



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA HABANA JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA
“CUJAE” FACULTAD DE INGENIERÍA AUTOMÁTICA Y BIOMÉDICA**

Trabajo de diploma para optar por el título de ingeniero biomédico.

**“Programación de estación meteorológica VÓRTICE para
distribución de información meteorológica al sector
agrícola.”**

Lázaro Andrés O’Farrill Nuñez
<https://orcid.org/0000-0002-1146-2775>

Tutores
Ivón Oristela Benítez
Orestes Chávez

La Habana, 2022

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma. Para que así conste, firmo la presente a los días ____ .

Firma del autor

Firma del tutor

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

ÍNDICE

Declaración de autoría	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Resumen	V
Abstract	V
Introducción	1
Panorama de las estaciones meteorológicas	1
Problema científico	1
Objeto de estudio	2
Campo de investigación	2
Métodos de investigación	2
Teóricos	2
Empíricos	2
Estadísticos	3
Hipótesis	3
Sistema de objetivos	3
Alcance de investigación	3
Estructuración del contenido	4
I. Estado del arte	5
1.1. Marco Teórico	5
1.2. Estaciones Meteorológicas	5
1.2.1. Tipos de estaciones meteorológicas	5
1.2.2. Tipos de sensores utilizados	7
1.2.3. Adquisición de datos	7
1.3. ESP32	7
1.4. Arduino UNO	7
II. Diseño y Desarrollo de la Estación	8
2.1. Metodología	8
2.2. Consideraciones	8
2.2.1. Consideraciones Físicas	8
2.2.2. Consideraciones de Programación	8

2.3.	Definición de Sensores a Utilizar	9
2.3.1.	Temperatura y Humedad	9
2.3.2.	Sensor de velocidad del viento (Anemómetro)	9
2.3.3.	Sensor de dirección del viento (Veleta)	9
2.3.4.	Sensor de lluvia (Pluviómetro)	11
2.3.5.	Sensor de iluminación	11
2.3.6.	Sensor de detección de rayos	13
2.3.7.	Sensor de presión atmosférica	13
2.4.	Definición del Software Libre a Utilizar	13
2.5.	Envío de datos	13
2.5.1.	Servidor Web	13
2.5.2.	WebSocket	14
2.6.	Aplicación Móvil	14
2.6.1.	Quasar V1	14
2.6.2.	Capacitor	14
III.	Análisis y resultados	15
3.1.	Listado de materiales	15
3.2.	Análisis Económico	15
3.2.1.	Aseguramiento de material	15
3.2.2.	Recursos humanos	15
3.2.3.	Recursos materiales	15
3.2.4.	Recursos financieros complementarios	16
3.3.	Calibración de Sensores	17
3.3.1.	Problemas presentados:	17
3.4.	Pruebas de campo	17

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, afecta a diferentes sectores de la economía, siendo el sector agrícola uno de los más afectados cada año. El aumento de las temperaturas termina por reducir la producción de los cultivos deseados, a la vez que provoca la proliferación de malas hierbas y pestes. Los cambios en los regímenes de lluvias aumentan las probabilidades de fracaso de las cosechas a corto plazo y de reducción de la producción a largo plazo. Aunque algunos cultivos en ciertas regiones del mundo puedan beneficiarse, en general se espera que los impactos del cambio climático sean negativos para la agricultura, amenazando la seguridad alimentaria mundial. Por estos motivos es necesario realizar estudios estadísticos y realizar análisis sobre las variables meteorológicas.

Una estación meteorológica, es el lugar donde se realizan mediciones y observaciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos utilizando los instrumentos adecuados para así poder establecer el comportamiento atmosférico.

El exsecretario general de la Organización Meteorológica afirma: Una estación meteorológica es el lugar en el que se realizan observaciones del comportamiento de la atmósfera y del medio ambiente. La recopilación de datos emitidos por el instrumental meteorológico y su posterior análisis y estudio permitirán la caracterización espacial y temporal de los fenómenos atmosféricos, así como la realización de un diagnóstico de la situación atmosférica en un momento dado. En función a la estación meteorológica se definen tres parámetros fundamentales: humedad, presión atmosférica y temperatura, además de un conjunto de otras variables meteorológicas que interactúan entre sí. El siguiente trabajo tiene como objetivo desarrollar el software de la primera estación meteorológica de origen cubano, con el fin de analizar los efectos del cambio climático en la industria agrícola.

Panorama de las estaciones meteorológicas

Hay un gran número de compañías desarrollando estaciones meteorológicas. Sin embargo estas tienen a menudo un elevado coste, o solo son capaces de medir un número muy limitado de variables. Los fabricantes de estaciones más populares como Vantage Pro y Libelium tienen unidades básicas con un coste superior a los siete mil dólares (\$7,000) [1].

También hay iniciativas dedicadas a hacer disponibles estaciones automatizadas de bajo coste y código abierto. Entre estos proyectos es común encontrar como motivación la necesidad de un equipo mejor adecuado a las necesidades específicas de una región o individuos determinados [2, 3].

La relativamente alta popularidad de la que gozan estos equipos recientemente se debe en gran medida a la amenaza cada vez más real del cambio climático [4–7]. A lo largo de todo el mundo las impredecibles variaciones climatológicas amenazan con provocar una crisis alimentaria nunca antes vista[8, 9].

Problema científico

En muchos de los procesos agrícolas, conocer las variables meteorológicas es de vital importancia para lograr una mayor efectividad en los procesos, por lo que es necesario contar con un dispositivo que permita comprobar dichas variables.

Debido al alto coste que conlleva la adquisición de tecnología de punta en el desarrollo de dispositivos, en búsqueda de la soberanía tecnológica y con el objetivo de poder dotar al país con tecnologías propias, en el área de la industria agrícola, la MIPYME ESPOLETA Tecnologías S.R.L. en colaboración con UNNAME se suma a estas labores y lleva a cabo el diseño y desarrollo de la primera estación meteorológica del país.

Objeto de estudio

Estación meteorológica Vórtice.

Campo de investigación

Estaciones meteorológicas automatizadas.

Métodos de investigación

Teóricos

- Hipotético-Deductivo: Elaboración de la hipótesis de trabajo a partir de los conocimientos teóricos y experimentales.
- Histórico-Lógico: Estudio del comportamiento de aplicaciones de adquisición y análisis de datos para el control de la calidad en la producción de dispositivos.
- Analítico-Sintético: Descomposición del problema de investigación en subproblemas de menor complejidad para ser individualmente analizados y solucionados; integrándose, posteriormente a la solución propuesta.
- Inductivo-Deductivo: Fundamentación del uso de un sistema automatizado de análisis combinado para el control de la calidad.

Empíricos

- Observación: Observar directamente el equipo para apreciar su estado físico y evaluar los recursos informáticos a la disposición del personal que trabaja en el proyecto.

- Experimentación: Desarrollo y análisis de resultados experimentales, utilizando esquemas convencionales y el nuevo sistema propuesto.

Estadísticos

- Para confirmar las estimaciones realizadas en el análisis de los estimadores de exactitud y precisión y comparar el sistema propuesto con los sistemas consultados en las referencias consultadas.

Hipótesis

Si se desarrolla una estación metereológica, con prestaciones similares a otras estaciones existentes en el mercado internacional, con un costo de producción no muy elevado, para que de esta forma sea posible ofertar un equipo con buenas prestaciones técnicas y de seguridad, a un precio competitivo, se contribuirá al análisis de los efectos del cambio climático sobre los procesos agrícolas.

Si se desarrolla un software para la puesta en marcha y el control de la calidad de la estación meteorológica, permitirá la comprobación de los parámetros técnicos del equipo y contribuirá al análisis de los efectos del cambio climático sobre los procesos agrícolas.

Sistema de objetivos

Objetivo general

Desarrollar el software de la primera estación meteorológica de origen cubano.

Objetivos específicos

Para dar cumplimiento al objetivo general, es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Investigar el estado del arte de la estaciones meteorológicas que se ofrecen comercialmente, principales requerimientos técnicos, precios, principales empresas que las desarrollan.
- Analizar el hardware (diseño electrónico) del equipo.
- Implementar el protocolo de comunicación del dispositivo con la computadora para la transmisión y recepción de datos.
- Desarrollar de manera organizada e independiente las funcionalidades propuestas.
- Implementar el software del equipo.

Alcance de investigación

Científico-técnico El trabajo de investigación abordará el diseño, desarrollo e implementación de la primera estación meteorológica en nuestro país.

Económico El costo del proyecto es mucho menor que los encontrados actualmente en la industria meteorológica, la cual se caracteriza por sus prohibitivos precios. Su desarrollo contribuirá a tener una mayor independencia tecnológica para el sector agrícola.

Estructuración del contenido

I ESTADO DEL ARTE

1.1. Marco Teórico

El interés de la humanidad por tratar de predecir el clima es prácticamente tan antiguo como la civilización. En la época moderna la invención del telégrafo permitió llevar la predicción del clima a una velocidad nunca antes vista. A medida que se expandió el telégrafo a través de los Estados Unidos fue creada una red vigilancia meteorológica sobre su infraestructura [10].

No fue hasta el siglo XX que los avances en la física atmosférica llevaron a fundar los sistema de predicción meteorológica numéricos. En su libro, "Weather prediction by numerical process" [11], Lewis Fry Richardson señala como pequeñas diferencias en los fluidos atmosféricos pueden ser ignorados.

Durante la intervención de Estados Unidos en Cuba el Buró de Tiempo de Washington fabrica en la loma de Casablanca una estación meteorológica auxiliar. En 1904 el presidente cubano Tomás Estrada Palma decreta fundar un observatorio cubano. Por oposición la plaza de subdirector del observatorio es ocupada por el Ingeniero Civil, Arquitecto, Dr. en Ciencias Físicas, Dr. en Ciencias Naturales y Dr. en Ciencias Marítimas José Carlos Millas Hernández. Una vez ocupada esta posición creo una red de observadores basada en el telégrafo.

Este fue el estado de la meteorología hasta 1944, año en que el control del sistema meteorológico pasa a la marina. En este período se crean varias nuevas estaciones y con operarios capacitados a lo largo de Cuba [12].

Recientemente la necesidad de información meteorológica se ha incrementado en las areas locales para mejorar la productividad y reducir los costos de trabajo [13].

1.2. Estaciones Meteorológicas

1.2.1. Tipos de estaciones meteorológicas

Como se menciona en [14]. Las estaciones meteorológicas se clasifican en distintos grupos. Estos aparecen representados en la Tabla 1.

A día de hoy la red de estaciones del Instituto de Meteorología de Cuba (INSTMET) cuenta con 68 estaciones profesionales a lo largo del país; el número más alto de la región de America Central y del Caribe [15].

De acorde a lo comentado por el instituto este número es aún insuficiente para proveer la cobertura deseada a lo largo de todo el país. También está la realidad del elevado coste de obtención de estos equipos; haciéndolos poco viables para el uso doméstico o sectores de menor poder adquisitivo como lo son los pequeños campesinos. La compra de equipos de altas prestaciones, si bien es de gran necesidad para el sector agrícola con el objetivo de maximizar la utilización de recursos y prever condiciones climatológicas adversas como ciclones, huracanes, sequías e inundaciones [16], tiene un coste demasiado

Grupo	Clasificaciones
Sinóptica	Climatológica Agrícolas Especiales Aeronáuticas Satélites
Magnitud de las observaciones	Principales Ordinarias Auxiliares
Por el nivel de observación	Superficie Altitud
Por el nivel de observación	Terrestre Aéreas Marítimas
Mercado Objetivo	Doméstica Semiprofesionales Profesionales

Tabla 1: Clasificaciones de las estaciones meteorológicas

Clasificación	Identificaciones
---------------	------------------

prohibitivo para implementarlo a la escala necesaria para el sector.

1.2.2. Tipos de sensores utilizados

Las estaciones meteorológicas automatizadas utilizan distintos tipos de sensores. Estos se diferencian en las variables que miden, principio de funcionamiento y precio.

1.2.3. Adquisición de datos

1.3. ESP32

1.4. Arduino UNO

II DISEÑO Y DESARROLLO DE LA ESTACIÓN

2.1. Metodología

Se describe la metodología de ingeniería de diseño para desarrollar el sistema. Esta metodología está basada en la literatura [13].

- Definición del problema: La información meteorológica es aplicable al monitoreo del crecimiento, la predicción de los tiempos de cosecha, la prevención de plagas y enfermedades, lidiando con el cambio climático y condiciones climáticas anormales. Los estudios en el área de las Américas de estaciones meteorológicas de bajo costo, precisas y capaces de obtener mediciones durante un largo tiempo son escasos. Es más, estudios del aprovisionamiento de información meteorológica confiable y de fácil comprensión para los granjeros son extremadamente escasos.
- Opiniones que recogen el método.

2.2. Consideraciones

2.2.1. Consideraciones Físicas

El equipo está diseñado para operar tanto en interiores como exteriores. Cuando opera en interiores debe desactivar el pluviómetro, el anemómetro y la veleta. El equipo debe ser usado a no menos de dos metros del suelo y no más de 15. Las dimensiones del equipo no sobrepasan los 60 cm de alto y los 30 cm de diámetro.

2.2.2. Consideraciones de Programación

Los microcontroladores utilizados en el proyecto son el ESP32 como controlador principal y el Arduino Nano como controlador secundario. El ESP32 puede ser programado tanto utilizando el framework ESP-IDF recomendado por el fabricante o utilizando el framework Arduino. Con el fin de simplificar la base de código y facilitar la portabilidad del mismo a otros microcontroladores distintos se optó por utilizar el framework Arduino en ambos casos. Para esto se tomó en cuenta que la carga adicional que esto implica para el ESP32 no es lo suficientemente significativa ni impide el funcionamiento correcto de la aplicación en cuestión.

2.3. Definición de Sensores a Utilizar

2.3.1. Temperatura y Humedad

Para la lectura de la temperatura y la humedad ambiente se utilizó el sensor DHT11. Un sensor de bajo costo que es capaz de leer ambas variables. El análisis de la literatura y las pruebas conducidas en el laboratorio determinaron que la precisión de este sensor es adecuada para los resultados esperados del dispositivo.

2.3.2. Sensor de velocidad del viento (Anemómetro)

El sensor del anemómetro fue desarrollado por el equipo de electrónica de la empresa utilizando sensores de efecto Hall reciclados como los encontrados en los ventiladores las computadoras.

Funcionamiento: El anemómetro desarrollado por el equipo de hardware es un elemento mecánico que consiste en una hélice con un pieza magnética adherida a una de las paredes del buje. En la base del dispositivo se encuentra un sensor de efecto Hall. En la Figura 1 se aprecia el diseño del mismo. Este pulso activa una interrupción en el Arduino Pro Mini incrementando el contador de vueltas. El arduino cuenta las vueltas durante un segundo, por lo que este número equivale directamente a la velocidad angular del anemómetro.

Utilizando esta información el procesador principal se encarga de obtener la velocidad en m/s mediante la ecuación 1.

$$S = R \times 2 \times \pi \times \omega \quad (1)$$

Donde:

- S : Velocidad lineal en m/s del anemómetro.
- R : Radio del anemómetro.
- ω : Velocidad angular.

2.3.3. Sensor de dirección del viento (Veleta)

El sensor de dirección del viento también fue desarrollado utilizando tres imanes y cuatro sensores hall. Con este arreglo es posible obtener 3 bits de resolución en la medición de la dirección del viento. En la Figura 2 se muestra la distribución del hardware de la veleta. De esta forma siempre están activos uno o dos sensores en un instante determinado.

Las posiciones posibles de las veleta generan los valores que se muestran en la Tabla 2.

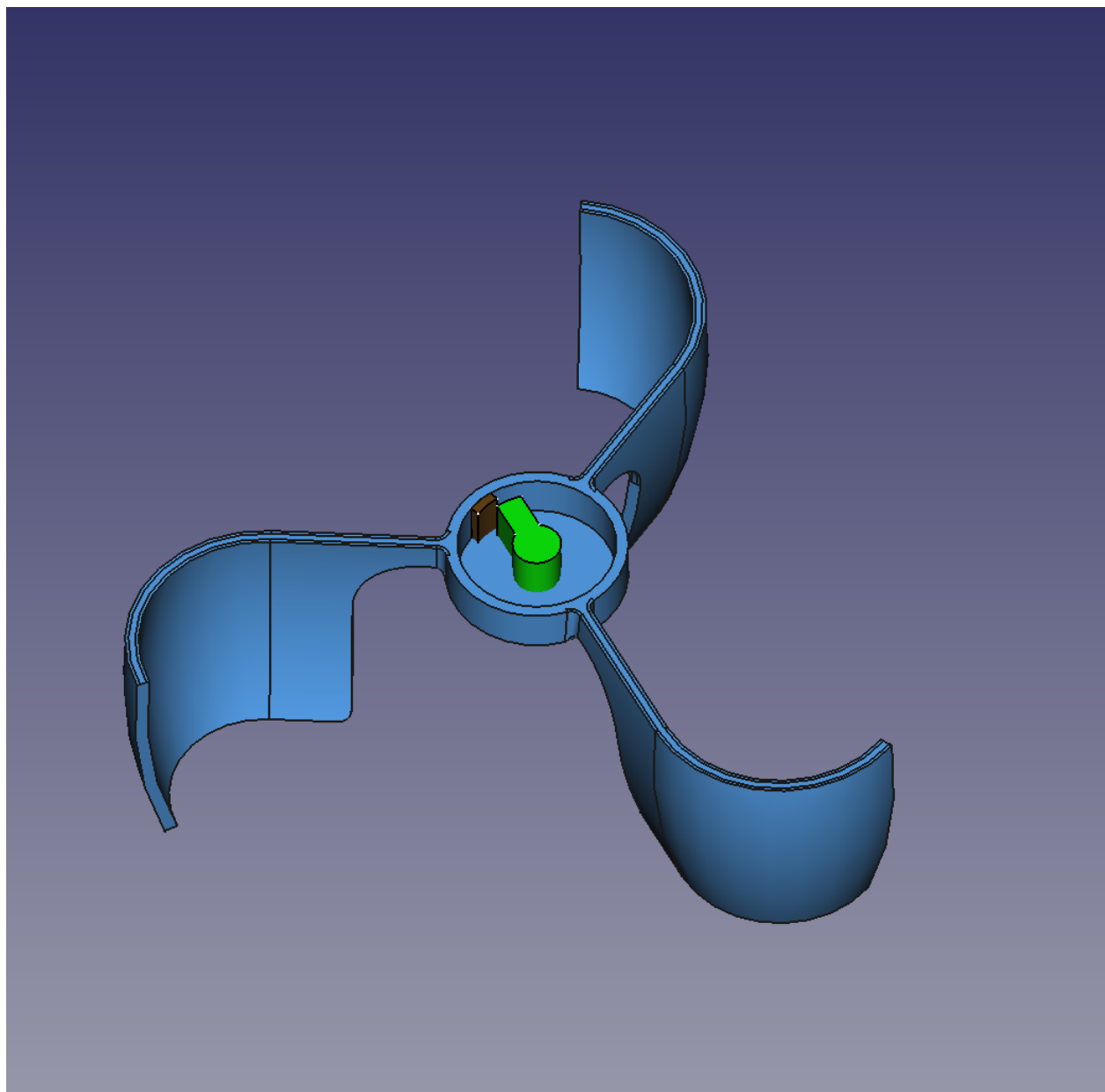


Figura 1: Componentes del anemómetro. Hélice (azul), imán (marrón), sensor de efecto Hall (verde).

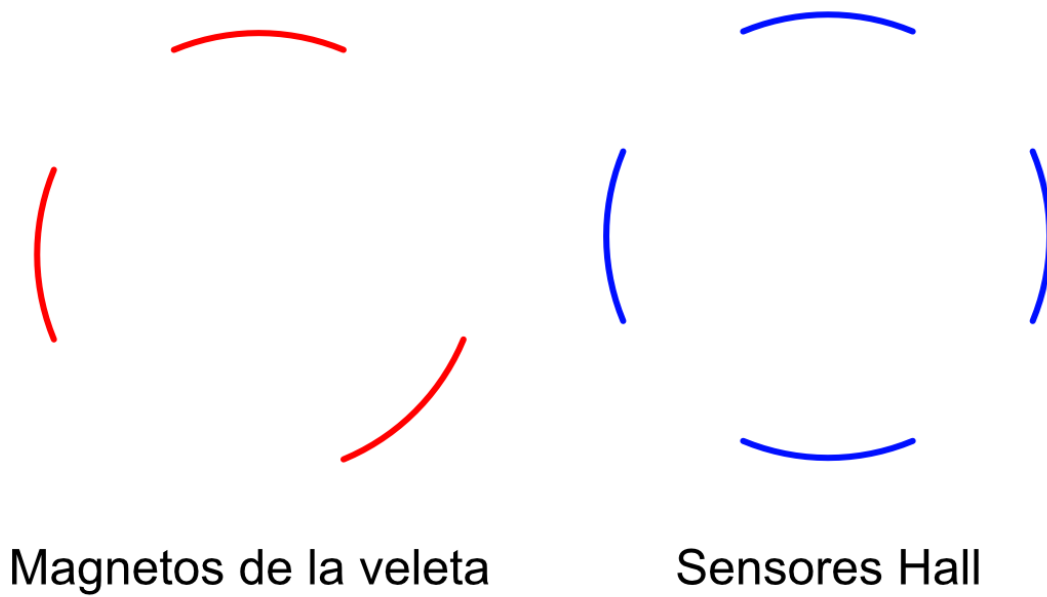


Figura 2: Distribución de los sensores en la veleta.

2.3.4. Sensor de lluvia (Pluviómetro)

El pluviómetro desarrollado consiste en un embudo y un mecanismo de balde basculante [17, 18]. La báscula tiene una capacidad de 20 mL en cada extremo. En la Figura 3 se ilustra el diseño de este componente.

La medida de las precipitaciones se obtiene contando el número de veces que la válvula ha oscilado en el día y utilizando la ecuación 2.

$$P_{mm} = \frac{n \times V_e}{A} \quad (2)$$

Donde:

- n : Número de oscilaciones de la báscula.
- V_e : Capacidad volumétrica de cada copa en litros (L).
- P_{mm} : Valor de precipitación en milímetros (mm).
- A : Área de la sección superior del embudo del pluviómetro en metros cuadrados (m^2).

2.3.5. Sensor de iluminación

El sensor de iluminación utilizado es un sensor de luz de Arduino basado en una fotorresistencia.

Dirección	Código Binario	Código Hexadecimal
<i>N</i>	1100	0xC
<i>NE</i>	0010	0x2
<i>E</i>	1001	0x9
<i>SE</i>	0100	0x4
<i>S</i>	0011	0x3
<i>SO</i>	1000	0x8
<i>O</i>	0110	0x6
<i>NO</i>	0001	0x1

Tabla 2: Conversión de lectura de la veleta a dirección.

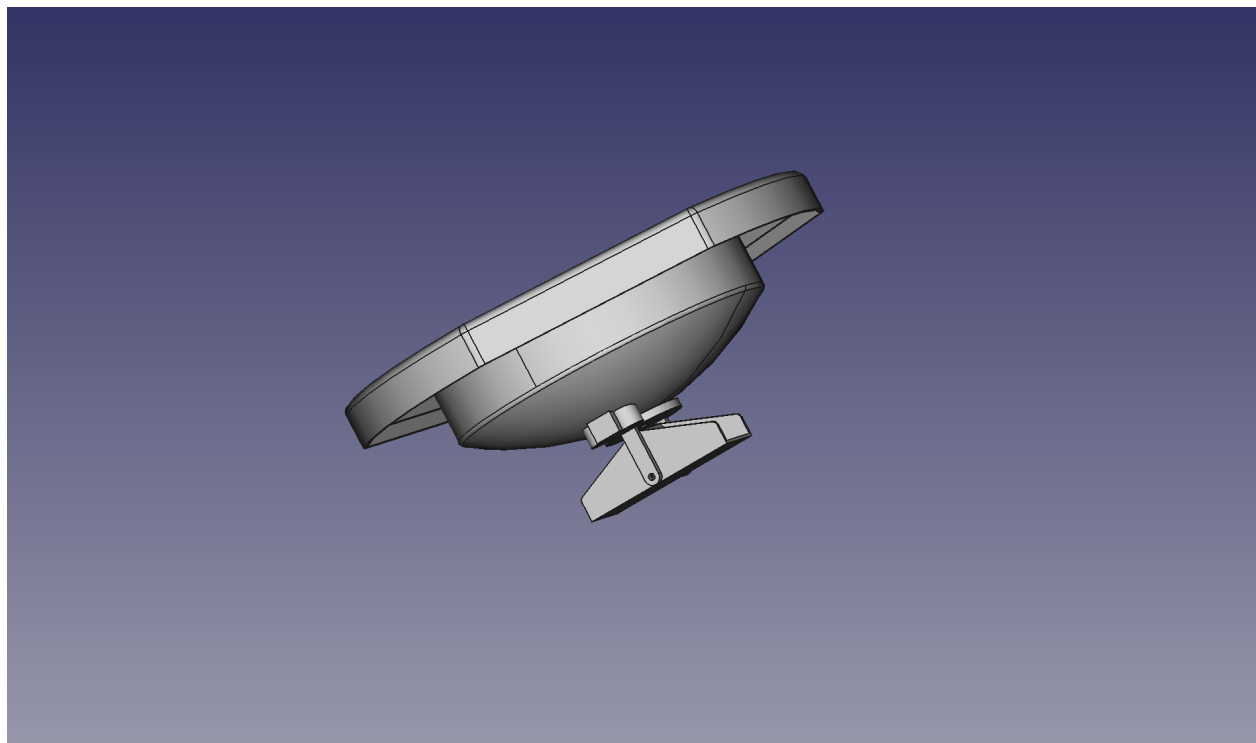


Figura 3: Diseño del pluviómetro.



Figura 4: Sensor BMP180.

2.3.6. Sensor de detección de rayos

El sensor de detección de rayos también fue desarrollado por el equipo utilizando sensores Hall. La onda electromagnética producida por el impacto del rayo genera un pico de corriente que es detectado por el sensor Hall. Esta onda electromagnética es amplificada con el uso de una antena lo que permite detectar rayos en un radio de 16 km.

2.3.7. Sensor de presión atmosférica

El sensor de presión atmosférica seleccionado es el BMP180. Este es un sensor de bajo coste y alta disponibilidad con una cota de error extremadamente baja. Este sensor aparece en la Figura 4.

2.4. Definición del Software Libre a Utilizar

Para evitar problemas legales relacionados al uso de la propiedad intelectual todas las bibliotecas y frameworks utilizados en la programación del dispositivo son de código abierto.

2.5. Envío de datos

2.5.1. Servidor Web

Una de las tareas del programa principal es la de servir los datos para consumo de posibles aplicaciones clientes. Para esto se desarrolló una API REST general que permite servir los datos a distintos dispositivos de forma homogénea.

2.5.2. WebSocket

Para la transmisión en tiempo real se utiliza el protocolo de websockets. Este permite, una vez establecida la conexión inicial, enviar datos al cliente sin que este los solicite.

2.6. Aplicación Móvil

2.6.1. Quasar V1

Para desarrollar la aplicación se utilizó el framework web Quasar V1 basado en el microframework progresivo Vue.js 2. Este fue seleccionado por la familiaridad del desarrollador con aplicaciones web utilizando este framework y las distintas configuraciones que presentan que facilitan el despliegue de manera simultánea hacia distintos dispositivos.

2.6.2. Capacitor

Para generar la aplicación Android utilizada en el proyecto se utilizó el framework Capacitor el cual permite empaquetar aplicaciones web como aplicaciones nativas. A estas se les conoce como aplicaciones híbridas. El uso de una aplicación híbrida en este caso se encuentra justificado por la relativamente baja complejidad que presenta la aplicación móvil y lo conveniente que resultan las tecnologías web para hacer aplicaciones multiplataforma.

III ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1. Listado de materiales

3.2. Análisis Económico

3.2.1. Aseguramiento de material

En la sede de la MIPYME ESPOLETA Tecnologías S.R.L.se encuentran todos los materiales necesarios para la fabricación y programación del equipo.

3.2.2. Recursos humanos

El trabajo se realizará durante un período de un año (12 meses). Para la realización de este proyecto se cuenta con dos tutores los cuales estarán encargados del asesoramiento de este Trabajo de Diploma y con dos aspirantes. La Tabla 3 presenta los gastos de salario correspondientes a los participantes, así como los días dedicados por cada uno. El siguiente análisis corresponde a los meses comprendidos desde enero de 2021 hasta diciembre de 2021. La forma de calcular los salarios básicos (SB) aparece en 3.

$$SB = \sum_i^n A_i * B_i \quad (3)$$

donde:

n: Número total de participantes

Ai: Días dedicados a las investigación por participantes.

Bi: Salario diario por participantes (igual al salario mensual dividido por 24).

trabajador	sal / mensual	sal/diario	días/invest.	sal/basico	sal/comp	seg/soc
Tutor 1	6940	289.17	80	23133.33	2102.82	3533 .06
Tutor 2	6940	289.17	80	23133.33	2102.82	3533 .06
Aspirante 1	400	16.67	120	2000	181.80	305 .45
Aspirante 2	400	16.67	120	2000	181.80	305 .45

Tabla 3: Gastos por concepto salarial y de seguridad social.

3.2.3. Recursos materiales

La Tabla 4 muestra los recursos materiales empleados y sus respectivos precios.

Dispositivo	Cant	Precio USD	Precio CUP
Laptop	1	700	16800
ESP32	2	3	72
Arduino Nano	2	2	48
DHT22	1	0.50	12
Totales	4	705.50	16932

Tabla 4: Gastos por materiales directos

3.2.4. Recursos financieros complementarios

La Tabla 5 muestra los gastos totales.

Gastos Totales	Cant. CUP
OTROS GASTOS	0
COSTO INDIRECTO	61009.98
COSTO DIRECTO	70896.64
COSTO TOTAL (CT)	131906.62

Tabla 5: Gastos Totales

El Salario Complementario 4 es 9.09 % del salario total anual:

$$SC = 0,0909 * SB \quad (4)$$

La Seguridad Social 5 es 14 % del total de los salarios:

$$SS = 0,14 * (SB + SC) \quad (5)$$

Entonces el costo directo de la investigación está dado por 6.

$$CD = SB + SC + SS + MD + DP + OG \quad (6)$$

El costo indirecto estimado está dado por 7.

$$CI = 1,4063 * SB \quad (7)$$

Finalmente el costo total estimado de la investigación está dado por 8.

$$CT = CD + CI \quad (8)$$

3.3. Calibración de Sensores

El prototipo de la estación fue llevado al INSTMET para pasar las pruebas de rigor y recibir la certificación por parte del mismo con respecto a la precisión de los sensores.

3.3.1. Problemas presentados:

La primera ronda de pruebas arrojó pequeños errores de precisión en el equipo. Siguiendo las indicaciones del laboratorio las mediciones fueron corregidas utilizando aproximaciones lineales. Actualmente un segundo prototipo está siendo probado por la institución y se encuentra a la espera de nuevos resultados.

3.4. Pruebas de campo

Actualmente el primer prototipo del equipo está siendo probado por el cliente. Se espera obtener la retroalimentación del mismo en los próximos meses para trabajar en la corrección de posibles defectos encontrados.

REFERENCIAS

- [1] J. S. Botero-Valencia, M. Mejia-Herrera, and Joshua M. Pearce. Low cost climate station for smart agriculture applications with photovoltaic energy and wireless communication. *HardwareX*, 11:e00296, April 2022. ISSN 2468-0672. doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00296.
- [2] Gabriel F. L. R. Bernardes, Rogério Ishibashi, André A. S. Ivo, Valério Rosset, and Bruno Y. L. Kimura. Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring. *Digital Communications and Networks*, May 2022. ISSN 2352-8648. doi: 10.1016/j.dcan.2022.05.002.
- [3] Guilherme Tomaszewski Netto and Jorge Arigony-Neto. Open-source Automatic Weather Station and Electronic Ablation Station for measuring the impacts of climate change on glaciers. *HardwareX*, 5:e00053, April 2019. ISSN 2468-0672. doi: 10.1016/j.ohx.2019.e00053.
- [4] Alex Zizinga, Jackson-Gilbert Majaliwa Mwanjalolo, Britta Tietjen, Bobe Bedadi, Himanshu Pathak, Geoffrey Gabiri, and Dennis Beesigamukama. Climate change and maize productivity in Uganda: Simulating the impacts and alleviation with climate smart agriculture practices. *Agricultural Systems*, 199:103407, May 2022. ISSN 0308-521X. doi: 10.1016/j.agsy.2022.103407.
- [5] Mirza Junaid Ahmad, Gun-ho Cho, and Kyung Sook Choi. Historical climate change impacts on the water balance and storage capacity of agricultural reservoirs in small ungauged watersheds. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41:101114, June 2022. ISSN 2214-5818. doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101114.
- [6] Fulu Tao, Liangliang Zhang, Zhao Zhang, and Yi Chen. Climate warming outweighed agricultural managements in affecting wheat phenology across China during 1981–2018. *Agricultural and Forest Meteorology*, 316:108865, April 2022. ISSN 0168-1923. doi: 10.1016/j.agrformet.2022.108865.
- [7] Amos Apraku, John F. Morton, and Benjamin Apraku Gyampoh. Climate change and small-scale agriculture in Africa: Does indigenous knowledge matter? Insights from Kenya and South Africa. *Scientific African*, 12:e00821, July 2021. ISSN 2468-2276. doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e00821.
- [8] Muhammad Asim Ibrahim and Marie Johansson. Combating climate change – What, where and how to implement adaptive measures in the agriculture sector of Öland, Sweden, keeping in view the constraints of carrying capacities and risk of maladaptation. *Land Use Policy*, 122:106358, November 2022. ISSN 0264-8377. doi: 10.1016/j.landusepol.2022.106358.
- [9] Hongpeng Guo, Yujie Xia, Jingshu Jin, and Chulin Pan. The impact of climate change on the efficiency of agricultural production in the world's main agricultural regions.

Environmental Impact Assessment Review, 97:106891, November 2022. ISSN 0195-9255. doi: 10.1016/j.eiar.2022.106891.

- [10] Thomas Jefferson and the telegraph: highlights of the U.S. weather observer program — NOAA Climate.gov. <http://www.climate.gov/news-features/blogs/beyond-data/thomas-jefferson-and-telegraph-highlights-us-weather-observer>.
- [11] Lewis Fry Richardson. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge, The University press, 1922.
- [12] Historia de la Meteorología en Cuba. Historia de la Meteorología en Cuba - EcuRed. https://www.ecured.cu/Historia_de_la_Meteorolog%C3%ADa_en_Cuba.
- [13] Jeyeon Kim, Daichi Minagawa, Daiki Saito, Shinichiro Hoshina, and Kazuya Kanda. Development of KOSEN Weather Station and Provision of Weather Information to Farmers. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(6):2108, March 2022. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s22062108.
- [14] Palaguachi Encalada, Sonia Isabel. *DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA BASADA EN UNA RED JERÁRQUICA DE SENSORES, SOFTWARE LIBRE Y SISTEMAS EMBEBIDOS PARA LA EMPRESA ELECAUSTRO EN LA MINICENTRAL GUALACEO UTILIZANDO COMUNICACIÓN MQTT Y MODBUS*. PhD thesis, 2018.
- [15] Cuba's Institute of Meteorology highly respected > Cuba > Granma - Official voice of the PCC. <https://en.granma.cu/cuba/2016-02-09/cubas-institute-of-meteorology-highly-respected>.
- [16] Anoek J. van Tilburg and Paul F. Hudson. Extreme weather events and farmer adaptation in Zeeland, the Netherlands: A European climate change case study from the Rhine delta. *Science of The Total Environment*, 844:157212, October 2022. ISSN 0048-9697. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157212.
- [17] Minhan Liao, Aimin Liao, Jiufu Liu, Zhao Cai, Hongwei Liu, and Tao Ma. A novel method and system for the fast calibration of tipping bucket rain gauges. *Journal of Hydrology*, 597:125782, June 2021. ISSN 0022-1694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125782.
- [18] Yili Hu, Jiangtao Zhou, Jianping Li, Jijie Ma, Ying Hu, Feng Lu, Xinsheng He, Jianming Wen, and Tinghai Cheng. Tipping-bucket self-powered rain gauge based on triboelectric nanogenerators for rainfall measurement. *Nano Energy*, 98:107234, July 2022. ISSN 2211-2855. doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107234.