\\_p4p\\_detail=2022111212154212223585789033920013957220&algo\\_exp\\_id=a9670c0a-ce3b-460b-8a51-2b9fbdfef1f61-5&pdp\\_ext\\_f=%7B%22sku\\_id%22%3A%2212000022681487374%22%7D&pdp\\_npi=2%40dis%21EUR%210.93%210.78%21%21%210.59%21%21%402100bddf16682841426557281ee400%2112000022681487374%21sea&curPageLogUid=TAet9zxJvUz&ad\\_pvid=2022111212154212223585789033920013957220\\_6](https://es.aliexpress.com/item/1005002900577123.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.2807bb76dBAFLT&algo_pvid=a9670c0a-ce3b-460b-8a51-2b9fbdfef1f61&aem_p4p_detail=2022111212154212223585789033920013957220&algo_exp_id=a9670c0a-ce3b-460b-8a51-2b9fbdfef1f61-5&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000022681487374%22%7D&pdp_npi=2%40dis%21EUR%210.93%210.78%21%21%210.59%21%21%402100bddf16682841426557281ee400%2112000022681487374%21sea&curPageLogUid=TAet9zxJvUz&ad_pvid=2022111212154212223585789033920013957220_6)

[48] Edu y Xisco, «¿Cuánto se debe cobrar por una impresión 3D? Calculadora», *Impresoras 3D: imprint3d.net*.  
<https://imprint3d.net/impresoras-3d/cuanto-debe-cobrar-por-una-impresion-3d-calculadora/>

## Relación de documentos

(X) Memoria 185 páginas

(\_) Anexos 126 páginas

La Almunia, a 23 de 11 de 2022



Firmado: Jonathan Chamba Benítez