

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESTACIÓN
METEOROLÓGICA PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES**



**BRIAN YESID GARZÓN GUZMÁN
MARÍA FERNANDA RINCÓN CERÓN**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESTACIÓN
METEOROLÓGICA PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES**

BRIAN YESID GARZÓN GUZMÁN - 20111007018
MARÍA FERNANDA RINCÓN CERÓN - 20111007076

Proyecto de grado para optar por el
título de Ingeniero Eléctrico

DIRECTOR:
Prof. DIEGO JULIÁN RODRÍGUEZ PATARROYO Ph.D.

CODIRECTOR:
Prof. HERBERT ENRIQUE ROJAS CUBIDES I.E. M.Sc. Ph.D.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2017

Notas de aprobación

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., Octubre de 2017

Dedicatoria

A Dios que nos inspira, guía y anima cada nuevo día.

A nuestros padres porque gracias a ellos somos grandes personas.

A nuestros hermanos, a quienes debemos nuestro escape de la realidad.

A todos los que nos fortalecieron, apoyaron y guiaron en este proyecto.

Brian Yesid y María Fernanda

Agradecimientos

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por brindarnos las herramientas para nuestro desarrollo profesional, y así cumplir nuestro sueño como Ingenieros Eléctricos integrales.

A los docentes Herbert Enrique Rojas y Diego Julián Rodríguez, por ser nuestros guías en este culminar, quienes nos brindaron sus consejos y aportes para fortalecer nuestro proceso académico y personal.

A nuestras familias, quienes mantuvieron su confianza, paciencia y amor por nosotros, y además valoraron nuestro esfuerzo en todo momento, gracias a su constante enseñanza nos llevaron a ser inquebrantables en este proceso.

A todos nuestros compañeros con los que coincidimos en este camino académico y que nos ayudaron con sus aportes para nuestro desarrollo personal y profesional.

Resumen

Partiendo de la necesidad de desarrollar e implementar nuevas tecnologías a nivel mundial que protejan el medio ambiente y con la idea de mantener la vanguardia de las Redes Eléctricas Inteligentes que cada vez llega a más lugares del mundo; los grupos de investigación: Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía (Lifae) y el Grupo de Compatibilidad Electromagnética (GCEM), proponen la implementación de una Red Eléctrica Inteligente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; de esta forma se da apertura a nuevos campos de investigación y aplicación.

Para colaborar con este proyecto de investigación se plantea el diseño e implementación de una estación meteorológica automática para la medición de variables ambientales que se relacionan a la generación de la energía eólica y fotovoltaica. La realización de una estación meteorológica de este tipo lleva consigo la inclusión de elementos adicionales a los sensores de las variables a medir, de tal forma que se pueda cumplir con el sistema de adquisición de datos, el sistema de almacenamiento de información, el sistema de visualización y sincronización de hora y lugar de la ubicación de la Estación Meteorológica Automática (EMA).

A través de este documento, se presenta la elección de los elementos que harán parte de la EMA, incluyendo su proceso de adquisición y procesamiento de datos; donde la arquitectura principal y los sensores son los elementos más importantes. Adicionalmente, se contará con módulos que facilitarán al usuario el uso de la EMA y de la información brindada por esta.

Para concluir en la implementación de la EMA, se realiza el análisis de selección de sensores, el diseño de circuitos de acondicionamiento, la conexión y programación de cada uno de los elementos a emplear, las pruebas de funcionamiento de todo el sistema bajo condiciones de intemperie debido al emplazamiento de la EMA y finalmente la implementación según las condiciones de cada uno de los elementos.

Abstract

Based on the need to develop and implement new technologies worldwide that protect the environment and with the idea of maintaining the vanguard of Smart Grids that increasingly reaches more places in the world, the research groups: Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía (Lifae) and Grupo de Compatibilidad Electromagnetica (GCEM), propose the implementation of an Smart Grid at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas; thus opening new fields of research and application.

To collaborate with this research project, the design and implementation of an automatic meteorological station for the measurement of environmental variables related to the generation of wind and photovoltaic energy are proposed. The realization of a meteorological station of this type entails the inclusion of additional elements to the sensors of the variables to be measured, in such a way that it can be complied with the data acquisition system, the information storage system, the visualization system and the synchronization of time and place of the location of the Automatic Weather Station.

Through this document, it is presented the choice of the elements that will be part of the EMA, including its process of data acquisition and processing; where the main architecture and sensors are the most important elements. Additionally, there will be modules that will facilitate the user's use of the Automatic Weather Station and the information provided by this one.

Finally, it is conclude with the implementation of the Automatic Weather Station; the analysis of the selection of sensors, the design of conditioning circuits, the connection and programming of each of the elements to be used, the tests of operation of the whole system under weather conditions due to the emplacement of the Automatic Weather Station and finally the implementation according to the conditions of each of the elements.

Contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Formulación del problema.....	2
1.2. Justificación	3
Académica	3
Económica y social.....	3
1.3. Alcances.....	4
1.4. Objetivos	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
1.5. Estructura del documento de trabajo de grado	6
2. Marco Teórico	8
2.1. Meteorología	8
2.2. Estación meteorológica	8
2.3. Estaciones Meteorológicas Automáticas	8
2.3.1. Tipos de EMA.....	9
2.3.2. Componentes de una estación meteorológica automática	9
2.4. Orientaciones generales para una estación meteorológica	10
2.4.1. Observadores.....	10
2.4.2. Emplazamiento	10
2.4.3. Coordenadas de una estación meteorológica.....	11
2.4.4. Características convenientes de los instrumentos	11
2.4.5. Consideraciones de emplazamiento para cada instrumento.....	12
2.5. Estaciones Meteorológicas en Bogotá	12
2.6. Instrumentos de medición	13
2.6.1. Variables a medir	13
2.6.2. Características de los instrumentos de medición.....	15
2.7. Sistemas de Adquisición y Procesamiento de datos	18
2.7.1. Sistemas de adquisición de datos.....	18
2.7.2. Sistema de procesamiento de datos.....	19
2.8. Elementos periféricos	20
2.8.1. Sistema de comunicación	20
2.8.2. Sistema de almacenamiento de datos	21

2.8.3.	Sistema de visualización de datos	21
2.8.4.	Sistema de sincronización.....	21
2.8.5.	Sistema de posicionamiento	22
2.8.6.	Sistema de alimentación.....	22
2.9.	Protocolos de comunicación en tarjeta Arduino	22
2.9.1.	Protocolo SPI.....	22
2.9.2.	Protocolo Serial.....	23
2.9.3.	Protocolo I2C.....	24
2.10.	Herramientas de desarrollo.....	24
2.10.1.	Arduino IDE	24
2.10.2.	Software Nextion Editor	24
2.10.3.	Software XAMPP	25
2.10.4.	Software Eagle	25
2.10.5.	Software AutoCAD.....	25
3.	Metodología de diseño	26
3.1.	Selección de arquitectura principal del sistema	26
3.2.	Selección de sensores.....	26
3.2.1.	Temperatura.....	31
3.2.2.	Humedad relativa	32
3.2.3.	Presión atmosférica.....	32
3.2.4.	Radiación solar	33
3.2.5.	Velocidad y dirección del viento	34
3.2.6.	Precipitación.....	35
3.3.	Elementos periféricos	35
3.3.1.	Módulo <i>Wi-Fi</i> ESP8266-01.....	35
3.3.2.	Modulo SD.....	36
3.3.3.	Pantalla táctil Nextion.....	37
3.3.4.	Módulo Reloj DS1307	38
3.3.5.	Modulo GPS.....	38
3.3.6.	Panel solar y batería.....	39
3.4.	Síntesis de elementos empleados	40
3.5.	Envío de datos a servidor externo	44
3.5.1.	Servidor en tiempo real - Sin almacenamiento de información.....	44

3.5.2.	Servidor en tiempo real – Base de Datos	45
3.6.	Proceso almacenamiento de datos.....	46
3.7.	Consideraciones de programación - codificación	47
3.7.1.	Programación Tarjeta de Desarrollo Arduino	47
3.7.2.	Programación Modulo <i>Wi-Fi</i>	48
3.7.3.	Programación Servidor	48
3.8.	Diseño y construcción	49
3.8.1.	Circuitos.....	49
3.8.2.	Encapsulado y soportes	53
3.9.	Calibración de sensores.....	54
3.9.1.	Humedad relativa	55
3.9.2.	Temperatura ambiente	56
3.9.3.	Presión atmosférica	56
3.9.4.	Radiación solar	57
4.	Costos de inversión.....	57
4.1.	Sensores y módulos de EMA.....	58
5.	Análisis de implementación	59
5.1.	Validación de los datos y evaluación de resultados obtenidos.....	59
5.2.	Viabilidad técnica	64
5.3.	Legalidad del proyecto.....	64
6.	Conclusiones.....	64
7.	Recomendaciones futuros proyectos	66
	Bibliografía.....	68
	Anexos	73
A.1.	Circuito de acondicionamiento Sensor de Presión.....	73
A.2.	Circuito de acondicionamiento Sensor de radiación	75
A.3.	Diseño de sistema fotovoltaico autónomo.....	76
	Determinación de la demanda o carga.....	76
	Selección del generador y regulador.....	77
	Selección baterías	79

Lista de tablas

Tabla 1.5.1. Elementos empleados en la EMA - UD.	6
Tabla 2.6.1. Requisitos de las mediciones e instrumentos a emplear.	17
Tabla 3.2.1. Tarjetas Sistema de Adquisición de Datos.	27
Tabla 3.2.2. Sensores temperatura.	28
Tabla 3.2.3. Sensores de Humedad Relativa.	28
Tabla 3.2.4. Sensores Presión Atmosférica.	29
Tabla 3.2.5. Sensores radiación solar.	29
Tabla 3.2.6. Sensores Velocidad del Viento.	30
Tabla 3.2.7. Sensores Dirección del Viento.	30
Tabla 3.2.8. Sensores Precipitación.	31
Tabla 3.4.1. Resumen de elementos de la EMA.	40
Tabla 4.1.1 Costos sensores y módulos EMA.	58
Tabla 4.1.2. Costos de accesorios de la EMA.	58
Tabla 5.1.1. Error calculado para la variable temperatura ambiente.	60
Tabla 5.1.2. Error calculado para la variable Humedad Relativa.	61
Tabla 5.1.3. Error calculado para la variable Radiación Solar	62
Tabla 5.1.4. Error calculado para la variable Presión Atmosférica	63
Tabla A.3.1. Análisis de cargas del prototipo.	76
Tabla A.3.2. Radiación solar diaria.	77
Tabla A.3.3. Especificaciones paneles.	78
Tabla A.3.4. Correcciones por temperatura.	78
Tabla A.3.5. Características de regulador seleccionado.	79
Tabla A.3.6. Capacidad sistema.	80
Tabla A.3.7. Características de batería seleccionada.	80

Lista de figuras

Figura 2.3.1. Partes de una Estación Meteorológica Automática.	9
Figura 2.6.1. Tipos de radiación terrestre.	14
Figura 2.7.1. Esquema básico de un Sistema de Adquisición de datos.	18
Figura 2.9.1. Pines de conexión Arduino para SPI.	23
Figura 2.9.2. Comunicación serial RX/TX.	23
Figura 2.9.3. Pines de conexión Arduino para I2C.	24
Figura 3.2.1. Circuito de aplicación sensor MLX90615SSG.	31
Figura 3.2.2. Circuito de aplicación sensor DHT 22.	32
Figura 3.2.3. Circuito de aplicación sensor MPXM2102AS – SOIC 20.	33
Figura 3.2.4. Circuito de aplicación sensor Kipp & Zonen CMP3.	33
Figura 3.2.5. Circuito de aplicación sensor Novalynx 200-WS.	34
Figura 3.2.6. Circuito de aplicación sensor 260-7852 Rain collector.	35
Figura 3.3.1. Conexión ESP8266 con Arduino.	36
Figura 3.3.2. Pines de conexión para Modulo SD.	37
Figura 3.3.3. Circuito de conexión Pantalla Nextion y Arduino.	37
Figura 3.3.4. Circuito de aplicación Modulo Reloj DS 1307.	38
Figura 3.3.5. Circuito de aplicación Modulo GPS Neo 6m.	39
Figura 3.4.1. Esquema de conexión EMA - UD.	43
Figura 3.5.1. Visualización de datos en ThingSpeak.	44
Figura 3.5.2. Pantalla Servidor con phpMyAdmin.	45
Figura 3.6.1. Tarjeta SD almacenaje de datos en carpeta por mes dentro del respectivo año.	46
Figura 3.6.2. Archivo Excel.	47
Figura 3.8.1. Diseño del diagrama esquemático de la tarjeta PCB. Elaboración propia con Eagle.	50
Figura 3.8.2. Diseño del diagrama esquemático del PCB de los circuitos de acondicionamiento de los sensores.	50
Figura 3.8.4. Disposición de las Borneras dentro de la caja estanca para las conexiones respectivas de energización de los sensores.	51
Figura 3.8.3 Tarjeta PCB construida.	51
Figura 3.8.5. Visualización que tiene un usuario al abrir la EMA – UD.	52
Figura 3.8.6. Conexión e implementación de la PCB con sus elementos periféricos integrados.	52
Figura 3.8.7 Prototipo EMA construido.	53
Figura 3.8.8. Diseño de trípode, elaborado con AutoCAD.	54
Figura A.1.1. Curva característica del sensor de presión MPXM2102AS.	73
Figura A.1.2. Características de operación.	73
Figura A.1.3. Circuito de acondicionamiento Sensor de Presión.	74
Figura A.2.1. Circuito acondicionamiento Sensor Radiación.	75

Lista de ecuaciones

Ecuación 3.2.1. Conversión variable presión atmosférica.	33
Ecuación 3.2.2. Conversión variable radiación solar.....	34
Ecuación A.1.1.1. Tensión de salida circuito restador.....	74
Ecuación A.1.1.2. Tensión de salida circuito amplificador no inversor.	74
Ecuación A.3.1. Potencia pico del generador.	77
Ecuación A.3.2. Energía a suministrar a la carga	77
Ecuación A.3.3. Corriente del generador.....	79
Ecuación A.3.4. Capacidad nominal del sistema.....	79
Ecuación A.3.5. Capacidad diaria	79
Ecuación A.3.6. Capacidad corregida.....	80

1. Introducción

Realizar medición y estudio de variables meteorológicas ha tenido un significado cada vez más importante para diferentes áreas de la cotidianidad como la agricultura, la navegación, la astronomía, la generación de energía, entre otras. Este tipo de actividades ha permitido obtener una mayor eficiencia en las labores que se van a realizar, ya que se tienen en cuenta estas variables que influyen en los fenómenos ambientales no determinísticos que se presentan en todo el planeta, dado que al interactuar entre ellos mismos, generan cambios climáticos que pueden favorecer o afectar las labores de los seres humanos.

La medición de estas variables se realiza principalmente en estaciones meteorológicas. Existen diversos tipos de estaciones meteorológicas según las necesidades del usuario, las condiciones a evaluar, el fin de la información que se va a obtener y demás elementos que se tienen presentes para definir un tipo de estación meteorológica.

En la actualidad se tiene proyectado crear una Red Eléctrica Inteligente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por parte de los grupos de investigación; Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía (Lifae) y el Grupo de Compatibilidad Electromagnética (GCEM). Por esto, se presenta este proyecto como una propuesta para el diseño e implementación de una Estación Meteorológica Automática (EMA), teniendo en cuenta los estándares propuestos por la Organización Mundial de Meteorología (OMM).

El objetivo principal de la EMA es dar solución a la medición de variables ambientales que puedan ser de utilidad para la evaluación del recurso energético adecuado para la generación de energía, de la que finalmente se encargara la Red Eléctrica Inteligente.

Se presentan los elementos empleados, las condiciones para su selección y el proceso para la implementación de esta herramienta incluyendo la aplicación de las normas y guías internacionales para estaciones meteorológicas según la OMM.

La EMA desarrollada cuenta con un módulo *Wi-Fi* que permite enviar los datos captados hasta un servidor, que además son almacenados de forma constante, como respaldo del servidor, en una tarjeta de memoria SD que es acoplada a través de un módulo. Cuenta con disponibilidad de medición de temperatura ambiente, temperatura objeto (ideal para temperatura de panel fotovoltaico), humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, precipitación, velocidad y dirección del viento.

1.1. Formulación del problema

La demanda de energía eléctrica aumenta a través del tiempo ya que es incorporada en todas las actividades del ser humano. La escasez de los recursos energéticos fósiles y la contaminación obtenida por la mayoría de formas de generación de la energía eléctrica son factores que afectan directa o indirectamente a la economía de la población teniendo en cuenta el impacto ambiental que se produce de dichas actividades.

La tendencia energética mundial se enfoca hacia el diseño e implementación de Redes Eléctricas Inteligentes (Smart Grids) donde los usuarios no solo sean consumidores de energía eléctrica sino que puedan gestionar su participación como consumidores o como posibles generadores, aportando energía con tecnologías no “convencionales” tales como fotovoltaicas, eólicas, almacenamiento en celdas de combustibles, entre otras [1].

Manteniendo esta tendencia y con el propósito de dar pie a la investigación, los grupos de investigación Lifae y GCEM proponen la implementación de un prototipo de Red Eléctrica Inteligente. Para el funcionamiento de dicho proyecto es necesario el conocimiento y medición del recurso energético disponible en todo momento. El proceso de generación de algunas tecnologías implica variaciones según la eficiencia que se puede alterar por las condiciones climáticas y ambientales en un periodo específico. La información relacionada a variables ambientales es crucial para la toma de decisiones para elegir el método más eficiente de generación de energía y está sujeta a cambios en el tiempo.

Teniendo en cuenta esta necesidad se plantea la pregunta: ¿Qué importancia toma la implementación de una estación meteorológica destinada a la medición del recurso solar y eólico para mejorar el desempeño de una Red Eléctrica Inteligente?

1.2. Justificación

Académica

Se evidencia la necesidad de diseñar e implementar una Estación Meteorológica Automática con instrumentos de bajo costo cuyo propósito sea la medición del recurso energético, a partir de la medición de variables ambientales, para poder generar energía (eólica y fotovoltaica) desde el punto con mayor eficiencia en la Red Eléctrica Inteligente propuesta por los grupos de investigación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, teniendo en cuenta los requisitos de medición y acondicionamiento que define la normativa de la Organización Mundial Meteorológica para instrumentos de propósito general, proponiendo tecnologías para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos. Además, se da inicio a una serie de trabajos relacionados al mejoramiento y mayor aprovechamiento de los recursos energéticos.

Económica y social

Teniendo en cuenta la creciente utilización de recursos naturales que son empleados para la generación de energía y que como efecto producen la escasez de estos, usar tecnologías con recursos que no están siendo aprovechados hace parte de las nuevas alternativas, como la implementación de una Red Eléctrica Inteligente. La elaboración y ejecución de una estación meteorológica automática para este tipo de tecnología, hará posible lograr un mayor aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, mejorando eficiencia y contribuyendo al medio ambiente.

1.3. Alcances

El proyecto abarca el diseño y la construcción de un prototipo de Estación Meteorológica Automática como propuesta para ser implementada en el plan de Red Eléctrica Inteligente de los grupos de investigación Lifae y GCEM, para que realice la medición de las siguientes variables ambientales siguiendo las recomendaciones de la OMM:

- Temperatura
- Presión atmosférica
- Humedad relativa
- Radiación
- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Precipitación

Para la calibración de los sensores se posee el apoyo de la Fundación Universitaria Los Libertadores, que cuenta con un Laboratorio de Radiometría Solar y algunos sensores patrones que son empleados para otros proyectos académicos, por lo que se emplearan algunos de los sensores de este Laboratorio para la construcción de la EMA. Estos elementos facilitaran el proceso de adquisición de los sensores propios de la EMA que será implementada en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Al tener la información de las variables medidas, se procesa según las recomendaciones de las normas internacionales y se envía vía *Wi-Fi* a un servidor, además de ser almacenada de forma temporal en un dispositivo. Asimismo, contara con módulos adicionales para que su funcionamiento sea más completo y pueda brindar mayor información al posible usuario.

Durante el diseño y construcción de la EMA, se garantiza la seguridad y confiabilidad de cada uno de los elementos que la componen ya que se tienen en consideración las recomendaciones presentadas por la OMM para el emplazamiento de una estación meteorológica.

Para la energización de la EMA se realizara el diseño con un sistema de energía fotovoltaica teniendo en cuenta que al ser una automática debe contar con la posibilidad de ser utilizada en lugares que no se encuentran conectados al sistema de energía, de esta forma se garantiza su funcionamiento en cualquier ubicación.

1.4. Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar una Estación Meteorológica Automática dedicada a la medición de las variables ambientales: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar cumpliendo estándares internacionales.

Objetivos específicos

- Evaluar los tipos de sensores, sistemas de adquisición de datos y sistemas de transmisión de datos que se adapten a las necesidades del proyecto y que están presentes en el mercado y seleccionar aquellos que cumplan con la normatividad internacional.
- Diseñar y programar los módulos principales que componen la estación meteorológica cuya función es acondicionar los datos recibidos por los sensores.
- Realizar el procesamiento de datos y detección de errores, y efectuar la transmisión de datos vía *Wi-Fi*, para ser almacenados de forma periódica.
- Implementar el *hardware* y *software* diseñados y elaborar la estructura de la estación meteorológica automática con las debidas protecciones para ser ubicada a la intemperie.
- Verificar el cumplimiento del prototipo, dentro de rangos de error aceptables, para ser implementado comercialmente bajo los parámetros establecidos por la normatividad.
- Evaluar el consumo de potencia eléctrica de la estación meteorológica automática y plantear posibles soluciones para abastecer su consumo.

1.5. Estructura del documento de trabajo de grado

El documento presentado que hace parte del trabajo de grado “Diseño e implementación de un prototipo de estación meteorológica para la medición de variables ambientales”, se desarrolla en 7 capítulos, con 2 anexos físicos y 8 anexos digitales, adicional a la implementación de la EMA que cuenta con los siguientes elementos y sistemas de acondicionamiento correspondientes, presentados en la Tabla 1.5.1.

Tabla 1.5.1. Elementos empleados en la EMA - UD.

Elemento	Función	Observaciones
<i>Arduino DUE</i>	Arquitectura principal de la EMA	Incluye conexión a fuente de energía
<i>MLX90615SSG</i>	Termómetro	Incluye circuito de acondicionamiento
<i>DHT22 con PCB</i>	Higrómetro	Ninguna
<i>MPXM2102AS</i>	Barómetro	Incluye circuito de acondicionamiento
<i>Kipp & Zonen CMP3</i>	Piranómetro	Incluye circuito de acondicionamiento
<i>Novalynx 200-WS-04</i>	Anemómetro	Incluye circuito de acondicionamiento
<i>Novalynx 200-WS-01</i>	Veleta	Incluye circuito de acondicionamiento
<i>260-7852 Rain Collector</i>	Pluviómetro	Incluye circuito de acondicionamiento
<i>ESP8266-01</i>	Sistema de comunicación Wi-Fi	Ninguna
<i>Modulo SD</i>	Sistema de almacenamiento de datos	Incluye Memoria SD de 4 GB
<i>Pantalla táctil Nextion</i>	Sistema de visualización	Incluye PCB para integración de módulos periféricos.
<i>Reloj DS1307</i>	Sistema de sincronización de tiempo	Incluye PCB para integración de módulos periféricos.
<i>Modulo GPS Neo</i>	Sistema de posicionamiento global	Incluye PCB para integración de módulos periféricos.
<i>Módulo TTL</i>	Conexión USB para reprogramar Modulo Wi-Fi	Incluye PCB para integración de módulos periféricos.
<i>Caja Estanca</i>	Resguardo de elementos periféricos	Ninguna

Fuente: Autores

Los anexos físicos corresponden a:

- Manual del Usuario, EMA – UD
- Manual del Observador, EMA – UD

Los anexos digitales corresponden a:

- Código completo de programación Arduino y Modulo *Wi-Fi* – *Software* Arduino IDE 1.8.1
- Hoja de cálculo Excel – Datos de medición
- Archivo de diseño aplicación de pantalla – *Software* Nextion Editor V0.46
- Archivos de soporte para el servidor – Lenguaje de programación PHP, HTML
- Diseño de tarjetas PCB – *Software* Eagle 8.1.0. *Free*
- Diseño de trípode de EMA – *Software* AutoCAD 2015
- Manual del usuario y Manual del Observador – PDF
- Hojas de datos de sensores y elementos periféricos empleados

2. Marco Teórico

2.1. Meteorología

El estudio de la atmosfera y sus fenómenos es la definición dada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para la meteorología. Su aplicación se evidencia en el trabajo realizado para describir, analizar y predecir las variables meteorológicas, que tienen cambios a partir de los fenómenos que ocurren en la atmosfera; se emplea esta información desde tiempos remotos en áreas como la bioclimatología, climatología, la agricultura, la hidrología, la navegación, la astronomía, la generación de energía, entre otros. [2]

2.2. Estación meteorológica

Una estación meteorológica está definida por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), como un sitio donde se realizan observaciones y mediciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos usando instrumentos apropiados, con el fin de establecer el comportamiento atmosférico en las diferentes zonas de un territorio; de esta forma se realizan predicciones y avisos para diversas actividades. [3]

Según lo evidenciado por la OMM las variables esenciales para una estación meteorológica dependen del tipo de instalación o fin que esta tenga, por lo que puede ser una estación sinóptica de superficie, de observación en altitud, climatológica, entre otras.

Según el tipo de estación se realiza y analizan mediciones de forma precisa para ciertas variables como:

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| • Tiempo presente | • Humedad relativa |
| • Tiempo pasado | • Presión atmosférica |
| • Dirección y velocidad del viento | • Precipitación |
| • Nubosidad | • Capa de nieve |
| • Tipo de nubes | • Insolación y/o radiación solar |
| • Altura de la base de las nubes | • Temperatura del suelo |
| • Visibilidad | • Evaporación |
| • Temperatura | |

2.3. Estaciones Meteorológicas Automáticas

Una Estación Meteorológica Automática (EMA) es la unión de diferentes sensores eléctricos para la obtención de datos de parámetros meteorológicos, donde las lecturas son acondicionadas y luego procesadas con tecnología de microcontroladores o microprocesadores para ser transmitidas a través de un sistema de comunicación de forma automática. Una EMA debe contar con la capacidad para funcionar de forma autónoma las 24 horas, usualmente con un sistema de alimentación a través de energía renovable como solar o eólica. [4]

Ahora, con el avance de la tecnología, es posible la medición de variables meteorológicas desde lugares inhóspitos o de difícil acceso, en horarios fuera de la jornada laboral y aun así lograr homogeneidad en los lapsos de tiempo y disminuir los posibles errores cometidos por los trabajadores de la estación. Es por estas razones que cada vez aumenta la necesidad

de mejorar la labor de tecnología para realizar observaciones sobre este tipo de variables y con el paso de los días, el cambio de las estaciones tradicionales por automáticas es cada vez más utilizado en el mundo.

Las exigencias de precisión y exactitud establecidas para estas estaciones no distan de las aplicadas para las estaciones tradicionales, por su parte el equipo de medición no debe necesitar calibración ni mantenimiento por parte del personal; en periodos de tiempo cortos. Dependiendo de qué tan largos sean estos periodos, estas se pueden clasificar desde las atendidas esporádicamente por el personal hasta estaciones totalmente desatendidas, es decir, totalmente automáticas.

2.3.1. Tipos de EMA

- EMA en tiempo real: permite visualizar datos medidos dentro de un intervalo de tiempo. Tienen sistemas de comunicación permitiendo visualización remota, instantes después de ser procesados.
- EMA fuera de línea: Entrega los datos procesados a un dispositivo de almacenamiento interno (generalmente un *datalogger*). Se requiere la intervención en el proceso de un operador para que estos puedan ser enviados.

2.3.2. Componentes de una estación meteorológica automática

La Figura 2.3.1., muestra de manera esquemática los principales subsistemas que hacen parte de una Estación Meteorológica Automática, la cual es un sistema donde cada componente se relaciona con al menos algún otro componente y tiene una función determinada.

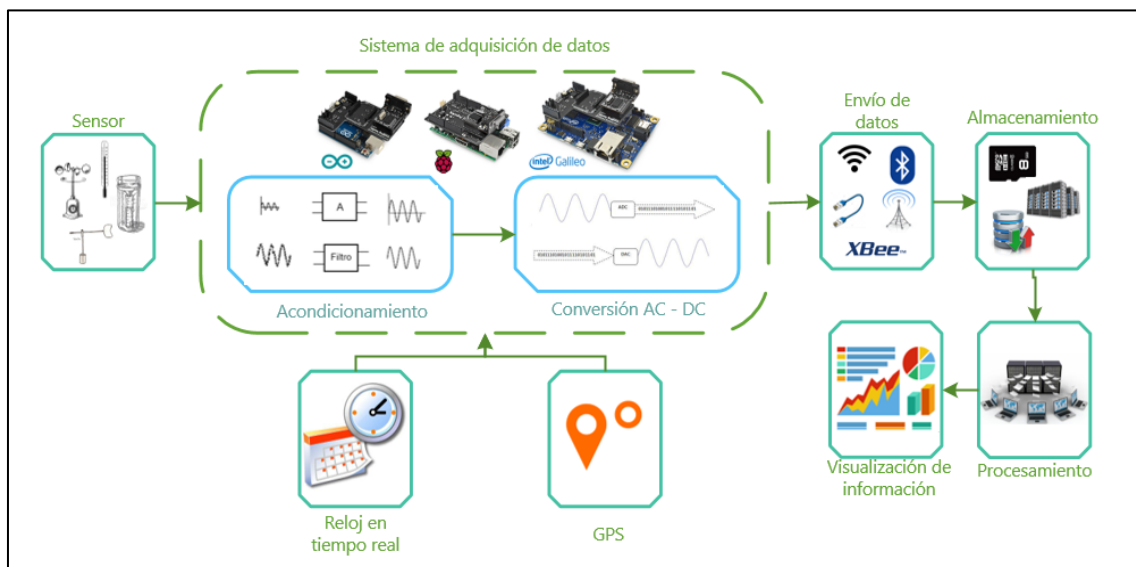


Figura 2.3.1. Partes de una Estación Meteorológica Automática.

La integración de un sistema de este tipo cuenta con componentes que se relacionan entre sí para cumplir con su objetivo vital, contando con una arquitectura principal (sistema de adquisición de datos) y con subsistemas de colaboración (medición, comunicación, almacenamiento, visualización, posicionamiento global y sincronización). Fuente: Autores

En una EMA o cualquier sistema que maneja funciones de almacenamiento y procesamiento de datos cuenta con un componente principal o arquitectura principal que en este caso es una tarjeta de desarrollo que funciona como sistema de adquisición y procesamiento de datos. Adicionalmente, cuenta con subsistemas modulares que permiten integrar toda la información que debe presentar el sistema completo; para este caso cuenta con un sistema de medición de variables ambientales (Sensores), un sistema de comunicación para la transmisión de la información (Envío de datos), un sistema de almacenamiento de información, un sistema de visualización de la información, un sistema de posicionamiento global (GPS) y un sistema de sincronización de tiempo (Reloj). Estos sistemas trabajan de forma entrelazada para cumplir con la función principal de la EMA.

2.4. Orientaciones generales para una estación meteorológica

La principal normatividad a nivel mundial para la climatología y la meteorología está dada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), dada en su documento OMM No. 49: “Reglamento Técnico: Volumen I - Normas Meteorológicas de carácter general y practicas recomendadas”, en donde se hace referencia al documento OMM No. 8: “Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos” para las estaciones meteorológicas, orientando con recomendaciones y asesoramiento para llevar a cabo observaciones y mediciones meteorológicas; al ser una guía, las condiciones de los procedimientos no son de obligatorio cumplimiento. [5]

Siguiendo las recomendaciones de la OMM No. 8, se presentan algunas consideraciones correspondientes al emplazamiento y exposición de cualquier estación meteorológica.

2.4.1. Observadores

Aunque se emplee una Estación Meteorológica Automática, es esencial contar con un observador meteorólogo ya que este podrá realizar funciones como:

- Efectuar observaciones sinópticas y/o climatológicas con exactitud y representatividad, para variables que no cuentan con sistemas automáticos para su medición, como el tipo de nubes.
- Mantener los instrumentos, la documentación y los emplazamientos en buen estado.
- Realizar registros semanales y/o mensuales de datos climatológicos, en caso de no contar con registros automáticos.
- Proporcionar observaciones complementarias cuando el equipo no realice todas las mediciones necesarias o cuando se encuentre fuera de servicio.
- Responder consultas de otros participantes y especialistas.

Lo ideal, es que los observadores cuenten con un título correspondiente al Servicio Meteorológico para acreditar su competencia y poder efectuar observaciones acorde a las normas exigidas.

2.4.2. Emplazamiento

Se deben tener presentes algunas consideraciones para el emplazamiento de una estación meteorológica, teniendo en cuenta los requisitos de exposición de los instrumentos de medición de una estación sinóptica o climatológica:

- Los instrumentos exteriores deben instalarse en terrenos llanos por lo que se deben ubicar en una zona de 25 m por 25 m si el espacio alrededor presenta muchas instalaciones, de lo contrario puede ubicarse en una zona de 10 m por 7 m. Además, debe estar ubicado en una zona restringida.
- El sistema no debe ubicarse cerca a laderas ni en una hondonada, de lo contrario pueden presentarse observaciones erróneas.
- El emplazamiento debe estar alejado de árboles, edificios, muros u otros obstáculos.
- El registrador de luz solar (piranómetro), el pluviómetro y el anemómetro deben estar expuestos y en el mismo lugar de los otros instrumentos.
- Es posible que el lugar de emplazamiento no tenga las condiciones adecuadas para estimar la velocidad y dirección del viento, por lo que tal vez sea necesario elegir otro punto de observación.
- Los emplazamientos muy abiertos son ideales para la mayoría de los instrumentos, pero podrían no ser los adecuados para los pluviómetros.
- Cuando se presenten árboles o edificios a cierta distancia de los instrumentos, que permitan divisar el horizonte, deberían elegirse otros puntos para las observaciones de radiación.

2.4.3. Coordenadas de una estación meteorológica

Las coordenadas de una estación deben conocerse y registrarse con precisión, deben estar dadas por:

- Latitud en grados, minutos y segundos enteros.
- Longitud en grados, minutos y segundos enteros.
- Altura de la estación sobre el nivel medio del mar, en metros hasta el segundo decimal.

Pueden estar dadas por la ciudad, pueblo o aeródromo que den nombre a la estación.

2.4.4. Características convenientes de los instrumentos

Los requisitos más importantes que deben satisfacer los instrumentos meteorológicos son:

- Incertidumbre, según el requisito especificado para la variable que se trate
- Fiabilidad y estabilidad
- Facilidad de funcionamiento, calibración y mantenimiento
- Sencillez de diseño que sea coherente con los requisitos
- Durabilidad
- Nivel de costo aceptable de los instrumentos, los bienes fungibles y las piezas de recambio

Lo importante de la incertidumbre es que sea un valor que se mantiene por un periodo largo de evaluación, esto es mucho mejor a contar con una excelente incertidumbre inicial, que no dura por mucho tiempo.

La calibración inicial del instrumento revelará desviaciones del resultado ideal por lo que es normal que en ocasiones se efectúen correcciones en los datos observados durante las

operaciones normales. Es importante reconocer y tener presentes las correcciones que se realizan y mantener informe de estas.

La sencillez, la robustez y la facilidad de mantenimiento son importantes, ya que los instrumentos de una estación meteorológica son empleados de forma continua por varios años. Una construcción robusta es esencial para dispositivos que se encuentran expuestos al aire libre.

2.4.5. Consideraciones de emplazamiento para cada instrumento

Cada uno de los instrumentos cuenta con unas características específicas de emplazamiento

a) Temperatura

- El sensor de temperatura debe estar ubicado dentro de una caja o garita que debe montarse a una altura entre 1,25 m y 2 m.
- Se debe evitar la cercanía de superficies artificiales que pueden elevar la temperatura del aire, además evitar obstáculos que influyen en el equilibrio radiactivo de la caja o garita.
- No deben presentarse obstáculos que generen sombra sobre la garita o caja, a excepción del relieve natural que no se toma en consideración.

b) Precipitación

- Lo ideal, pero no necesario, es que el pluviómetro se encuentre protegido del flujo del aire ya que el viento es la principal fuente de alteración para estas mediciones.
- Los obstáculos cercanos al pluviómetro deben contar con la misma altura que el pluviómetro, siendo un obstáculo cualquier objeto con un ancho angular superior o igual a 10°.
- La distancia entre cualquier obstáculo y el pluviómetro debe ser mayor al doble de la altura del objeto por encima del aparato y preferiblemente debe cuadruplicar la altura.

c) Radiación

- Se deben evitar obstáculos cercanos, no se toman en cuenta las sombras proyectadas por el relieve natural. Se pueden omitir obstáculos que estén más allá del horizonte visible.

2.5. Estaciones Meteorológicas en Bogotá

El IDEAM es el organismo de apoyo técnico y científico para el Sistema Nacional Ambiental que permite conocer información sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio ambiente. Es por esto, que es la entidad referente a las Estaciones Meteorológicas en el país; con el apoyo de otras entidades como la Secretaria Distrital de Ambiente cuentan con 275 estaciones meteorológicas, de las cuales algunas pertenecen al Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), 15 pertenecen a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) de la Secretaria Distrital de Ambiente y únicamente las estaciones de Guaymaral, Kennedy y la Estación Móvil cuentan con las 7 variables que se

tratan en este documento: Velocidad y dirección del viento, radiación solar, precipitación, humedad relativa, presión atmosférica y temperatura. [6], [7]

2.6. Instrumentos de medición

Debido al tipo de estación que se empleará, los instrumentos de medición serán elementos que se encuentren de forma permanente en contacto con las variables a medir y así poder convertir estas variables físicas en variables eléctricas para ser procesadas. Para la elección de un sensor se tienen en cuenta sus características:

- Rango (Salida y entrada)
- Offset
- Precisión
- Sensibilidad
- Resolución
- Rapidez de respuesta
- Incertidumbre

Atendiendo a las señales que proporcionan los sensores, se pueden clasificar en:

- **Analógicos:** En estos la señal varía, a nivel macroscópico, de forma continua. La información está en la amplitud, si bien se suele incluir en este grupo los sensores con salida en el dominio temporal.
- **Digitales:** La salida varía en forma de pasos discretos. No requieren conversión A/D, simplificando su manejo [8].

2.6.1. Variables a medir

Según la OMM en su Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos una estación que realiza observaciones de superficie podría contar hasta con 15 variables, dependiendo de la ubicación geográfica, las estaciones y la influencia de otros factores que incluyen hasta el tipo de nubes en la zona. Teniendo en cuenta que el diseño de la EMA que se espera realizar será empleado para una Red Eléctrica Inteligente que contará con generación de energía eólica y solar, únicamente se consideran esenciales la temperatura, la humedad relativa, la presión atmosférica, la precipitación, la radiación solar, la velocidad y la dirección del viento como variables a medir.

a) Temperatura del aire:

La temperatura es la magnitud física que caracteriza el movimiento aleatorio medio de las moléculas en un cuerpo físico [9]. En medición de recurso energético, esta variable resulta de vital importancia por dos razones: los paneles solares usados en una Red Eléctrica Inteligente están constituidos de materiales semiconductores, lo que los hace dependientes de la temperatura [10], y además es un factor importante para determinar la cantidad de potencia que es posible obtener del viento [11].

b) Humedad Relativa

Es la relación, expresada en porcentaje, entre la presión de vapor observada y la tensión del vapor saturante con respecto al agua a la misma temperatura y presión [9]. Esta medición resulta necesaria para el cálculo de la densidad del aire, factor que determinará la potencia que se puede obtener del viento.

c) Presión Atmosférica

La presión atmosférica en una superficie dada es la fuerza por unidad de área que ejerce sobre dicha superficie el peso de la atmósfera que está encima. En otras palabras, la presión es igual al peso de la columna vertical de aire sobre la superficie que se extiende horizontalmente, que llega hasta el límite exterior de la atmósfera [9].

d) Precipitación:

En meteorología, la precipitación se define como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes o el aire y se deposita en el suelo [9]. La cantidad de precipitación sobre un punto de la superficie terrestre es llamada pluviosidad, o monto pluviométrico.

e) Radiación Solar:

La radiación solar es la energía proveniente del sol recibida por la tierra [9]; esta energía incidente en la superficie terrestre se manifiesta de tres maneras diferentes:

- Directa: Es aquella que llega sin cambio de dirección y sin interactuar con nada. Es la más importante en un día soleado.
- Difusa: Es la que se obtiene como producto de los choques de la radiación directa con los componentes atmosféricos. Es la típica en los días nublados.
- Reflejada: Es la que llega procedente de la reflexión de la radiación directa en los elementos del entorno.

El objetivo de un panel solar es sacar el máximo provecho de la radiación directa y en cierta proporción de la radiación difusa, por ello, típicamente se disponen en un ángulo de 45° y por esta misma razón conviene medir con una precisión recomendada por los estándares internacionales estas dos magnitudes [12].

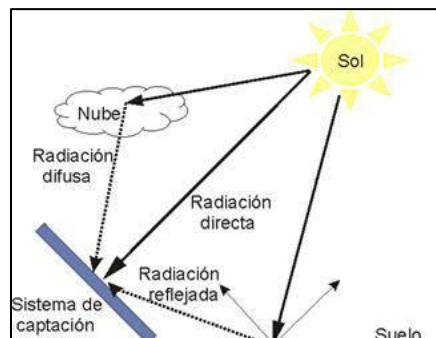


Figura 2.6.1. Tipos de radiación terrestre.
Fuente: [13]

f) Velocidad del viento:

Es una magnitud vectorial tridimensional que experimenta fluctuaciones aleatorias de pequeña escala en el espacio y en el tiempo que se superponen a un flujo organizado de mayor escala. Los datos correspondientes a la velocidad del viento son empleados para el estudio de contaminación atmosférica, aterrizaje de aeronaves y el diseño e implementación de aerogeneradores. [9]

g) Dirección del viento:

Es la dirección desde la que sopla el viento y se mide en sentido del giro de las manecillas del reloj a partir del norte geográfico, es decir, el norte verdadero. [9]

2.6.2. Características de los instrumentos de medición

Para cada uno de las variables que se medirán, se usará un instrumento que idealmente deberá contar con ciertas características para considerar confiable la medición. Las características que debe tener cada uno de los instrumentos son considerados como “Requisitos de incertidumbre de las mediciones operativas y rendimiento de los instrumentos” según la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos de la OMM; dichos datos se presentan a continuación para cada variable e instrumento en la Tabla 2.6.1.

Se tienen en cuenta los siguientes conceptos según la OMM:

- **Exactitud** (de medición): grado de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero de la variable que se mide.
- **Repetibilidad** (de resultados de mediciones): grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma variable que se mide, realizadas en las mismas condiciones de medición.
- **Reproducibilidad** (de resultados de mediciones): grado de concordancia entre los resultados de mediciones de la misma variable que se mide, realizadas en distintas condiciones de medición.
- **Incetidumbre de medición** (incertidumbre): parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a la variable que se mide, sobre la base de la información utilizada.
- **Error** (de medición): resultado de una medición menos un valor verdadero de la variable que se mide.
- **Desviación**: el valor menos su valor verdadero convencional.
- **Sensibilidad**: cambio en la respuesta de un instrumento de medición dividido por el correspondiente cambio en el estímulo.
- **Resolución**: expresión cuantitativa de la capacidad de un dispositivo de indicación para distinguir significativamente entre valores situados muy cerca de la cantidad indicada.

Notas

1. Columna 3, unidad de medida establecida por la OMM.
2. Columna 4, rango común para la mayoría de las variables; los límites dependen de las condiciones climatológicas locales.
3. Columna 5, resolución más estricta determinada por el Manual de claves (OMM-No. 306).
4. Columna 6,
Instantánea: Con el fin de excluir la variabilidad natural en pequeña escala y el ruido, un valor medio correspondiente a un periodo de un minuto se considera

como el mínimo y el más apropiado; los promedios para periodos de hasta 10 minutos son aceptables.

Promedio: Valores medios correspondientes a un periodo de tiempo determinado, especificados por los requisitos de codificación.

Totales: Totales para un periodo de tiempo determinado, especificados por los requisitos de codificación.

5. Columnas 7 a 9, hacen referencia al rendimiento operativo típico establecido por el equipo de expertos de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación (CIMO) sobre tecnología y técnicas de medición en superficie.

Teniendo en cuenta la información presentada en la Tabla 2.6.1 se realizó una búsqueda de los sensores que se iban a emplear para cada una de las variables a implementar en esta EMA, para lo cual se encontraron en el mercado los sensores presentados en las siguientes tablas. (Hojas de datos de sensores en Anexos).

Variable	Instrumento de medición	Unidad de medida	Rango	Resolución comunicada	Modo de medición / Observación	Constante de tiempo del sensor	Tiempo medio de obtención	Incertidumbre de medición alcanzable
<i>Temperatura del aire</i>	Termómetro	°C	-80°C a +60°C	0.1 K	Instantánea	20 s	1 min	0.2 K
<i>Humedad relativa</i>	Higrómetro	%	0% a 100%	1% para HR alta 5% para HR baja	Instantánea	40 s	1 min	3 a 5%
<i>Presión Atmosférica</i>	Barómetro	hPa	500 hPa a 1080 hPa	0.1 hPa	Instantánea	20 s	1 min	0.15 hPa
<i>Precipitación (diaria)</i>	Pluviómetro	mm	0 a 500 mm	0.1 mm	Totales	n/a	n/a	La mayor de 5% o 0.1mm
<i>Radiación solar</i>	Piranómetro	J/m ²	n/a	1 J/m ²	Totales	20 s	n/a	0.4 MJ/m ² para ≤ 8 MJ/m ² 5% para >8 MJ/m ²
<i>Velocidad del viento</i>	Anemómetro	m/s	0 a 75 m/s	0.5 m/s	Promedio	Constante de distancia: 2 a 5 m	2 y/o 10 min	0.5 m/s para ≤ 5 m/s 10% para > 5 m/s
<i>Dirección del viento</i>	Veleta	°	0 – 360°	1°	Promedio	Coefficiente de amortiguamiento: > 0.3	2 y/o 10 min	5°

Tabla 2.6.1. Requisitos de las mediciones e instrumentos a emplear.

Fuente: Adaptación de [9]

2.7. Sistemas de Adquisición y Procesamiento de datos

2.7.1. Sistemas de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición de datos se encargan de recibir información analógica (señal eléctrica) obtenida de los transductores o sensores y convertirla en datos digitales (bits) por medio de un conversor analógico- digital (ADC). Además los sistemas de adquisición (DAQ, por sus siglas en inglés Data Acquisition) se encargan del procesamiento y posterior almacenamiento de las señales digitales obtenidas para ser visualizadas por parte del usuario como señales físicas; en ocasiones es necesario implementar sistemas de acondicionamiento o de conversión adicionales a los que hacen parte de del procesador.

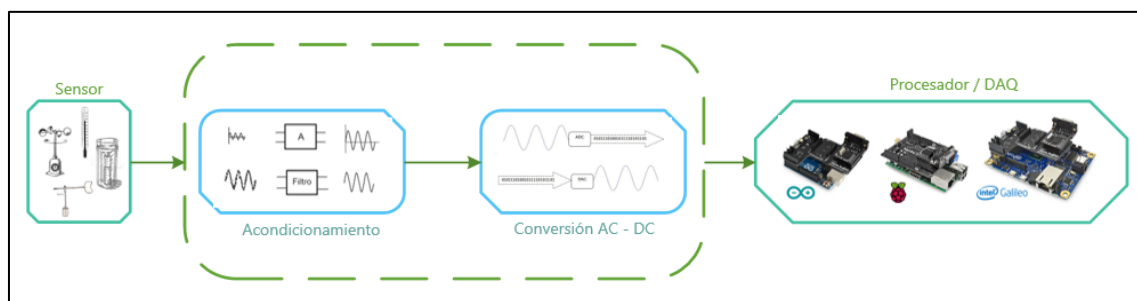


Figura 2.7.1. Esquema básico de un Sistema de Adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos cuenta con los componentes necesarios para adaptar la señal eléctrica y convertirla en datos digitales, según sus elementos pueden realizar el procesamiento y almacenamiento de las señales digitales obtenidas. Fuente: Autores

En el esquema presentado, Figura 2.7.1, se evidencian las etapas que intervienen en el proceso de adquisición:

a) *Sensor*

Es el elemento principal, aquel que tiene contacto con la variable física a medir, convirtiendo esta magnitud en una variable eléctrica; pero dicho sensor presenta limitaciones de rango y puede ser susceptible al ruido por lo que es necesario, según el sensor, realizar acondicionamiento de señal. [14]

b) *Acondicionamiento de la señal*

Es la etapa que se ubica en la salida del sensor con el fin de acoplar la información proveniente de este a las condiciones de trabajo del DAQ. Algunas de las funciones de la etapa de acondicionamiento de la señal son: asegurar la estabilidad de la señal de entrada para que la conversión se realice de forma correcta y acotar la entrada a rangos de voltaje adecuados para un aprovechamiento eficiente del conversor.

Además, los sistemas de acondicionamiento son empleados cuando en la salida del sensor se presenta una impedancia de valor alto, ya que los multiplexores analógicos poseen pequeñas capacitancias que se pueden presentar como problema en aplicaciones de rápida conmutación, para esto se acopla una etapa que transforme la impedancia del sensor. Algunos de los procesos esenciales para realizar un buen acondicionamiento son [15]:

- Amplificación
- Filtrado
- Atenuación
- Aislamiento
- Linealización

c) Conversor Analógico-Digital (ADC)

El ADC fragmenta o clasifica la señal analógica en varios niveles de voltaje, a mayor cantidad de divisiones, mayor resolución o cantidad de valores posible, lo que incrementa el número de bits necesarios para representar todos los datos. Al tomar muestras de la señal original y clasificarlas dentro de varios niveles de voltaje (discretización) se da una pérdida de información que produce un error por discretización que se tiene en cuenta para obtener la resolución del instrumento.

Los principales tipos de conversores son:

- ADC de aproximación sucesiva.
- ADC de Voltaje a Frecuencia.
- ADC Sigma-Delta.

Para lidiar correctamente con el error de discretización es necesario hacer el cálculo adecuado para conocer las características óptimas de un conversor analógico-digital que permita una resolución mínima requerida para cada dato por las reglas de diseño; esta conversión puede realizarse inclusive con la misma tarjeta o procesador.

2.7.2. Sistema de procesamiento de datos

Los sistemas de procesamiento de datos se encargan de tomar uno o múltiples datos digitales en sus entradas bien sea de forma paralela (cada bit por un pin diferente) o de forma serial (todos los bits ingresan por un único pin de forma síncrona con un ciclo de reloj o asíncrona con una cadena de sincronismo), para someterlos a un determinado proceso aritmético, para su visualización o simplemente para ser almacenados en una memoria digital.

El núcleo del sistema de procesamiento de datos se denomina unidad central de procesamiento (CPU, por sus siglas en ingles), y se compone principalmente de un microprocesador, una memoria de datos, una memoria de programa y un reloj, el procesador contiene un set de instrucciones aritméticas y booleanas que permiten manipular cualquier tipo de numero binario (bits) de cierta longitud dada que viene determinada por el tipo de procesador.

En la actualidad la mayoría de dispositivos para el procesamiento de datos tales como microcontroladores, microprocesadores o placas de desarrollo incorporan en su mayoría módulos para la adquisición de datos como conversores analógico-digitales o diversos puertos de comunicación tales como *Wi-Fi*, USB, serial, I²R, entre otros, con protocolos o drivers integrados que facilitan su utilización .

a) Placas de desarrollo para sistemas de adquisición de datos

Las placas de desarrollo consisten en múltiples sistemas integrados o incrustados (embebidos) dentro de un único circuito general que esta prediseñado para cumplir con

ciertas características personalizadas, como por ejemplo, la resolución y la cantidad de canales de un ADC, la velocidad y capacidad de un microprocesador o microcontrolador, la cantidad de memoria ROM y RAM entre otras de manera que facilite la implementación de múltiples aplicaciones en un espacio más reducido y con mayor practicidad.

Las placas de desarrollo además poseen su propio entorno de programación y se programan usando lenguajes de alto nivel como C o Java, entre otros; inclusive algunas incluyen comandos exclusivos de su propio fabricante. La facilidad de uso radica en que los lenguajes de alto nivel son mucho más intuitivos que los lenguajes convencionales y no se requieren demasiadas líneas de código para realizar tareas complejas razón por la que son muy utilizadas para la academia e incluso en otras áreas del conocimiento.

Algunas de las tecnologías más sobresalientes en cuanto a placas de desarrollo se refieren son:

- Arduino
- Galileo de Intel & Arduino
- Texas Instruments
- PSOCs de Cypress
- RaspBerry Pi
- Arndale de Samsung
- Tibbo

2.8. Elementos periféricos

Adicional a los elementos esenciales para un sistema de adquisición de datos, se implementan otros módulos que permiten obtener información adicional y esencial para una EMA, teniendo en cuenta que tendrá la posibilidad de ser ubicada en otros sitios. Otros elementos que se utilizan son para la visualización y almacenamiento de la información.

2.8.1. Sistema de comunicación

Debido a condiciones de emplazamiento extremas donde una EMA puede localizarse en espacios con condiciones de acceso muy limitadas es necesario recurrir entonces a sistemas de comunicación inalámbricos para acceder de forma sencilla y eficiente a los datos recogidos por la EMA.

La comunicación entre la EMA y un centro de control o proceso puede hacerse en tiempo real, es decir que la EMA continuamente se encuentra enviando toda la información tomada del medio, lo que requiere una gran cantidad de energía, otra manera consiste en recoger un conjunto de datos dado un intervalo de tiempo y promediar sus valores, luego serán almacenados en un buffer o base de datos para ser transmitidos de tal forma que se reduce el tiempo de utilización del canal y también el consumo de energía, los intervalos de tiempo durante los cuales deben promediarse los datos obtenidos para cada variable meteorológica se encuentran entre las recomendaciones de la OMM.

Existen diversas tecnologías de comunicación inalámbrica:

- Módulo *Wi-Fi*
- Tecnología Xbee
- Tecnología 3G
- Tecnología 4G

2.8.2. Sistema de almacenamiento de datos

Los sistemas de almacenamiento de datos son un conjunto de componentes que se emplean para leer o grabar información como soporte del almacenaje de datos, ya sea en forma temporal o permanente. El almacenamiento realizado por el dispositivo puede ser primario (principal) o secundario.

Para el almacenamiento primario se tienen en cuenta aquellos dispositivos que manejan almacenamiento masivo además de que siempre que el dispositivo principal (tarjeta de desarrollo u ordenador) reciba energía la información es guardada en la memoria de dicho dispositivo, de lo contrario se pierde. En el almacenamiento secundario, el proceso es secuencial, se guarda información hasta que el usuario lo requiera, por lo que se emplean dispositivos externos para almacenar, en ocasiones cuentan con menor capacidad que una memoria de almacenaje primario, siendo más lentos. [16]

Actualmente se cuenta con diversos dispositivos de almacenamiento de datos:

- Memoria ROM (Read Only Memory)
- Memoria RAM (Random Access Memory)
- Disco duro
- CD (CD, CD-R, CD-RW, CD-ROM, DVD, DVD-ROM, DVD-RAM, DVD-R, DVD-RW, HD-DVD, Blue Ray)
- Tarjetas de memoria (SD)
- USB
- Disco duro virtual

2.8.3. Sistema de visualización de datos

La visualización de datos o de información, es un proceso que tiene como objetivo que el usuario pueda tener conocimiento entendible y en detalle sobre cierta información, es decir, facilitarle al usuario la comprensión de los datos que se visualizan.

Este proceso, implica una secuencia en la que esta información debe ser obtenida y analizada desde otro punto para poder identificar los datos útiles para el usuario y descartar los innecesarios; esta información debe ser interpretada pensando en el usuario, para que puedan ser comprendidos por este, de forma detallada y finalmente se comunica al usuario la información elegida para que de esta forma pueda comprender los datos brindados y que corresponden a la información requerida.

Es esencial que el que busca dar a conocer la información, tenga claro que desea comunicar y además conozca las necesidades del usuario, de esta forma será más sencillo transmitir a través de la visualización la información necesaria. [17]

2.8.4. Sistema de sincronización

Un sistema de adquisición de datos como el de una EMA, debe contar con registro de tiempo para conocer información adicional a la que brindan las variables, e identificar la variación de las variables ambientales según la disposición horaria. La mayoría de tarjetas como Arduino cuentan con la función del tiempo incorporada, pero esta función toma como hora

0, el momento en el que se energiza el dispositivo, por lo que es necesario implementar módulos adicionales que permitan conocer la hora y fecha real o contar con un código en el que se pueda asignar la hora actual para adicionar este tiempo al tiempo 0 con el que inicia el microcontrolador, el inconveniente se presentaría cada vez que sea necesario reiniciar la energización del microcontrolador, ya que debería reprogramarse. [18]

2.8.5. Sistema de posicionamiento

La EMA puede ser ubicada en cualquier parte por lo que las condiciones ambientales entre un lugar y otro pueden variar. Es necesario que el usuario pueda considerar la ubicación de la estación para definir el comportamiento de las variables según el sitio donde se encuentra ubicado. Para esto, lo ideal es utilizar un módulo GPS que permita identificar, como se definió en las consideraciones adicionales que debe tener una estación meteorológica en la sección 2.4.3, en la que se aclaran las condiciones para las coordenadas de ubicación de la estación meteorológica.

2.8.6. Sistema de alimentación

Los métodos de captación de energía deben ser diseñados según las necesidades del sistema que requiere la alimentación y las condiciones en la que este se encuentra. Para esto se debe identificar si el sistema debe ser o no autónomo. Teniendo en cuenta las disposiciones de una EMA, su emplazamiento y demás factores por los cuales es necesario que esta cuente con energía todo el tiempo, lo ideal es implementar un sistema de alimentación autónomo y además contar con la opción de tener conexión a la red.

Para el caso del sistema conectado a la red, lo ideal sería contar con un adaptador de energía para la tarjeta de desarrollo a implementar y que pueda ser conectado fácilmente a cualquier tomacorriente. Siendo un sistema que no necesita de diseño ni de mayores costos.

Por otro lado, para un sistema de alimentación autónomo es necesario identificar la dimensión de la instalación de la EMA e identificar cómo será el sistema a implementar, siendo lo ideal emplear paneles solares por lo que además se debe contar con el análisis para la carga de baterías, teniendo en cuenta los puntos del día en los que la energía solar no es suficiente para brindar energía a la EMA.

2.9. Protocolos de comunicación en tarjeta Arduino

2.9.1. Protocolo SPI

El protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) permite comunicar dispositivos periféricos con conexión serial contando con Arduino como el dispositivo principal. Este protocolo es utilizado por microcontroladores permitiendo la sincronización de datos de forma serial, de esta forma se puede comunicar con uno o más dispositivos periféricos ubicados a cortas distancias. [19]

En toda conexión por SPI se presentan cuatro elementos esenciales para su conexión:

- MISO (Master In Slave Out): La línea esclava para enviar información al dispositivo principal.

- MOSI (Master Out Slave In): La línea principal para enviar información a los dispositivos periféricos.
- SCK (Serial Clock): Pulsos del reloj, que sincronizan la transmisión de información generada por el dispositivo principal
- SS (Slave Select): el pin para cada dispositivo que el periférico que el dispositivo principal puede utilizar para habilitar o deshabilitar dispositivos específicos

Dependiendo de la tarjeta Arduino, se cuentan con diferentes pines para la conexión SPI, como se presenta en la Figura 2.9.1.

Arduino / Genuino Board	MOSI	MISO	SCK	SS (slave)	SS (master)	Level
Uno or Duemilanove	11 or ICSP- 4	12 or ICSP- 1	13 or ICSP- 3	10	-	5V
Mega1280 or Mega2560	51 or ICSP- 4	50 or ICSP- 1	52 or ICSP- 3	53	-	5V
Leonardo	ICSP- 4	ICSP- 1	ICSP- 3	-	-	5V
Due	ICSP- 4	ICSP- 1	ICSP- 3	-	4, 10, 52	3,3V
Zero	ICSP- 4	ICSP- 1	ICSP- 3	-	-	3,3V
101	11 or ICSP- 4	12 or ICSP- 1	13 or ICSP- 3	10	10	3,3V
MKR1000	8	10	9	-	-	3,3V

Figura 2.9.1. Pines de conexión Arduino para SPI.

Fuente: [19]

2.9.2. Protocolo Serial

El protocolo Serial es utilizado para la comunicación entre una tarjeta Arduino y un computador u otros dispositivos, para su conexión se emplean niveles de tensión *Transistor Transistor Logic* (TTL, por sus siglas en inglés) es decir, 5V o 3,3V. Todas las tarjetas Arduino cuentan con al menos un puerto Serial, utilizado en los pines TX/RX y se comunica por pines 1 y 0 de igual forma que se comunica por USB al computador. De esta forma, se puede utilizar para comunicar el monitor serial del *software* Arduino con la tarjeta Arduino u otros dispositivos conectados a este, según la velocidad de transmisión (baud rate) de comunicación del dispositivo.

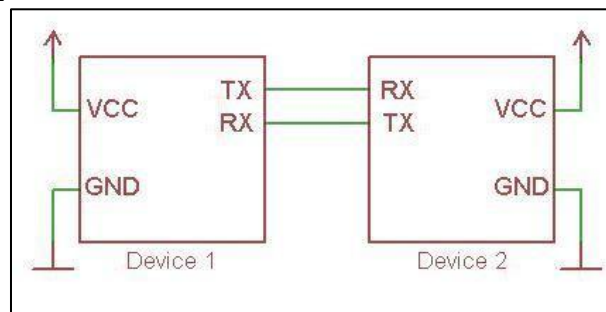


Figura 2.9.2. Comunicación serial RX/TX.

Fuente: [20]

El Arduino DUE cuenta con tres puertos seriales adicionales a 3,3V: Serial1 en pines 19 (RX) y 18 (TX), Serial2 en pines 17 (RX) y 16 (TX), Serial3 en pines 15 (RX) y 14 (TX).

El Arduino Leonardo utiliza su puerto Serial1 para comunicarse con otros dispositivos, vía TTL (5V), conectándose en los pines 0 (RX) y 1 (TX). El puerto Serial es utilizado para conectar vía USB.

2.9.3. Protocolo I2C

El protocolo I2C es un protocolo empleado para conectar en serie diferentes dispositivos que manejan este estándar, permitiendo conectar hasta 1000 dispositivos. La comunicación se realiza entre un dispositivo maestro o principal quien transmite la señal para sincronizar la transferencia de datos y el otro dispositivo, el esclavo. Cada uno de los dispositivos periféricos tiene una dirección única, de esta forma se puede identificar que dispositivo envió la información.

El bus I2C cuenta con 3 líneas:

- SDA: la línea de datos, por donde circularan los datos.
- SCL: la línea de reloj, para sincronizar las transferencias de datos
- GND: la línea de tierra, se utiliza como referencia de voltaje

Dependiendo de la tarjeta Arduino, los pines SDA y SCL cambian y debe emplearse la librería Wire. [21]

Board	I2C / TWI pins
Uno, Ethernet	A4 (SDA), A5 (SCL)
Mega2560	20 (SDA), 21 (SCL)
Leonardo	2 (SDA), 3 (SCL)
Due	20 (SDA), 21 (SCL), SDA1, SCL1

Figura 2.9.3. Pines de conexión Arduino para I2C.

Fuente: [21]

2.10. Herramientas de desarrollo

Para el diseño, programación y desarrollo de esta EMA se emplean dos *software* que son esenciales para estas funciones.

2.10.1. Arduino IDE

El principal es el *software* de Arduino (IDE) para realizar la programación correspondiente de la tarjeta de desarrollo, es un programa de código abierto que permite realizar programación de forma sencilla y cargarlo a la tarjeta por puerto USB. Su entorno de desarrollo es escrito en código Java y está basado principalmente en *Processing*. Este programa puede ser utilizado con cualquier tarjeta de desarrollo Arduino. Es empleado para programar algunos módulos que son empleados en esta EMA como el módulo *Wi-Fi* ESP 8266. Para este proyecto se empleó la versión 1.8.1.

2.10.2. Software Nextion Editor

Se empleó el *software* de Nextion para diseñar la interfaz de las aplicaciones que se utilizaran para visualizar la información y para que el usuario pueda interactuar con la EMA

conociendo los datos, modificando algunos parámetros, enviando información a la EMA y actualizando datos. Para este proyecto se empleó la versión V0.46

2.10.3. Software XAMPP

XAMPP es un *software* libre, que permite la gestión de base de datos MySQL; ligado a servidores como Apache y con la función de emplear lenguajes PHP y Perl. Debido a estas funciones se relacionan las letras de su nombre X (disponible para cualquier sistema operativo), A (Apache), M (MariaDB), P (PHP), P (Perl). Actualmente emplea MariaDB como bases de datos.

Este software permite ser utilizado como servidor web libre, es sencillo para utilizar y se puede interpretar páginas dinámicas. Por esto, se empleó en este proyecto para crear el servidor donde se pueden visualizar los datos recibidos desde la EMA.

2.10.4. Software Eagle

Para realizar el diseño de las PCB que hacen parte del proyecto, se empleó el software Eagle. Este es un software de diseño de diagramas y PCB, con licencia libre y una amplia gama de componentes disponibles al momento de instalarlo. Además, cuenta con una interfaz sencilla que permite desarrollar de forma rápida cada uno de los diseños. La versión empleada para crear el diseño de las PCB fue Eagle 8.1.0.

2.10.5. Software AutoCAD

El diseño del trípode y la caja estanca, se realizó con el Software AutoCAD en su versión educativa. Este software permite realizar dibujo 2D y modelado 3D con la facilidad de acceder a herramientas a través de comandos y a una interfaz de menús muy sencilla. Para la creación de estos diseños se empleó la versión de AutoCAD 2015.

3. Metodología de diseño

Para el diseño e implementación de la EMA, inicialmente se realiza un proceso de comparación y selección de cada uno de los elementos que hacen parte de un sistema de este tipo (Arquitectura principal, sensores, elementos periféricos) y a partir de esto se realiza el acondicionamiento necesario y la programación para cada uno de los elementos, con el fin de cumplir con las características y funciones planteadas para esta estación meteorológica; para culminar con la construcción de la estación.

3.1. Selección de arquitectura principal del sistema

Para este proyecto se cuenta con la posibilidad de utilizar las tarjetas Arduino Leonardo, Arduino Due y Tibbo; por lo que se realiza una comparación entre estas tarjetas, que es presentada en la Tabla 3.2.1.

Por las características presentadas, se emplea la tarjeta Arduino Due, principalmente por sus tipología de procesamiento y por la cantidad de pines con los que permite trabajar, teniendo en cuenta que serán varios sensores y módulos los que se emplearán; además de que se cuenta con una amplia bibliografía para las tarjetas Arduino.




Una de las principales ventajas de este módulo es el procesamiento de datos y la facilidad de acople de diversos sensores, por lo que también cuenta con una amplia gama de *shields* o módulos que permiten adicionar funcionalidades. En general, debido a su fácil adquisición, manejo y economía, las placas de desarrollo de Arduino son las de mayor presencia en el mercado. Son comunes para principiantes y estudiantes debido a su facilidad de uso y su amigable interfaz; estas tarjetas utilizan microprocesadores Atmel de distintas capacidades que junto a sus demás componentes ofrecen una gran gama de aplicaciones, además de la variedad en sus versiones. Arduino permite adquirir información de un entorno específico a través de sus pines de entrada y afectar a otros elementos como luces, motores y otros actuadores. Para su programación se emplea un *software* propio de la compañía, basado en programación *Processing/Wiring*.

3.2. Selección de sensores

Según las recomendaciones planteadas por la OMM, para la selección de los sensores de cada variable ambiental, se optó por escoger algunos sensores que cuentan con fácil adquisición en el mercado y que según sus aplicaciones podrían ser utilizados en la EMA. Para cada uno de estos sensores se realizó la comparación y se presentan sus características en las siguientes tablas.

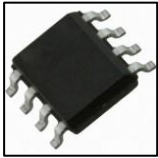



A partir de la comparación, se seleccionaron los sensores que cumplieran con las recomendaciones de la OMM y se presentan sus respectivos esquemas de conexión y demás elementos necesarios para su funcionamiento adecuado en los siguientes numerales.

Tabla 3.2.1. Tarjetas Sistema de Adquisición de Datos.

CARACTERÍSTICAS	ARDUINO LEONARDO [22]	ARDUINO DUE [23]	TIBBO EM1206EV-SSK [24]
<i>Imagen</i>			
<i>Micro Controlador</i>	AT91SAM3X8E	AT91SAM3X8E	T1000 ASIC
<i>Tensión De Funcionamiento</i>	3.3V	3.3V	3.3V
<i>Voltaje De Entrada (Recomendado)</i>	(7 - 12)V	(7 - 12)V	12V
<i>Voltaje De Entrada (Límites)</i>	(6 - 16)V	(6 - 16)V	-
<i>Pines digitales I/O</i>	20 I/O Digitales (7 proporcionan Salida PWM y 12 como entradas análogas)	54 I/O Digitales (12 proporcionan Salida PWM), 12 entradas análogas	Más de 17 I/O de propósito general, incluidas salidas PWM (6Hz - 22.1184mhz)
<i>Corriente CC Para Pin 3.3V</i>	40 mA	800 mA	230mA
<i>Memoria Flash</i>	32 KB (ATmega32u4) of which 4 KB used by bootloader	512 KB Todo Disponible Para Las Aplicaciones De Usuario	512K Or 1024KB Flash Memory For Firmware, Application, And Data Storage.
<i>SRAM</i>	2.5 KB (ATmega32u4)	96 KB (Dos Bancos: 64KB Y 32KB)	2KB EEPROM For Data Storage
<i>Velocidad De Reloj</i>	16 MHz	84 Mhz	88 Mhz
<i>Longitud</i>	68.6 mm	101.52 mm	103.5 mm
<i>Anchura</i>	53.3 mm	53.3 mm	57 mm
<i>Precio [Pesos colombianos]</i>	68.000	170.000	600.000

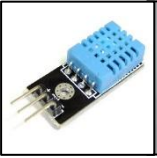


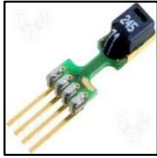
Fuente: Autores

Tabla 3.2.2. Sensores temperatura.

<i>Referencia Sensor</i>	DS1722 [25]	DS18S20 [26]	LM335 [27]	MLX90615SS G [28]
Imagen				
Nivel mínimo [°C]	-55	-55	-40	-40
Nivel máximo [°C]	120	125	100	85
Tipo de sensor	Digital	Digital	Digital	Digital
Tensión de operación [V]	2,65 – 5,5	3,0 – 5,5	2.92 - 3.04	3
Resolución [°C]	1 – 0,0625	0,5	0,5	0,01
Exactitud [°C]	±2	±0,5	±1	±0,5
Tiempo de respuesta [s]	0,075 – 1,2	0,75	-	5e ⁻⁵
Precisión [°C]	-	0,25	1	0,5
Precio [Peso colombiano]	5.800	6.960	1.798	35.000




Fuente: Autores

Tabla 3.2.3. Sensores de Humedad Relativa.

<i>Nombre</i>	DHT22 (Temp.) [29]	HS1101 [30]	HIH-4000-002 [31]	SHT71 (Temp.) [32]
Imagen				
Nivel mínimo [%]	0	1	0	0
Nivel máximo [%]	100	99	100	100
Tensión de operación [V]	3,3 – 6	5,0 – 10,0	4,0 – 5,8	2,4 – 5,5
Resolución[%]	0,1	-	-	0,5
Exactitud[%]	-	±1,5	±2,5	±1
Tiempo de respuesta [s]	2	5	5	8
Precisión[%]	±2%	-	±3,5%	±3%
Precio [Peso colombiano]	24.000	12.180	36.000	13.000



Fuente: Autores

Tabla 3.2.4. Sensores Presión Atmosférica.

<i>Nombre</i>	MPXM2102AS – SOIC 20 [33]	MPX5010GP [34]	BMP180 [35]
Imagen			
Nivel mínimo [kPa]	0	0	300
Nivel máximo [kPa]	100kPa	10K	1100 hPa
Sensibilidad [mV/kPa]	0,4	0,45	-
V. operación [V]	10-16	5,00	1.8- 3.6
Resolución [kPa]	-	-	0.01hPa
Exactitud [%]	-	5.0	0.5
Tiempo de respuesta [s]	0,001	0,001	0,003
Precio [Peso colombiano]	29.000	63.800	16.000




Fuente: Autores

Tabla 3.2.5. Sensores radiación solar.

<i>Nombre</i>	Kipp & Zonen CMP3 [36]	Piranómetro SPN1 [37]
Imagen		
Nivel mínimo [W/m²]	0	0
Nivel máximo [W/m²]	2000	2000
Sensibilidad [μV/W/m²]	5 - 20	-
Resolución [W/m²]	< 0,2	0.6
Exactitud	-	±5
Tiempo de respuesta [s]	< 18	< 0,2
Campo visión	180°	360°
Precio [Peso colombiano]	4.500.000	21.000.000



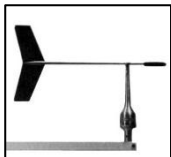
Fuente: Autores

Tabla 3.2.6. Sensores Velocidad del Viento.

<i>Nombre</i>	Vector L100 [38]	Thies Fisrt Class Advanced [39]	Novalynx 200-WS-01 [40]
Imagen			
Nivel mínimo [m/s]	0.2	0.3	0
Nivel máximo [m/s]	75	75	99
Tipo	Opto-electrónico	Digital	Magnéticas
V. operación [V]	10	15	5
Resolución [m/s]	0.05	0.05	0,5
Exactitud [m/s]	±0.2	±1	±3
Precisión	2%	3%	3%
Precio [Peso colombiano]	2.721.000	3.800.000	680.000





Fuente: Autores

Tabla 3.2.7. Sensores Dirección del Viento.

<i>Nombre</i>	Veleta THIES FIRST CLASS [41]	NRG #200 [42]	Novalynx 200-WS-04 [43]
Imagen			
Rango de medida	0° - 360°	0° - 355°	0°-360°
Tipo	Análogo	Análogo	Análogo
V. operación [V]	24	15	15
Exactitud	±1	±1	±3
Precisión	0,25%	1%	-
Umbral de inicio [m/s]	0,5	1	-
Precio [Peso colombiano]	2.400.000	1.200.000	800.000

Fuente: Autores

Tabla 3.2.8. Sensores Precipitación.

<i>Nombre</i>	PLUVIÓ. YOUNG [44]	PLUVIÓ. THIES [45]	MW8006- 03/08 [46]	260-7852 Rain Collector [47]
Imagen				
Nivel de recogida [cm²]	200	200	324	214
Resolución [mm]	0,1	0,1	0,2	0,2
Precisión	3%	3%	8%	-
Rango de medida [mm/min]	Max. 11	Max. 11	10	10
V. operación [V]	24	24	24	24
Precio [Peso colombiano]	3.900.000	3.756.000	3.600.000	300.000

Fuente: Autores

3.2.1. Temperatura

El sensor MLX90615SSG se eligió por sus características y compatibilidad con las condiciones sugeridas por la OMM. Es un termómetro infrarrojo que permite realizar mediciones de temperatura ambiente y de objetos sin tener contacto con este, por lo que en este punto se plantea la opción de realizar mediciones de temperatura del panel. Para obtener la señal de salida de este sensor se emplea el siguiente circuito, presentado en la Figura 3.2.1.

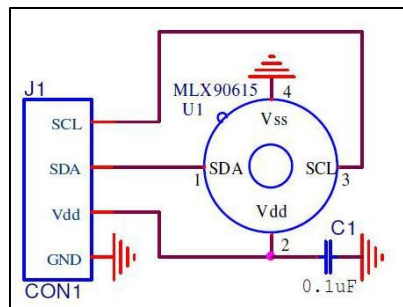


Figura 3.2.1. Circuito de aplicación sensor MLX90615SSG.

Fuente: [28]

Además de la implementación de este circuito, se debe utilizar una librería propia de este dispositivo para facilitar su programación en la tarjeta Arduino. La librería para el sensor de temperatura digital Melexis MLX90614 utiliza un protocolo similar al I2C, llamado SMBus, de esta forma logra trabajar con la librería Wire en ciertas funciones. La librería de este

sensor permite simplificar código que se debe utilizar para la lectura y envío de información y únicamente puede ser empleada para la referencia de este sensor.

Este sensor permite conocer la temperatura ambiente y la temperatura de un objeto, su librería principal fue creada por parte de una empresa para obtener la medición de la temperatura de los motores tipo OutRunner sin escobillas de CC utilizados en Multicopters, para fines de registro de datos y telemetría mecánica. Además, esta librería permite conectar varios sensores de este tipo en serie, para así obtener información de temperatura de varios objetos al mismo tiempo. [48] Teniendo en cuenta la opción de conectar varios sensores de este tipo para medir la temperatura de varios objetos, se podría implementar una cadena de estos sensores para conocer la temperatura de cada uno de los paneles que harán parte de la Red Eléctrica Inteligente y de esta forma utilizar sus valores para realizar mantenimientos o identificar posibles daños en los paneles.

3.2.2. Humedad relativa

El sensor de humedad relativa, DHT22, además de cumplir con las características propuestas por la OMM es de fácil acceso y manipulación, debido a que para su implementación cuenta con una adaptación para ser conectado de forma directa a la tarjeta Arduino, teniendo únicamente tres pines, dos para la alimentación y uno para la salida digital que se conecta a un pin digital de la tarjeta Arduino. Si no se contara con su adaptación, se conectaría como se presenta en la Figura 3.2.2.

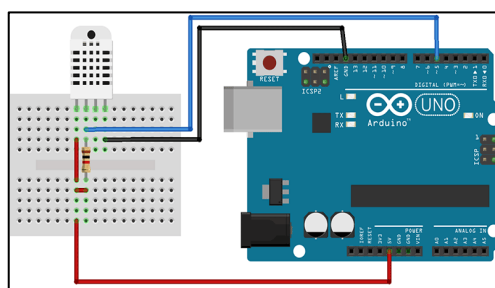


Figura 3.2.2. Circuito de aplicación sensor DHT 22.
Fuente: [49]

Adicional al circuito se utiliza una librería específica para este sensor, es la DHT.h. La librería permite obtener los valores de humedad relativa y temperatura, como variables físicas, es decir, transforma las señales eléctricas sin necesidad de realizar cálculos adicionales.

3.2.3. Presión atmosférica

El sensor de presión atmosférica, MPXM2102AS – SOIC 20, es un sensor que cumple con las características recomendadas por la OMM y es empleado en diversos proyectos como barómetro debido a su precisión. Para su implementación se utiliza un circuito de acondicionamiento para la tensión de salida del mismo (0mV - 40 mV) y obtener una entrada en la tarjeta Arduino DUE dentro de su rango de trabajo (0V – 3,3) V. El diseño del circuito presentado en la Figura 3.2.3 se presenta en el Anexo A.A.1.

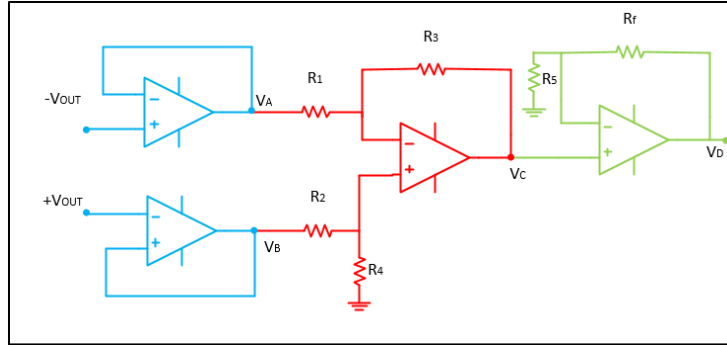


Figura 3.2.3. Circuito de aplicación sensor MPXM2102AS – SOIC 20.
Fuente: Autores.

Se utiliza también una ecuación para convertir el valor obtenido del circuito de acondicionamiento (0V – 5V) en la entrada analógica del sistema de adquisición de datos donde el valor que puede leerse es de 0 a 1023, además se hace la conversión según la información de la gráfica Tensión de salida Vs. Presión, presentada en la hoja de datos del sensor. En la Ecuación 3.2.1, el valor V_0 corresponde al valor de entrada que se obtiene a la salida del circuito de acondicionamiento en bits.

$$P [kPa] = \frac{1000kPa * V_0}{1023}$$

Ecuación 3.2.1. Conversión variable presión atmosférica.

3.2.4. Radiación solar

El sensor seleccionado para la medición de la radiación solar fue el Kipp & Zonen CMP3, debido a que ya había sido adquirido para otros proyectos, además de cumplir con las características propuestas por la OMM, es un equipo previamente calibrado y listo para su uso. Para su implementación se utiliza el siguiente circuito que permite realizar acondicionamiento de la señal para trabajar en el rango de señales de entrada del sistema de adquisición de datos, ya que el sensor de radiación mantienen una señal de salida de (0 – 30) mV, para ser acoplada al rango de trabajo de la tarjeta Arduino DUE (0 – 3,3) V. El circuito presentado, diseñado en proteus, simula con un divisor de tensión la señal generada por el sensor de radiación y cuenta con circuito amplificador no inversor. El diseño del circuito presentado en la Figura 3.2.4 se presenta en el Anexo A.A.2.

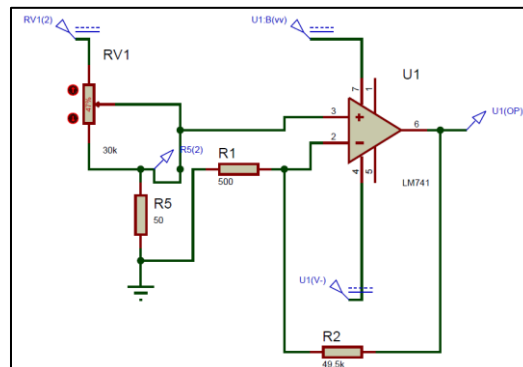


Figura 3.2.4. Circuito de aplicación sensor Kipp & Zonen CMP3.
Fuente: Autores.

Para la conversión de la variable eléctrica recibida en la tarjeta Arduino DUE, se emplea la siguiente ecuación; teniendo en cuenta que la información recibida es analógica por lo que se maneja en un rango de (0 – 1023).

$$Radiación\ solar = \frac{50 * V_0}{31}$$

Ecuación 3.2.2. Conversión variable radiación solar.

3.2.5. Velocidad y dirección del viento

Debido a la disponibilidad que tiene sobre este instrumento, el laboratorio de Radiometría Solar de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se emplea el sensor Novalynx 200-WS, además de que está disponible para este proyecto cumple con las condiciones propuestas por la OMM y su adquisición es sencilla debido que ha sido utilizado en otras instituciones educativas para otros proyectos y se han obtenido los resultados de calibración adecuados para este sensor. Este sensor es uno de los más implementados en estaciones meteorológicas completas que hacen parte de la misma empresa; por lo que es una empresa que permite confiar que el uso del sensor será adecuado para implementarlo en una estación meteorológica.

Para emplear el anemómetro, se realiza la adaptación por medio de un circuito de acondicionamiento, lo que luego se dirige a la entrada análoga en la tarjeta Arduino, teniendo en cuenta el rango de trabajo del sensor (1.2 mph); la hoja de datos del sensor cuenta con una ecuación que relaciona el número de vueltas (rotaciones) y una constante para calcular la velocidad del viento.

Por otro lado, la veleta es uno de los sensores más sencillos, ya que cuenta con elementos magnéticos para reconocer la posición del eje, emulando un potenciómetro. Para este sensor, se obtiene la señal analógica que es entregada a la tarjeta Arduino y en el código de este es procesada para obtener la dirección del viento. Teniendo en cuenta la entrada analógica, se divide el rango de esta señal en las 8 posibilidades que puede tener como señal real de salida el sensor (Norte, Sur, Oriente, Occidente, Nororiente, Noroccidente, Suroriente, Suroccidente); esta relación se crea con el giro de 360° que maneja el sensor.

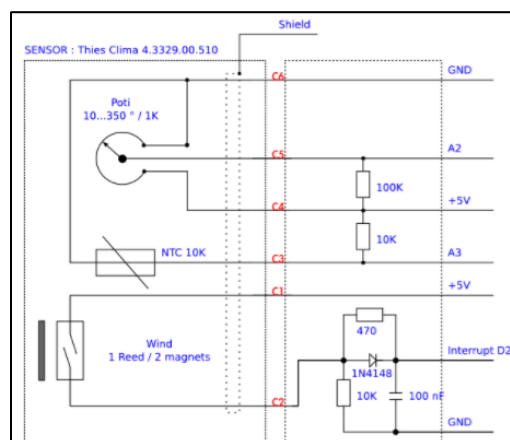


Figura 3.2.5. Circuito de aplicación sensor Novalynx 200-WS.

Fuente: [50]

3.2.6. Precipitación

Para el pluviómetro, se optó por emplear el sensor 260-7852 Rain Collector; teniendo en cuenta que es un sensor de fácil adquisición y del cual se ha evidenciado que ha sido empleado en proyectos universitarios con excelentes resultados.

Este sensor cuenta con un circuito basado en el equilibrio de un balancín al completar su máximo peso y un contador para cambio de lado en la balanza; teniendo un registro de mm^3 para cada cambio de lado. Por lo que la lógica principal de este sensor es un contador que se reinicia cada día, según las recomendaciones de la OMM. Este contador es implementado en la tarjeta Arduino, a partir de los pulsos enviados por el sensor para cada cambio de lado del balancín. Para el reconocimiento de pulsos por parte del Arduino, se emplea un circuito de acondicionamiento.

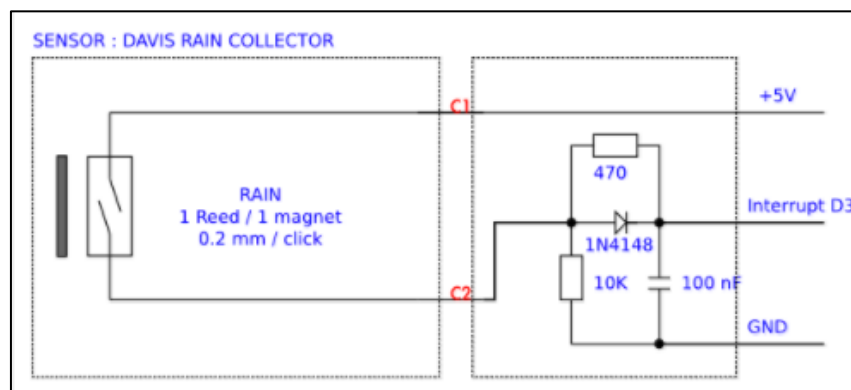


Figura 3.2.6. Circuito de aplicación sensor 260-7852 Rain collector.

Fuente: [50]

3.3. Elementos periféricos

Como elementos periféricos se optó por utilizar los siguientes dispositivos correspondientes a los sistemas de comunicación, almacenamiento de datos, visualización de datos, sincronización de tiempo y alimentación.

3.3.1. Módulo Wi-Fi ESP8266-01

Cada una de las tecnologías presentadas para hacer parte del sistema de comunicación, tiene sus ventajas y desventajas, pero teniendo en cuenta la opción de permitir que en futuros proyectos se pueda mejorar la versión de esta EMA y que sea de fácil entendimiento los elementos utilizados, se utiliza el módulo *Wi-Fi*.

El módulo *Wi-Fi* ESP8266, de la compañía Espressif Systems, hace parte del mundo *Internet of Things* (IoT, por sus siglas en inglés), un mundo en el que ahora se conectan miles de objetos y no personas. Es un módulo que puede ser conectado de forma directa a una tarjeta Arduino y puede ser programado para funcionar con o sin una tarjeta de estas. Se emplean comandos tipo AT para su programación y pueden ser controlados desde el monitor serial del *software* de Arduino o en sus últimas versiones se permite su uso como una placa de desarrollo equivalente a Arduino, de tal forma que se puede cargar código de la misma manera que un Arduino convencional. Al emplear este módulo se puede enviar la

información recibida por la tarjeta Arduino a algún servidor. Sus características principales [51]:

- Wi-Fi 2.4 GHz, 802.11 b/g/n, WPA/WPA2
- Integra pila de protocolos TCP/IP v4
- Potencia de salida de +20dBm en modo 802.11b
- Conexiones SDIO 2.0, SPI, UART, I2C
- Modulo sueño <10uA, Modo sueño leakage < 5uA
- Despierta y transmitir paquetes en <2 ms
- Consumo de energía de <1.0mW (DTIM3)
- Rango de temperatura de funcionamiento -40C ~ 125C

De acuerdo a sus características, se hace un dispositivo bastante integral que permite realizar con independencia proyectos pequeños a gran velocidad y con amplitud de aplicaciones.

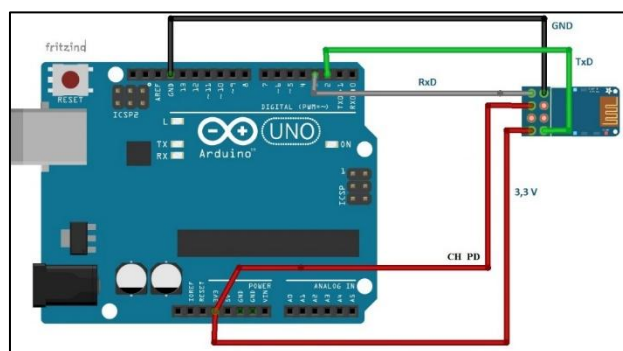


Figura 3.3.1. Conexión ESP8266 con Arduino.

Fuente: [52]

3.3.2. Módulo SD

De las tecnologías presentadas como almacenamiento de información, la de mejor acceso para este proyecto y con mayor disponibilidad de almacenamiento es la tarjeta de memoria (SD), de esta forma se podrá realizar análisis de forma posterior y que pueda ser empleada esta información para el objetivo de la Red Eléctrica Inteligente. Este módulo permite utilizar una memoria micro SD en la que se almacenan, como respaldo, los datos recibidos por la tarjeta Arduino y son digitalizados en archivos .csv, que se pueden observar y procesar fácilmente en la aplicación Microsoft Excel. Para utilizar el modulo SD se debe tener en cuenta que los pines de conexión cambian según el tipo de tarjeta Arduino que se vaya a utilizar.

Para emplear el modulo SD, se utilizan las librerías SPI y SD, librerías que hacen parte del conjunto de librerías básicas del *software* de Arduino. Por un lado, la librería SPI es utilizada por la comunicación SPI entre la tarjeta Arduino (dispositivo principal o maestro) y la tarjeta de memoria – SD (dispositivo periférico), realizando la conexión según los pines presentados en la Figura 2.9.1. Se debe tener presente, además de los pines esenciales de conexión SPI, un pin CS *hardware* para seleccionar la tarjeta SD, de lo contrario la librería no funcionará.

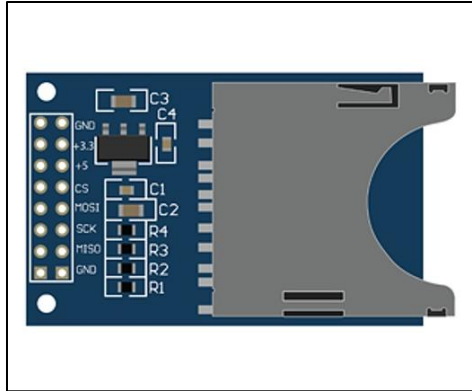


Figura 3.3.2. Pines de conexión para Módulo SD.

Fuente: [19]

La librería SD para tarjetas Arduino permite leer y escribir en tarjetas SD, a través del módulo SD adquirido, sin necesidad de emplear otros. La librería soporta los formatos FAT16 y FAT32 para los archivos del sistema en una tarjeta SD, además de las tarjetas SDHC. Con esta librería se puede realizar funciones que incluyan crear archivos y guardarlos en directorios específicos de la tarjeta SD, por lo que se debe identificar de forma precisa en donde se escribirá en la SD, ya que en la tarjeta SD se puede confundir una carpeta con un archivo. Además se puede conocer la información de la tarjeta de memoria, guardar y leer información, crear y destruir archivos, mostrar información de un archivo. [53]

3.3.3. Pantalla táctil Nextion

Para visualizar la información de la EMA, se utiliza una pantalla táctil para así aprovechar su doble función y no utilizar un teclado como elemento adicional. La referencia de la pantalla a utilizar es Nextion de 2,4", cuenta con una interfaz HMI y con su propio *software* para crear las diferentes aplicaciones, su manejo es sencillo, en donde no se utiliza código de programación complicado. Su conexión con la tarjeta Arduino es a través del puerto serial.

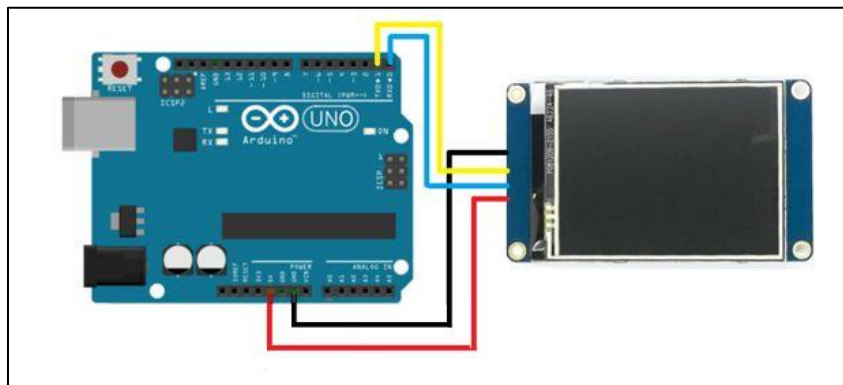


Figura 3.3.3. Circuito de conexión Pantalla Nextion y Arduino.

Fuente: [54]

Para tener comunicación entre la pantalla Nextion y la tarjeta Arduino el código de programación se realiza desde la tarjeta Arduino, empleando la librería Nextion, la cual permite programar de forma sencilla la interfaz entre Arduino y la pantalla Nextion,

utilizando arreglos para transmitir datos desde el Arduino y poder ser presentados en la pantalla o recibir datos en la tarjeta Arduino que son transmitidos por indicaciones dadas por parte del usuario en la pantalla como selección de botones. La información enviada por parte del Arduino se puede visualizar como texto, como barras de progreso, graficas, indicadores, entre otros. [55]

3.3.4. Módulo Reloj DS1307

Tener una EMA implica que los datos registrados correspondan a una fecha y hora determinada, la tarjeta Arduino no cuenta con reloj en tiempo real para saber los segundos, los minutos, la hora, el día, el mes y el año. Por lo que se dispone de un módulo Reloj que permite sincronizar la hora actual para poder tomar el registro en tiempo real. El módulo DS1307, cuenta con una batería y su propio circuito. La conexión de este módulo es la siguiente:

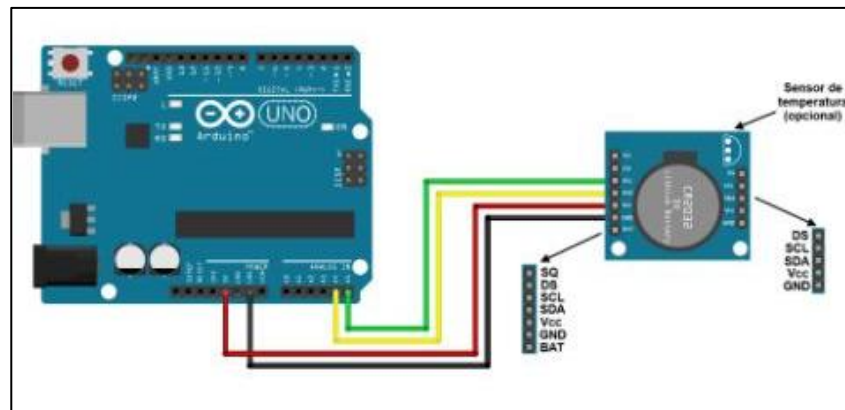


Figura 3.3.4. Circuito de aplicación Modulo Reloj DS 1307.
Fuente: [56]

Adicional a la conexión, se deben emplear las librerías Wire y RTCLib. La librería Wire es una librería esencial para enlazar aquellos dispositivos que se comunican con la tarjeta Arduino a través del protocolo de comunicaciones I2C. En esta librería se puede emplear el código para que la tarjeta Arduino sea maestro o esclavo, según la dirección que le sea asignada. El código en esta librería también permite leer información, verificar la disponibilidad de información, iniciar una transmisión, transmitir información, terminar transmisión. [21] La librería RTCLib, es la librería que permite simplificar los códigos de conexión entre el módulo RTC 1307 y la tarjeta Arduino, se emplea esencialmente un comando que permite ajustar la hora y la fecha del dispositivo.

3.3.5. Modulo GPS

Partiendo de que es una EMA que puede ser emplazada en cualquier parte, puede que su posición cambie más allá de estar en una ciudad, por lo que se optó por utilizar el modulo GPS Neo 6m, que permite conocer la ubicación geográfica de la estación, obteniendo los datos de latitud y longitud, con lo que se puede calcular inclusive el huso horario para el sitio donde está ubicado para tener en cuenta la diferencia horaria respecto a la hora de la ubicación inicial que es Bogotá. Adicionalmente, permite conocer la altitud en metros sobre

el nivel del mar para el sitio donde se encuentra ubicada la estación. El modulo se conecta a la tarjeta Arduino, por medio de protocolo serial, como se presenta en la Figura 3.3.5.

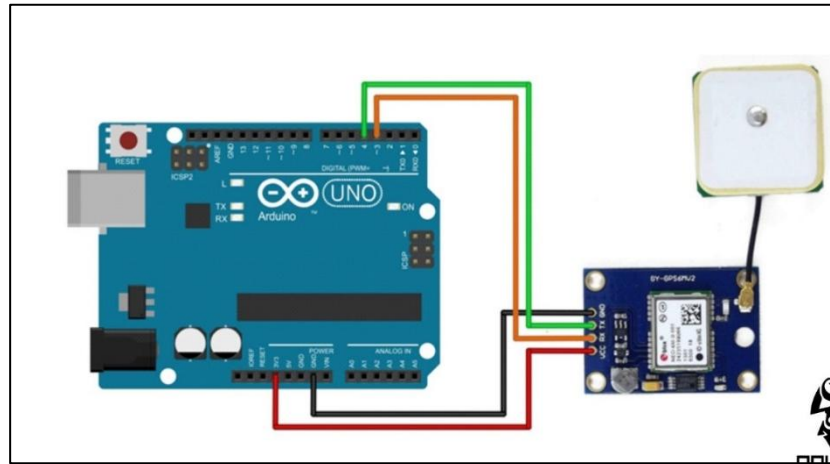


Figura 3.3.5. Circuito de aplicación Modulo GPS Neo 6m.

Fuente: [57]

Para utilizar este módulo, se emplea una librería propia TinyGPS.h, con esta librería se pueden obtener más datos relacionados a la posición global como definir la distancia entre un punto y otro, pero son datos que no son necesarios para este proyecto y pueden ser empleados para otros trabajos.

3.3.6. Panel solar y batería

Para el sistema de alimentación de energía de la EMA, se debe tener en cuenta las posibilidades de emplazamiento que se puedan presentar, por lo que puede ser en sitios donde no se tiene conexión a una red de energía, o también contar con la opción de conectarlo a una red. Debido a esto es necesario implementar un sistema que le permita contar con energía para su funcionamiento en cualquiera de las dos situaciones.

Para las situaciones en las que la EMA pueda ser conectada a la red se cuenta con un adaptador de energía que estará directamente conectado a un tomacorriente y a la tarjeta Arduino. Como elementos comerciales se pueden encontrar cargadores de 5V, 9V y 12V; para el funcionamiento eficiente de la tarjeta Arduino se debe contar con un cargador con una tensión de trabajo mayor a 5V. Se tiene en cuenta el consumo de energía de la tarjeta Arduino, por ser el elemento que alimentara a los demás módulos de la EMA.

Teniendo en cuenta la potencia máxima de trabajo (Corriente y Tensión) que debe ser empleada para alimentar la tarjeta Arduino, se realizan los cálculos para un sistema autónomo de energía, a partir de estos valores de potencia. Con esto, se diseña el número de paneles y baterías que se podrán emplear; y se presentan una opción para regulador de tensión para este sistema.

La propuesta planteada para el sistema fotovoltaico autónomo que alimentada la EMA se desarrolla en el Anexo A.3, de este diseño se propone emplear los siguientes elementos seleccionados y en las cantidades calculadas:

- 1 panel solar referencia Shine Solar SHS135-36P, 12V, 150W.
- 1 regulador referencia: Tracer3906BP/Tracer3910BP Charger Controller, 100V, 10A.
- 1 arreglo de 4 baterías referencia: MK 8GTE-DEKA, 6V, 196 Ah

3.4. Síntesis de elementos empleados

La Tabla 3.4.1. presenta un resumen de los elementos que se utilizaran, la referencia de cada uno de ellos y observaciones relacionadas a elementos adicionales que se deben utilizar para el correcto funcionamiento de cada uno de ellos.

Tabla 3.4.1. Resumen de elementos de la EMA.

Elemento	Referencia	Función	Observaciones
	Arduino DUE	Arquitectura principal de la EMA	Ninguna
	MLX90615SSG	Termómetro	Su conexión con la tarjeta de desarrollo incluye un capacitor de 0,1μF. Emplea dos librerías propias, include/twi.h y Arduino.h
	DHT22 con PCB	Higrómetro	Emplea una librería propia, DHT.h
	MPXM2102AS	Barómetro	Se acopla a un circuito de acondicionamiento.
	Kipp & Zonen CMP3	Piranómetro	Se acopla a un circuito de acondicionamiento.



Novalynx
200-WS-04

Anemómetro

Se acopla a un circuito de acondicionamiento.



Novalynx
200-WS-01

Velea

Se acopla a un circuito de acondicionamiento.



260-7852 Rain
Collector

Pluviómetro

Se acopla a un circuito de acondicionamiento.



ESP8266-01

Sistema de comunicación Wi-Fi

Emplea una librería propia, ESP8266.h



Modulo SD

Sistema de almacenamiento de datos

Emplea dos librerías propias, SD.h y SPI.h



Pantalla táctil
Nextion

Sistema de visualización

Emplea una librería propia, Nextion.h



Reloj DS1307

Sistema de sincronización de tiempo

Emplea dos librerías propias, Wire.h y RTCLib.h



Modulo GPS
Neo

**Sistema de
posicionamiento
global**

Emplea una librería
propia, TinyGPS.h

Fuente: Autores.

Para cada uno de los elementos seleccionados se conoce hasta este punto la forma de conexión a la arquitectura principal, por lo que se puede crear un esquema de conexión general de todo el sistema, a partir de un software de dibujo vectorial que permite presentar de forma gráfica las conexiones que se espera que sean realizadas para la implementación de este prototipo. El esquema realizado tiene en cuenta los niveles de tensión y las conexiones a cada pin de la tarjeta de desarrollo Arduino, como se evidencia en la Figura 3.4.1.

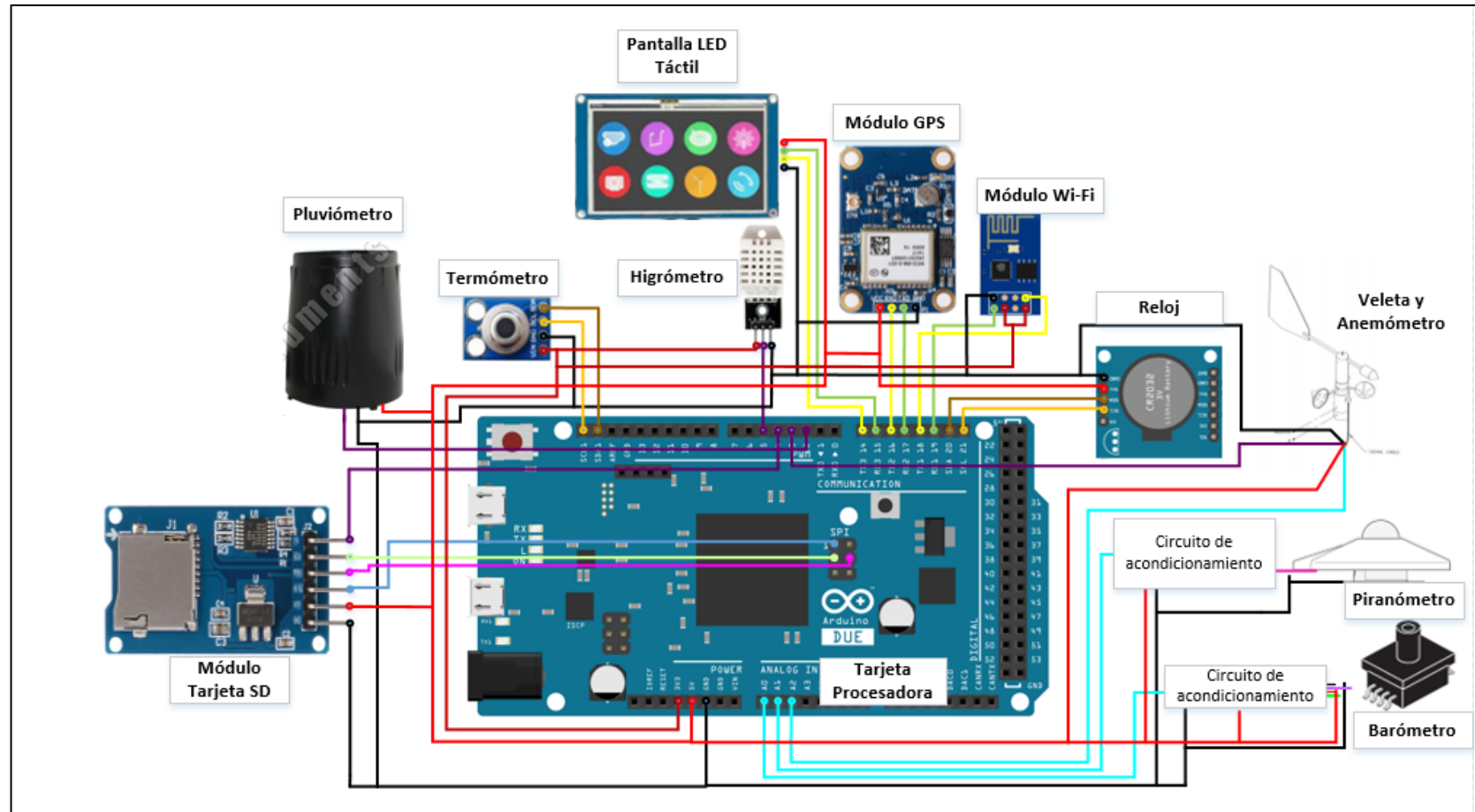


Figura 3.4.1. Esquema de conexión EMA - UD.

El esquema presentado muestra las conexiones de cada uno de los elementos que hacen parte de la EMA, referenciando los niveles de tensión y las conexiones análogas y digitales según el color de las conexiones para cada elemento. Algunos sensores, cuentan con circuitos de acondicionamiento que son presentados con mas detalle en la sección de cada uno de ellos de este documento. Fuente: Autores.

3.5. Envío de datos a servidor externo

3.5.1. Servidor en tiempo real - Sin almacenamiento de información

Para el envío de datos se decidió utilizar el módulo *Wi-Fi* ESP 8266 y se buscó conectarlo a un servidor para visualizar la información desde cualquier parte, donde se debe contar con internet. Se empleó ThingSpeak, una plataforma de IoT que permite recolectar y almacenar información de sensores en la nube y de esta forma utilizar esta información para diversas aplicaciones. Esta página permite enviar información desde tarjetas de desarrollo Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone y otras.

El principal elemento de ThingSpeak es el canal, el cual contiene los archivos de información, archivos de ubicación y el estado del archivo. Después de que se crea un canal de ThingSpeak, se puede escribir, procesar y visualizar la información en este, inclusive permite crear reacciones sobre la información con tweets y otras alertas; aunque algunas de estas acciones incluyen un costo adicional. [58]

El canal es creado para las variables de temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, radiación solar, precipitación, dirección y velocidad del viento. Los datos presentados en la gráfica de ThingSpeak son los últimos 100 datos recibidos desde el módulo *Wi-Fi*, por lo que se puede visualizar el valor de la variable y la hora.

El uso gratuito se restringe a la recepción de un dato diferente cada 25 segundos. Además, sólo almacena los últimos 100 datos adquiridos por cada sensor, lo que lo hace ineficiente para la aplicación requerida y las características de almacenamiento que sugiere la OMM.

De acuerdo con las limitantes presentadas por el servidor se intentó dar respaldo por medio de otro servidor como base de datos, sin dejar de usar ThingSpeak, lo que requería de dos módulos *Wi-Fi* cada uno dedicado a un servidor. El código empleado por el módulo para enviar los datos a ThingSpeak requería del uso de los tediosos comandos AT, lo que dentro de las líneas de código de Arduino hacía un uso innecesario de memoria y por la forma de ejecución lineal del código, se ralentizaba la adquisición de los datos.

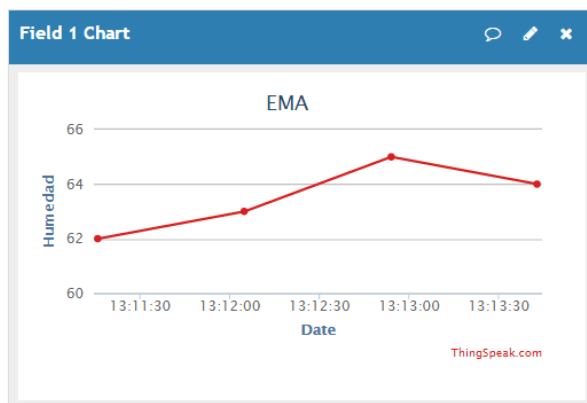


Figura 3.5.1. Visualización de datos en ThingSpeak.
Fuente: [59]

Por lo anterior, se optó por usar sólo uno de los servidores mencionados que proporciona gran variedad de utilidades y la facilidad de descargar y usar los datos de acuerdo con el requerimiento del usuario.

3.5.2. Servidor en tiempo real – Base de Datos

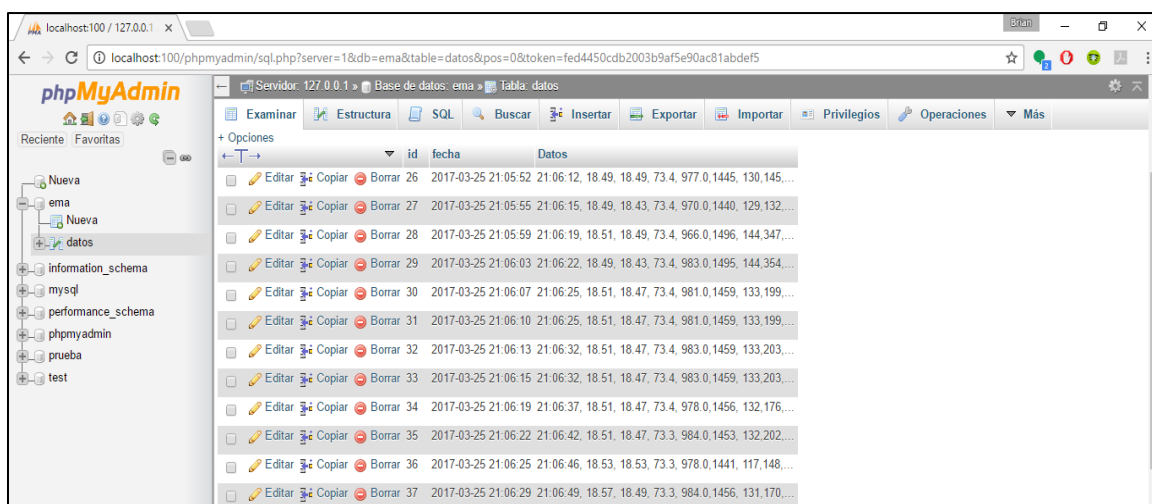
Principalmente, el objetivo es acceder a la información que ha recibido la estación desde cualquier punto de manera remota, es decir sin visualización física de la EMA, aunque se cuenta con almacenamiento de información en el sitio donde se encuentra la estación, tan sólo es un respaldo en caso de que ocurra alguna falla en la transmisión vía *Wi-Fi*.

Para esto, se crea un servidor local con la ayuda de la herramienta phpmyadmin, que brinda XAMPP. La herramienta interactúa con bases de datos para almacenamiento de información en la web. Dentro de las funciones principales que se pueden utilizar se encuentran el manejo de bases de datos, de tablas, de relaciones entre datos, entre otras.

Con este servidor se realiza la conexión por *Wi-Fi*, utilizando el módulo ESP 8266, que en sus versiones más recientes permite la carga de código en lenguaje arduino por medio de una librería implementada que facilita la ejecución del proceso.

XAMPP es una herramienta que permite la creación de un servidor remoto que consiente en alojar a phpmyadmin y usarlo de acuerdo a necesidad, permitiendo un fácil manejo para luego generar el código del módulo y probar que el envío de datos se realiza de manera adecuada, o eventualmente, detectar muy fácil en que parte del proceso de transmisión se encuentra el problema.

El resultado de la obtención de los datos en la base de datos de phpmyadmin se evidencia en una tabla como la presentada en la Figura 3.5.2.



	id	fecha
	26	2017-03-25 21:05:52 21:06:12, 18.49, 18.49, 73.4, 977.0,1445, 130,145,...
	27	2017-03-25 21:05:55 21:06:15, 18.49, 18.43, 73.4, 970.0,1440, 129,132,...
	28	2017-03-25 21:05:59 21:06:19, 18.51, 18.49, 73.4, 966.0,1496, 144,347,...
	29	2017-03-25 21:06:03 21:06:22, 18.49, 18.43, 73.4, 983.0,1495, 144,354,...
	30	2017-03-25 21:06:07 21:06:25, 18.51, 18.47, 73.4, 981.0,1459, 133,199,...
	31	2017-03-25 21:06:10 21:06:25, 18.51, 18.47, 73.4, 981.0,1459, 133,199,...
	32	2017-03-25 21:06:13 21:06:32, 18.51, 18.47, 73.4, 983.0,1459, 133,203,...
	33	2017-03-25 21:06:15 21:06:32, 18.51, 18.47, 73.4, 983.0,1459, 133,203,...
	34	2017-03-25 21:06:19 21:06:37, 18.51, 18.47, 73.4, 978.0,1456, 132,176,...
	35	2017-03-25 21:06:22 21:06:42, 18.51, 18.47, 73.3, 984.0,1453, 132,202,...
	36	2017-03-25 21:06:25 21:06:46, 18.53, 18.53, 73.3, 978.0,1441, 117,148,...
	37	2017-03-25 21:06:29 21:06:49, 18.57, 18.49, 73.3, 984.0,1456, 131,170,...

Figura 3.5.2. Pantalla Servidor con phpMyAdmin.

El servidor empleado como Base de Datos, presenta en este formato la información que es adquirida por el Arduino y luego es enviada a través del módulo WiFi. Además, permite visualizar la información como la hora y fecha a la que se reciben los datos. En su interfaz se encuentran diferentes herramientas que permiten manipular y descargar la información que es almacenada en esta base de datos Fuente: Autores.

3.6. Proceso almacenamiento de datos

La herramienta phpmyadmin permite a su vez almacenar los datos que recibe del módulo *Wi-Fi ESP 8266*, así como permite descargarlos en archivos .csv, para su fácil procesamiento, los cuales son documentos que permite representar datos en una tabla en donde las columnas son separadas por comas y las filas por saltos de líneas.

Como respaldo, se utiliza la tarjeta de memoria SD, en donde se almacena la información en archivos .csv. Desde el código de programación en Arduino se crean los archivos, se dan los títulos para las columnas y se ubican los valores según las condiciones de fecha y hora dadas por el Modulo de Reloj RTC 1307. Por cada día se crea un archivo y por cada mes se crea una carpeta.

Al abrir los archivos .csv en algún equipo se puede emplear la aplicación Microsoft Excel, la cual permite presentar los archivos en una tabla. En la tarjeta SD se ubica, por facilidad, un archivo Excel llamado “Visualización”, debido al formato en el que se guardan los archivos, al abrir el documento en *office 2013* se encuentra el encabezado con los títulos para la correcta visualización de los datos; se ubica en la casilla A2, en la pestaña de Datos se selecciona la opción desde texto y posteriormente se elige el archivo con los datos del día que se desea; se verifican las columnas separadas correctamente y se aceptan todas las ventanas hasta finalizar la exportación. Allí se podrán graficar y analizar los datos como se requieren.

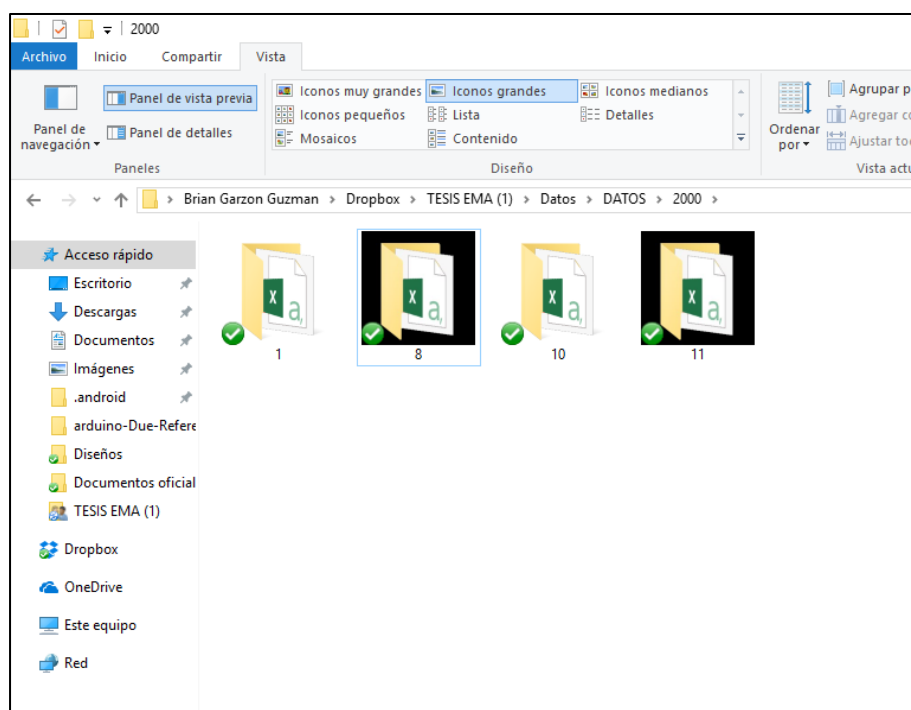


Figura 3.6.1. Tarjeta SD almacenaje de datos en carpeta por mes dentro del respectivo año.

El almacenamiento de la información es coordinada desde que se recibe en la tarjeta de desarrollo Arduino, para ser separada por año y mes en cada carpeta, obteniendo únicamente un archivo por día. Fuente: Autores.

La Figura 3.6.1, muestra las carpetas por año y por mes, donde se realizaron pruebas cambiando la fecha en la EMA – UD, para verificar la creación de carpetas por año, mes y día por parte del módulo SD al recibir los datos de los sensores.

Al abrir los archivos .csv creados y configurarlos desde *Microsoft Excel* para ser utilizados como archivos .xlsx, se evidencian las columnas correspondientes a hora, temperatura ambiente, temperatura de objeto, humedad relativa, presión atmosférica, radiación, precipitación, dirección del viento y velocidad del viento, con sus respectivas unidades; como se evidencia en la Figura 3.6.2.

Hora	Temp. Ambiente [°C]	Temp. Objeto [°C]	Humedad [%]	Presión [hPa]	Radiación [J/m²]	Precipitación [mm]	Dirección del viento [°]	Velocidad del Viento [m/s]
10:15:01	18.53	18.47	73.7	944	1604	0	90	0
10:15:05	18.51	18.41	73.7	956	1616	0	90	0
10:15:08	18.53	18.41	73.7	938	1601	0	90	0
10:15:13	18.57	18.43	73.7	950	1616	0	90	0
10:15:17	18.53	18.43	73.7	939	1604	0	90	0
10:15:20	18.57	18.43	73.7	962	1617	0	90	0
10:15:23	18.59	18.43	73.7	962	1619	0	90	0
10:15:26	18.59	18.43	73.7	961	1604	0	90	0
10:15:29	18.59	18.43	73.7	962	1617	0	90	0
10:15:32	18.61	18.43	73.7	956	1616	0	90	0
10:15:35	18.63	18.47	73.7	939	1606	0	90	0
10:15:38	18.63	18.43	73.7	963	1608	0	90	0
10:15:42	18.63	18.47	73.7	961	1612	0	90	0
10:15:45	18.63	18.47	73.7	960	1616	0	90	0
10:15:48	18.63	18.43	73.7	961	1616	0	90	0
10:15:51	18.65	18.49	73.7	959	1612	0	90	0
10:15:54	18.65	18.49	73.7	958	1612	0	90	0
10:15:57	18.65	18.47	73.7	947	1606	0	90	0
10:16:00	18.67	18.47	73.7	960	1612	0	90	0
10:16:05	18.67	18.41	73.7	954	1600	0	90	0
10:16:08	18.67	18.43	73.7	960	1609	0	90	0
10:16:12	18.69	18.47	73.8	958	1612	0	90	0

Figura 3.6.2. Archivo Excel.

Los archivos .xlsx se obtienen después de importar los datos desde el archivo .csv, en texto plano a Excel, de manera que su procesamiento sea más rápido y se pueda obtener una mejor visualización del comportamiento de los datos, además permite manipular de forma más sencilla la información obtenida de cada variable ambiental. Fuente: Autores.

3.7. Consideraciones de programación - codificación

Para realizar la conexión entre los diferentes elementos se realiza la programación principal en la tarjeta de desarrollo Arduino DUE y además en el módulo *Wi-Fi*, empleando librerías esenciales para cada uno de los elementos. Algunos de estos elementos están diseñados principalmente para ser empleados con la tarjeta de desarrollo Arduino UNO; de acuerdo con esto, se realizaron códigos adicionales y modificaciones en las librerías que permitieran la compatibilidad con la tarjeta de desarrollo que hace parte de la arquitectura principal de la EMA-UD.

3.7.1. Programación Tarjeta de Desarrollo Arduino

Para realizar el código de la Tarjeta de Desarrollo Arduino DUE se empleó el *software* Arduino IDE, basado en lenguaje *Java*. Las librerías que se emplearon fueron:

- TinyGps – Librería para Módulo GPS Neo 6M

- DHT – Librería para Sensor de Humedad DHT22
- Nextion – Librería para Pantalla Nextion 2.4”
- Arduino – Librería para Sensor de Temperatura MLX90614
- Include/twi - Librería para Sensor de Temperatura MLX90614
- SD – Librería para Módulo tarjeta de memoria SD
- SPI – Librería para el protocolo del Módulo tarjeta de memoria SD
- Temp - Librería para Sensor de Temperatura MLX90614
- RTCLib – Librería para el Módulo Reloj DS1307
- Wire – Librería para el Módulo Reloj DS1307

3.7.2. Programación Modulo Wi-Fi

Para programar el módulo *Wi-Fi* y que este pudiera estar conectado al servidor gestionado desde XAMPP, fue necesario partir desde la actualización del módulo, debido a que inicialmente su *firmware* está diseñado para trabajar por medio de comandos AT.

Actualizado el módulo se procede a descargar la librería ESP82266 en el *software* Arduino IDE de manera que desde la facilidad y practicidad que brinda el mismo lenguaje de Arduino se pueda programar el módulo. Hecho esto, se carga el código directamente en el módulo, sin conexiones por medio del Arduino, lo que permite mayor velocidad de procesamiento.

El módulo tiene una conexión específica entre la tarjeta de desarrollo (modo normal) y una conexión distinta con el dispositivo USB que permite la carga del código (modo carga). Dicha dualidad en la conexión debe ser considerada cada vez que se realiza este proceso, debido a que se debe desconectar el módulo de la tarjeta y conectarlo por USB al computador para la carga del código.

Para manejar de forma sencilla este proceso, se crea un puente compuesto por un par de *switch* estilo tiny de tres posiciones, incluidos en el diseño de la PCB de los elementos periféricos, permitiendo una conexión hacia el lado USB y otra hacia la placa principal. Además de los *switch* se incluye un pulsador que debe ser necesario activar para reiniciar el módulo y asegurar el cambio entre el modo normal y el modo de carga.

3.7.3. Programación Servidor

Como se enunció en la sección 3.5.2 “Servidor en tiempo real – Base de Datos”, se usó la herramienta XAMPP para crear el almacenamiento principal de la EMA; en la presente sección se aclara como se programó ese servidor y cuál debe ser la manipulación para su correcto funcionamiento. XAMPP es directamente el servidor que entre sus características tiene la capacidad de poner en servicio por medio de phpmyadmin una base de datos de manera que se podrá visualizar de forma remota dentro de la red que se disponga, ya sea LAN o WAN, para efectos académicos la red será LAN debido a que la exteriorización de la red a internet requiere un pago.

La comunicación entre phpmyadmin (Base de Datos) y el ESP 8266 (módulo *Wi-Fi*) requiere de la elaboración de un código que se le carga al módulo y en su concepción debe tener en cuenta el cambio de la dirección IP de la máquina (ver manual de observador), en dónde se aloja el servidor y por supuesto, el nombre de la red a la que se colgará el módulo *Wi-Fi* y la respectiva contraseña.

Adicional a esos parámetros se debe tener en cuenta que debe ir una línea de código donde se concatena una página en PHP, creada previamente para facilitar la comunicación, ubicada dentro de las carpetas de instalación del servidor. En total son dos páginas en lenguaje PHP y una en HTML; las páginas creadas, en su conjunto, sirven para probar el correcto funcionamiento del servidor y de la base de datos sin conectar el Módulo *Wi-Fi*.

Con el módulo *Wi-Fi* conectado y el código cargado, no será necesario tener dentro del servidor el archivo en HTML, este archivo sólo sirve de prueba para cargar datos y verificar el correcto funcionamiento del servidor y la base de datos.

3.8. Diseño y construcción

3.8.1. Circuitos

Los circuitos empleados, cuentan con las conexiones entre la arquitectura principal del sistema, los sensores, los elementos periféricos y el sistema de alimentación. Para esto, se diseñó y construyó una tarjeta PCB, donde se integrará con la tarjeta de desarrollo Arduino DUE y los elementos periféricos, que será conectada a 7 salidas digitales, 7 salidas análogas, 7 puntos de tierra, 7 puntos de alimentación de 3.3.V y 7 puntos de alimentación de 5V; esto es debido a la posibilidad de que en algún momento se realicen cambios de los sensores y todos los sensores empleados sean digitales o todos sean análogos, igualmente podría pasar con el nivel de tensión que los alimenta.

El diseño y construcción de la tarjeta PCB se realiza a modo Shield, es decir, extensión de la tarjeta de desarrollo, en dónde se obtienen las señales del Arduino DUE que son importantes para el adecuado funcionamiento del proyecto, a su vez hace la adaptación y conexión de los elementos periféricos que también pertenecen al proyecto. En la Figura 3.8.6 se muestra la integración de la PCB con el Arduino DUE y los elementos periféricos, partiendo del diagrama esquemático mostrado en la Figura 3.8.1. Finalmente se construyó con normatividad técnica de acuerdo a las siguientes características:

- Dimensiones: 11cm x 7cm.
- Espesor de la tarjeta: 1,6 mm
- Espesor cobre: 17 micras
- Antisolder: Verde
- Capas : 2

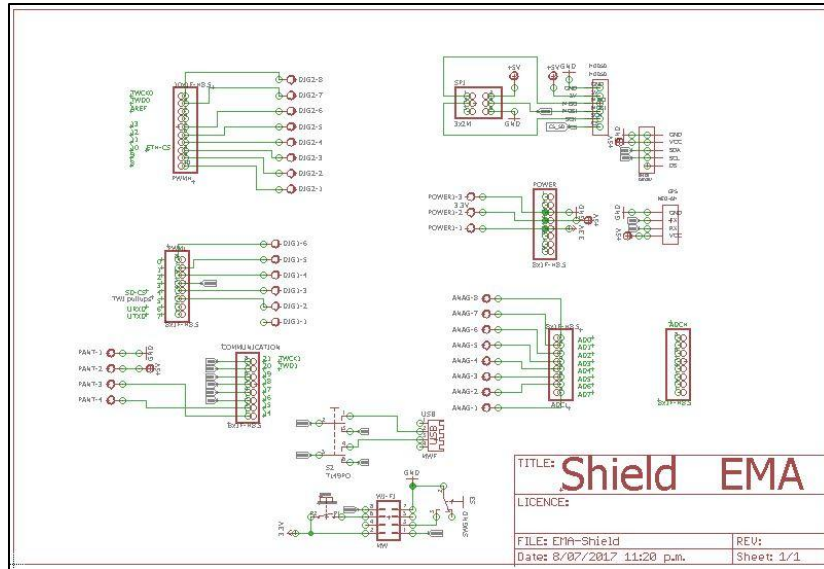


Figura 3.8.1. Diseño del diagrama esquemático de la tarjeta PCB. Elaboración propia con Eagle.

El diagrama esquemático de la PCB, posee la información de las conexiones que va a tener el Shield EMA; el cual es el circuito impreso que se obtiene de la integración de los elementos periféricos que se van a incorporar en la EMA teniendo en cuenta los niveles de tensión de cada uno de los elementos y las conexiones que estos tienen con la tarjeta principal del sistema, Arduino. Fuente: Autores.

Contando con los sensores seleccionados y sus correspondientes sistemas de acondicionamiento, se diseñó y construyó otra tarjeta PCB, Figura 3.8.2, para todos los sensores que requieren de acondicionamiento; los que se ubicarán en la garita meteorológica; termómetro, higrómetro y barómetro, tendrán su conexión por medio de cableado normal entre la tarjeta PCB de los sensores y las respectivas conexiones hacia la tarjeta PCB que se ubica en la caja estanca.

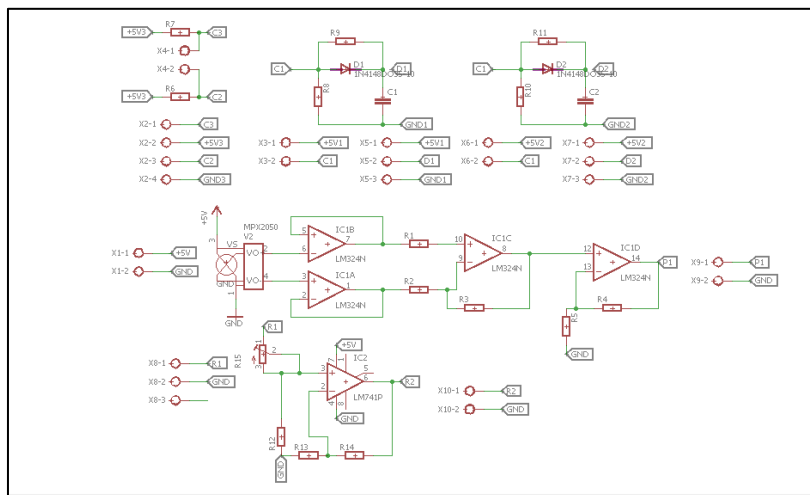


Figura 3.8.2. Diseño del diagrama esquemático del PCB de los circuitos de acondicionamiento de los sensores.

Este diagrama esquemático de PCB, posee la información de las conexiones que se realizaron para los circuitos de acondicionamiento de los sensores que requieren (Anemómetro, veleta, pluviómetro, piranómetro e higrómetro); es un circuito impreso que se obtiene de la integración de los elementos que constituyen cada uno de los circuitos de acondicionamiento. Fuente: Autores.

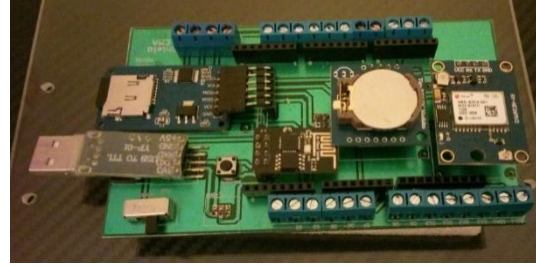
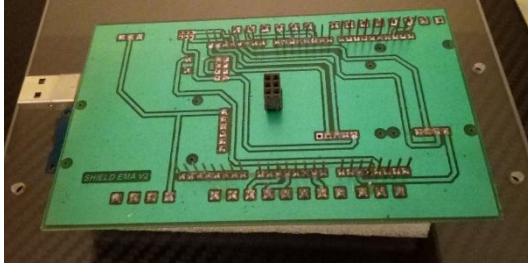


Figura 3.8.3 Tarjeta PCB construida.

En estas dos imágenes se presenta la tarjeta PCB impresa y con la conexión de los elementos utilizados para poder conectar cada uno de los elementos periféricos.

Se realiza la impresión de la tarjeta PCB y se conectan los elementos adicionales (borneras, regletas y switch) que son necesarios. La disposición y conexionado con los sensores de la EMA se realiza por medio de los bornes asociados ubicados dentro de la caja estanca, tal como se evidencia en la Figura 3.8.4.

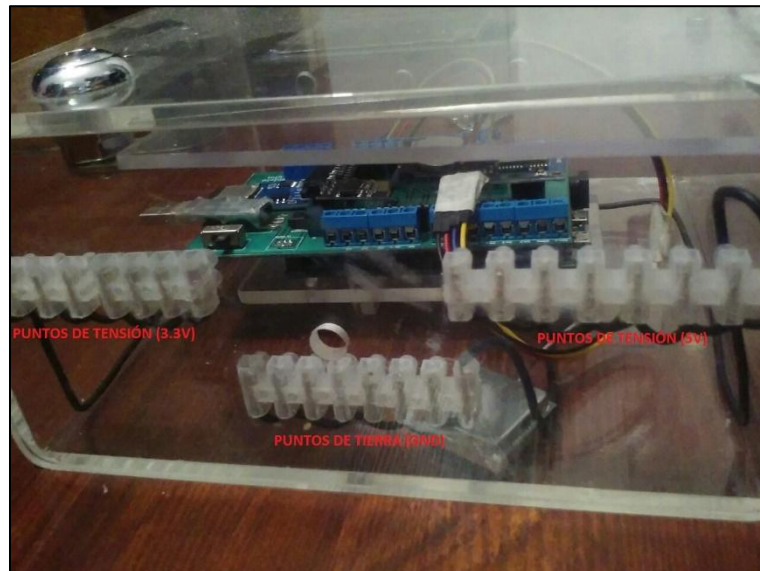


Figura 3.8.4. Disposición de las Borneras dentro de la caja estanca para las conexiones respectivas de energización de los sensores.

La disposición de las borneras se realizó de tal forma que se pueda conectar 7 sensores con el mismo nivel de tensión de forma simultánea, por esto se evidencian conexiones para 7 puntos (3,3 V), 7 puntos (5 V) y 7 puntos (Tierra). Fuente: Autores.

El prototipo finalizado de la estación meteorológica se puede apreciar en la Figura 3.8.5 en dónde se observa que el conexionado queda aislado por medio de una tapa que se fija con tornillos y solo permite la operación manual con la pantalla táctil que se limita también a ciertas funciones de visualización.

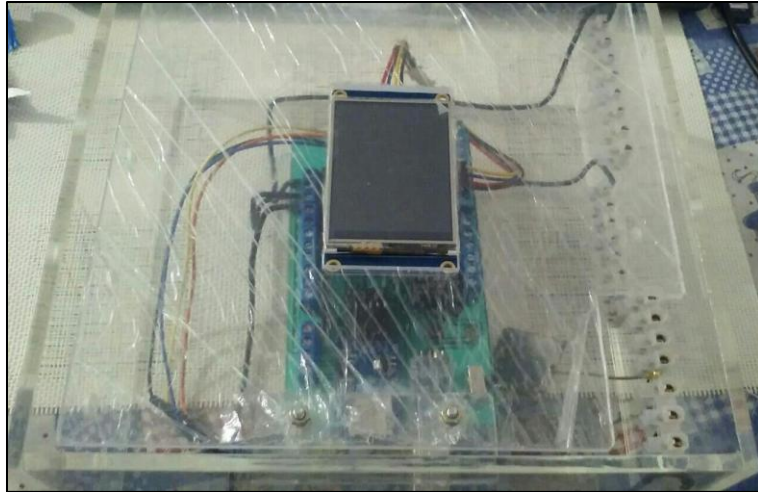


Figura 3.8.5. Visualización que tiene un usuario al abrir la EMA – UD.

La disposición de la caja fue diseñada de tal forma que sea accesible únicamente para el usuario la pantalla, por lo que debe contar con autorización de personal capacitado para acceder a las conexiones de los demás elementos.
Fuente: Autores.

El conexionado de la EMA – SHIELD hecha para la integración de todos los elementos periféricos de la EMA – UD se muestra en la Figura 3.8.6



Figura 3.8.6. Conexión e implementación de la PCB con sus elementos periféricos integrados.

La EMA fue construida bajo un concepto de elementos modulares, por lo que cada uno de los elementos que la componen se pueden conectar y desconectar para realizar mantenimiento o cambio de una forma sencilla.
Fuente: Autores.

Finalmente, por medio de la Figura 3.8.7 se observa la disposición final de la EMA - UD, en dónde queda con llave y al abrirse solo puede manipularse por medio de la pantalla táctil para el correcto monitoreo por parte de los usuarios y observadores de la EMA.

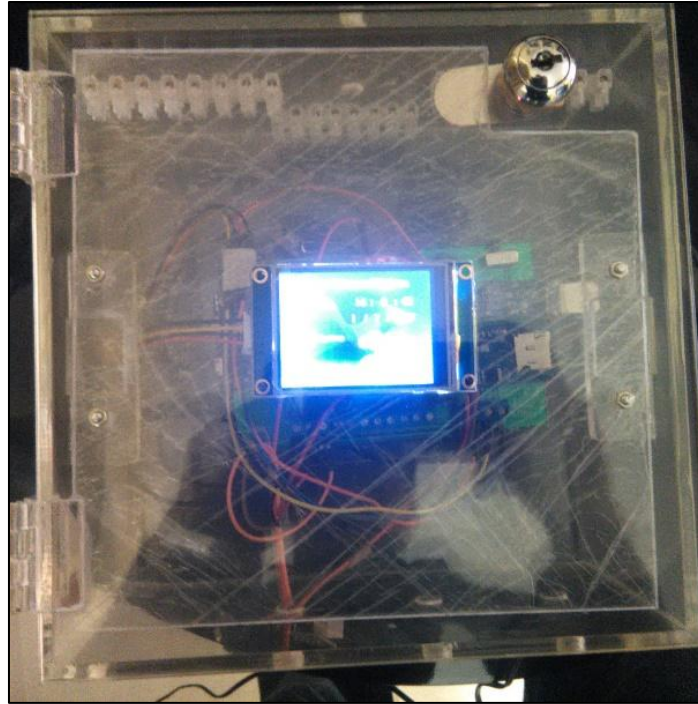


Figura 3.8.7 Prototipo EMA construido.

La EMA se evidencia de esta forma al finalizar su construcción, cuenta un elemento de seguridad para poder manipular cualquiera de sus componentes y se diseñó totalmente transparente para que el usuario pueda interactuar y conocer de forma más detallada el proceso y el estado de la EMA. Fuente: Autores.

3.8.2. Encapsulado y soportes

La estación meteorológica que será empleada es clasificada como estación sinóptica climatológica terrestre de superficie ya que su nivel de observación y ubicación será en la superficie terrestre, realiza observaciones climatológicas de forma horaria enviándolas a un centro recolector de datos y presentada en forma real para diferentes actividades.

Para la construcción de toda la EMA-UD, se tienen en cuenta las consideraciones brindadas por la OMM para la ubicación de cada uno de los sensores. Por esto, como suele emplearse en las estaciones meteorológicas, se diseña un trípode para poder manejar las alturas que recomienda la OMM para los sensores de temperatura, radiación, velocidad y dirección del viento.

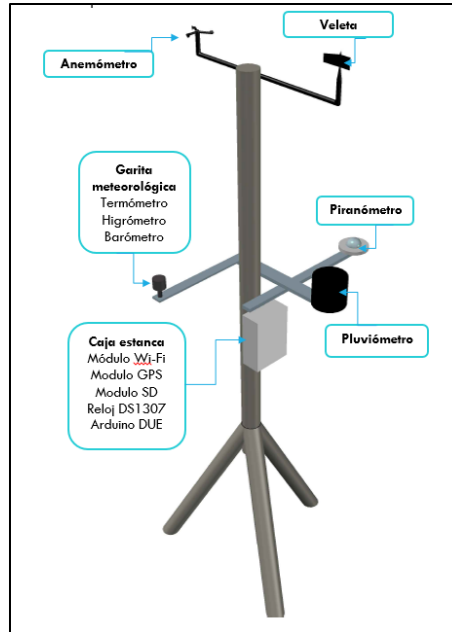


Figura 3.8.8. Diseño de trípode, elaborado con AutoCAD.
Fuente: Autores.

En la mitad del trípode, aproximadamente, al alcance de quien será el operador de la estación se ubica una caja estanca, un accesorio en el que son emplazados los elementos periféricos de la EMA y la tarjeta de desarrollo Arduino DUE que es la arquitectura principal del sistema, el *datalogger*. Esta caja cuenta con acceso para el público general que estará limitado a la visualización de la información en la pantalla táctil Nextion y un acceso condicionado a seguridad física para que sea del alcance del observador encargado de la estación; este observador podrá verificar conexiones de los elementos de la EMA, recoger la información almacenada en la tarjeta de memoria SD, monitorear el correcto funcionamiento de los componentes de la EMA o realizar mantenimiento preventivo a la estación. Para más información de las actividades que puede realizar el observador, se creó un “Manual para el Observador”, presentado como anexo físico y digital a este documento.

El trípode, como se presenta en la Figura 3.8.8, cuenta con cinco soportes en la parte superior destinados para la garita meteorológica (termómetro, higrómetro y barómetro), el pluviómetro, el piranómetro, el anemómetro y la veleta; estos últimos, según el sensor adquirido pueden ser ubicados en un solo soporte. Para la caja estanca, se consideró el diseño de la tarjeta PCB construida para la arquitectura principal y los elementos periféricos, teniendo en cuenta la adecuación en la intemperie y la ubicación en el trípode.

3.9. Calibración de sensores

Para calibrar los sensores, se empleó como elemento patrón la Estación Meteorológica que hace parte del Laboratorio de Radiometría Solar de la Fundación Universitaria Los Libertadores sede Bogotá. Esta estación cuenta con un equipo de la compañía *Novalynx Corporation*, modelo 110-WS-16 con los siguientes instrumentos:

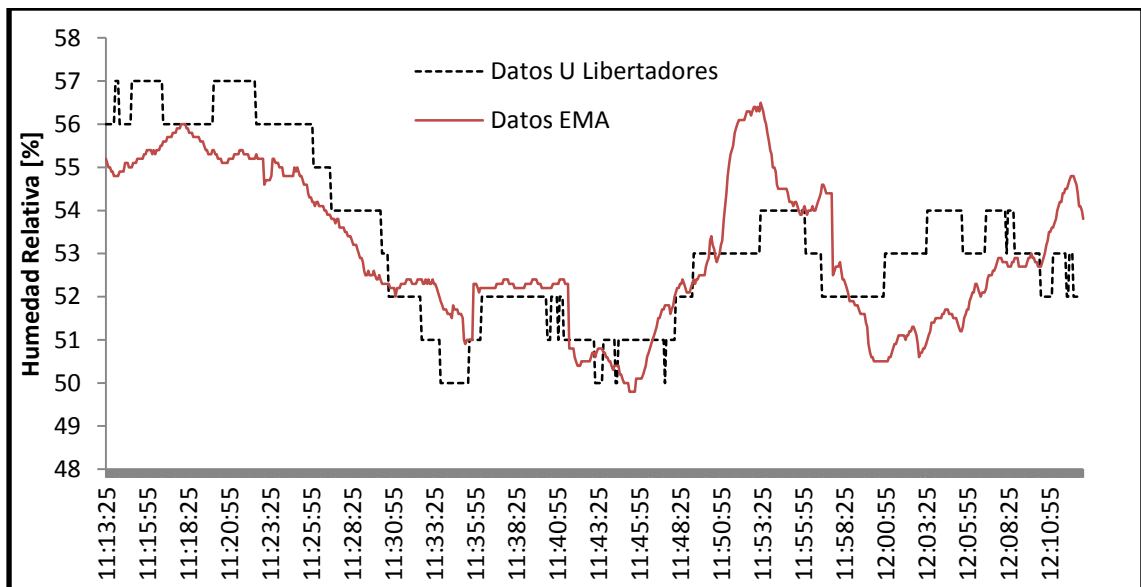
- Anemómetro: 200-WS-01/02
- Pluviómetro: 260-7852 Rain Collector
- Barómetro: 100-WS-16BP
- Higrómetro: 110-WS-16TH
- Termómetro: 225-HMP50YA
- Veleta: 200-WS-02/05
- Piranómetro: 100-6450

Las mediciones fueron realizadas de manera simultánea durante una hora para ambas estaciones en las instalaciones del Laboratorio de Radiometría Solar. La estación de la Fundación cuenta con una desventaja en el almacenamiento de la información ya que los datos son presentados en un formato establecido en archivo *.txt* (Documento de texto), por lo que para procesar los datos es necesario realizar el paso de estos de forma manual a un archivo donde se puedan manipular. Los datos obtenidos de la medición se presentan en el documento anexo en formato Excel, “Datos”.

Después de hacer el proceso manual para los datos de la estación de la Fundación, se verifico la sincronización de la información tomando como referencia la hora de cada medición y se realizaron las gráficas de cada una de las variables medidas, como se presentan en las siguientes secciones. Para cada una de las variables, se calculó el valor del coeficiente de correlación entre los datos medidos por la estación de la Fundación y los de la EMA.

3.9.1. Humedad relativa

Desviación Estandar = 2,00; Coef. Correlación = 0,85

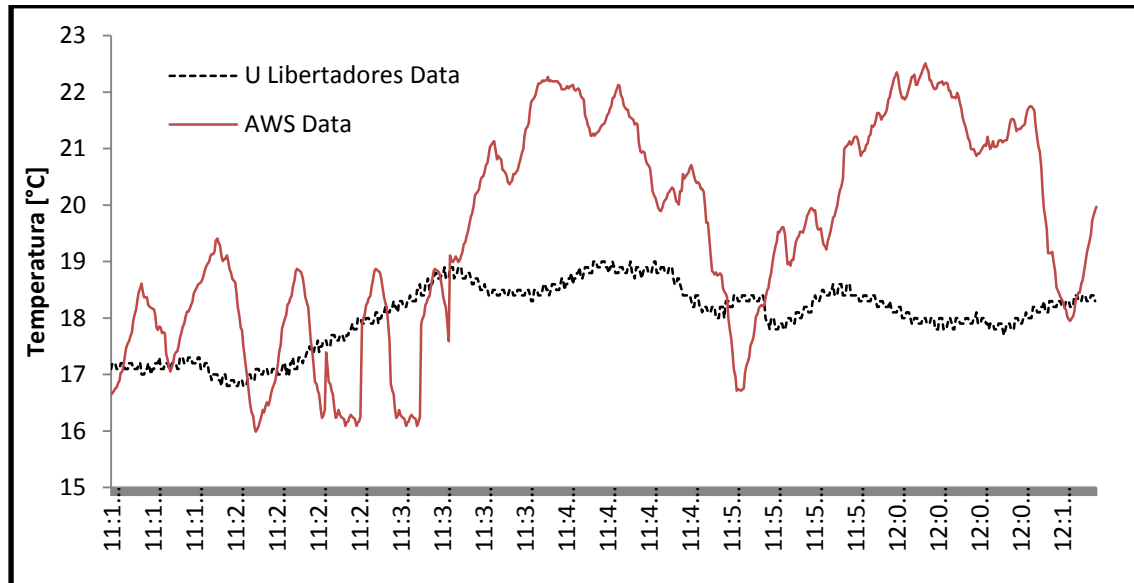


Gráfica 3.9.1. Humedad relativa. Datos recopilados simultáneamente por la EMA y la Estación Patrón para calibrar el Sensor.

Fuente: Autores.

3.9.2. Temperatura ambiente

Desviación estándar = 1,43; Coef. Correlación = 0,6



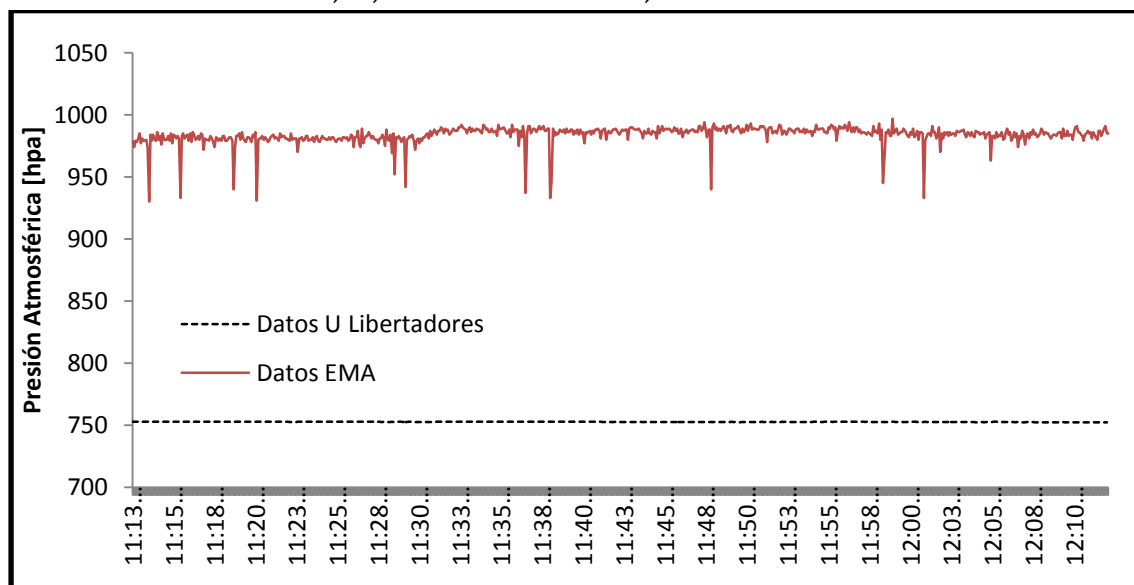
Grafica 3.9.2. . Temperatura. Datos recopilados simultáneamente por la EMA y la Estación Patrón para calibrar el Sensor.

Fuente: Autores.

3.9.3. Presión atmosférica

Para la presión atmosférica, se obtuvo un valor de desviación estándar que fue considerado alto, por lo que se realizaron modificaciones en la ecuación dada por la hoja de datos para obtener un valor menor de la desviación estándar.

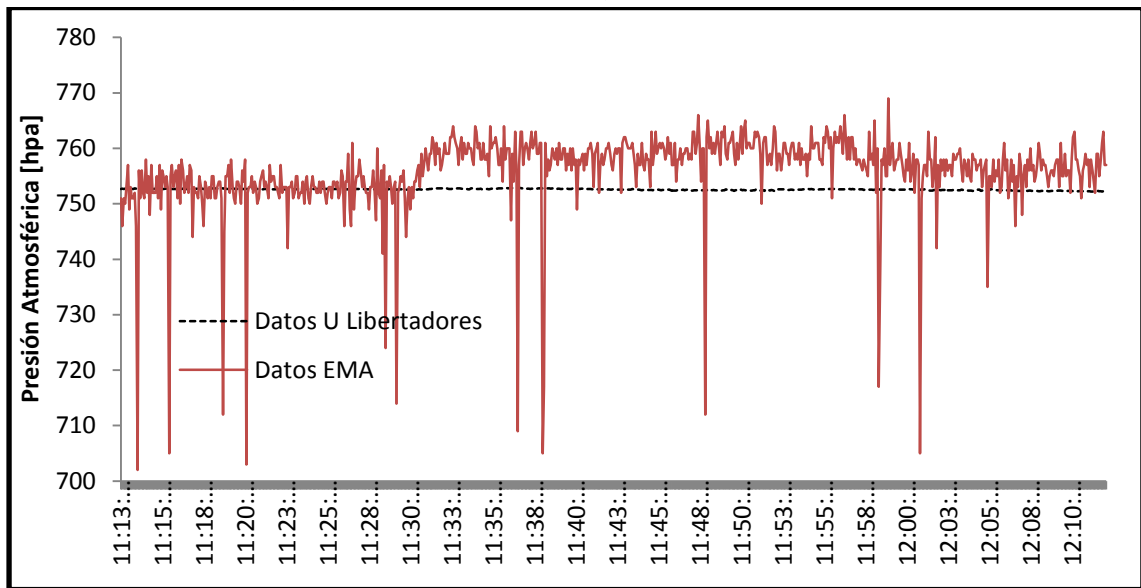
Desviación estándar = 115,72; Coef. Correlación = 0,17



Grafica 3.9.3. Presión atmosférica - Datos recopilados por la EMA y por la Estación Patrón para calibrar el sensor.

Fuente: Autores.

Desviación estándar = 5,65; Coef. Correlación = 0,98

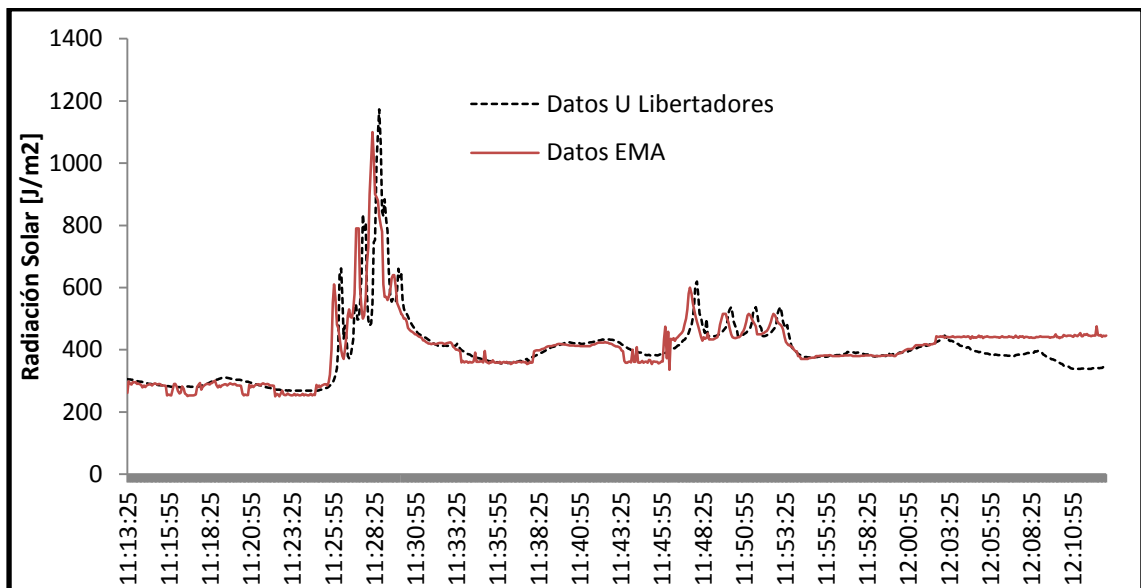


Grafica 3.9.4. Presión atmosférica – Datos Ajustados por la EMA y por la Estación Patrón. Curva luego de calibrar el sensor.

Fuente: Autores.

3.9.4. Radiación solar

Desviación estándar = 117,72; Coef. Correlación = 0,98



Grafica 3.9.5. Radiación Solar – Datos Ajustados por la EMA y por la Estación Patrón. Curva luego de calibrar el sensor.

Fuente: Autores.

4. Costos de inversión

Para el desarrollo de este proyecto se realizó una valoración económica de cada uno de los elementos que hicieron parte del diseño e implementación de esta Estación Meteorológica

Automática con la intención de que sea un proyecto que se pueda replicar más adelante y que la inversión económica no sea impedimento para esto.

4.1. Sensores y módulos de EMA

Se relacionan en la Tabla 4.1.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el costo en pesos colombianos de cada uno de los elementos que hacen parte de la EMA – UD.

Tabla 4.1.1 Costos sensores y módulos EMA.

Elemento	Justificación	Costo[COP]
<i>Arduino DUE</i>	Arquitectura principal de la EMA	\$150,000
<i>Sensor MLX90615SSG</i>	Termómetro	\$35,000
<i>Sensor DHT22 con PCB</i>	Higrómetro	\$19,000
<i>Sensor MPXM2102AS</i>	Barómetro	\$35,700
<i>Sensor Kipp & Zonen CMP3</i>	Piranómetro	\$4,413,000
<i>Sensor Novalynx 200-WS-04</i>	Anemómetro	\$680,000
<i>Sensor Novalynx 200-WS-01</i>	Veleta	\$300,000
<i>Sensor 260-7852 Rain Collector</i>	Pluviómetro	\$800,000
<i>Módulo ESP8266-01</i>	Sistema de comunicación <i>Wi-Fi</i>	\$14,000
<i>Modulo SD</i>	Sistema de almacenamiento de datos	\$7,000
<i>Pantalla táctil Nextion 2.4"</i>	Sistema de visualización	\$60,000
<i>Reloj DS1307</i>	Sistema de sincronización de tiempo	\$15,000
<i>Módulo GPS Neo</i>	Sistema de posicionamiento global	\$7,000
<i>Total</i>	<i>\$6,539,700</i>	

Fuente: Autores.

Tabla 4.1.2. Costos de accesorios de la EMA.

Elemento	Costo [COP]
<i>Caja estanca</i>	\$60,000

Caja donde son ubicados los elementos relacionados al proceso de adquisición y control de información (Tarjeta Arduino DUE, módulo *Wi-Fi*, modulo SD, pantalla táctil, reloj y Modulo GPS)

<i>Tarjetas PCB</i>	Tarjetas PCB elaboradas para la conexión eléctrica de los elementos que hace parte de la EMA-UD	\$150,000
<i>Otros elementos</i>	Elementos adicionales necesarios para la conexión y el adecuado soporte de los sensores y módulos (Conductores, borneras, tornillos, etc.)	\$50,000
<i>Total</i>		\$260,000

Fuente: Autores.

5. Análisis de implementación

5.1. Validación de los datos y evaluación de resultados obtenidos

De acuerdo con los lineamientos establecidos dentro de las características que se deben contemplar en el proyecto de investigación, es de gran importancia realizar la validación de los datos recopilados por la EMA-UD, de manera que se puedan obtener los indicadores mínimos viables para asegurar un correcto funcionamiento dentro de los ambientes requeridos para el prototipo o si es necesario realizar los respectivos ajustes a este prototipo de manera que pueda llegar a utilizarse de forma comercial o solo en pro de la comunidad académica.

Como se mencionó anteriormente, se han realizado mediciones comparativas con la Estación meteorológica de la Fundación Universitaria Los Libertadores, la cual cuenta con la certificación de ser una estación patrón para los sensores que se usan en la EMA-UD, como se ha mencionado anteriormente. Esta estación provee los sensores de precipitación y velocidad y dirección del viento los cuáles no necesitan ser patronados debido a que son elementos que aseguran una correcta medición; a diferencia de los sensores de humedad relativa, temperatura ambiente, presión atmosférica y radiación solar que si han sido sometidos a la calibración adecuada para soportar dichas especificaciones técnicas mínimas como se ha visto en el capítulo 3.9.

Para la correspondiente validación de los datos se determina el error con el que finalmente la EMA-UD recopila información en función de su equipo patrón, la estación meteorológica de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Para realizar este análisis, se tomaron 6 datos por cada una de las variables, que corresponden al percentil 90 de cada 10 minutos de los datos capturados durante una hora. El percentil 90 se empleó ya que al observar el comportamiento de los datos se supone que la variación no es considerable para el 90% de los datos, el comportamiento de las variables ambientales se mantiene constante por determinados periodos.

El tiempo durante el cual fueron capturados los datos no permitió realizar mediciones de precipitación debido a que no se contaban con lluvia para esta temporada. Las demás

variables que dependían de sensores no patrones se presentan a continuación con su correspondiente porcentaje de error para los datos elegidos como se explicó anteriormente.

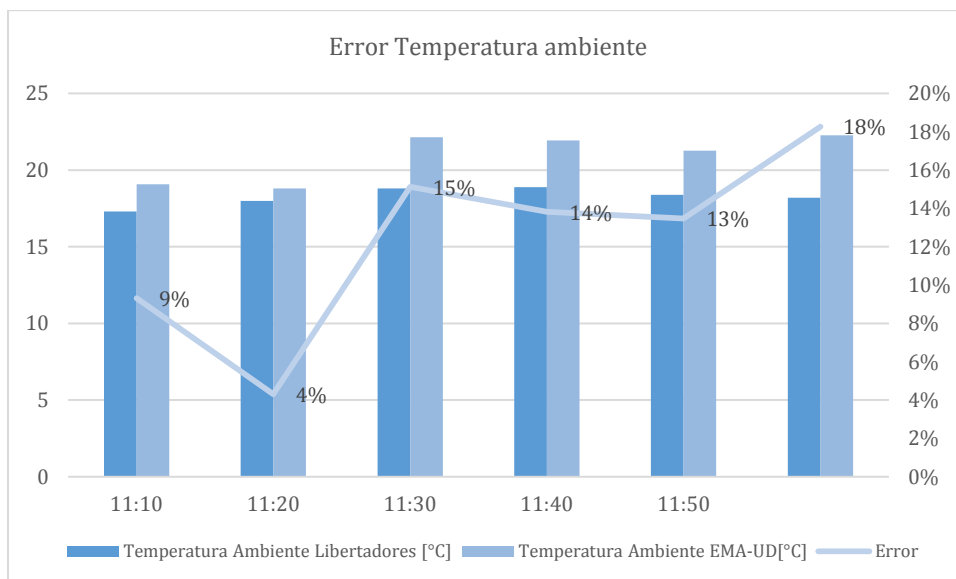
Tabla 5.1.1. Error calculado para la variable temperatura ambiente.

Hora	Temperatura Ambiente		Error
	Libertadores [°C]	EMA-UD[°C]	
11:10	17,3	19,078	9%
11:20	18	18,81	4%
11:30	18,8	22,15	15%
11:40	18,9	21,934	14%
11:50	18,4	21,264	13%
12:00	18,2	22,27	18%

Fuente: Autores.

La temperatura es una variable sin un comportamiento definido, para un periodo corto; para periodos mayores a un día se puede definir límites de tiempo que mantendrán una temperatura constante. Las variaciones que se presentan durante un día para esta variable no son drásticas entre un valor y otro, por lo que durante una hora de toma de datos la variación fue de 2 a 3 °C, según los datos capturados por los sensores.

El porcentaje de error y cada uno de los promedios por cada 10 minutos se presenta en la gráfica y se evidencia que a medida que la temperatura ambiente aumenta se mantiene una relación en el aumento del porcentaje del error, por lo que se considera que para temperaturas más elevadas es posible que el porcentaje de error supere el 20%, siguiendo el comportamiento evidenciado en esta hora del día.



Grafica 5.1.1. Error calculado para la variable Temperatura ambiente.

Fuente: Autores.

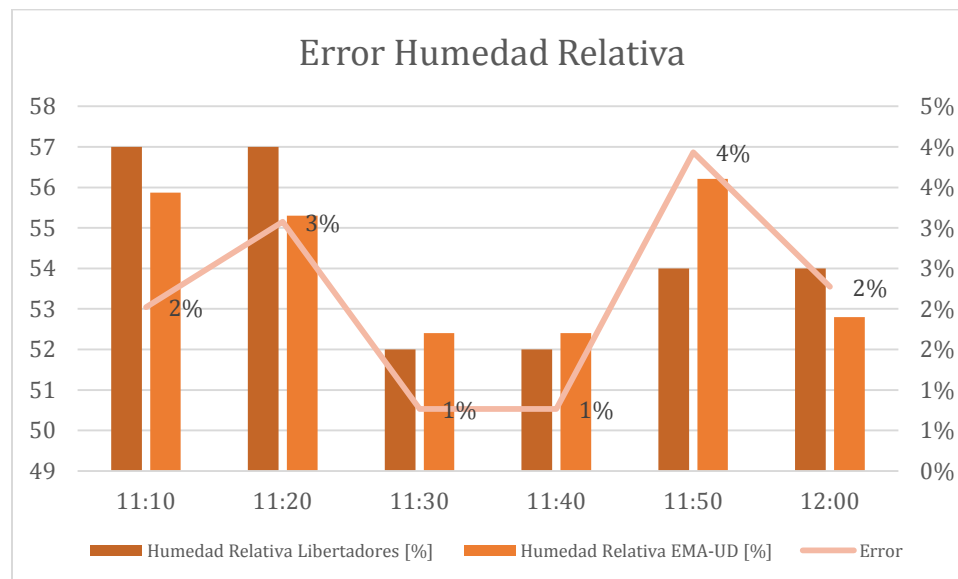
La humedad relativa es una variable que depende una relación entre la temperatura ambiente y la presión atmosférica, por lo que existe relación directa con la temperatura ambiente. Se evidencia un comportamiento similar en el porcentaje de error para la humedad relativa y la temperatura ambiente, aunque el porcentaje de error para la humedad relativa disminuye de manera considerable en relación al de la temperatura ambiente.

Al igual que para el sensor de temperatura ambiente, para este caso el porcentaje de error aumente para valores de humedad relativa más altos, aunque se podría realizar un cálculo más real si el sensor de humedad relativa permitiera obtener resultados con al menos dos cifras decimales al igual que el elemento patrón.

Tabla 5.1.2. Error calculado para la variable Humedad Relativa.

Hora	Humedad relativa		Error
	Libertadores [%]	EMA-UD[%]	
11:10	57	55,87	2%
11:20	57	55,3	3%
11:30	52	52,4	1%
11:40	52	52,4	1%
11:50	54	56,21	4%
12:00	54	52,8	2%

Fuente: Autores.



Grafica 5.1.2. Error calculado para la variable Humedad Relativa.

Fuente: Autores.

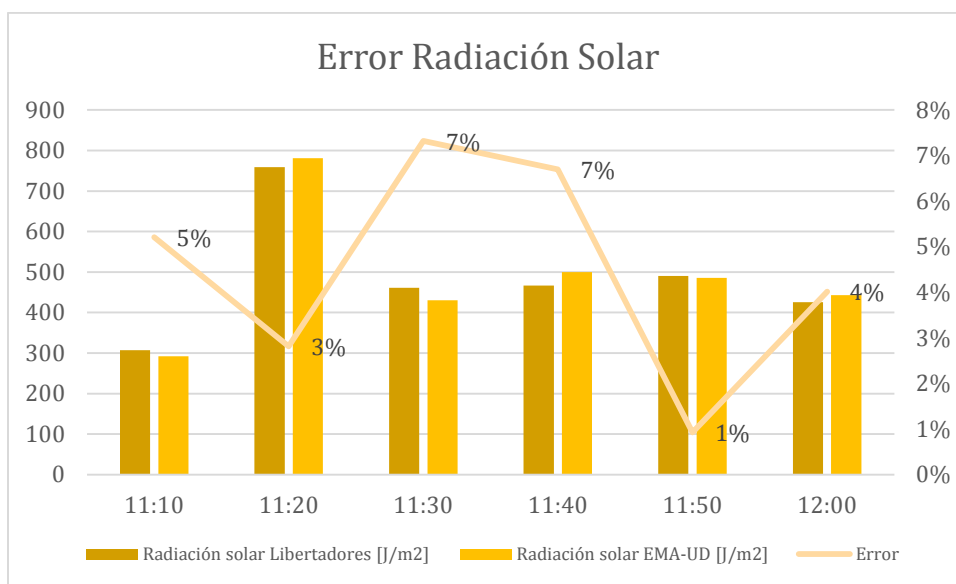
Al momento de realizar las pruebas para las tomas de datos que son presentadas a continuación, se contaba con presencia de nubes, por lo que los datos de radiación solar son bajos para lo que se considera que debió haber sido medido por la estación para esta hora, cerca del mediodía.

A diferencia de los otros sensores empleados, para el piranómetro el porcentaje aumenta cuando la medición corresponde a bajos valores de radiación solar, como se evidencia en la gráfica y en la tabla, el porcentaje de error más alto (5%) se obtuvo para el valor más bajo de radiación solar y el porcentaje de error más bajo (1%) se obtuvo para el valor de radiación más alto. Esto puede deberse a que el piranómetro a diferencia de los demás sensores, no cuenta con alimentación por parte del arduino u otro elemento que le de energía, por lo que su funcionamiento probablemente dependa de las condiciones ambientales, similar a una fotocelda.

Tabla 5.1.3. Error calculado para la variable Radiación Solar

Hora	Radiación solar		Error
	Libertadores [J/m ²]	EMA-UD[J/m ²]	
11:10	307,2	292	5%
11:20	759	781	3%
11:30	461,5	430	7%
11:40	466,5	500	7%
11:50	490	485,5	1%
12:00	425,2	443	4%

Fuente: Autores.



Gráfica 5.1.3. Error calculado para la variable Radiación solar.

Fuente: Autores.

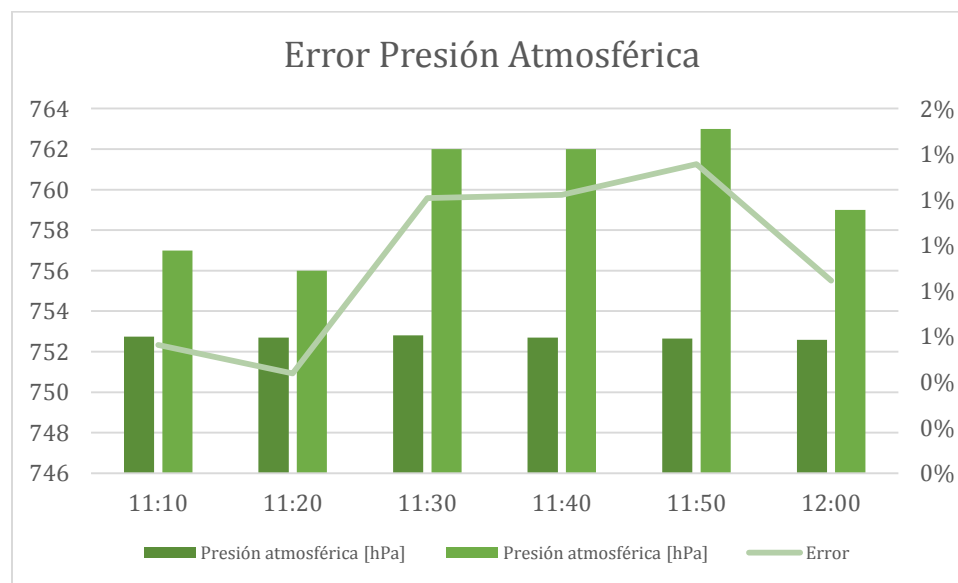
La presión atmosférica es una variable relacionada con la humedad relativa y la temperatura y aun así presenta variaciones que se pueden percibir de una forma más sencilla, pero en este caso la presión atmosférica tiende a tener un comportamiento constante, y su rango de variación se evidencia más en el sensor patrón que en el sensor de la EMA.

Debido a estas variaciones que no son fácilmente detectables, el porcentaje de error tampoco varía de forma considerable, pero su comportamiento es similar al de los sensores de temperatura ambiente y humedad relativa, para valores más altos de presión atmosférica el porcentaje de error es mayor.

Tabla 5.1.4. Error calculado para la variable Presión Atmosférica

Hora	Presión atmosférica		Error
	Libertadores [°C]	EMA-UD[°C]	
11:10	752,736	757	1%
11:20	752,694	756	0%
11:30	752,8	762	1%
11:40	752,69	762	1%
11:50	752,65	763	1%
12:00	752,59	759	1%

Fuente: Autores.



Gráfica 5.1.4. Error calculado para la variable Presión atmosférica.

Fuente: Autores.

Para cada una de las variables se evidencio un comportamiento que relaciona la variable y el porcentaje de error. Únicamente para la radiación solar el porcentaje de error es inversamente proporcional a los valores que son captados por el sensor, es decir, para valores altos de radiación solar, el porcentaje de error es menor que para valores de radiación bajos. Lo contrario ocurre para los demás sensores en donde se evidencia una relación directa entre la variable y el porcentaje de error.

5.2. Viabilidad técnica

El proyecto desarrollado permitió emplear elementos de fácil desarrollo, aplicación y adquisición en el mercado, por lo que durante el proceso de su creación la viabilidad técnica fue positiva. Por lo que se justifica la inversión económica en cada uno de los elementos, además de la dedicación del tiempo para su desarrollo e implementación. Además, los elementos empleados cuentan con amplia información en la web, ya que en su mayoría hacen parte del actual mundo IoT, con esto se pueden realizar cambios en su funcionamiento para mejorar o adaptar el desempeño de cada uno.

Por estas razones, en el futuro se pueden realizar modificaciones o mejoras a este proyecto y será posible este proceso debido a todas las facilidades que se pueden encontrar en la web, en el mercado y en otros recursos bibliográficos para la realización de una nueva versión de la EMA – UD.

5.3. Legalidad del proyecto

Todos los elementos digitales que hacen parte de este proyecto fueron adquiridos de forma legal y disponible para el público en general, por lo que el desarrollo de proyectos con estos elementos no genera inconvenientes legales como patentes o derechos de autor para su utilización. Cada *software* que se empleó en este proyecto es *software* libre, las versiones empleadas y actualizaciones, pueden ser descargados de forma gratuita desde las páginas web de cada uno de sus creadores.

Las librerías adicionales para el entorno de programación de algunos elementos fueron descargadas de la web a partir de desarrollos libres de diferentes comunidades y autores, algunas de estas son descargadas como bases para ser modificadas durante el desarrollo de este proyecto. Los diseños de los circuitos de acondicionamiento para los elementos se encuentran relacionados en las hojas de datos de cada uno de estos, siendo información libre al público, desde que se cuente con la adquisición del elemento.

La compañía Arduino en su página web tiene foros en donde se pueden realizar consultas, contribuciones, colaboraciones y presentar proyectos, por lo que cada una de las publicaciones que se realizan allí, se pueden emplear de forma gratuita en proyectos de Arduino, siempre que se haga referencia a los autores. Además, desde la página web de Arduino se pueden consultar librerías y líneas de código que pueden ser empleadas en diferentes proyectos, de forma libre.

Todos los elementos (*Software* y *Hardware*) empleados en este proyectos pueden ser adquiridos de manera libre, sin restricción al público; aunque algunos son gratuitos y otros generan un costo para su adquisición.

6. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto se refirió a brindar una solución de carácter científico y tecnológico enfocado a la solución de la pregunta problema que se compagina con los objetivos que fueron planteados en este proyecto de grado. El objetivo principal se plantea

que la información brindada por esta estación pueda ser parte de un proyecto como el de la Red Eléctrica Inteligente que está proyectado por los grupos de investigación Lifae y GCEM, o alguno en dónde sea de utilidad para las múltiples aplicaciones cotidianas en el ámbito tecnológico y científico, queda de parte de los autores de este trabajo de grado la seguridad de presentar un prototipo aplicable y de carácter académico, susceptible a muchos tipos de mejoras que en un apartado siguiente se enunciarán. Para concluir con este proyecto se creó aprendizaje y se realizaron diferentes consideraciones para la construcción de la EMA.

En el proceso se evaluó la normatividad de la OMM, para considerar cada una de las sugerencias propuestas en su GUIA OMM No. 8 al momento de seleccionar los sensores y demás sistemas que hacen parte de la EMA, las características presentadas en las hojas de datos, fueron comparadas con las consideraciones de la guía, siendo de gran relevancia que todos los aspectos que allí se consideran importantes y pertinentes se han cumplido completamente en la resolución que en este documento se ha planteado.

Cada uno de estos sensores y elementos periféricos fueron programados, acondicionados e integrados para que funcionaran de una manera uniforme como todo un sistema y poder cumplir con el objetivo de medir las variables escogidas desde el principio. Los circuitos de acondicionamiento se diseñaron según las hojas de datos de cada uno de estos sensores. Se plantea que la estación pueda ser modular y que dichos módulos, al sufrir algún deterioro o afectación puedan ser fácilmente reemplazados por unos nuevos, a pesar de que se pensó realizar dicha modularidad para elementos diferentes a los que se han elegido, no es posible garantizar que el funcionamiento adecuado de la estación se mantenga con la intervención de un elemento no mencionado en el presente documento.

Para cumplir con el procesamiento de datos, se implementó la tarjeta Arduino DUE, ya que sus características cumplen con las necesidades del proyecto por el número de entradas que maneja y por la facilidad de programación y de relación con los demás elementos. Además, se logró la visualización en tiempo real en el servidor creado en phpMyAdmin y en la pantalla que fue incorporada en la caja estanca, esta información llega al servidor a través de conexión Wi-Fi y es almacenada en dicho servidor de forma constante. Adicional a esto, se creó la conexión correspondiente para el modulo SD, donde se cuenta con almacenamiento continuo de respaldo y que es relacionado por día en un archivo .csv para tratar de forma sencilla los datos que se reciben desde cada uno de los instrumentos.

Después de realizar todo el proceso para el diseño e implementación de una EMA, se concluye con la estructura presentada en la Figura 3.8.7, donde se evidencia el prototipo final de la EMA – UD, la disposición de cada uno de sus elementos y la ubicación elegida para la implementación final.

De acuerdo con la validación de los datos obtenidos con las pruebas realizadas y teniendo como patrón la estación meteorológica patrón la estación que se encuentra en las instalaciones de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se determinó que un grado de error valido es aquel que no supera el 10% de lo captado por cada sensor entre una y otra

estación. Por lo tanto la EMA se encuentra en condiciones para poder ser comercializada bajo las sugerencias de mejora dadas en el capítulo de Recomendaciones futuros proyectos.

Debido a la ubicación que pueda tener la estación, se plantea la opción de ser alimentada de forma autónoma o conectada a la red. Para esto, se realiza el diseño correspondiente para los elementos que se pueden emplear en cada una de estas opciones y se propone su implementación como una mejora para este proyecto en futuras versiones.

7. Recomendaciones futuros proyectos

Contando con el desarrollo presentado para este proyecto y con las particularidades presentadas durante este proceso, se presentan algunas recomendaciones para futuros proyectos relacionados a este:

Teniendo en cuenta las características del sensor de temperatura empleado durante este proyecto, MLX90615SSG, se propone utilizar este sensor para la medición de temperatura de los paneles que se vayan a emplear en la Red Eléctrica Inteligente. Según su hoja de datos y las librerías disponibles para utilizarlo, se pueden utilizar varios de estos en serie para conocer la temperatura de varios elementos de manera simultánea. La temperatura de los paneles es un factor considerado al diseñar un sistema fotovoltaico y calcular su eficiencia.

Los datos de las variables medidas con la EMA, pueden ser empleados para calcular otros parámetros como el punto de rocío, la puesta y salida del sol, la fase lunar; parámetros que pueden ser considerados de gran importancia para la eficiencia de la generación de energía de la Red Eléctrica Inteligente.

La estación construida, tiene la posibilidad de ser ubicada en cualquier lugar, siempre que cumpla las condiciones de emplazamiento, y para poder transmitir de forma permanente a cualquier lugar la información que está midiendo, se recomienda implementar un servidor externo, de tal forma que desde cualquier otro punto se pueda conocer las mediciones que está realizando la estación.

Para el envío de datos, se emplea una red Wi-Fi, que debe estar conectada de forma permanente a la estación, de lo contrario el único sistema de almacenamiento con el que se cuenta de manera continua es la tarjeta de memoria SD. Por esto, se propone implementar otro método de comunicación que pueda ser conectado a la estación de forma permanente, como comunicación GPRS o radiofrecuencia.

Para otras versiones de la estación, se podrían utilizar otra tarjeta de procesamiento, que permita realizar la programación de los elementos de forma más sencilla y que ocupe menos espacio, ya que la programación empleada para este proyecto es extensa y ocupa gran espacio al procesar la información que maneja la tarjeta Arduino DUE.

El servidor creado brinda los datos recibidos desde la estación, pero no cuenta aún con la opción de manipular estos datos. Se propone realizar una aplicación o Interfaz Hombre-

Máquina directamente en un computador, para que el usuario tenga mayor accesibilidad al manejo de la información.

No se contará con los recursos económicos necesarios para la adquisición de todos los elementos para la EMA, por lo que se presenta la posibilidad de emplear otros sensores que se rijan por la normatividad de la OMM y que durante otros procesos de manera posterior puedan ser adquiridos para futuros proyectos.

Teniendo en cuenta que la información será almacenada en un servidor web, inicialmente se plantea la idea de contar con un servidor web gratuito o de bajo costo, porque el almacenamiento de datos será de gran capacidad, constante y costoso. Por esto, primero se implementa un servidor propio, un computador que será empleado como servidor, que debe estar conectado a la misma red de la EMA y de los equipos que quieran visualizar la información.

Cada vez que la EMA sea ubicada en un nuevo sitio, se debe reconfigurar los datos de la red a la que se encontrara conectada de forma manual a través del *Software* Arduino IDE, conectando el módulo *Wi-Fi* directamente y cargando el código con las modificaciones de red requeridas; para esto, las indicaciones serán definidas en el Manual del Observador.

Se debe contar con acceso a una red *Wi-Fi* para todos los lugares en donde se ubicará la EMA.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, «Smart Grids y la evaluación de la red eléctrica,» Barcelona, 2011.
- [2] Organization, World Meteorological, «Meteoterm,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/8bTuSq>. [Último acceso: 2 Noviembre 2016].
- [3] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «Glosario,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/XOX9vk>. [Último acceso: 16 Abril 2016].
- [4] Departamento de Ciencias y Tecnología - Universidad Nacional de Asunción (Paraguay), «Estación Meteorologica,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/PsoFqE>. [Último acceso: 4 Diciembre 2016].
- [5] O. M. M. -. OMM, OMM No. 49 Reglamento Técnico: Volumen I - Normas meteorológicas de carácter general y prácticas recomendadas, Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial - OMM, Actualización 2012.
- [6] IDEAM, «Solicitud de información - Red de estaciones,» 2016.
- [7] S. D. d. Ambiente, «Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB,» 2016.
- [8] R. P. Areny, Sensores y acondicionadores de señal, Barcelona: Marcombo, 2003.
- [9] O. M. M. -. OMM, OMM No. 8 Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial, 2014.
- [10] K. Leung Ray, *Photovoltaic Cell Efficiency at Elevated Temperatures*, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [11] H. R. Van De Wyngard, «La generacion eólica,» de *Energía Eólica*, Santiago, Universidad Católica de Chile, 2011, pp. 83-99.
- [12] J. A. Duffie y W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Hoboken: John Wiley & Sons. Inc, 2013.
- [13] P. J. Hernandez, «Arquitectura, conceptos, diseño bioclimatico,» 8 Marzo 2014. [En línea]. Available: <https://goo.gl/diBMEg>. [Último acceso: 4 Diciembre 2016].
- [14] W. K. Bolton, *Intrumentación y control industrial*, Madrid: Paraninfo S.A., 1996.
- [15] *Measurement Computing, Data Acquisition Handbook*, Norton, MA, 2004.

- [16] «Sistemas de almacenamiento informatico,» *CyL Digital*.
- [17] G. Vialcanet, «Visualización de datos: ¿Qué dicen los expertos?,» *DBi - Digital Business Intelligence*, 2014.
- [18] F. R. Victor Palma, Estación Meteorologica multiparametrica sincronizada con GPS y monitoreada a traves de Internet, San Salvador, 2013.
- [19] Arduino, «SPI library,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/vktvAP>. [Último acceso: 11 Diciembre 2016].
- [20] Instructables, «Comunicación Serial,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/UUtzNx>. [Último acceso: 22 Diciembre 2016].
- [21] Arduino, «Wire Library,» Arduino, [En línea]. Available: <https://goo.gl/iQ5jTK>. [Último acceso: 22 Diciembre 2016].
- [22] Arduino, «Arduino Leonardo,» Arduino, 2016. [En línea]. Available: <https://goo.gl/o1QFAz>. [Último acceso: 11 Diciembre 2016].
- [23] Arduino, «Arduino Due,» Arduino, 2016. [En línea]. Available: <https://goo.gl/n4IVQe>. [Último acceso: 11 Diciembre 2016].
- [24] T. Technology, «EMB1206EV,» Tibbo Technology, 2016. [En línea]. Available: <https://goo.gl/gzcC5B>. [Último acceso: 11 Diciembre 2016].
- [25] Maxim, «DS1722 Digital Thermometer with SPI/3-Wire Interface,» 2016.
- [26] Maxim, «DS18S20,» 2016.
- [27] N. Semiconductor, «LM335 Precision Temperature Sensors,» 2000.
- [28] Melexis, «MLX90615 Infra Red Thermometer,» 2013.
- [29] A. E. C. Ltda, «Digital - output relative humidity & temperature sensor/module,» Thomas Liu .
- [30] Humirel, «Relative Humidity Sensor HS1101,» 2002.
- [31] Honeywell, «HIH-4000 Series Humidity Sensors».
- [32] Sensirion, «Datasheet SHT7x Humidity and Temperature Sensor,» 2010.
- [33] Motorola, «100 kPa On - Chip Temperature Compensated & Calibrated Silicon Pressure

- Sensors,» 2000.
- [34] NXP, «MPX5010 Integrated Silicon Pressure Sensor on-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated,» 2012.
- [35] Bosch, «BMP180 Digital pressure sensor,» 2013.
- [36] K. & Zonen, «Piranometros».
- [37] AT, «Sunshine Pyranometer type SPN1».
- [38] Ammonit, «Anemometer Vector,» 2011.
- [39] T. Clima, «WindSensor - First Class Advanced,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/bGoiIX>. [Último acceso: 7 Enero 2017].
- [40] Novalynx, «Model 200-WS-01B Wind Speed Sensor,» 2010.
- [41] Ammomit, «Wind Wave Thies First Class POT,» 2016.
- [42] N. Systems, «Specifications NRG #200 Wind Direction Vane,» 2004.
- [43] Novalynx, «WeatherPort General Purpose Wind Sensors».
- [44] Ammomit, «Precipitation Sensor Young,» 2016.
- [45] Ammomit, «Thies Precipitation Sensor,» 2013.
- [46] L. Lastem, «Pluviometri Elttrici - MW8006-03/08,» 2009.
- [47] Novalynx, «Precipitation: 260-7852 Rain Collector».
- [48] Arduino, «Library for the Melexis Digital IR Thermometer Type MLX90614 (variants),» Arduino, Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://goo.gl/uTlpVi>. [Último acceso: 22 Diciembre 2016].
- [49] E. 6. Norte, «DHT22 Sensor Temperatura y Humedad,» [En línea]. Available: <http://www.electronica60norte.com/detalle.php?sku=1458>. [Último acceso: 29 Enero 2017].
- [50] «WetterStation Garching,» [En línea]. Available: <http://www.wetter-garching.de/howto.html>. [Último acceso: 23 Enero 2017].
- [51] E. Systems, «ESP8266EX Datasheet Version 4.3,» 2015.

- [52] Labradoc, «ESP8266 WiFi Module Quick Start Guide».
- [53] Arduino, «SD Library,» Arduino, [En línea]. Available: <https://goo.gl/85s8uX>. [Último acceso: 22 Diciembre 2016].
- [54] H. H. T. Profesionales, «Nextion Arduino,» Instructables, [En línea]. Available: <https://goo.gl/RYL7nq>. [Último acceso: 11 Diciembre 2016].
- [55] GitHub, «Arduino - Nextion,» GitHub, [En línea]. Available: <https://goo.gl/p7nU2D>. [Último acceso: 22 Diciembre 2016].
- [56] GeekFactory, «Tutorial DS1307 con Arduino,» 20 Marzo 2015. [En línea]. Available: <https://goo.gl/43Lq61>. [Último acceso: 7 Enero 2017].
- [57] N. Mechatronics, «Modulo GPS con Arduino,» [En línea]. Available: http://www.naylampmechatronics.com/blog/18_Tutorial-M%C3%B3dulo-GPS-con-Arduino.html. [Último acceso: 27 Enero 2017].
- [58] MathWorks, «ThingSpeak,» MathWorks, [En línea]. Available: <https://goo.gl/ssqxc>. [Último acceso: 5 Enero 2018].
- [59] T. -. MathWorks, «ThingSpeak,» [En línea]. Available: <https://thingspeak.com/>. [Último acceso: 15 Enero 2017].
- [60] J. A. Brache, «Interfacing the MPXM2053 Pressure Sensor to the MSP430F449,» 2007.
- [61] NASA, «Surface meteorology and Solar Energy,» NASA, [En línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen>. [Último acceso: 30 Abril 2015].
- [62] S. a. C. Honeywell, «HIH 400 Series Humidity Sensors,» 2010.
- [63] Freescale, «100kPa On Chip Temperature Compensated Silicon Pressure Sensors,» 2012.
- [64] L. L. Enrique Martines, «Cálculo de la Temperatura de Punto de Rocío a diferentes valores de presión,» *Simpósio de Metrología 2008*, pp. 22-24, 2008.
- [65] Aosong, «Temperature and humidity module DHT11».
- [66] I. G. Davila y I. P. Camacho, Monitoreo de una estación meteorologica Via Internet, Mexico: Universidad Autonoma de Zacatecas, 2009.
- [67] I. Components, «H21A1 Aperture Opto-Electronic Single,» 2000.

- [68] Arduino, «Software Arduino,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/d85id7>. [Último acceso: 26 Diciembre 2016].
- [69] Nextion, «Nextion Editor,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/niyWbo>. [Último acceso: 26 Diciembre 2016].
- [70] A. Friends, «XAMPP Apache + MariaDB + PHP + Perl,» [En línea]. Available: <https://www.apachefriends.org/es/index.html>. [Último acceso: 20 Febrero 2017].
- [71] AutoDesk, «Eagle PCB design made easy,» [En línea]. Available: <http://www.autodesk.com/products/eagle/overview>. [Último acceso: 2 Abril 2017].
- [72] AutoDesk, «AutoCAD,» [En línea]. Available: <http://latinoamerica.autodesk.com/products/autocad/overview>. [Último acceso: 2 Abril 2017].

Anexos

A.1. Circuito de acondicionamiento Sensor de Presión

Según la hoja de datos del sensor de presión MPXM2102AS, como se presenta en la Figura A.1.1 y en la Figura A.1.2, los valores de tensión que se pueden obtener son del orden de milivoltios, por lo que para la tarjeta Arduino DUE serían valores que cuentan con baja resolución, con lo que se evidencia que es necesario utilizar un circuito para amplificar la señal.

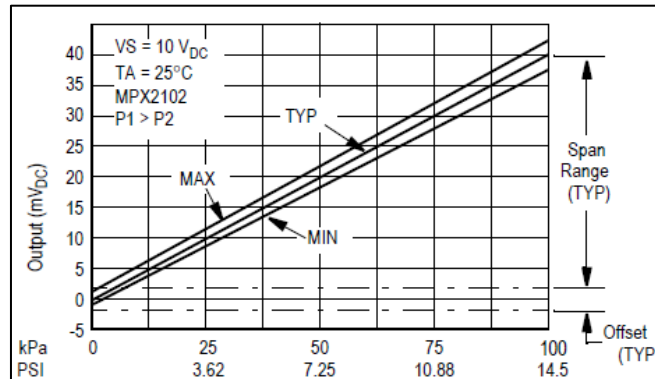


Figura A.1.1. Curva característica del sensor de presión MPXM2102AS.

Fuente: [33]

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Pressure Range ⁽¹⁾					
Absolute Pressure Range MPX2102A	P_{OP}	20	—	100	kPa
Differential Pressure Range MPX2102D	P_{OP}	0	—	100	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V_S	—	10	16	V_{DC}
Supply Current	I_O	—	6.0	—	mAdc
Full Scale Span ⁽³⁾	V_{FSS}	38.5	40	41.5	mV
Offset ⁽⁴⁾					
MPX2102D Series	V_{OFF}	-1.0	—	1.0	mV
MPX2102A Series		-2.0	—	2.0	
MPXM2102D/G Series	V_{OFF}	-1.0	—	1.0	mV
MPXM2102A Series		-2.0	—	2.0	

Figura A.1.2. Características de operación.

Fuente: [33]

Para realizar el acondicionamiento de este sensor se emplean tres etapas en el proceso de amplificación, como se presenta en Figura A.1.3 utilizando seguidores voltaje, restadores de señales y amplificadores no inversores. [60]

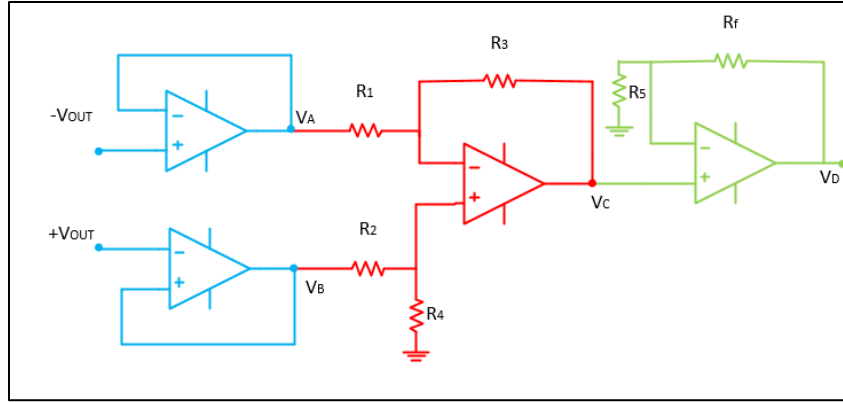


Figura A.1.3. Circuito de acondicionamiento Sensor de Presión.

Fuente: Autores

Las señales que se obtienen del sensor de presión se utilizan como entrada de dos circuitos seguidores de voltaje (Azul), que permiten aislar las señales de entrada anulando los efectos de carga, por lo que se mantiene la señal al ser utilizada en este proceso de acondicionamiento.

Las señales obtenidas (V_A y V_B) son restadas utilizando un circuito amplificador restador (Rojo) para el que se emplea una ganancia de 100, el valor de la tensión de salida se obtiene empleando la Ecuación A.1.1.1. Los valores de las resistencias R_1 y R_2 deben ser iguales, como los valores de las resistencias R_3 y R_4 . Por lo que se emplean resistencia de $1k\Omega$ (R_1 y R_2) y de $100k\Omega$ (R_3 y R_4).

$$V_C = (V_B - V_A) \frac{R_3}{R_1}$$

Ecuación A.1.1.1. Tensión de salida circuito restador.

La tensión de salida del amplificador restador (V_C) se emplea como señal de entrada para el circuito amplificador no inversor (Verde), cuyo valor de salida se calcula con la Ecuación A.1.1.2, utilizando $R_5=1k\Omega$.

$$V_D = \left(1 + \frac{R_f}{R_5}\right) (V_C)$$

Ecuación A.1.1.2. Tensión de salida circuito amplificador no inversor.

El sensor de presión será alimentado a 5 V, por lo que el rango de Full Scale que será de -1mV a 21mV. Calculando con el máximo valor de salida del restador (21mV) y para un valor de salida de amplificación de $V_D=3,2V$; se obtiene $R_f = 523,8\Omega$. Llevando este valor a valores comerciales de resistencia, se utiliza una resistencia de 520Ω , con lo que se obtiene $V_D=3,192V$ para $P=100kPa$ como valor máximo de salida del circuito de acondicionamiento y $V_D=-0,152V$ para el valor mínimo con $P=0 kPa$.

A.2. Circuito de acondicionamiento Sensor de radiación

Para el sensor de radiación, al igual que el de presión, se debe realizar una amplificación de señal, de tal forma que la señal de salida del sensor se encuentre en el rango de señal de entrada del Arduino DUE.

Para esto, se emplea un acondicionamiento con un amplificador no inversor. Debido a que el sensor de radiación no cuenta con alimentación externa, no presenta cargas que influyan en su señal de salida y no es necesario utilizar un seguidor de tensión.

Para realizar los cálculos de los valores de resistencia que se van a emplear, se utiliza la Ecuación A.1.1.2, asumiendo un valor de resistencia $R_1 = 500\Omega$ amplificando el valor que se obtiene del sensor de radiación hasta 100 veces, con lo que se obtenía una salida de 3V para 30mV. El valor obtenido fue de $R_f = 49,5k\Omega$.

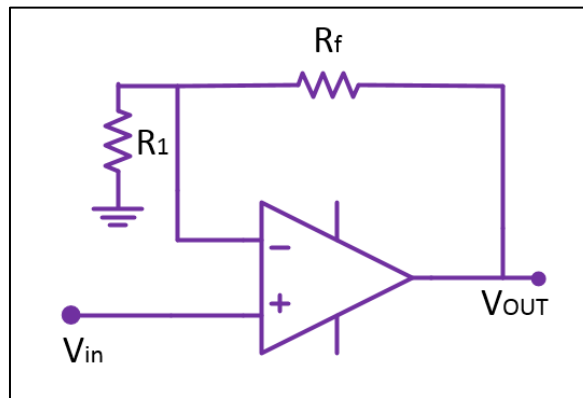


Figura A.2.1. Circuito acondicionamiento Sensor Radiación.

Fuente: Autores.

A.3. Diseño de sistema fotovoltaico autónomo

Determinación de la demanda o carga

La EMA, es un dispositivo autónomo por lo que su fuente de alimentación debe ser independiente y constante para mantener de forma continua con su funcionamiento; por lo tanto para que cuente con su propio abastecimiento de energía se propone este diseño de un sistema fotovoltaico autónomo para el cual se contara con un sistema de generación de energía y un sistema de almacenamiento de la misma.

La propuesta se realiza a partir de información de la EMA como su nivel de tensión, los elementos asociados, la potencia de los elementos y el tiempo que se encuentran activados cada uno de estos.

Tabla A.3.1. Análisis de cargas del prototipo.

Carga	Potencia [W]	Energía [Wh-día]
<i>Arduino</i>	12	288
<i>Termómetro</i>	0,125	3
<i>Higrómetro</i>	0,0075	0,18
<i>Barómetro</i>	0,06	1,44
<i>Piranómetro</i>	0	0
<i>Anemómetro y veleta</i>	0,05	1,2
<i>Pluviómetro</i>	0,25	6
<i>Sistema de comunicación Wi-Fi</i>	0,56	13,44
<i>Sistema de almacenamiento de datos</i>	1	24
<i>Sistema de visualización</i>	0,325	7,8
<i>Sistema de sincronización de tiempo</i>	0,01	0,24
<i>Sistema de posicionamiento global</i>	0,021	0,52
Total	14,40	345,82

Fuente: Autores.

Una estación meteorológica presenta información de variables ambientales de forma continua por lo que su funcionamiento debe mantenerse durante las 24 horas del día. Los elementos que se tienen en cuenta para este diseño son los que hacen parte del prototipo implementado y ya que todos los elementos estarán conectados a la tarjeta de desarrollo Arduino, este será el elemento que recibirá de forma directa, su nivel de tensión de entrada es (7 – 12) V, por lo que se diseña con tensión nominal de 12V. La EMA será empleada principalmente en Bogotá, por lo que se tendrán en cuenta su ubicación y sus condiciones ambientales para este diseño.

Selección del generador y regulador

Se empleará un regulador MPPT (Maximum Power Point Tracking) ya que es un elemento que de forma autónoma ajusta la tensión de entrada para alcanzar la máxima potencia en el panel solar y se emplea la siguiente ecuación para conocer la potencia pico del generador:

$$\text{Potencia Pico del generador} = \frac{\text{Energía a suministrar a la carga}}{\text{HSS}}$$

Ecuación A.3.1. Potencia pico del generador.

Dentro de esta ecuación, se presentan dos variables; la energía suministrada que está dada por la ecuación que se muestra a continuación, y HSS que corresponde a Horas de Sol Estándar en la zona donde se realizara el diseño.

$$\text{Energía a suministrar a la carga} = \text{Energía total DC} * (1 + \text{FS})$$

Ecuación A.3.2. Energía a suministrar a la carga

En esta ecuación, se utiliza el valor de energía total DC, y el FS (Factor de Seguridad). Este factor de seguridad puede tener en cuenta diversos elementos, entre ellos principalmente las pérdidas de potencia en elementos como el panel, las baterías, entre otros. Para este caso, se tendrá en cuenta únicamente el porcentaje de potencia que se pierde debido a la temperatura ambiente de la zona donde se realiza el diseño. Por lo que el FS será de 0.16, valor que se confirmará más adelante al presentar las correcciones por temperatura.

El valor de HSS, corresponde a los datos de energía solar disponible en la localidad, teniendo en cuenta el promedio del peor mes. Para obtener estos datos, se cuenta con la información que brinda la NASA en su página “NASA Surface meteorology and Solar Energy” [61], donde se obtienen los datos a partir de la ubicación del sitio dada en Longitud y Latitud. Para este caso, Bogotá, Cundinamarca cuenta con coordenadas: 4° 36,58' N, 74° 4,90' W, Latitud: 4,6097100 y Longitud: -74,0817500.

Tabla A.3.2. Radiación solar diaria.

Mes	Radiación solar diaria [kWh/m2/d]
Enero	4.67
Febrero	4.78
Marzo	4.91
Abril	4.73
Mayo	4.96
Junio	5.25
Julio	5.55
Agosto	5.73
Septiembre	5.44
Octubre	4.98
Noviembre	4.47
Diciembre	4.32

Fuente: Autores.

$$\text{Energía a suministrar a la carga} = 345,82 * (1 + 0.16) = 401,15 \text{ [Wh]}$$

$$P_{PGFV} = \frac{401,15}{4.32} = 92,86 \text{ W}$$

Teniendo los valores de potencia pico del generador, se selecciona un panel que supla la potencia del sistema, se presentan los datos de un panel que tiene las siguientes características y también son presentadas en anexos de este documento:

Tabla A.3.3. Especificaciones paneles.

Marca	Shine Solar
Referencia	SHS135-36P
<i>Potencia Máxima (Pmax)</i>	150
<i>Tensión para Potencia Máxima (Vmp)</i>	18,1
<i>Corriente para Potencia Máxima (Imp)</i>	8,33
<i>Tensión de Circuito Abierto (Voc)</i>	22,4
<i>Corriente de corto circuito (Isc)</i>	8,82
<i>Temperatura Nominal de Operación de la Celda (NOCT)</i>	45
<i>Coefficiente de Temperatura para Voc (Δ Voc)</i>	-0.34
<i>Coefficiente de Temperatura para Isc (Δ Isc)</i>	0.045
<i>Coefficiente de Temperatura para Pmax (Δ P)</i>	-0.47

Fuente: Autores.

Según esto, se puede calcular las posibles combinaciones de paneles en paralelo y en serie, y se calcula la corriente y voltaje máximos según cada una de las configuraciones, teniendo en cuenta la temperatura ambiente del sitio y dos extremos, una temperatura mínima y una máxima, para esto se realizaron primero los cálculos correspondientes a corrección por temperatura para cada uno de los paneles y para cada condición de temperatura.

Tabla A.3.4. Correcciones por temperatura.

T. ambiente	17°C	10°C	60°C
Tc	48.25	41.25	91.25
Δ T	23.25	16.25	66.25
Δ Voc %	-7.905	-5.25	-22.52
Voc(1000W/m2)	20,62	21.16	17.34
Δ Isc %	1.04	0.73	2.98
Isc(1000W/m2)	8,91	8.88	9.08
Δ P %	-16.5375	-7.63	-31.13
P(1000W/m2)	133.60	138,54	103.29

Fuente: Autores.

Estos cálculos se realizan con el objetivo de conocer la corriente y la tensión que se espera que genere el panel en condiciones del sitio y se hacen suposiciones de casos extremos, debido a que a mayor temperatura la corriente será mayor y a menor temperatura la tensión será mayor.

Ahora, se podrá escoger el regulador a partir de los valores de corriente y tensión de la combinación del número de paneles que sea más adecuado y se ajuste a un regulador específico, teniendo en cuenta que estos valores del generador deben ser menores a los del regulador.

El regulador escogido fue el siguiente, para el cual se presenta la tabla de especificaciones completa en anexos. (Ver Anexos). Este regulador será el que se implementará en los tres circuitos.

Tabla A.3.5. Características de regulador seleccionado.

Tracer3906BP/Tracer3910BP	
Charger Controller	
<i>Voc [V]</i>	100
<i>Corriente máx. de salida [A]</i>	10

Fuente: Autores.

Es necesario verificar además que la corriente del generador sea menor o igual a la corriente máxima de salida del regulador, se verifica con la siguiente ecuación:

$$I_{gen} = \frac{P_{pGV}}{V_{nom}} = \frac{401,15}{12} = 33,42$$

Ecuación A.3.3. Corriente del generador.

Con esto, se evidencia que el regulador cumple las condiciones necesarias para ser implementado en cada uno de estos tres circuitos.

Selección baterías

Para la selección de las baterías primero debe calcularse la capacidad nominal del sistema para cada uno de los circuitos, calculando con la siguiente ecuación:

$$CN_{sistema} = CI * No. de días de autonomía$$

Ecuación A.3.4. Capacidad nominal del sistema

Para este caso, el número de días de autonomía del sistema se tomará como 3 días, esperando a que las baterías logren abastecer durante 3 días.

Teniendo en cuenta que CI (carga diaria en corriente) es equivalente a la siguiente ecuación:

$$CI = \frac{E_{sumi}}{V_n(sist)}$$

Ecuación A.3.5. Capacidad diaria

Además, es necesario calcular la capacidad corregida, esto permitirá calcular el número de baterías en serie y en paralelo que será necesario utilizar, dada por la siguiente ecuación:

$$C_{corregida} = \frac{CN_{sist}}{P_{desc.}}$$

Ecuación A.3.6. Capacidad corregida

Lo ideal es utilizar el menor número de ramas en paralelo, preferiblemente 3, por eso se realizan los cálculos con 2 baterías para identificar la mejor opción.

Tabla A.3.6. Capacidad sistema.	
<i>Cnsis</i>	<i>100,28</i>
<i>CI</i>	<i>33,42</i>

Fuente: Autores.

Las baterías escogidas tienen las siguientes características y permiten tener las siguientes combinaciones de baterías en paralelo y serie para cada uno de los circuitos, las demás especificaciones de estas baterías se dan en anexos. (Ver Anexos)

Tabla A.3.7. Características de batería seleccionada.

<i>Batería</i>	<i>MK 8GTE- DEKA</i>
<i>Voltaje de operación [V]</i>	<i>6</i>
<i>C [Ah]</i>	<i>196</i>
<i>P. descarga</i>	<i>0.35</i>
<i># Baterías serie</i>	<i>2</i>
<i>C. Corregida</i>	<i>286,53</i>
<i># Baterías paralelo</i>	<i>1,46</i>

Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta las condiciones que debe cumplir la batería, la batería MK 8GTE-DEKA permite tener 2 baterías en paralelo y 2 en serie.