



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Caracterización de un sistema captador de niebla, como fuente alternativa de agua que relacione variables climatológicas en la ciudad de Tunja – Boyacá

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico

ALEJANDRO SIERRA RODRIGUEZ

Dirigida por:

Director: Ing. Wiesner Hernández Arnold Fabian. PhD

Co-Director: Ing. Andrés Álvarez Camargo. Msc

Junio, 2022



Universidad Santo Tomás



Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica

Caracterización de un sistema captador de niebla, como fuente alternativa de agua que relacione variables climatológicas en la ciudad de Tunja – Boyacá

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico

ALEJANDRO SIERRA RODRIGUEZ

Director: Ing. Wiesner Hernández Arnold Fabian. PhD.

Co-Director: Ing. Andrés Álvarez Camargo. Msc

Approved by

Date:

(Signature)

(Signature)

.....
Ing. Wiesner Hernández Arnold Fabian
Docente Tutor

.....
Ing. Andrés Álvarez Camargo
Docente Cotutor

.....
Firma Primer Lector

.....
Firma Segundo Lector

Tunja, 2022

Exoneración de Responsabilidades

Los conceptos desarrollados, investigaciones realizadas, prácticas elaboradas, análisis y conclusiones del presente proyecto son de exclusiva responsabilidad del autor. Dejo constancia que cedo los derechos de propiedad intelectual a la Universidad Santo Tomas seccional Tunja, según lo establecido por la ley No. 1915 del 12 de Julio de 2018, ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Resumen

La recolección de agua de niebla puede aliviar la escasez de agua en ciertas regiones del país. Sin embargo, existen grandes colectores de niebla que fallan con frecuencia bajo la carga de fuertes vientos, esto se debe principalmente al no incluir el diseño de ingeniería y la falta de información sobre el fenómeno que se somete las mallas como superficie recolectora (Mussie F. et al, 2013). En el concepto de esta investigación, se plantea una caracterización de un sistema recolector de agua de niebla en la ciudad de Tunja – Boyacá, por lo que se pretende realizar un estudio que verifique una viabilidad técnica para su implementación y de esta forma se pueda encontrar cuales son los factores del éxito que influyen en mayor medida para recolectar agua.

Para identificar los parámetros técnicos necesarios para la adquisición de datos, se hace una exploración de las variables climatológicas como la temperatura, humedad, punto de rocío, nivel de agua, velocidad del viento y dirección del viento, ya que son determinantes en la formación de niebla. Mediante un estudio de correlación se analiza los datos con respecto al comportamiento de las variables atmosféricas.

Con los resultados obtenidos se identifica cuál es el comportamiento de la niebla en la ciudad de Tunja sobre la malla, se establecerá un horario en el cual hay mayor probabilidad de captación de agua.

Palabras Claves: Atrapanieblas, Punto de Rocío, base de datos, caracterización, correlación, sensores y comunicación inalámbrica.

Tabla de contenido

Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Definición del problema	2
1.3 Formulación de Pregunta.....	2
1.4 Delimitación del problema	2
1.5 Justificación.....	3
1.6 Objetivos.....	3
1.6.1 Objetivo General	3
1.6.2 Objetivo específico	4
Capítulo 2	4
Marco Referencial.....	4
2.1 Marco Teórico	4
2.2 Marco De Antecedentes	5
2.3 Marco Conceptual	6
2.3.1 Caracterización de un sistema	6
2.3.2 Atrapanieblas	6
2.3.3 Clases De Atrapanieblas	6
2.3.4 Niebla	7
2.3.5 Variables Meteorológicas	7
2.3.6 Temperatura Atmosférica	7
2.3.7 Humedad Atmosférica.....	7
2.3.8 Punto De Roció.....	8
2.3.9 Velocidad Del Viento	8
2.3.10 Dirección Del Viento.....	8
2.3.11 Instrumentación	9
2.3.12 Sensores.....	9
2.3.13 Características Estáticas	9
2.3.14 Características Dinámicas.....	10
2.3.15 Sensor de temperatura	10
2.3.16 Sensor de Humedad	11
2.3.17 Sensor de Viento.....	12
2.3.18 Sensor de nivel	13

2.3.19	Transmisión de datos	14
2.3.20	Correlación polinómica	15
2.4	Marco Geográfico.....	15
Capítulo 3		16
Diseño Metodológico		16
•	Tipo De Investigación	16
•	Hipótesis.....	16
3.1	Mecánica del sistema captador de niebla	16
3.1.1	Diseño del sistema bidimensional	16
Capítulo 4		19
Diseño De Integración De Sensores		19
4.1	Estudio y Comparación de sensores	19
4.1.1	Instrumento - Temperatura	19
4.1.2	Instrumento – Humedad	20
4.1.3	Instrumento - Velocidad del viento	21
4.1.4	Instrumento – Nivel de agua.....	21
4.1.5	Instrumento - Potenciómetro Veleta.....	22
4.1.6	Selección de microcontrolador	23
4.2	Diseño de tarjeta para adquisición de datos.....	23
4.2.1	Reguladores de voltaje.....	23
4.2.2	Tarjeta de transmisión y recepción de datos.....	24
Capítulo 5		27
Calibración de sensores		27
5.1	Sensor de humedad.....	27
5.1.1	Humedad Relativa alta.....	28
5.1.2	Humedad Relativa Baja.....	30
5.1.3	Datos Experimentales con la humedad.....	30
5.2	Sensor Temperatura.....	31
5.2.1	Datos Experimentales con la Temperatura	33
5.3	Sensor Veleta.....	34
5.3.1	Datos Experimentales con la Veleta	36
5.4	Sensor de Nivel.....	37
5.4.1	Datos Experimentales con el Ultrasónico.....	38

5.5	Anemómetro	39
5.6	Algoritmo para adquisición de datos	40
Capítulo 6		42
Tratamiento De Datos Adquiridos		42
6.1.1	Taza de muestreo en variables climatológicos	42
6.1.2	Recolección de datos en LabVIEW	43
6.2	Correlación polinomial	44
Capítulo 7		45
Análisis de Resultados		45
7.1	Sistema Captador de niebla	45
7.2	Monitoreo y taza de muestreo	47
7.3	Relación de variables climatológicas y captación de agua	49
Otros aportes.....		55
8.1	Presupuesto.....	55
Conclusiones		56
Trabajo Futuro.....		57
Referencias		58
Anexos.....		60
Lista de materiales de tarjeta de integración		63
Esquemático de tarjeta de transmisión y recepción de datos		64
Montaje de veleta		65
Bloques de interface LabVIEW		66
Posibles condiciones sin la existencia de neblina		67

Índice de figuras

Figura 1: Tipos de sensores de temperatura	10
Figura 2: Instrumentos de medición de nivel	13
Figura 3: características geográficas de Tunja	15
Figura 4: Dimensión del mecanismo captador de niebla.....	17
Figura 5: a. Dimensión de canaleta, b. cable galvanizado.....	17
Figura 6: Partes del sistema	18
Figura 7: Tanque de agua	18
Figura 8: Errores de temperatura típicos y máximos.....	20
Figura 9: Circuito típico de una veleta de potenciómetro.....	22
Figura 10: Regulador De Tensión Y Entradas De Sensores.....	24
Figura 11: Conexiones Transmisor y receptor	25
Figura 12: Producto de adquisición y transmisión de datos	25
Figura 13: Transmisor de datos del sistema	26
Figura 14: Receptor de datos del sistema	27
Figura 15: Metodología calibración - Humedad.....	28
Figura 16: Cámara de calibración con KNO ₃	29
Figura 17: Cámara de calibración con NaCl	29
Figura 18: Cámara de calibración con Gel de Silicio	30
Figura 19: Curva de tendencia obtenida – Humedad	31
Figura 20: Registro de temperatura baja.....	32
Figura 21: Registro de temperaturas de 13°C y °18°C.....	32
Figura 22: Curva de Calibración de temperatura.....	33
Figura 23: Error de temperatura	34
Figura 24: Marca de Origen en la veleta	35
Figura 25: Metodología de calibración - Veleta.....	35
Figura 26: Curva de tendencia obtenida - Veleta	36
Figura 27: Calibración de hc-sr04	37
Figura 28: Recta que relaciona la Medida Real, Medida del sensor con la obtenida en la calibración.....	38
Figura 29: Desviación típica tomadas del Sensor Ultrasónico	39
Figura 30: Método de calibración – Anemómetro.....	40
Figura 31: Lectura y Transmisión de datos	41
Figura 32: Interface LabVIEW de captador de niebla.....	43

Figura 33: Mapa de ejecución de la investigación – Tunja, Boyacá	45
Figura 34: Ensamble del prototipo según SFC	46
Figura 35: Montaje del sistema Caracterizado – Sin Niebla	47
Figura 36: Interface LabVIEW con adquisición de muestras.....	47
Figura 37: Resumen de valores instantáneos de las 17440 a 873 muestras.....	48
Figura 38: Recolección de agua en 24 horas	49
Figura 39: Correlación según polinomio y coeficiente de determinación	50
Figura 40: Correlación de Agua y Punto de Rocío.....	51
Figura 41: Correlación Velocidad del viento y agua	52
Figura 42: Curva de la Función de Densidad de Probabilidad de Weibull y el Histograma	52
Figura 43: Rosa de vientos.	53

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Características del E32-TTL-100	14
Tabla 4.1: Combinación de señal de salida	22
Tabla 4.2: Características de los microcontroladores.....	23
Tabla 4-1: Consumo Eléctrico de dispositivos	24
Tabla 5.1: Sales de emisión de humedad.....	28
Tabla 6.1: Parámetros de Weibull	42
Tabla 7.1: Aproximado de Relación.....	50
Tabla 7.2: Características de datos registrados.....	53
Tabla 8.1: Presupuesto del proyecto.....	55

Capítulo 1

1.1 Introducción

El consumo de agua está aumentando debido al crecimiento de la población y la expansión de la agricultura, existe la necesidad de explorar posibles recursos hídricos alternativos que sean económicamente viables y renovables (Informe de políticas de ONU-AGUA, 2017). La niebla es una de ellas, es una fuente potencial de agua que podría usarse con innovadora tecnología de recolección de agua de niebla. Conviene destacar este recurso natural en la ciudad de Tunja, porque esta fuente predomina y a pesar de ello, no se ha tenido en cuenta en la ciudad como alternativa para suministro de agua dulce y sostenible.

Con este trabajo se busca disponer del recurso hídrico, como respuesta al panorama hacia nuevas tecnologías de captación con modelos que ya se han venido desarrollando en países como Chile, cuyos resultados han sido favorables para buscar nuevas fuentes hídricas (Mendoza B. & Castañeda F., 2014). Los captadores de niebla tienen un sistema parecido a las mallas que se usan en el voleibol, la humedad se retiene en la malla y cuando se condensa en pequeñas gotas de agua, estas caerán por su propio peso hasta la canaleta de recolección.

Siendo experimental la investigación, es de carácter necesario buscar variables que influyan en este tipo de captadores para atrapar y condensar la niebla en condiciones propicias. La evaluación se hace a partir del desarrollo e implementación de un sistema que permita medir las variantes en el medio ambiente. Con el diseño de un sistema adquirente de datos y un sistema recolector de agua niebla bidimensional se mide el comportamiento del medioambiente y sus cambios sobre este mismo. La zona de estudio se encuentra ubicada en el barrio Asís de la ciudad de Tunja, se espera realizar un análisis sobre un sitio alto, en el que las corrientes de aire son constantes, generando condiciones favorables para la implementación de los sistemas captadores de niebla.

El sistema de adquisición de datos se asemeja a una clase de estación meteorológica. Sus medidas son realizadas en periodos cortos de tiempo real y según los resultados obtenidos de la investigación se hace un tratamiento de datos para establecer una relación de peso de cada variable medida para obtener la mejor correlación, así apreciando el comportamiento del entorno del sistema recolector y sus cambios.

El mecanismo evalúa la viabilidad para la implementación de sistemas captadores de agua a partir de niebla en una zona urbana, del mismo modo se estudia si los vientos que se generen en la ciudad de Tunja son demasiado fuertes para generar daños como el colapso de la estructura de soporte o la funcionalidad de la malla que se rompa y posiblemente pierda su capacidad de recolección.

1.2 Definición del problema

Actualmente las actividades humanas requieren cada vez más fuentes alternativas de agua como recurso hídrico, se está volviendo una necesidad principal en la humanidad y de la misma forma su mayor preocupación (Tuesca et al, 2015). Existen cada vez más desafíos en cuanto al abordaje del agua como problemática, teniendo en cuenta que a nivel global existe un alto porcentaje de agua, y solo una pequeña parte se le puede dar uso (Kevin M., 2020).

Las fuentes de abastecimiento de agua en la ciudad de Tunja son dadas por la represa Teatinos y los pozos profundos (Ricardo R. 2012). Otra fuente hídrica como alternativa de suministro es el agua de niebla que puede ser recolectada mediante mallas (Carlos Amaya, 2017).

Los sistemas de condensación de agua en mallas dependen de la disposición de características climatológicas y orográficas, es decir, el mecanismo no funciona a cualquier hora del día (M. Juliao et al, 2016).

Los mecanismos recolectores de agua son desarrollados e implementados de forma permanente en zonas geográficas propicias, donde hay presencia de niebla y vientos estables. Los sistemas que se encargan de atrapar la niebla comienzan a tener fallas en periodos cortos debido a la exposición de vientos fuertes. Por tal razón, los mecanismos implementados como la malla se terminan desgarrando por fuertes vientos y la disminución de la vida útil de la malla por exposición a la radiación del sol. (P. Cereceda et al, 2014).

A través de este trabajo se pretende buscar un mecanismo de captación de niebla que evalúe y determiné la hora más propicia para obtener agua en zonas de la ciudad de Tunja.

1.3 Formulación de Pregunta

Para el desarrollo de la investigación se plantean las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué variables físicas son más relevantes en el proceso de captación de agua usando un sistema captador de niebla en la ciudad de Tunja?
- ¿Qué rendimiento tiene un captador de nieblas en diferentes zonas geográficas, tomando como caso de estudio una zona urbana en Tunja?

1.4 Delimitación del problema

Partiendo del diseño mecánico del captador de niebla se analiza los sensores con mejor rendimiento en relación costo-beneficio, aprovechando el máximo potencial para el mecanismo. Con el proceso de distribución de la instrumentación se toman los datos experimentales en la zona de análisis, como medio de monitoreo de las condiciones meteorológicas que relacionan la humedad, temperatura y vientos con el fin de establecer un análisis de recolección de agua.

En el proceso de la caracterización se efectúa un seguimiento a las variables que se encuentran en el entorno del sistema captador de niebla durante el día y la noche. Con la información recolectada se hace correlaciones polinómicas en Matlab para determinar una función matemática en cada variable de tipo exponencial, cuadrática, logarítmica, entre otras. La función matemática permite describir que factor es más importante a la hora de recolectar agua en la malla Raschel. Las mallas Raschel son poli sombras en forma de tela fabricadas de filamentos de polietileno de alta densidad, las mallas pueden tejerse de diferentes densidades, por ejemplo, del 35%, 50%, 2

65%, etc. Estas mallas usualmente son usadas para sombreado, protección de vientos y heladas sobre invernaderos o cultivos.

El estudio se realizará al norte de la ciudad de Tunja, específicamente el barrio Asís cercano a la ruta entre Arcabuco y Tunja. El sector se encuentra situado a una altitud de 2771 msnm, se tendrá en cuenta su nivel elevado para determinar la influencia sobre la recolección de agua por el atrapa nieblas a partir de la zonificación. El diseño del sistema se parte desde el modelo bidimensional *Standard Fog Collector (SFC)* desarrollado por la escuela chilena de redes atrapanieblas, que se adopta de forma generalizada como unidad estándar de captación de agua de niebla.

1.5 Justificación

El agua es vista como un recurso valioso para la vida humana y para los procesos productivos, naturales y ambientales (Lina Muñoz, 2020). Por tal razón, el siguiente proyecto resulta fundamental ya que permite tener una visión de un modelo de captación alternativo de agua a partir de la humedad atmosférica, es una alternativa de poco impacto ambiental y es un modelo sostenible. La implementación de estos diseños otorga soluciones a escala pequeña y se puede sistematizar a partir de modelos bidimensionales (Córdoba y González, 2012).

Boyacá tiene las condiciones climatológicas y orográficas favorables para la posible implementación de sistemas de captación de niebla (IDEAM, 2021). La ciudad de Tunja en su mayor parte del territorio es zona montañosa y la humedad es óptima, y de acuerdo a una investigación exhaustiva realizada en la base de datos, no se encontraron trabajos desarrollados de modelos de captación de niebla como fuente alternativa en la ciudad. Por lo cual, es una alternativa de estudio como abastecimiento hídrico.

La razón asociada a este proyecto es evaluar información climatológica que determine la disponibilidad del recurso hídrico en ambientes atmosféricos en la ciudad de Tunja, la información recolectada se hace por medio de un sistema captador de niebla, donde se almacenarán mínimo 60 muestras por hora durante las 24 horas del día para evaluar e identificar la cantidad de niebla y rocío que proporcione el mecanismo durante 7 días, se considera 1 semana ya que puede existir en algunos días agua de lluvia y alteren los datos de nivel de agua. De acuerdo a los resultados que se obtengan en el transcurso del día y la noche, se establecerá la viabilidad y zona horaria de recolección de agua adecuada.

Este estudio contribuirá a la disponibilidad del recurso hídrico, si el trabajo presente finaliza con eficiencia se complementará con un nuevo trabajo de investigación, que desarrolle un sistema mecánico que recoja la malla, permitiendo el cuidado y manejo de la red (malla) de los vientos y radiación al sol, maximizando la vida útil de los modelos actuales, ahorros económicos de reconstrucción y daño ambiental por continuo cambio de mallas de fibra plástica.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Caracterizar un sistema recolector de agua a partir de niebla que permita evaluar la relación entre la captación de agua y diferentes variables climatológicas.

1.6.2 Objetivo específico

- Identificar el modelo físico de captación de niebla para la evaluación del agua recolectada.
- Diseñar un sistema de adquisición de datos en relación a las variables climatológicas y a la captación de agua.
- Implementar un protocolo de pruebas con el fin de validar las medidas tomadas por el sistema de adquisición.
- Analizar la información recolectada para determinar las relaciones entre las variables climatológicas y la captación de agua.

Capítulo 2

Marco Referencial

En este capítulo del documento se define los conceptos teóricos más importantes donde se cita información relevante para el desarrollo del sistema captador de niebla, la segunda parte se tienen en cuenta algunos referentes teóricos que relacionan la temática planteada para obtener información técnica y metodológica sobre temas como captadores de agua y variables referentes a la investigación. Se definen conceptos básicos relacionados a la ingeniería electrónica y áreas a fines necesarias para desarrollar este trabajo. Finalmente, un análisis geográfico y necesario, ya que es importante definir el lugar de implementación de la investigación.

2.1 Marco Teórico

El atrapanieblas no es un sistema nuevo, su patente fue diseñada en Chile en los años 1960 en el cual, su proceso es la condensación del vapor de agua atmosférica que se transmite en el aire y superficies frías por medio de la concentración de micropartículas de agua generadas por el *punto de rocío*, es decir, una relación de temperatura y humedad. Chile es pionera en esta técnica de captación, donde ha realizado estudios para detectar y saber los comportamientos de la niebla en una variedad de ecosistemas (Díaz W. & Orellana D., 2011).

Esta técnica de concentración ocurre porque la *humedad atmosférica* se condensa con rapidez comparada con la que se evapora según la temperatura, la formación de partículas de agua en grandes cantidades, es perfecta para obtener agua. En ambientes con gran humedad y vegetación la niebla se vuelve más densa y permite obtener mayores proporciones de agua por medio de mallas, cuyas redes finas capturan estas pequeñas gotas de agua. En las investigaciones realizadas, la idea principal es dejar como obstáculo una malla que logre retener la embestida del viento, así condensa las gotas de agua producidas por cierta humedad y temperatura adecuada, que por acumulación de agua estas caerán por gravedad a través de la superficie de la malla hasta llegar a una canaleta (Huertas J. & Molina P., 2016).

La cantidad de niebla se mide con relación a la humedad relativa; existe humedad del cien por ciento cuando el vapor de agua se transforma en líquido. La humedad relativa es la relación entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor de equilibrio del agua a una temperatura dada. Por tanto, depende de la temperatura y la presión del sistema de interés. La presencia de gotas de agua en el aire depende mucho más de la temperatura que de la cantidad de vapor existente”. (Tobías M., 2020).

La investigación sobre las potencialidades de captación de niebla se puede mejorar con las condiciones meteorológicas de las áreas y condiciones gráficas. Además, al emplear este sistema alternativo de recolección de agua es importante las variables que intervienen en el entorno climático del sistema. La instrumentación que se podría tener en cuenta en estos recolectores de agua puede ser el anemómetro para tomar la rapidez de viento, una veleta para orientar de forma perpendicular el sistema con respecto al viento, pluviómetro para registrar el agua que

se acumula en cierto tiempo, la cantidad de niebla que existe en cierto volumen de aire de acuerdo a la presión, nivel de Ph del agua recolectada, temperatura y tensión de cables (W. Córdoba & D. González, 2011).

2.2 Marco De Antecedentes

Para este trabajo se tuvo en cuenta los siguientes trabajos investigativos:

Fesseahaye G. & Michael J., 2014, realizaron un estudio llamado “*Fog-water collection for community use*”, en la cual revisan la tecnología de recolección de niebla, teniendo en cuenta la información sobre la niebla y características climáticas que determinan la formación de la niebla, basándose en la calidad y cantidad de agua recolectada, con el fin de la subsistencia de comunidades que se benefician. El desarrollo de esta investigación determinó que la cantidad de agua de niebla que es recolectada es adecuada en zonas donde la niebla se forma constante durante todo el año; sin embargo, en las zonas donde la niebla no es constante, el diseño de esta tecnología se tiene que ampliar o sistematizar.

En la costa sur de Iquique, Chile, 2015, se ha desarrollado los proyectos más innovadores de recolección de agua de la niebla, con 91 captadores de agua de 58 metros cuadrados cada uno, los captadores se direccionan a un estanque de 160 metros cúbicos los cuales se llenaban con facilidad.

Jennifer H. & Paula M., 2016 realizaron una investigación en la “Prefactibilidad para la posible implementación de atrapanieblas en el municipio de Ráquira-Boyacá.”, determinaron la viabilidad de instalar un sistema atrapanieblas, en la cual revisaron que el municipio cuenta con condiciones meteorológicas favorables para la recolección de agua, de forma que por cada metro cuadrado de malla instalada se recolecta 7,2 litros de agua por día de forma teórica.

A nivel internacional se realizan múltiples investigaciones con el objetivo de implementar nuevos atrapanieblas en zonas con abundante niebla. Con la época actual se espera diseñar atrapanieblas con nuevas tecnologías en el uso de captadores, mallas más resistentes y con mayor eficiencia en la obtención de agua. Últimamente no se está utilizando la recolección de agua para cultivos, también en el consumo humano por ejemplo “agua de niebla Alisos” de canarias, “cerveza atrapanieblas”. (Agua de niebla S.L, 2018 Hangarone)

Por otra parte, los estudiantes Poveda P., Sanabria I. & Juan C., 2018 de la universidad gran Colombia, realizaron el estudio de la eficiencia de captación de niebla, con la finalidad de suministrar agua a la población rural de Chipaque-Cundinamarca, donde obtuvieron como resultado la captación de agua de 4.5 litros por metro cuadrado al día.

La universidad fundación de América, 2020, diseñó una herramienta que permite realizar estudios de implementación de sistemas captadores de agua, relacionando las condiciones atmosféricas (Temperatura, Humedad, punto de rocío) que permite determinar la cantidad de agua a recolectar, donde el diseño no representa un criterio de selección para implementación, es decir, los diseños realizados sólo funcionan en los lugares seleccionados en el momento de instalación, por lo tanto, la eficiencia no fue evaluada en diferentes condiciones climáticas.

Los casos más sobresalientes en los que se encuentran características climatológicas similares a Tunja, es el desarrollado en el Alto Patache, ciudad ubicada en el desierto de Atacama, Chile. Es importante mencionar que la “humedad relativa media anual en Tunja es del 80 %” (IDEAM 2021) siendo la misma que en Chile. Ubicada en la zona costera tiene mayor posibilidad de tener niebla de forma constante; los atrapanieblas desarrollados en Chile se han usado exclusivamente para riego por más de 50 años, usualmente en altitudes entre 600 y 1300 m.s.n.m. El

estudio se hizo en el mes de septiembre, siendo el mes con mayor humedad relativa, los prototipos de atrapaniebla de prueba fueron mallas Rachell de 8 metros cuadrados de 35 % de espesor instaladas a una altura de 2.2 metros sobre el suelo, este sistema logra capturar 23 litros de agua al día (Osses et al., 2017).

2.3 Marco Conceptual

A continuación, se presenta los conceptos y términos necesarios para el desarrollo de este proyecto según un análisis bibliográfico en este tipo de sistemas.

2.3.1 Caracterización de un sistema

La caracterización es la descripción de las características principales de un objeto, es considerada como un fin de proponer estrategias que permita mejorar aspectos que conlleven a una mayor incidencia a el estudio como el caso de un atrapanieblas (Valerio Cabrera et al., 2004).

Por lo general, es un tipo de estudio descriptivo, recurre a la consecuencia de datos cuantitativos y cualitativos con el objetivo de acercarse al conocimiento y comprensión de acontecimientos y experiencias asociadas a un objeto, comprensión de estructuras y características. Con el estudio de una caracterización se obtiene la identificación de datos de forma organizada, ofreciendo información sobre atributos generales y particularidades del objeto de estudio (Alcaldía Medellín, 2019).

Con una caracterización se puede generar un interés de conocimiento en un momento temporal determinado.

2.3.2 Atrapanieblas

Es el diseño de una estructura estilo malla compuesta de hilos delgados de acero o polietileno (nylon) que es templada en lo mayor posible. Cuando la niebla cruza la superficie de la malla a temperatura menor a la saturación del vapor de agua y determinada presión, se genera una condensación, transformándose en micro partículas de agua que se acumulan en esta red y caen hasta el final de la malla por acción de la gravedad. El tamaño de las partículas de agua es de 1 a 40 μm (Mora K 2020).

La organización de los estados iberoamericanos menciona que, para tener un mejor desarrollo de estos sistemas, la malla debe tener una textura de un diámetro muy pequeño. Se podría capturar agua de 3 a 4 litros diarios por m² de malla. La ubicación de los atrapanieblas debe estar en la dirección perpendicular al viento dando como resultado un sistema óptimo de recolección. (Organización de los Estados Iberoamericanos, 1998). Recomienda un coeficiente de sobra de 50%, y 70% de una sola superficie (Kevin Mora, 2020).

2.3.3 Clases De Atrapanieblas

Bidimensional: es una superficie plana (raschel) que se encuentra templada entre dos pilares, ya sean de madera, acero galvanizado o algún material resistente. Este tipo de atrapaniebla solo se puede ubicar de un solo sentido, es decir, una sola posición perpendicular con respecto al viento predominante, siendo el diseño más común. Estos modelos son empotrados al suelo y asegurados con cables de acero para la tensión de sustentación.

Tridimensional: son múltiples superficies que se encuentran templadas por dos o más pilares de forma que capture grandes cantidades de niebla, los atrapanieblas de es este tipo usualmente se diseñan e instalan en lugares con nieblas que provengan de diferentes direcciones, por lo tanto, se ofrece una multitud de frentes con superficies de condensación de agua, como por ejemplo el macro diamante (Carlos E. & Antofagasta, Chile)

2.3.4 Niebla

Comúnmente en la meteorología es referenciado a la suspensión de partículas de agua en el espacio de visibilidad en rango de un kilómetro, en ausencia del aire. Consiste en que las nubes que se encuentran cerca al suelo son partículas de agua con un volumen pequeño (40 micrones) que se encuentra en estado de suspensión. Todo el vapor que es capaz de contener a una temperatura y presión determinada se clasifica en espesor, persistencia y densidad (Tobías Alarcón, 2020).

La niebla se divide en dos clases:

- Niebla radiactiva. Es el enfriamiento del aire cercano a la superficie alcanzando una temperatura de localidad de rocío así formando niebla con ambiente de alta humedad relativa. Normalmente se da en la noche, la superficie se enfría por liberación de radiación y el aire por conducción (Eficiencia de Materiales en Atrapanieblas 2016). Este tipo de niebla son bastante reducidas ya que se dan en ciertos lugares con combinaciones y condiciones sinópticas diurnas. En definitiva, necesita de rocío dominante, ligera turbulencia y suficiente enfriamiento durante la noche.
- Niebla frontal. Es la interacción de aires, cuando hay descenso de la base de las nubes hasta la superficie (gotas de agua) y esta tiene una temperatura mucho mayor que la del aire, las gotas de lluvia se desvanecen formando así vapor de agua.

2.3.5 Variables Meteorológicas

Estos sistemas tienen numerosas variables, nombrando las más importantes en el desarrollo de la investigación son: Temperatura, Humedad, Punto de rocío, velocidad del viento y dirección del viento durante el periodo de tiempo en el cual se realiza el seguimiento.

2.3.6 Temperatura Atmosférica

La temperatura está determinada por el calor del área terrestre, es la sensación que se tiene del calor del aire en determinada zona. La temperatura atmosférica está alterada por la altura sobre el nivel del mar, por ejemplo, Tunja es una zona alta sobre el nivel del mar, por lo tanto, sus temperaturas son bajas. Otros elementos que pueden incidir son el viento o la presencia de elementos que generan sombra (Bosques, Edificaciones, entre otros).

En las zonas con influencia de un lago la temperatura es más estable que en un lugar sin ninguna acumulación de agua. En la zona montañosa cuando la temperatura alcanza su punto máximo la humedad presenta su punto mínimo y viceversa.

2.3.7 Humedad Atmosférica

Es la cantidad de humedad o vapor en el aire expresada en porcentaje (%), necesaria para llegar al punto de saturación. La saturación se genera debido a una elevación de humedad relativa con una misma temperatura o por la baja temperatura con la misma humedad (Lina Muñoz, 2020). Cuando el aire no es capaz de mantener la humedad se genera el rocío, es decir, que a mayor temperatura hay mayor evaporación y las partículas de agua están dilatadas o más separadas en el medio, con menor tamaño, por lo tanto, no puede precipitarse.

El alcance de una condensación se da cuando el aire se satura, al reducirse levemente la temperatura el peso y tamaño de las gotas de agua aumentan en consecuencia se precipitan (Blanca M. & Fredy C., 2014). El aire

saturado se reconoce con una humedad relativa de 100% y es aquí el punto de rocío (IDEAM, 2014). Por ejemplo, una humedad relativa del 70% quiere decir que el vapor de agua del 100% puede contener el aire a esta temperatura, de tal solo 70%.

La humedad se relaciona con la evaporación de agua de los ríos, mares, lagos, reservorios y en general, donde exista algún tipo de acumulación de agua. Entonces, en los escenarios con humedades del 100%, el ambiente se percibe totalmente húmedo y genera sensación de asfixia, y en humedad relativa del 0% es un ambiente seco.

2.3.8 Punto De Rocío

Con la Ecuación 2-1 se obtiene el punto de rocío o temperatura de rocío por el cual debe enfriarse el aire para que se logre saturar el aire y comience a condensarse como niebla, es decir, si la temperatura está próxima al punto de rocío mayor será la probabilidad de condensación (Cony C. & Yudy C. 2016). En definitiva, es la temperatura en la cual comienza a condensarse el vapor de agua.

$$P_r = \sqrt[8]{\frac{H}{100} * [112 + (0.9 * T)]} + (0.1 * T) - 112 \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Pr = Punto de rocío
T = Temperatura en °C
H = Humedad relativa

2.3.9 Velocidad Del Viento

La velocidad o fuerza del viento es el factor que influye en mayor o menor potencial en la colección de agua de niebla. El viento no es constante y están sujetas a periodos y amplitudes variantes del flujo del aire, por lo cual, el viento sobre la superficie terrestre es revoltosa y es dependiente a la orografía de la tierra. Teniendo en cuenta que la velocidad del viento no es constante y siempre existen ráfagas de vientos, la información se desvirtúa.

La velocidad del viento puede generar impactos en el colector de agua, la velocidad del viento resulta ser un factor importante en el crecimiento de la formación de niebla, que a menor velocidad del viento aumenta la formación de niebla y a mayor velocidad del viento la niebla disminuye debido a la perturbación que se genera en el proceso de formación.

2.3.10 Dirección Del Viento

La dirección del viento es considerada y ubicada en dos dimensiones expresadas en cantidades vectoriales con fines meteorológicos; la primera está en el plano paralelo a la superficie de la tierra, la otra componente es una perpendicular al plano anterior. La dirección del viento es medida por veletas y según la secretaría de la organización meteorológica (OMM, 2004), la instalación en estudios especiales no requiere de normativa de instalación, se puede instalar en diferentes alturas.

2.3.11 Instrumentación

La instrumentación se compone en parte a la electrónica analógica, se encarga principalmente de la lectura de datos provenientes de las variables físicas.

2.3.12 Sensores

Estos dispositivos proporcionan una señal de salida que es función de la magnitud que se mida, es decir, reaccionan ante cambios en una determinada variable; la naturaleza de la variable de salida puede ser digital o analógica, el tipo de variable en su salida puede estar de forma resistiva, capacitiva e inductiva.

¿Cómo elegir de manera correcta un sensor para medir una variable en el captador de niebla? Es importante tener en cuenta las características de la variable a medir y aspectos técnicos, ya sea el rango de medición, sensibilidad, precisión, ruido, resolución entre otros. Además, conocer el ambiente con el que trabajara el dispositivo.

Aspectos importantes a la hora de hacer este tipo de análisis.

2.3.13 Características Estáticas

- **Rango o Campo de medida**

El conjunto de datos que puede adquirir la señal de entrada o variable de interés, el sensor está en la capacidad de medir un máximo y un mínimo con una tolerancia de error.

- **Resolución**

El instrumento mide cambios a valores próximos de la variable a medir. Si el cambio es mínimo en la detección, este es más sensible y la división de la escala es más pequeña.

- **Precisión y Repetitividad**

La precisión es próxima al valor real obtenido, el valor se mide cada que se encuentra en la misma condición en repetidas ocasiones. Por ejemplo, tener múltiples medidas con determinado sensor en el punto de repetición, indica la cercanía entre un valor máximo y mínimo teniendo una dispersión de la variable. Sus unidades de exactitud se dan en porcentaje o ppm del sensor.

La repetitividad indica la misma salida ante repetidas mediciones con las mismas condiciones.

- **Sensibilidad y ruido**

La sensibilidad permite revelar la dimensión mayor o menor variación del cambio en la señal de salida de un sensor, dada por unidad de cambio de magnitud referente a la variable de entrada. Si la variación de salida aumenta y la señal de entrada de igual forma, el sensor tiende a ser más sensible. Es común que los instrumentos de adquisición de datos alcancen una perturbación aleatoria del propio sistema de medidas que afecte la señal de entrada a medir.

2.3.14 Características Dinámicas

- **Respuesta en velocidad y frecuencia**

Es el retraso que se puede generar entre el cambio de variable medida o de entrada respecto al cambio en la variable de salida, la señal de salida debe continuar sin retraso con los cambios de la señal medida.

Generalmente los sensores convencionales presentan una respuesta en frecuencia de pasa bajos.

- **Estabilidad**

Muestra la desviación en la salida del sensor con respecto al valor teórico, al cambiar medidas exteriores distintos al que se desea medir (condiciones ambientales, fuente de alimentación, entre otros).

Los sensores no siempre se comportan de forma lineal con la variable medida en ascenso o descenso, por lo cual se presenta la histéresis.

2.3.15 Sensor de temperatura

El sensor de temperatura permite transformar una variedad de cambios de temperatura en señales eléctricas que posteriormente son procesadas por un microcontrolador. El material con el que se compone el sensor es muy conductor de temperatura, este permite hacer cambios que se transmitan de forma rápida a todo el elemento del sensor y sus conexiones externas.

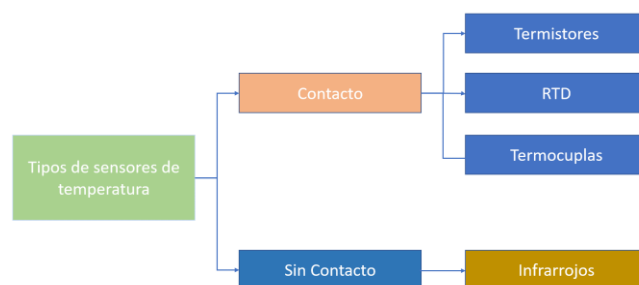


FIGURA 1: TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA

Fuente: Elaboración propia, 2022

Los tres tipos de sensores relacionados a la medición de temperatura atmosférica son de contacto como los de la Figura 1.

- **Sensor de temperatura Termistor**

Se basa en el comportamiento de la resistencia de los elementos semiconductores siendo variable en función de la temperatura, se encuentran dos tipos según las características del material con el que se construyen.

Termistores NTC (*Negative Temperature Coefficient*)

Al aumentar la temperatura disminuirá el valor de la resistencia, por lo cual, se les consideran que tienen coeficiente de temperatura negativo.

Termistores PTC (*Positive Temperature Coefficient*)

Al aumentar la temperatura, resulta el aumento de la resistencia y el coeficiente es positivo.

El limitante de los termistores son la no linealidad según la temperatura y tiene problemas de auto calentamiento. La ventaja en los termistores es su sensibilidad, respuesta rápida y son económicos.

- **Sensor de temperatura RTD (*Resistance temperature detector*)**

El sensor de temperatura RTD se basa en la diferenciación de resistencia del conductor de temperatura, el conductor se fabrica de materiales como níquel, platino o cobre. Cuando hay un aumento en la temperatura se ocasiona una agitación térmica de los electrones, por lo cual, termina aumentando el valor de la resistencia.

Los sensores RTD más comunes son:

Elemento enrollado: se diseñan con alambre que pasan alrededor de un núcleo de cerámica o vidrio.

Elemento Película: es una capa fina de película que es depositada en un sustrato cerámico.

Una característica importante de estos sensores son su funcionamiento de forma lineal, son de alta precisión y repetitividad. Pero, una de sus desventajas es el tiempo de respuesta porque son más lentas y es costoso comparado con otro tipo de sensores de temperatura. Son propensos a sufrir fallas por auto calentamiento, por lo tanto, se debe tener un control de corriente del circuito.

- **Sensor de temperatura Termopar o Termocupla**

Su funcionamiento se basa el efecto *seebeck*, al tener la unión de dos alambres con diferentes metales y sometido a un cambio de temperatura, se forma una diferencia de potencial en mV entre los dos alambres que es proporcional a la temperatura, por lo cual, aprovecha la señal.

Para tener en cuenta los termopares se considera una relación de temperatura y el voltaje no lineal. Por lo tanto, estos sensores necesitan de un circuito llamado compensación de unión fría y de un material que varía la magnitud del voltaje y temperatura, el problema es que se debe acondicionar con un termistor.

2.3.16 Sensor de Humedad

El sensor de humedad identifica la humedad del aire en espacios abiertos o cerrados. Actualmente los sensores están disponibles tanto analógicos como digitales, los analógicos están hechos de vidrio o cerámica, este absorbe el agua de la humedad relativa donde cambia la carga del condensador. El digital se basa en microsensors que convierten la señal de analógica a digital mediante un chip, su composición se basa en electrodos con polímeros teniendo como resultado la capacitancia del sensor.

No todas las mediciones en cualquier entorno son apropiadas con la misma tecnología, es por eso que existen tipos de sensores de humedad relativa como lo son: capacitivos, resistivos, condensación y humedad-temperatura integrado.

- **Sensor por Condensación**

Es un sensor especializado en la humedad relativa específicamente en el punto de rocío, su uso común deriva en el higrómetro óptico de espejo frío. El funcionamiento de este sensor es mucho más robusto que los demás, ya que hace circular la mezcla gaseosa por una cámara equipada con un espejo, el cual, es enfriado con la finalidad de

condensar el vapor en el espejo o evaporar. Se proyecta un haz de luz sobre el espejo donde refleja sobre una foto resistencia, el sistema mide la intensidad lumínica real sobre la foto resistencia y la distorsión de condensación presentada por el espejo, por lo tanto, la diferencia entre la resistencia y la distorsión permite medir el valor de humedad.

- **Sensor de humedad Capacitivo**

Los sensores de humedad capacitivos son creados con material dieléctrico que absorben o expulsa el vapor de agua del ambiente según los cambios de humedad. Con los cambios resultantes de la constante dieléctrica se crea una variación en el valor de la capacitancia eléctrica del sensor por lo que su impedancia cambia con la humedad.

Este sensor es ideal en ambientes con altas temperaturas porque el polímetro dieléctrico soporta altas temperaturas, son apropiados en aplicaciones que necesitan alto grado de sensibilidad en nivel bajo de humedad con respuesta veloz. Sin embargo, el sensor tiende a saturarse y su lectura se transforma en no lineal.

- **Sensor de humedad Resistivo**

Compuestos de una rejilla de electrodos cubiertos con sal sensible a la humedad. Con el paso de la humedad sobre la capa de protección, el electrodo es ionizado y se excita por una corriente así cambiando el valor de la impedancia del sensor. La impedancia se usa para calcular el porcentaje de la humedad relativa.

Son relativamente precisos, aunque si son más lentos en el tiempo de respuesta. Hay valores altos de resistencia en humedad inferior al 20 % por lo que es apropiado en intervalo alto de humedad.

- **Sensor de Humedad y temperatura integrado**

Están integrados en un solo chip, permite adquirir valores de temperatura y humedad del ambiente en un solo dispositivo. Tienen un proceso de integración electrónica de alta confiabilidad y es estable a largo plazo. En su interior hay un sensor capacitivo para la humedad.

2.3.17 Sensor de Viento

El sensor de viento está diseñado para proporcionar información de la fuerza del viento, la medición tiene en cuenta la velocidad instantánea del viento.

- **Anemómetro de copelas**

Su estructura está formada por casquetes semiesféricos que miden la velocidad de rotación con respecto a el eje Y por la acción del viento. Actualmente la medición de la velocidad de giro de las copelas se realiza por medio de transductores eléctricos que son resistentes a vientos de hasta 40 m/s.

- **Anemómetro de compresión**

Su diseño tiene forma de L y se basa en el tubo de Pitot que está formado por dos tubos, el primero de ellos se orienta en dirección a las corrientes de aire (presión dinámica y estática) y el otro, en un orificio lateral conectado a un medidor de presión. La diferencia de presiones de los tubos medidos determina la velocidad del viento.

- **Anemómetro Ultrasónico**

Este tipo de sensor mide la componente horizontal del viento de acuerdo a la velocidad de propagación del sonido. Lo que mide es el tiempo que demora en desplazarse la señal de sonido en cruzar una distancia conocida. El intervalo

de tiempo se relaciona con la velocidad del viento entre receptor y emisor, de igual manera se puede determinar la dirección del viento. El inconveniente es el alto consumo, por lo que necesita conectarse a una red eléctrica de 120 v.

- **Anemómetro de filamento caliente**

Es adecuado para turbulencias y se mide con la disipación de calor de un conductor cuando se expone al viento, el material es un metal de diámetro pequeño (platino o níquel). Cuando la temperatura del filamento es constante, la corriente eléctrica es función conocida de la velocidad del viento o si el viento enfría el conductor varía su resistencia. El anemómetro de filamento caliente es proporcional a la corriente que circula con la velocidad del viento (René G. & Carolina M. 2005).

- **Veleta**

Mide la dirección del viento, usualmente está formada por una placa plana el plano vertical con un contrapeso que gira libremente orientándose en la dirección del viento por acción de momento inercial.

2.3.18 Sensor de nivel

Los sensores de nivel operan de manera directa o utilizando la presión hidrostática, tienen en cuenta las características de los fluidos y características eléctricas. Los sensores permiten hacer una interpretación de nivel real, se dividen en medidores de nivel líquidos y sólidos. A continuación, en la Figura 2 se presentan los tipos más importantes para medir los niveles de fluidos.

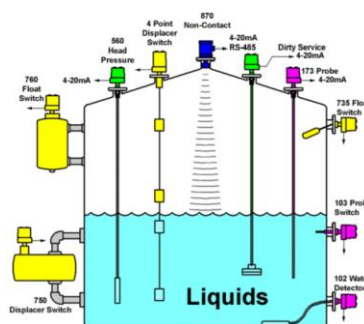


FIGURA 2: INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE NIVEL

Fuente: Cortés A. Teth, 2014

- **Medida Directa - Sonda**

Son utilizados con una regla que se introduce en el tanque donde se mide la presión atmosférica. Con el tanque abierto, se realiza la lectura de nivel con la regla que se encuentra mojada por el líquido.

- **Presión Hidrostática – Presión Diferencial**

Consta de un diafragma que, con el contacto con el agua de un tanque, mide la presión hidrostática desde diferentes profundidades. Con la presión que se encuentra en la parte exterior del sensor y la medida por el diafragma se produce un diferencial de presiones que sirve para calcular el nivel de agua en el tanque.

- **Características Eléctricas – Medidor Conductivo o Resistivo**

Lo compone ductos y un circuito electrónico que es activado cuando los electrodos entran en contacto con el líquido, si cambia el nivel agua en el tanque la corriente varía según lo mojado que se encuentre el electrodo.

▪ Características Eléctricas – Medidor por capacidad

El sensor cuando detecta un fluido se produce un campo electrostático, el campo reacciona con los electrodos del sensor, generando un cambio en la capacitancia, lo que forma una señal de que el líquido ha llegado a un nivel indicado. Se acondiciona la salida en valores capacitivos y resistivos, que son entregadas en valores de señales analógicas.

▪ Características Físicas – Medidor por Ultrasonido

El sensor ultrasónico envía impulsos desde la parte superior del tanque y este refleja en la superficie del líquido que se encuentra en la parte inferior del tanque, los impulsos regresan en cierto tiempo el cual se traduce en la distancia. El receptor determina la distancia y el nivel líquido

2.3.19 Transmisión de datos

• Tecnología LoRa E32-TTL-100

De la familia E32 es el modelo más básico de acuerdo a las características de la Tabla 2.1, los LoRa funcionan con comunicación inalámbrica que usa las ondas de radio adoptando la tecnología LPWAN (redes de amplio espectro y baja potencia), maximiza la comunicación de larga distancia y un menor consumo de energía, permite ahorrar costos adicionales de repetidores. El módulo inalámbrico UART LoRa permite enviar datos y alcanzar rangos extremadamente largos a velocidades de datos bajas. LoRa permite establecer una comunicación de forma remota que no requiera al acceso a internet o Datos.

Especificaciones	E32-TTL-100	Modos de operación			Descripción
Frecuencia de operación	410 MHz-441 MHz (predeterminado 433 MHz)	Modo	M1	M2	
Alimentación	2,3 V-5,5 V CC	Modo 0 - Normal	0	0	UART y el canal inalámbrico, está activado. El receptor funciona en modo 0 o modo 1
Alcance edificación/Línea de vista libre	400 m - 3000 m (Max)				
Potencia de transmisión	100mW (+20dBm)	Modo 1 - Wake-Up	0	1	Se abre el UART y el canal inalámbrico. El modo agrega el código de preámbulo de la transmisión del paquete de datos para que pueda despertar el receptor.
Sensibilidad de recepción	-146 dBm				
Logitud de emisión	512 bytes, 58 bytes por paquete	Modo 2 Power-saving	1	0	UART está deshabilitado. El módulo inalámbrico funciona en Modo (despertar por radio). Transmite datos después de recibir el datos inalámbricos
Longitud de recepción	512 bytes de longitud, 58 bytes por paquete				
Tasa de datos en velocidad RF	2.4kbps	Modo 3 Sleep	1	1	Ajuste de parámetros.

Tabla 2.1: Características del E32-TTL-100

Fuente: Hoja Técnica

Es ideal el uso de una antena para amplificar la cobertura de la señal, esta emite ondas de radio sobre el plano horizontal.

2.3.20 Correlación polinómica

En relación a la variable independiente y la variable dependiente de un plano cartesiano es modelado un polinomio de grado n , se ajusta una relación no lineal de las variables X y Y . La regresión polinomial en este proyecto tiene como objetivo describir los fenómenos no lineales como el climatológico. En la correlación se ajusta a un modelo, es común en estos estudios realizar pruebas para determinar el orden apropiado del polinomio.

2.4 Marco Geográfico

La ciudad de Tunja es la capital de Boyacá, se encuentra ubicada sobre la cordillera Oriental, parte central del departamento, se localiza en las coordenadas $05^{\circ}32'7''$ de latitud norte y $73^{\circ}22'04''$ en la longitud oeste, la ciudad cuenta con alturas que van desde los 2632 metros sobre el nivel del mar hasta 3150 m.s.n.m Figura 3a. Tiene una extensión de 121.4 Km^2 donde la temperatura durante el año varía generalmente de 6°C a 18°C y 76% de humedad relativa promedio durante el año según un informe de la weather spark Figura 3b.

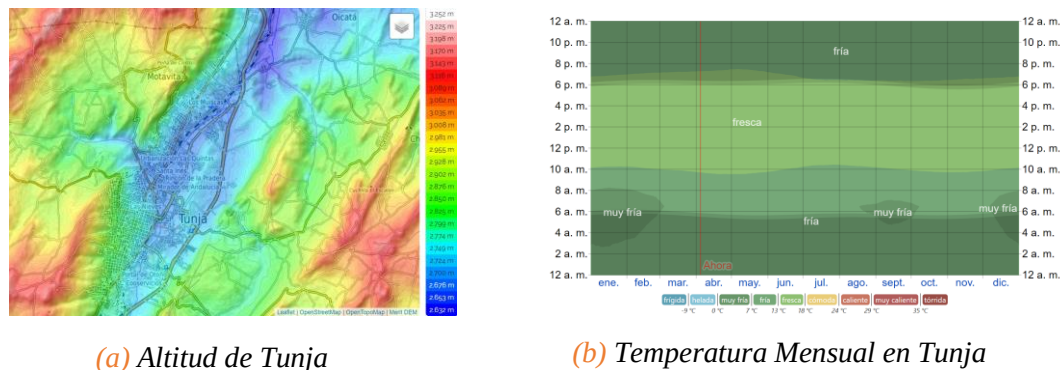


FIGURA 3: CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DE TUNJA

Fuente: es-co.topographic-map.com

Con la información anterior, es comprendido el funcionamiento relacionado a captadores de niebla y de allí es extraída información fundamental para el desarrollo de este trabajo, entre ellas la cantidad de agua que puede ser recolectada con diversas redes de diferentes clases y las variables que influyen en el entorno del mecanismo. En el estudio bibliográfico se encontró una ecuación importante, la Ecuación 2-1 del punto de rocío, ya que esta permite conocer en qué momento comienza la condensación en el aire teniendo en cuenta la temperatura y la humedad.

Otro concepto importante es el viento, con el viento se puede determinar en mayor o menor medida la recolección de agua. La ciudad tiene una variedad de altitudes óptimas para instalar el sistema con temperaturas que alcanzan el rocío, cuando la superficie de la tierra alcanza temperaturas bajas debido a la pérdida nocturna de calor. Para generar niebla es necesario que la noche este despejada, la pérdida de calor máxima, vientos mínimos y humedades altas.

Capítulo 3

Diseño Metodológico

En los siguientes capítulos, se establece un diseño metodológico para caracterizar el sistema de forma experimental por lo que se adopta un sistema estándar de captación de niebla que reciba y lea la información de los equipos de medición calibrados y así obtenga información que determine la recolección de agua.



Tipo De Investigación

El enfoque investigativo de los atrapanieblas es cuantitativo, su desarrollo se encamina hacia la recolección de datos y tabulación para posibles alternativas de solución, con base a la información recolectada, se hace una caracterización de acuerdo a la zona de estudio. La finalidad de este trabajo de grado es realizar una mención sobre las variantes climatológicas que se presentan en la zona de estudio. Se especifica propiedades importantes del fenómeno según el análisis, este estudio pretende medir variables que posteriormente evalúen diversos aspectos de acuerdo al entorno del sistema captador de nieblas.



Hipótesis

Caracterización de un sistema captador de niebla encargado de medir variables meteorológicas que requieren los mecanismos durante el día y la noche. Con los datos medidos y almacenados se puede hacer correlaciones polinómicas para determinar la recolección de agua según la hora y lugar.

Con este tipo de sistemas se espera a futuro mejorar la eficiencia de los métodos de captación de agua. Si es implementado con un sistema mecánico que recoja la malla, permitirá maximizar la vida útil de los modelos actuales, se presentará un ahorro económico de reconstrucción y disminución del daño ambiental por continuo cambio de mallas de fibra plástica.

3.1 Mecánica del sistema captador de niebla

En el presente capítulo, se explica el diseño y montaje del sistema captador de niebla, siendo fundamental para adquirir los datos de su entorno y analizarlos en los siguientes capítulos de este libro. De acuerdo a los conceptos del marco referencial relacionados al captador de niebla se diseña el sistema estructural de forma bidimensional en Autodesk inventor (Programa de diseño 3D), con el diseño se establecen los materiales adecuados para este experimento. El mecanismo tiene la capacidad de recolectar agua entre 3 y 4 litros de agua, de acuerdo al diseño de la Figura 4 a escala 1:1 de cada uno de elementos medidos en cm para los pilares, el tamaño de la malla Rachell, el espacio que ocupa todo el mecanismo y los cables de tensión.

3.1.1 Diseño del sistema bidimensional

Con el dimensionamiento en el programa se hace el montaje del sistema experimental. El montaje se basa en una polisombra tipo Rachell del 80 % del poro abierto, está ajustada en sus 4 esquinas con Tornillos Hexagonales de 1/2X2” sujetos a una placa de madera de tipo ajuste con medidas de 3x1 cm x 2.5 m. de Cedro Blanco. El ajuste que se observa en la *Figura 5b* la cual permite templar la malla de una manera uniforme durante los fuertes vientos e incluyendo la placa que atraviesa el centro de la malla de la Figura 4. El principal objetivo es poder recolectar la

mayor cantidad de agua sin generar un efecto de curvatura en la malla, y así mejorar la recolección de agua según los estudios previos que se hicieron en el marco referencial para obtener mejores resultados.

Figura 4 *Captador de niebla bidimensional*

Nota. Diseño que representa el captador de niebla, distribución de sensores, almacenamiento y medidas en cm.

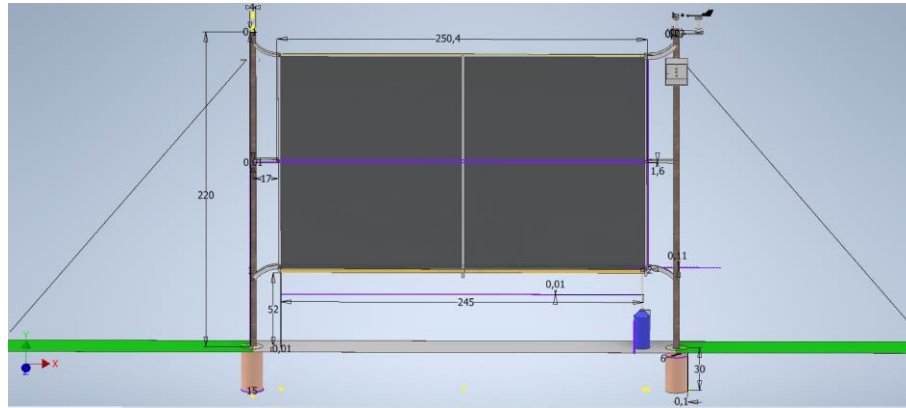


FIGURA 4: DIMENSIÓN DEL MECANISMO CAPTADOR DE NIEBLA

Fuente: Elaboración Propia, 2022

En la *Figura 5* se ajusta la malla hacia los pilares de soporte con tornillos Hexagonales de 3/8X4" que es templado con cable de acero galvanizado 1/8" que soporta hasta 650 kg. Los soportes estructurales son dos pilares de Tubo cuadrado 70 x 70 x 1.5mm x 6m estructural HR50 de acero. Los soportes son empotrados a una distancia de 30 cm sobre el terreno a instalar, obteniendo una altura de 220 cm disponibles para instalar la malla de 150 cm de altura y 250 cm de ancho. La separación entre pilares es de 290 cm dejando espacio de 20 cm entre la base estructural y la malla.

Figura 5 *Tensión malla y Canaleta*

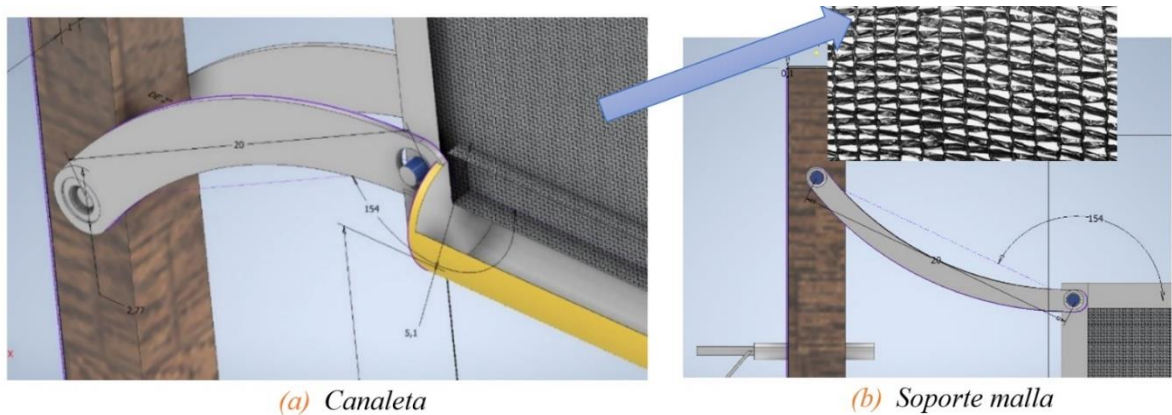


FIGURA 5: A. DIMENSIÓN DE CANALETA, B. CABLE GALVANIZADO

Fuente: Elaboración Propia, 2022

En la *Figura 5a* y la *Figura 6a* se observa la canaleta de recolección de agua a una altura de 52 cm sobre el suelo, se distribuye la malla Rachel con una canaleta de 2" de diámetro con longitud de 245 cm que se extiende hasta el codo del tanque de almacenamiento. Se separa la malla de los pilares 20 cm para evitar golpes y tensionar la malla, el cable que tensiona la malla tiene un Angulo de 154° con respecto a la canaleta.

Figura 6 Distribución

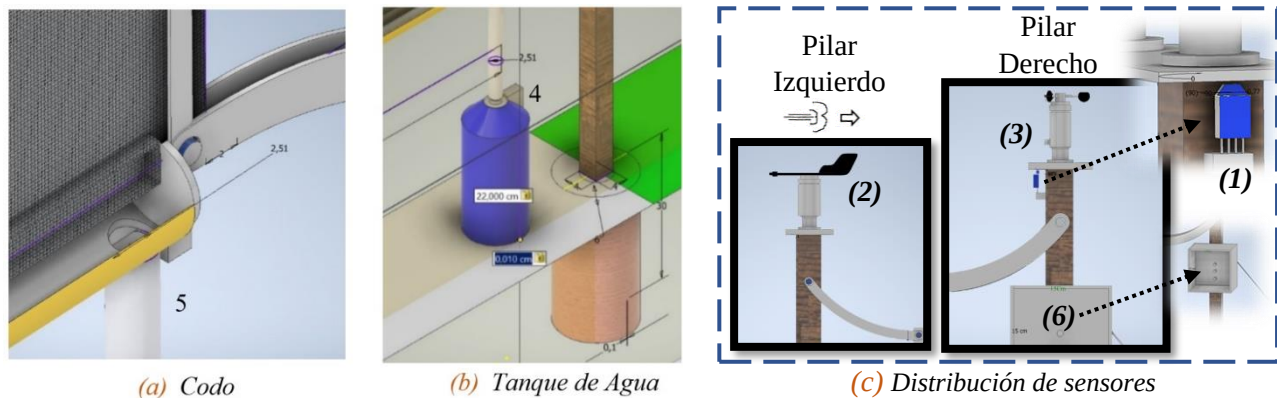


FIGURA 6: PARTES DEL SISTEMA

Fuente: Elaboración Propia, 2022

La Figura 6c establece la distribución sensorial de la malla en donde (1) es la posición del sensor de temperatura y humedad, (2) y (3) son los sensores medidores del viento que son dejados en lo más alto del sistema para obtener medidas que sobre pasan la malla. El numeral (6) corresponde a la caja de almacenamiento para la tarjeta de integración y la batería. La caja es diseñada de forma hermética, así protege la circuitería del polvo y agua proyectada. La caja es dejada en la estructura derecha con el fin de evitar la extensión de cable a través de todo el sistema y así se genere ruido por cableado.

En la Figura 7 se dimensiona el tanque de almacenamiento de agua con un tubo de PVC de 3" de diámetro con 52 cm de largo, se elige la forma de cilindro para tener mejor precisión en la recolección de agua, es la variable más importante a la hora de comparar su medida con otras variables, ya que el experimento consiste en la recolección de agua como fuente alternativa, por lo tanto, la cantidad de agua debe ser homogénea a la hora de la recolección.

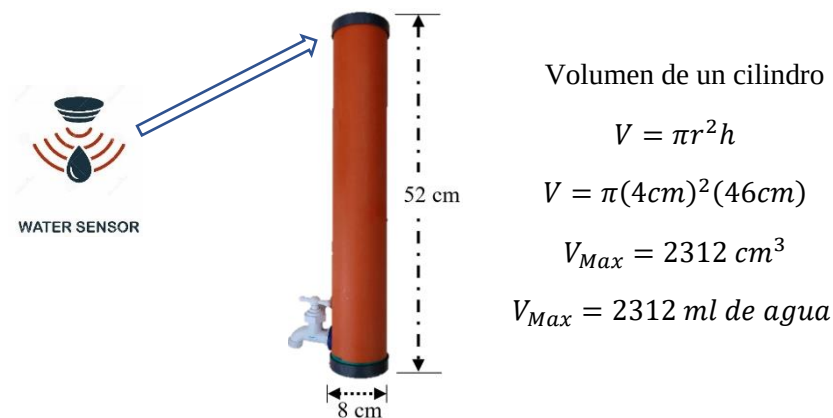


FIGURA 7: TANQUE DE AGUA

Fuente: Elaboración propia, 2022

El diseño anterior fue basado en la recopilación de la información obtenida de múltiples trabajos investigativos que se mencionaron en el marco referencial. Con el programa Autodesk inventor se hace una visualización previa para poder determinar los materiales necesarios para implementar el sistema mecánico de tipo bidimensional, con el diseño y las medidas del sistema anterior se puede desarrollar un sistema recolector con una malla de densidad del 80% y recolección de agua de hasta 3 litros diarios, pero la implementación del sistema dependerá del

presupuesto final y el montaje de la red podrá incrementar o disminuir sus dimensiones, por lo tanto, el nivel de agua cambiara.

Capítulo 4

Diseño De Integración De Sensores

En este capítulo se considera dan las variables de estudio, partiendo desde las características necesarias para determinar los sensores con mejor rendimiento a la hora de tomar los datos experimentales. En la Tabla Anexos 1 y Tabla Anexos 2 se priorizan las características eléctricas, dinámicas y estáticas de cada uno de los sensores, de la misma forma los tipos de sensores que relacionan la variable medida. El desarrollo de este proyecto tiene un presupuesto relativamente bajo, por tal razón, se tiene en cuenta tres sensores que ofrezcan un rendimiento aceptable en el mercado.

4.1 Estudio y Comparación de sensores

Bajo las condiciones eléctricas más importantes se describe y compara que sensor es mejor o no apto, priorizando el costo-rendimiento. Se mencionan sensores beneficiosos en el posible caso de aumentar los costos de implementación en sistemas captadores de agua a futuro.

Con el análisis final de la instrumentación se diseña la tarjeta de integración de sensores teniendo en cuenta el consumo eléctrico de los dispositivos elegidos, haciendo revisión de la hoja técnica para ver los consumos eléctricos o recomendaciones del fabricante para determinar si requiere de filtros, regulación o resistencia Pull UP-Down.

4.1.1 Instrumento - Temperatura

El sistema captador de niebla se expone a un ambiente hostil, por lo tanto, se consideran solo sensores de contacto y no sensores sin contacto que solo miden la temperatura de superficies.

El sensor RTD de 3 hilos Wzp-035 de platino que se encuentra en la Tabla Anexos 1 es estable, preciso y de mayor repetibilidad que los otros dos sensores, debido a la conexión de 3 hilos que resuelven bien el problema de error generado por los cables. La exactitud del RTD es de $0,35 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ y el termopar es de $41 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, por lo tanto, el RTD tiene mayor rendimiento por su respuesta lineal, pero el sensor duplica su precio comparado con los otros dos sensores. Las dimensiones del RTD no son favorables comparadas con los sensores tipo termistor y termopar referente a la Tabla Anexos 1, el RTD requiere de un módulo transmisor como el MAX31865 para tomar lectura de la resistencia y convertirla en señal analógica para ser interpretada por el microcontrolador.

Cabe resaltar que si existe la disponibilidad de más recursos económicos. El sensor RTD es recomendable usarlo comparado con los otros dos sensores por su optimo rendimiento, al implementarlo con mecanismos mucho más grandes es funcional para análisis de datos en tiempo real por su precisión.

La Termocupla Tipo K referencia E52-CA1DYM6 1M tiene incorporado un circuito de compensación de unión fría integrada, dado lo anterior no hay que diseñar un circuito que altere la magnitud del voltaje y temperatura que usualmente se realiza en este tipo de sensores. El consumo en estado activo es tan bajo que puede ser conectado directamente al microcontrolador. La respuesta dinámica con respecto al tiempo de lectura es de $0,17 \text{ s}$ comparada

con el sensor tipo termistor de 2s, es hasta 12 veces más rápido. La resolución es de 0,25 °C es bastante aceptable, pero en comparación con el sensor tipo termistor NTC baja su rendimiento.

La temperatura atmosférica que se espera registrar en la ciudad de Tunja no es inferior a 0°C o superior a 30°C, de acuerdo con los 3 sensores de temperatura de la Tabla Anexos 1. El rango de medida es alto, los dos primeros sensores son excesivamente amplios, comparado con el sensor tres Am2301 que tiene incorporado un sensor tipo termistor NTC digital básico para medir el aire circundante en menor rango y el costo es inferior al RTD y la termocupla, por lo que lo hace viable en el costo-beneficio en comparación a los otros.

En la Figura 8 se muestra los errores de temperatura típicos y máximos del sensor *Am2301*. Los valores típicos según la hoja técnica indican que la temperatura que se espera medir en el atrapanieblas conserva la precisión en $\pm 0.3^\circ\text{C}$. El sensor se adapta mejor a la aplicación debido a la precisión, entendiendo que, bajo consumo eléctrico, no necesita de módulos de conversión, puesto que tiene protección en ambientes hostiles y de fácil instalación.

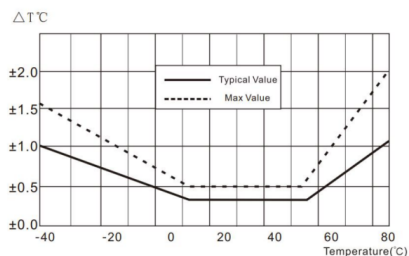


FIGURA 8: ERRORES DE TEMPERATURA TÍPICOS Y MÁXIMOS

Fuente: Data Sheet AM2301 - Humidity and Temperature Module

El único inconveniente que presenta el sensor *Am2301* es la toma de datos nuevos cada 2 segundos, pero en el Capítulo se describe la tasa de muestreo que requiere más de 2 segundos.

4.1.2 Instrumento – Humedad

Anteriormente se menciona el sensor de referencia *Am2301*, el cual está integrado en un solo chip el sensor de humedad capacitivo y temperatura. El sensor de humedad tiene un rango de medida amplio, desde 0 hasta el 100 % algo que no cumple el sensor resistivo *Hr202*, este solo tiene operación del 20 hasta el 90% de humedad, y de acuerdo a la investigación realizada la humedad relativa en la ciudad de Tunja puede ser superior al 90 %, por lo tanto, el sensor resistivo aumenta su margen de error en posibles datos en muestras de humedad alta. De igual forma, el tiempo de respuesta del sensor dos es más lenta que el *Am2301*.

Si la zona de estudio no supera el rango de operación del *hr202* su funcionamiento es óptimo para la aplicación del atrapanieblas, el instrumento mide la humedad relativa con linealidad, bajo consumo de energía y alta relación rendimiento-precio en comparación a los otros sensores de humedad.

El instrumento de medición *S8000* por condensación es un sensor de precisión que mide directamente el punto de rocío. Tiene medidas de humedad sin desviación a largo plazo en todo rango de operación, proporciona sensibilidad muy alta y respuestas rápidas, incluso en niveles bajos de humedad. El sensor de tipo condensación tiene la gran ventaja de medir la condensación sobre una superficie, por ejemplo, la malla captadora de niebla. Es un sensor de precisión de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ superando en gran medida el sensor capacitivo y resistivo permitiendo registrar

la información en memoria o transmitirla de forma inalámbrica, pero su capacidad de funcionamiento requiere de una red eléctrica de 120 v, por lo cual no es viable su uso por el modo de implementación del proyecto.

Según las especificaciones y comparaciones que se mencionaron con respecto a los sensores de temperatura y humedad, resulta viable el sensor **Am2301** para la toma de datos del proyecto.

4.1.3 Instrumento - Velocidad del viento

Los tres dispositivos que miden la velocidad del viento en la Tabla Anexos 2 requieren de una fuente de suministro superior a 9 v y se necesita de una batería portable para la alimentación. El anemómetro de copelas *JL-FS2* tiene la misma resolución de medida que el anemómetro de filamento caliente *LT-YK2005AH*, pero este último tiene una variedad de desventajas y son el rango de medida de apenas 0,2 m/s Min y 20 m/s Max comparado con el de copelas que tiene el rango efectivo de medición de velocidad desde 0 hasta 30m/s, el error o precisión del sensor es mayor, el anemómetro de filamento caliente es robusto y pesado comparado los otros dos anemómetros y es más costoso que el de copelas. La ventaja del anemómetro de filamento caliente es la capacidad de retener hasta 16000 datos, contiene su propio microprocesador de interfaz de computadora RS232 ofreciendo una mejor exactitud.

El anemómetro con tubo de Pitot tiene el mejor rendimiento que los anemómetros 1 y 3 de la Tabla Anexos 2, el rango de medición de velocidad es tres veces mayor al de filamento caliente y su resolución es de 0,01m/s con precisión de $\pm 2,5$ %. Es un anemómetro ideal para medir la velocidad del viento que pasa por el sistema captador de nieblas, es funcional para implementación de atrapanieblas más robustos, como el estudio de atrapanieblas tridimensionales este anemómetro no es factible para su uso en este proyecto, puesto que mide otras variables que no son requeridas en este trabajo como son la presión del aire y caudal, su uso en esta investigación es innecesaria por la cantidad de variables que mide.

Lo más recomendable es el anemómetro de copelas por su bajo consumo energético, la resolución y precisión es superior al *LT-YK2005AH*. El anemómetro tiene un modo de señal de salida de 0 a 5 v, se adecua a microcontroladores.

4.1.4 Instrumento – Nivel de agua

La dimensión y diseño del tanque de reserva es un factor importante a la hora de identificar el sensor de nivel adecuado para la medición, los 3 sensores que se observan en la Tabla Anexos 2 son de diferente tipo de medición. El primero es un sensor por transmisión hidrostática de referencia *KIT0139* entrega en su salida una señal de corriente de 4mA hasta 20 mA con precisión del 0,5 % en diversas profundidades. Es un sensor optimo en periodos largos de medida y tanques de profundidad de hasta 5 metros. Si existiera la posibilidad de incrementar la dimensión del atrapanieblas el sensor de transmisión hidrostática se recomendaría para esta aplicación. En este estudio no se recomienda su adaptación, debido a que requiere de una fuente de 12v algo que no sucede con los otros dos sensores que son alimentados con 5 v. En este trabajo las dimensiones del tanque son de apenas 2,3 litros de reserva y el sensor adopta mejor rendimiento en mayores profundidades.

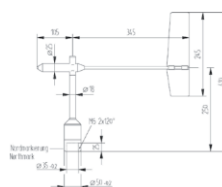
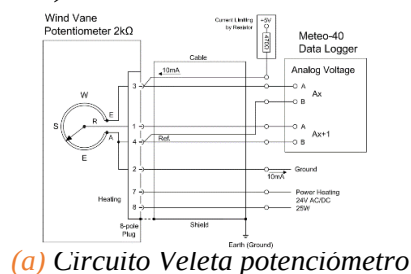
El sensor ultra sónico *HC-SR04* mide la distancia entre dos puntos con máximo de 450 cm, con el diseño del tanque de la *Figura 7* se puede determinar la cantidad de agua en cm^3 con precisión del $\pm 3mm$, el sensor ultrasónico no requiere de módulos que transforme la señal que se adecue al microcontrolador como lo hace el *KIT0139*. La alimentación es de 5 V dc, el mismo valor del sensor *Am2301*. Eso quiere decir que no hay necesidad de agregar un regulador de voltaje extra para interconectar los sensores, solo se necesita de un regulador que soporte la corriente de ambos sensores. El medidor resistivo *HW-038* tiene las mismas características de consumo eléctrico

4.1.5 Instrumento - Potenciómetro Veleta

Con la consideración anterior, se opta por el diseño de una veleta y para facilitar el proceso de diseño, se hace la revisión en tiendas oficiales de diseño de instrumentación relacionados a veletas. Se encontró (*Deutsche windguard, 2018*) encargada de calibración de sensores de viento evaluando sistemas de medición con ángulo de referencia en diferentes tipos de señal de salida como los observados en la Tabla 4.1.

Sensor Type	Output Signal	No.
Wind vane	Digital	1
	Analog	2
	Ratiometric	3

Con la propuesta aplicada a sensores de bajo costo se elige la veleta de potenciómetro que produce una señal de salida radiométrica. El diseño que se hace es la variabilidad de una resistencia obtenida desde un potenciómetro rotativo de 10 K Ω , dependiendo de la posición de acuerdo a la rotación de la veleta se mide el voltaje de la señal de salida que es producida por la caída de voltaje a través del potenciómetro. El circuito representativo de la *Figura 9a* es típico de una veleta de potenciómetro dada en la hoja de especificaciones de *Windspeed Ltd. (Vector Instruments)*.



(c) Sensor de viento S21210

FIGURA 9: CIRCUITO TÍPICO DE UNA VELETA DE POTENCIÓMETRO

Fuente: Deutsche windguard, 2018

El diseño de la veleta se encuentra en la Figura Anexos 3.

4.1.6 Selección de microcontrolador

El microcontrolador debe cumplir con los parámetros necesarios para el monitoreo y envío de datos. Se busca un microcontrolador que permita desarrollar una tarjeta de integración para interconectarlo con los sensores y el módulo de transmisión de datos. Las características que debe tener el microcontrolador se basan en el tipo de información que envía cada uno de los sensores analizados anteriormente. El sensor de temperatura y humedad requieren de un protocolo de comunicación digital. El sensor de velocidad del viento conversión analógica y el sensor de nivel requieren de un pulso de disparo como el PWM, capacidad de memoria y comunicación UART para el módulo loRa. Para ello se proponen el Arduino o PIC.

	Arduino - Atmega328	PIC 16f877A
Bus width	8 bits	8 bits
Protocolo de comunicación	I2C, SPI, USART	I2C, SPI, USART
Numero de pines	30	40
Pines Analógicos entrada	8	8
I/O	12	33
Memoria	Flash, SRAM, EEPROM	SRAM, FLASH
Flash	16 KB	14 KB
Consumo de energía	19 mA	25 mA
Frecuencia de Reloj	16 MHz	20 MHz
Tensión de Alimentación	5 v - 12v	2 v - 5,5 v
Peso	7 gr	6 gr

Tabla 4.2: Características de los microcontroladores

Fuente: Elaboración propia, 2022

La resolución, el protocolo de comunicación y el número de pines analógicos son iguales, el uso del sensor de viento y el módulo LoRa funcionan para ambos microcontroladores. El Arduino tiene 21 pines digitales menos que el PIC, teniendo en cuenta que solo se requiere de 6 pines digitales para el módulo loRa, 2 para el Trig-Echo del sensor HC-SR04 y uno del sensor Am2301. El consumo energético del Arduino es inferior al PIC es ideal para mayor durabilidad en la batería de alimentación de todo el sistema. El voltaje de la batería que se va implementar esta entre 9v y 12v, por lo tanto, el PIC necesita de un regulador de voltaje, mientras el Arduino lo trae incorporado. En relación al costo beneficio de ambos microcontroladores es más confortable el Arduino por sus características benéficas en este trabajo.

4.2 Diseño de tarjeta para adquisición de datos

Teniendo en cuenta el estudio de sensores en el apartado anterior, se diseña un circuito placa de dos capas para distribuir la conexión de sensores y transmisión de acuerdo a las especificaciones de cada hoja técnica.

4.2.1 Reguladores de voltaje

La tarjeta tiene entradas analógicas y digitales [Figura 10c] que están identificadas para su respectivo sensor, cada dispositivo tiene un regulador de tensión [Figura 10a-b] para evitar saturar y quemar el microcontrolador o mantener un voltaje constante durante su uso. Los sensores de humedad-temperatura (Am2301),

el sensor ultrasónico (HC-SR04), la veleta y el módulo LoRa E32-TTL-100 requieren de una fuente de alimentación de 5 Voltios máximo, los fabricantes recomiendan estos voltajes típicos para tener mayor rendimiento, y en consideración que el Arduino nano tiene la capacidad de suministrar dicho voltaje en sus salidas, el consumo de corriente se limita a un máximo de 40 mA y 50 mA con voltajes de 3.3v, por lo tanto, se evita el consumo eléctrico del Arduino para los dispositivos por la corriente máxima de 133mA en su máxima eficiencia. En este diseño se deja la Tierra (Gnd) común en todo el circuito.

	Power Supply	Working Current		
HC-SR04	+5 V DC	15 mA		
E32-TTL-100	3.3 V DC-5 V DC	Transmitting power	110 mA	M0 o M1
		Receiving Current	14.5 mA	
Am2301	3.3 V DC-5 V DC	8 mA		
Arduino Nano	5 V DC-12 V DC	19 mA		
JL-FS2	DC12-24V	Power consumption	MAX≤0.3W	

Tabla 4-1: Consumo Eléctrico de dispositivos

Fuente: Elaboración propia, 2022

Nota: Los valores y referencias de cada uno de los componentes electrónicos se encuentran en la Tabla Anexos 3 ya que son elementos de montaje superficial y tienen un código de identificación extensa.

Los valores de los condensadores en las entradas y salidas de cada regulador son dados por recomendaciones de los fabricantes que se encuentran en la *hoja técnica*.

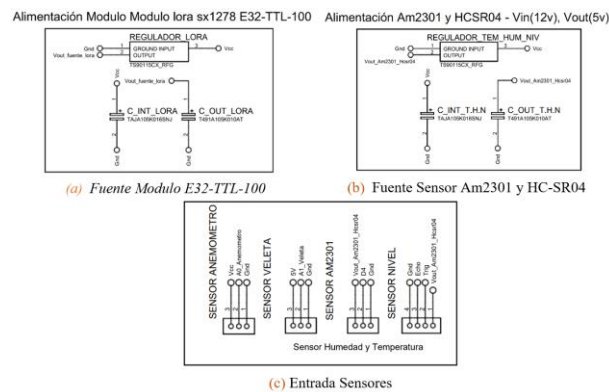


FIGURA 10: REGULADOR DE TENSION Y ENTRADAS DE SENSORES

4.2.2 Tarjeta de transmisión y recepción de datos

Tenido en cuenta los modos de operación del módulo LoRa E32-TTL-100 que se encuentran en la Tabla 2.1 se establece una conexión en las salidas digitales del Arduino D7 y D8 para determinar los estados según el modo. El fabricante LoRa menciona que los módulos UART con niveles TTL funcionan si se realizan conexiones de resistencias pull-up con rango de valores entre 5 y 10 K Ω para los pines Tx y Rx. En la *Figura 11* se muestra las conexiones del transmisor y receptor, el transmisor es conectado directamente al Arduino y el receptor LoRa es conectado al módulo *USB to TTL CP2102* para establecer una comunicación serial con LabVIEW. El diseño completo de la tarjeta se encuentra en la *Figura a.* de anexos.

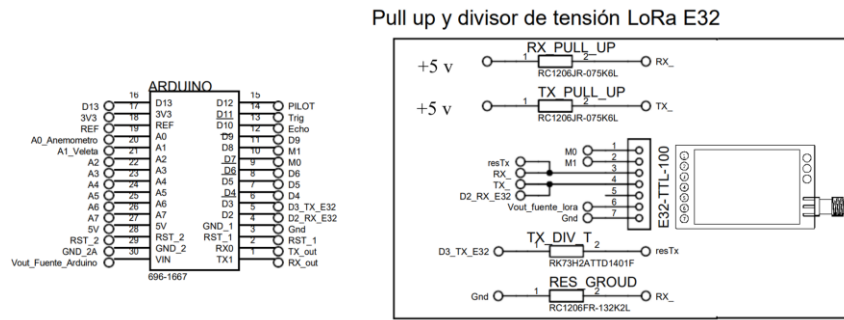
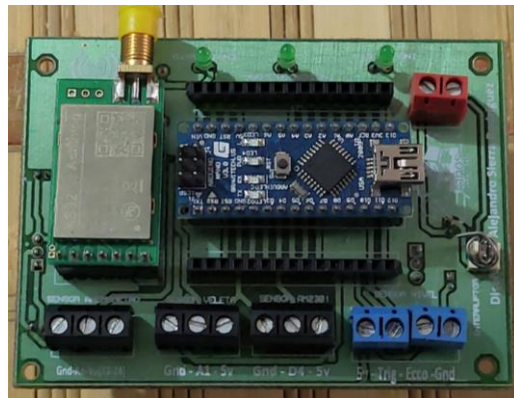


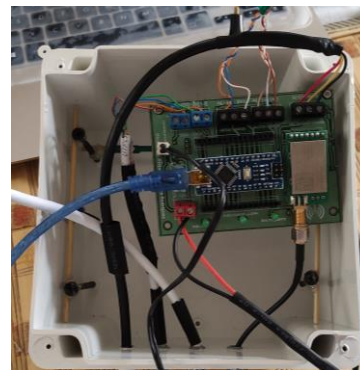
FIGURA 11: CONEXIONES TRANSMISOR Y RECEPTOR

Fuente: Elaboración propia, 2022

Se realizó una tarjeta de doble capa de 100x100 mm capaz de adquirir los datos de los sensores de temperatura, humedad, dirección de viento, velocidad del viento y nivel de agua [ver Figura 12a]. En la capa inferior se encuentran los elementos pasivos y los reguladores de tensión. Para el regulador de voltaje del Arduino y modulo LoRa E32-TTL-100 fue necesario un disipador de calor ya que por cada transmisión de datos se genera consumo de alrededor de 133 mA y el regulador LM7805 elevaba su temperatura, y por condiciones físico eléctricas del componente es necesario mantener la temperatura baja para un óptimo funcionamiento. En la capa superior se distribuye el módulo de transmisión, el microcontrolador y las borneras de conexión para su respectivo sensor, estableciendo un orden de conexión para cada dispositivo [ver Figura 12b].



(a) Tarjeta de adquisición de doble capa



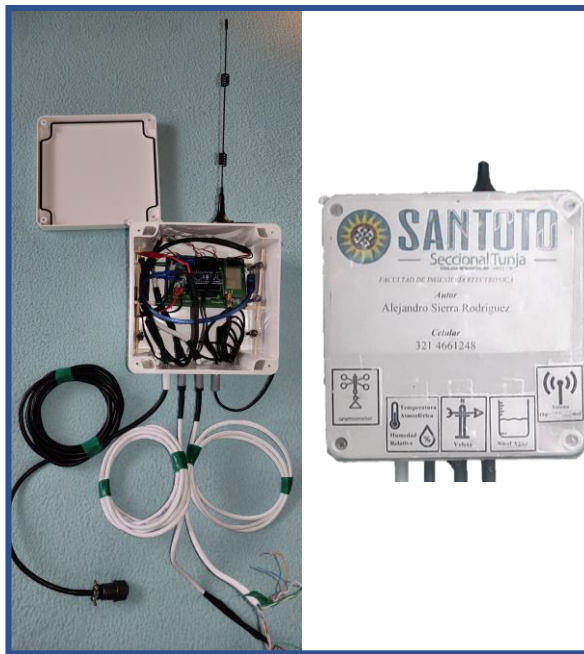
(b) Conexión entrada de sensores

FIGURA 12: PRODUCTO DE ADQUISICIÓN Y TRANSMISIÓN DE DATOS *Fuente: Elaboracion propia, 2022*

Se diseño la PCB para tener la posibilidad de seguir con la investigación de captadores de nieblas, se deja espacio para interconectar más dispositivos ya sea sensores o actuadores en la tarjeta, teniendo en cuenta que la alimentación entregada es de 5 v con consumo de hasta 2 amperios. El diseño de fabricación de ambas capas lo encuentra en la Figura Anexos 2.

A continuación, en la Figura 13 se muestra el diseño de la caja de distribución de sensores que transmite la información del sistema captador de niebla. La caja de referencia induma de 15x15cm de paso permitió aislar el circuito del polvo y agua, de la misma forma tiene la distribución sensorial de la siguiente forma: en el orden de izquierda a derecha se tiene primero el sensor para medir la velocidad del viento, en el segundo se observa un cable de tipo alambre UTP categoría 5E que permite transmitir la información del sensor de temperatura, humedad y

veleta. El tercer cable transmite la información del nivel de agua o del sensor HC-SR04 y finalmente está el cable que conecta el módulo LoRa con la antena hacia el exterior de la caja.



(a) Distribución sensorial



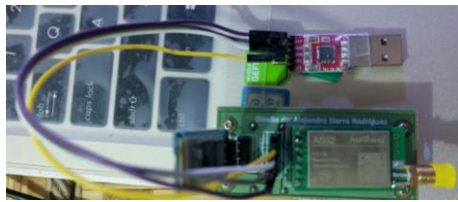
(b) Caja de almacenamiento con tornillo de ajuste

FIGURA 13: TRANSMISOR DE DATOS DEL SISTEMA

Fuente: Elaboración Propia, 2022

La caja de distribución se instaló en la parte superior del pilar derecho de la malla, el sistema transmisor tiene un indicador de alimentación y un indicador de transmisión de información en la parte inferior externa de la caja y en caso de existir una sobre corriente, será protegido todo el sistema.

El módulo LoRa que funciona como receptor [ver Figura 14 a] solo recibe datos, por diseño de la tarjeta se estableció el modo de operación en estado normal, por lo tanto, no transmite ningún dato solo recibe. Las entradas M1 y M0 del módulo fueron establecidas en un valor de 0 o referencia tierra, lo contrario al transmisor que permite cambiar su modo de operación desde la programación.



(a) Conexión Interna



(b) Producto receptor de 5x10x5cm



(c) Conexión del receptor al pc

FIGURA 14: RECEPTOR DE DATOS DEL SISTEMA

Fuente: Elaboración propia, 2022

Capítulo 5

Calibración de sensores

En el proceso de calibración, se realiza la revisión bibliográfica de métodos para determinar la técnica de calibración de cada uno de los sensores (Sawan S. Golplani, 2018). Es importante obtener medidas en todos los rangos posibles para ajustar la desviación con dispositivos de referencia a un valor real, en todos los procesos de calibración se aplica el método de comparación.

5.1 Sensor de humedad

En diversas investigaciones acerca de calibración de sensores de humedad relativa han usado una técnica en común, el método de cámara controlada (Martines L. & Dávila P., 2006). Esta técnica para obtener ambientes de humedad constante se basa en el uso de soluciones salinas saturadas en recipientes cerrados llenos de aire para generar una humedad, la solución salina saturada puede proporcionar condiciones de humedad estables. La estabilidad de la temperatura que contiene la solución debe ser constante (Mike Coleman, 2019). Se usa recipientes pequeños para que la cantidad de vapor de agua que se difunde sea suficientemente pequeña para permitir una concentración invariable (M.Fossa & P.Petagna, 2003). A continuación, se hace la lista de materiales necesarios para realizar el experimento de calibración. Se ilustra el método de cámara controlada para la calibración del sensor Am2301.

- ✓ Sensor de humedad capacitivo (Am2301)
- ✓ Arduino Nano
- ✓ Cloruro de Sodio (NaCl)
- ✓ Nitrato de potasio (KNO_3)
- ✓ Gel de silicio granular
- ✓ Cápsulas de evaporación (porcelana)
- ✓ Taza plástica con tapa hermética
- ✓ Higrómetro o termohigrómetro de laboratorio

La caracterización de este sensor se basa en 3 pruebas y para comprobar la precisión del sensor se realiza la siguiente metodología, donde los valores obtenidos se comparan con un estándar de referencia.

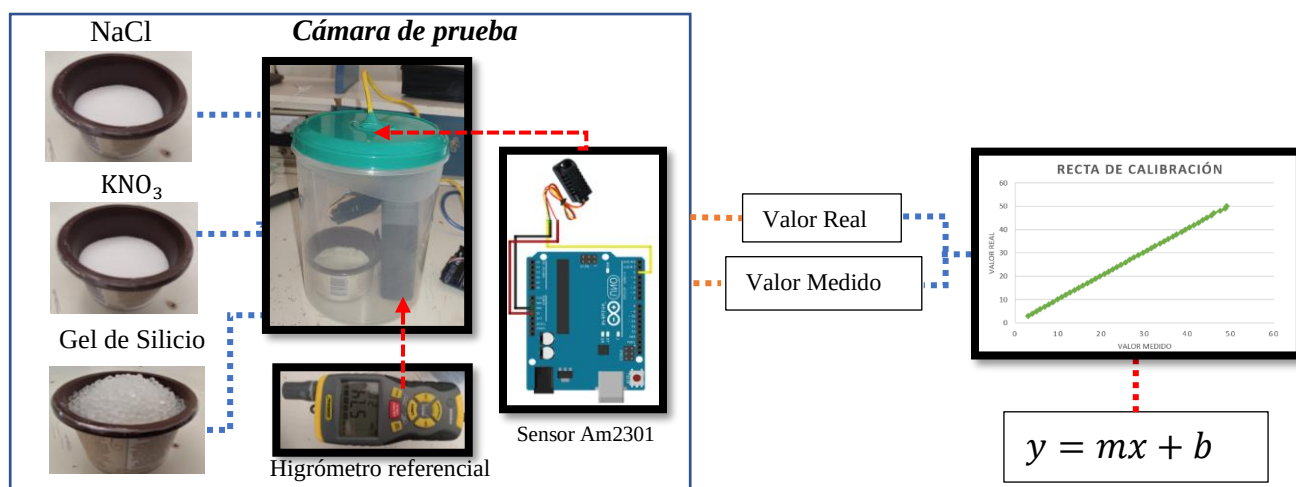


FIGURA 15: METODOLOGÍA CALIBRACIÓN - HUMEDAD

Fuente: Humidity Sensor Calibration, 2020 Anna Mai

5.1.1 Humedad Relativa alta

Esta prueba tiene el fin de someter el sensor Am2301 y un higrómetro patrón a una humedad alta, en este caso se elige el cloruro de sodio (NaCl) y el Nitrato de potasio (KNO₃) por su elevada y constante humedad en diferentes temperaturas atmosféricas, además, no se considera especialmente peligroso. Cuando se disuelven las sales en una solución acuosa (agua), se genera una atmósfera de humedad conocida como las que se observa en la Tabla 5-1.

Sal	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C
Bromuro de litio	6.86	6.61	6.37	6.16	5.97
Cloruro de litio	11.3	11.31	11.3	11.28	11.25
Acetato de potasio	23.4	23.11	22.51	21.61	—
Cloruro de magnesio	33.3	33.07	32.78	32.44	32.05
Carbonato de potasio	43.15	43.16	43.16	43.17	—
Nitrato de magnesio	55.87	54.38	52.89	51.4	49.91
Yoduro de potasio	70.98	69.9	68.86	67.89	66.96
Cloruro de sodio	75.61	75.47	75.29	75.09	74.87
Sulfato de amonio	81.7	81.34	80.99	80.63	80.27
Cloruro de potasio	85.92	85.11	84.34	83.62	82.95
Nitrato de potasio	95.41	94.62	93.58	92.31	90.79

Tabla 5.1: Sales de emisión de humedad

Fuente: Vernier, 2020

Específicamente, se introduce en la taza plástica el higrómetro patrón, el sensor Am2301 en un frasco sellado para preservar la atmósfera en el frasco, el recipiente contiene una concentración de evaporación aproximadamente 50 gr de KNO₃ con 8 ml de agua a temperatura ambiente sin disolver, formando una especie de pasta. Se hace un pequeño orificio en la parte superior del frasco para pasar los cables de conexión del sensor y

luego al microcontrolador. El sensor conectado es dejado a una distancia considerable al recipiente de evaporación. Se tiene cuidado de que el sensor nunca entre en contacto directo con la solución o probablemente se dañe.



(a) Higrómetro bajo calibración



(b) Muestra Higrómetro patrón

FIGURA 16: CÁMARA DE CALIBRACIÓN CON KNO₃

Fuente: Elaboración propia, 2022

Es importante dejar suficiente tiempo para que se equilibre los datos con el higrómetro estándar de referencia antes de registrar la lectura de ambos sensores. El microambiente que se realiza, permite mostrar las desviaciones de las lecturas del higrómetro bajo calibración y el higrómetro de referencia real, por lo tanto, se identifica la tendencia del valor de la humedad alta dentro este experimento. Los puntos de humedad obtenidos de ambos sensores transcurrido el tiempo de acuerdo a (M.Fossa & P.Petagna, 2003) se podrá recrear la ecuación de la recta entre los puntos medidos, para este caso se establece el punto máximo de la recta.

Para obtener un valor intermedio de humedad relativa se procede con la solución acuosa de NaCl que según Vernier, 2020 se puede establecer una humedad fija del 75%. La prueba es realizar el mismo procedimiento hecho con el KNO₃, por el cual, se establece el segundo dato para la ecuación de la recta.



(a) Higrómetro bajo calibración



(b) Muestra Higrómetro patrón

FIGURA 17: CÁMARA DE CALIBRACIÓN CON NaCl

Fuente: Elaboración propia, 2022

5.1.2 Humedad Relativa Baja

Esta etapa consiste en dejar los sensores a una humedad relativamente baja, y para ello se hace una nueva prueba, por el cual, teniendo en cuenta el procedimiento ya mencionado en los párrafos anteriores. Se vierte en la capsula de evaporación gel de Silicio granular, este es un absorbente de humedad del aire, es ubicado dentro del recipiente plástico hasta estabilizar la humedad de ambos sensores.



(a) Higrómetro bajo calibración



(b) Muestra Higrómetro patrón

FIGURA 18: CÁMARA DE CALIBRACIÓN CON GEL DE SILICIO

Fuente: Elaboración propia, 2022

Con los puntos máximos establecidos por la humedad alta y los puntos mínimos de la humedad mínima se registran los datos en una tabla. Se establece un modelo matemático a partir de una función que relacione los valores ideales con los valores observados, en este caso se usa un proceso de correlación para determinar una función. El grado del polinomio depende en gran medida que tan preciso se realice la calibración, entre más sales de emisión de humedad se use más exacto es la calibración, pero será en otro tipo de experimento. La función matemática obtenida deberá ser incluida en el código para observar y corregir los datos ideales para la humedad relativa, además se identifica la incertidumbre del sensor bajo calibración.

5.1.3 Datos Experimentales con la humedad

Las pruebas experimentales del sensor de humedad se relacionaron con los estados de las soluciones acuosas que estaban disponibles en el laboratorio. Durante las pruebas realizadas se obtuvieron humedades del 30% marcando una humedad relativa baja con el gel de silicio, el cloruro de sodio generó una humedad intermedia del 73,2% y humedad alta del 93,1% con el nitrato de potasio. Cada prueba duró alrededor de 130 minutos basándose en la estabilidad de la humedad que marco el sensor patrón con temperatura ambiente de 21°C.

El sensor Am2301 mide la humedad relativa en datos digitales junto a la temperatura, la lectura posible desde el microcontrolador se dio en [%RH] para poder correlacionar los datos y determinar la ecuación de calibración. Utilizando la herramienta de ajuste de curvas de MATLAB (curve fitting) se obtuvo la siguiente ecuación característica, donde es corregido los datos de salida del sensor.

$$HR \text{ Corregida} = 1,065 \cdot HR \text{ Medida} - 1,676$$

Ecuación 5-1

La representación de la curva de tendencia [Figura 19a] se correlacionan los datos con el patrón de medida, teniendo en cuenta que el sensor de referencia viene incorporado con un sensor de humedad capacitivo, por lo tanto, el comportamiento es similar. Para asegurar el ajuste en la precisión del proceso de calibración es recomendable usar todas las sales de la Tabla 5.1 acordando las medidas para diversos entornos o rangos.

La prueba de histéresis no se pudo realizar, se requiere de más sales para generar una variedad de humedades o de un cuarto de humedades con diferentes temperaturas. No se podrá asegurar el error de linealidad para entornos con temperaturas inferiores a 20°C. Con temperaturas superiores a 20°C se determinó una precisión de $\pm 1.34\% \text{RH}$ comparado con el valor inicial del $\pm 3\% \text{RH}$ que indica el fabricante del sensor Am2301 con temperaturas de 25°C.

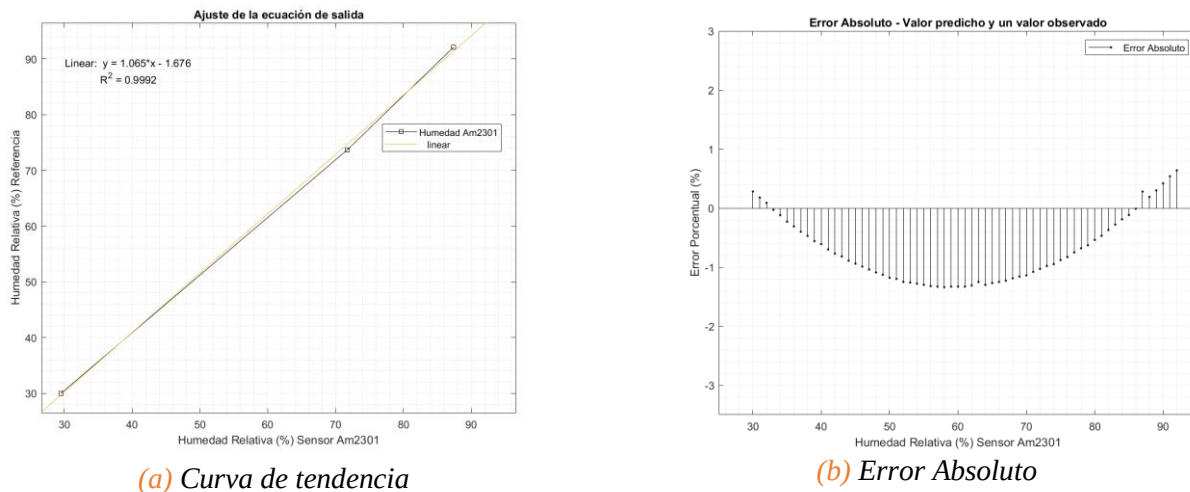


FIGURA 19: CURVA DE TENDENCIA OBTENIDA – HUMEDAD

Fuente: Elaboración propia, 2022

La caracterización lograda en cada uno de los sensores fue importante asignar una cantidad de datos que correlacionaran el valor real con el valor medido. Para algunos sensores es necesario comparar la medida con solo dos datos para disminuir el error de medida, para otros es necesario más de dos datos para establecer un soporte a la función matemática que se asigne de acuerdo al respaldo de pruebas realizadas. La investigación relacionada a procesos de calibración es fundamental para corroborar que los datos obtenidos de la malla fueran lo más cercano a los valores atmosféricos presentes a la hora de registrar la información en el sistema electrónico.

5.2 Sensor Temperatura

Según un informe de la Universidad Nacional (*Metrology Support, 2018*) para determinar un proceso de calibración aceptable se debe conocer el intervalo de calibración del sensor de manera equidistante y mínimo tres temperaturas. Por lo tanto, se considera el intervalo de calibración de 3 puntos de medición teniendo en cuenta la información del marco geográfico de este libro, ya que se menciona las temperaturas mensuales de: 6°C, 13°C y 18°C siendo las temperaturas baja, media y alta que se presentan en promedio durante el día en la ciudad de Tunja. En ese orden de ideas, el procedimiento inicial para el experimento requiere de los siguientes Equipos y materiales.

- Termómetro de referencia
- Sensor Bajo prueba (Am2301)
- Fuente de temperatura
- Arduino

En un recipiente se deja el sensor Am2301 y el termómetro de referencia, la primera prueba consiste en someter los instrumentos a una temperatura de 6°C donde se deja estabilizar la temperatura en el cuarto o fuente de temperatura para reducir el estrés térmico, cuando se estabiliza los valores de los sensores se registra los datos para establecer la función de acuerdo a los valores observados con los ideales. Se repite el mismo procedimiento con las temperaturas de 13°C y 18°C para establecer la curva de calibración.



FIGURA 20: REGISTRO DE TEMPERATURA BAJA

Fuente: Elaboración Propia, 2022

El proceso metodológico para calibrar el sensor de temperatura es agregar en el recipiente gel de silicio granular para absorber la humedad alta generada por las neveras o fuentes térmicas, es ideal realizar la calibración del sensor de temperatura con humedades entre el 50% y 80 %. En la Figura 20 se introduce el sensor Am2301 y la sonda que es conectado al termohigrómetro de forma externa a la fuente térmica o refrigerador. Se registran los datos de la temperatura baja obtenida por el *Refrigerador Puerta de Vidrio Imbera VR1.5* que alcanza un máximo de 7°C, la temperatura baja se registra cuando los valores de ambos sensores se estabilizan.

Para obtener las temperaturas de 13° C y 18 °C se usa una *Vitrina Horizontal* refrigerante con un máximo de 14°C. La calibración se basa en obtener una regresión lineal donde posiblemente se obtenga una curva con tendencia, la relación de temperaturas se compara con un termohigrómetro digital fijo con sensor de temperatura externa, es decir, una sonda que mide la temperatura tipo termistor. Para obtener una temperatura media (13°C) se deja la nevera en su temperatura más alta, hasta que llegue el punto de estabilización de ambos sensores registrado el segundo punto de la tendencia [ver Figura 21a].

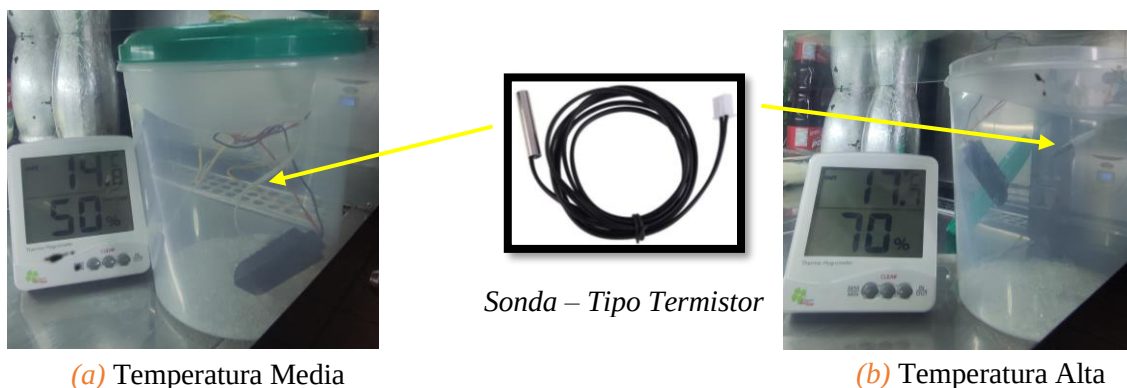


FIGURA 21: REGISTRO DE TEMPERATURAS DE 13°C Y °18°C

Fuente: Elaboración propia, 2022

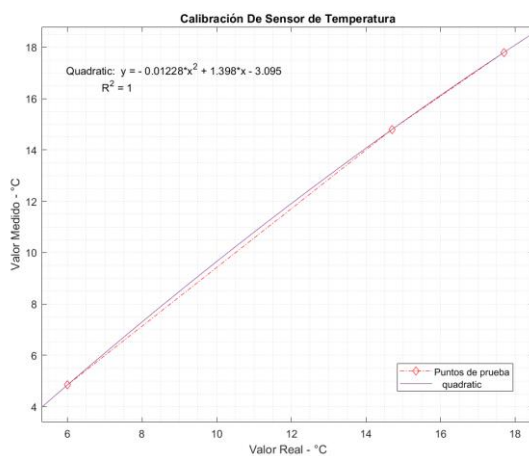
La vitrina horizontal que funciona como fuente térmica no alcanza una temperatura regulable de 18°C por tal razón, se libera la temperatura del frasco sellado y dejando entre abierta la puerta del refrigerador para equilibrar temperaturas entre el refrigerador y la temperatura ambiente [Figura 21 b], este proceso se denomina equilibrio térmico en la termodinámica (*Universidad Autónoma de nuevo León, pg. 50-51*). La temperatura obtenida del refrigerador se registra de forma manual para hallar la relación de cambios de temperaturas del sensor referencial y el am2301.

El sensor que funciona como patrón debe tener las mismas características que el sensor a calibrar, ya que se podrá garantizar un comportamiento similar durante los cambios de temperatura, se denomina características termodinámicas (Heikki L., 2020).

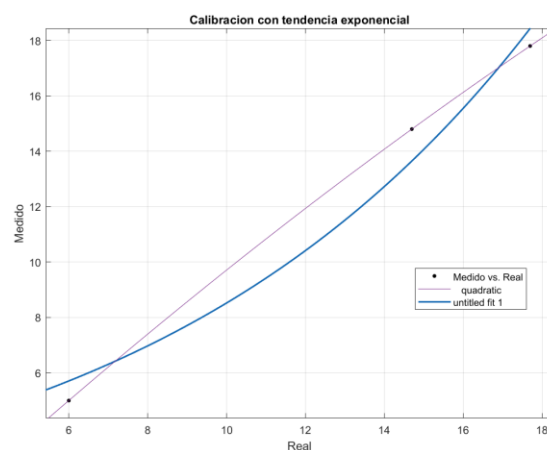
5.2.1 Datos Experimentales con la Temperatura

El sensor que se usó como patrón de calibración cuenta con una certificación de calibración ONAC (Organismo Nacional de acreditación de Colombia), es decir, cuenta con los resultados precisos y confiables para una calibración de un sensor de temperatura. Durante las pruebas realizadas fue necesario el uso de dos tipos de refrigeradores; el primero permitió establecer una temperatura fija de 6.2°C, tomando en cuenta este valor como el punto inicial para obtener la curva de tendencia para calibrar el Am2301. La temperatura media [14.7 °C] y temperatura Alta [17.7°C] fueron referentes a otro tipo de refrigeración de estilo ventanilla horizontal debido a las temperaturas un poco más elevadas que el anterior refrigerador.

Durante las pruebas realizadas se obtuvieron valores semejantes del sensor en calibración y el sensor patrón, esos valores fueron en las temperaturas media-alta [ver Figura 22a]. Pero a medida que disminuía la temperatura, la precisión del sensor Am2301 se iba perdiendo hasta llegar la temperatura baja como valor inicial de 5.01°C en el Am2301 y 6.2°C en el sensor referencial. En la Figura 22b representa la curva de tendencia con una función de tipo exponencial y se observa que hay mejor relación en los datos hasta los 7.5°C, pero aumenta de forma significativa el error a temperaturas superiores.



(a) Curva de tendencia – Ecuación de segundo orden



(b) Curva de tendencia – Ecuación tipo exponencial

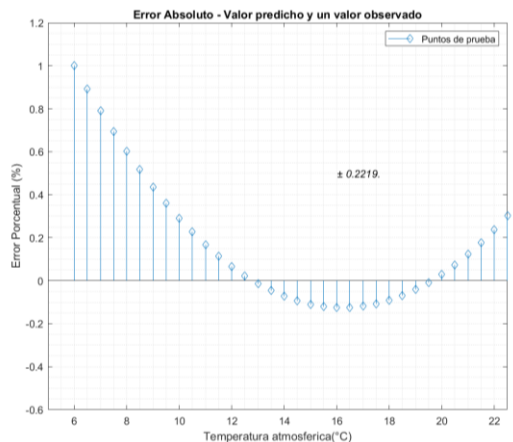
FIGURA 22: CURVA DE CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA

Fuente: Elaboración propia, 2022

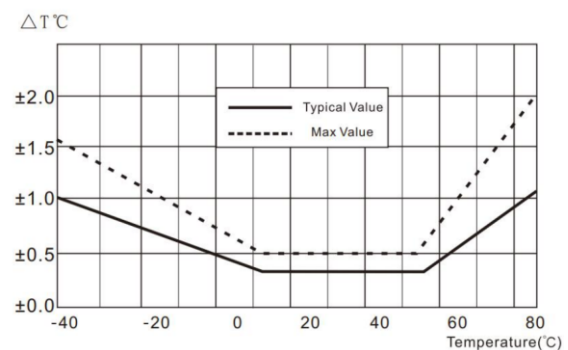
En consideración a estos resultados se opta por el polinomio de segundo grado para obtener una mejor precisión en el sensor de temperatura. Utilizando la herramienta de ajuste de curvas de MATLAB (*curve fitting*) se obtuvo la siguiente ecuación característica, donde es corregido los datos de salida del sensor de temperatura.

$$\text{Temperatura Corregida} = -0,01228 * \text{Tem Medido}^2 + 1,39 * \text{Tem Medido} - 3.09 \quad \text{Ecuación 5-2}$$

Antes de mostrar los resultados obtenidos en el experimento, se muestra el rendimiento de la temperatura relativa ofrecida por el fabricante del sensor con precisión típica de $\pm 0.3^\circ\text{C}$ con máximo de $\pm 1^\circ\text{C}$ [Figura 23 b].



(a) Error de temperatura obtenida con polinomio de segundo grado



(b) Rendimiento de temperatura relativa - Fabricante

FIGURA 23: ERROR DE TEMPERATURA

Fuente: Elaboración propia, 2022

Para disminuir el error que presentó el sensor de temperatura se planteó un proceso metodológico comparativo entre dos temperaturas entregadas por un sensor calibrado y uno en proceso de calibración, por tal razón se realizó el experimento que duró alrededor de 150 minutos por cada una de las tres pruebas realizadas, se obtuvo una precisión típica de $\pm 0.2219^\circ\text{C}$ con máximo de $\pm 1^\circ\text{C}$, el error no disminuye de manera significativa debido a la prueba de tan solo 3 temperaturas pero es aceptable el rendimiento de la Ecuación 5-2.

5.3 Sensor Veleta

En el capítulo anterior se diseñó una veleta de bajo presupuesto, inferior a 11 veces, si se compara con uno convencional, por tal razón, es considerado el proceso de calibración relacionado a sensores tipo radiométrico y para ello se usan dos técnicas (*Wind System Calibration*). La primera consiste en la necesidad de usar un equipo medidor de torque como el que se observa en la *Figura Anexos 4b* para verificar la torsión de la paleta, el valor de torque debe estar relacionado con los valores observados en la *Figura Anexos 4a* del formulario de umbral máximo. El medidor debe ubicarse en la parte superior central de la veleta sin ningún tipo de movimiento de aire, se aplica una fuerza constante sobre la paleta para girar los 360° sin exceder el valor de torque seleccionado según la *Figura Anexos 4a* y la referencia de la veleta. Si no excede el valor de torque el sensor se encuentra en excelente condición.

El segundo paso es la relación entre la señal de entrada y la señal de salida. A partir de la revisión bibliográfica para calibrar la veleta de tipo radiométrico, se tiene en cuenta el proceso realizado por (Paredes Gonzales et al., 2012) quien hace una calibración por mediciones angulares, su procedimiento requiere de los siguientes materiales para el experimento.

- ✓ Veleta Potenciómetro
- ✓ Multímetro
- ✓ Papel circular graduado para lecturas 0° a 360°
- ✓ Arduino

El marco referente inicia desde un ángulo de 0° para posicionar el lado Sur de la veleta y el potenciómetro en valores de resistencia cercano a cero. El cuerpo del sensor se posiciona sobre el punto central del papel circular graduado, coincidiendo el contrapeso con el cero del papel circular.

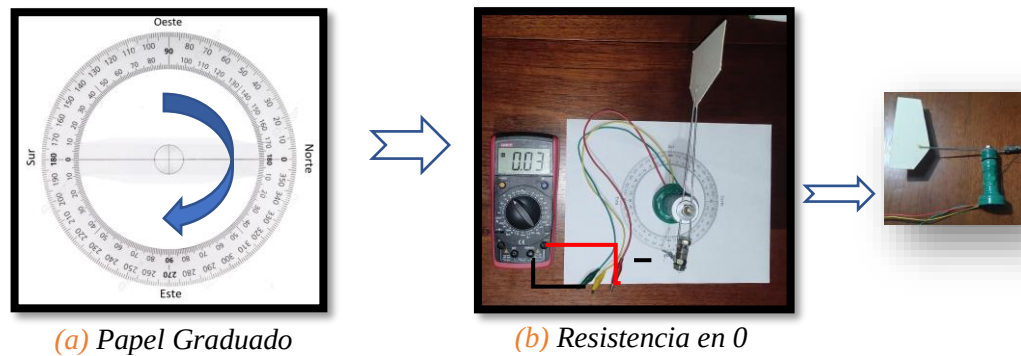


FIGURA 24: MARCA DE ORIGEN EN LA VELETA

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Con la conexión que se observa en la *Figura 25a* se toma las medidas del diferencial de potencial para diferentes valores de ángulos de giro, los cuales se obtienen haciendo girar la veleta, y este al mismo tiempo hace girar el potenciómetro [ver *Figura 25b*], se toma lectura del ángulo de 10 en 10 grados sobre el papel circular. Los errores de la banda muerta que se producen en el potenciómetro son corregidos con una resistencia de 10 k Ω (User Guide, 2002) en paralelo a Gnd y canal, cuando la paleta entra en la banda muerta las lecturas en ese punto se vuelven flotantes, sin la resistencia en paralelo no hay valor fijo.

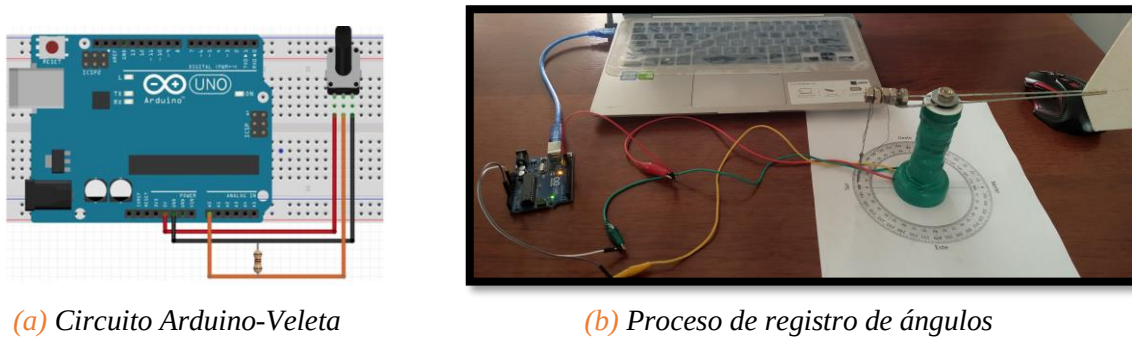


FIGURA 25: METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN - VELETA

Fuente: Elaboración propia, 2022

Con el proceso preliminar realizado, se toman 37 datos que relacionen un ángulo de rotación del potenciómetro con el valor digital obtenido desde el microcontrolador. Con los datos registrados se hacen comparaciones para determinar la linealidad del sensor con el papel, los ángulos de una veleta radiométrica son definidos con la siguiente ecuación (*User Guide*, 2002).

$$Direccion = 357 * \frac{(V_{in} - V_{+5})}{V_{ex} - (2 * V_{+5})} \quad \text{Ecuación 5-3}$$

5.3.1 Datos Experimentales con la Veleta

La caracterización del sensor fue respaldada con el papel graduado, las muestras de la veleta presentaron inicialmente un valor constante durante 4 muestras [ver Figura 26a], el valor se da por la zona muerta, es decir, en un rango de aproximadamente 40° o el gap del potenciómetro se logra el mismo valor durante este trayecto. Se determino los ángulos de giro con la Ecuación 5-3, sin embargo, los valores que ofrecía la ecuación no presentaban linealidad en los datos, en intervalos el ángulo era referente al papel radiómetro y en otros no.

La función de calibración para la veleta, fue comparar los valores digitales del potenciómetro con el papel graduado que se presentó en la metodología de la calibración de la veleta. Con las 37 muestras realizadas se tiene la curva de tendencia [Figura 26a] con la siguiente ecuación.

$$Grado\ corregido = -5.277 * 10^{-5} * Valor\ medido^2 + 0.3545 * Valor\ medido + 34.2 \quad \text{Ecuación 5-4}$$

La mejor similitud de tendencia fue la ecuación de segundo orden permitiendo medir valores correctos que no fueron lineales con la Ecuación 5-3. Con la Ecuación 5-4 se logra corregir en gran medida los datos que aproximan el comportamiento de la veleta con los datos reales en el sentido de rotación.

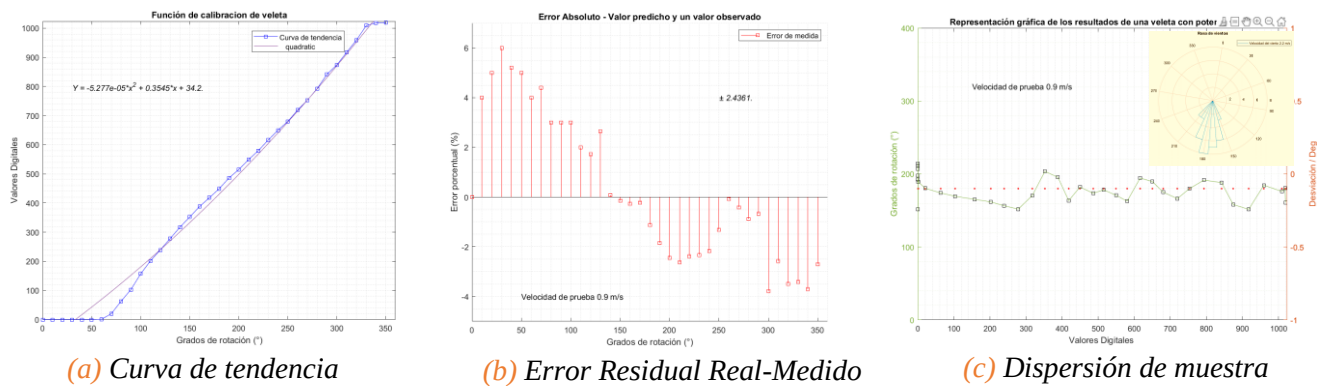


FIGURA 26: CURVA DE TENDENCIA OBTENIDA - VELETA

Fuente: Elaboración propia, 2022

Con las 37 muestras realizadas y la calibración, se establece un error relativamente aceptable de $\pm 2,5^\circ$ de exactitud teniendo en cuenta el diseño de un sensor convencional. Se evitaron los errores de medida subdividiendo en una escala de 8 direcciones de medida para establecer direcciones fijas para la veleta, en la investigación realizada se encontraron sensores que proponen de 8 hasta 16 direcciones fijas con exactitudes de $\pm 1^\circ$ [*wind vane*].

Para demostrar una de sus direcciones fijas se definió un rango de 160° a 200° la posible medida de 180° o dirección Sur como la indicada en la *Figura 26 c*.

5.4 Sensor de Nivel

Para determinar una exactitud y precisión de nivel de agua, se calibra primero el sensor ultrasónico HC-sr04 en una distancia conocida. La capacidad de almacenamiento del tanque es medible con la distancia que hay entre la base y el pico del tanque, y al restar la cantidad de espacio vacío se podrá determinar cuánto líquido hay.

Las condiciones del experimento han sido las siguientes:

- Temperatura Ambiente: 18°C
- Humedad Relativa: 58 %
- Resolución: 1 cm
- Tiempo de muestreo: 1000 milisegundos
- Rango de medida: 3cm a 50 cm

La *Figura 27* muestra el proceso metodológico de calibración, por el cual, consiste en una cinta métrica sobre una superficie plana como modelo correspondiente al patrón de referencia. La distancia tiene una longitud máxima de 50 cm con resolución mínima de 1mm, longitud referente a la dimensión del tanque ilustrado en la *Figura 7*. El sensor ultrasónico se fija en el extremo de la superficie mediante cinta adhesiva, en el otro extremo de la cinta métrica se posiciona un objeto que permita rebotar la onda emitida.

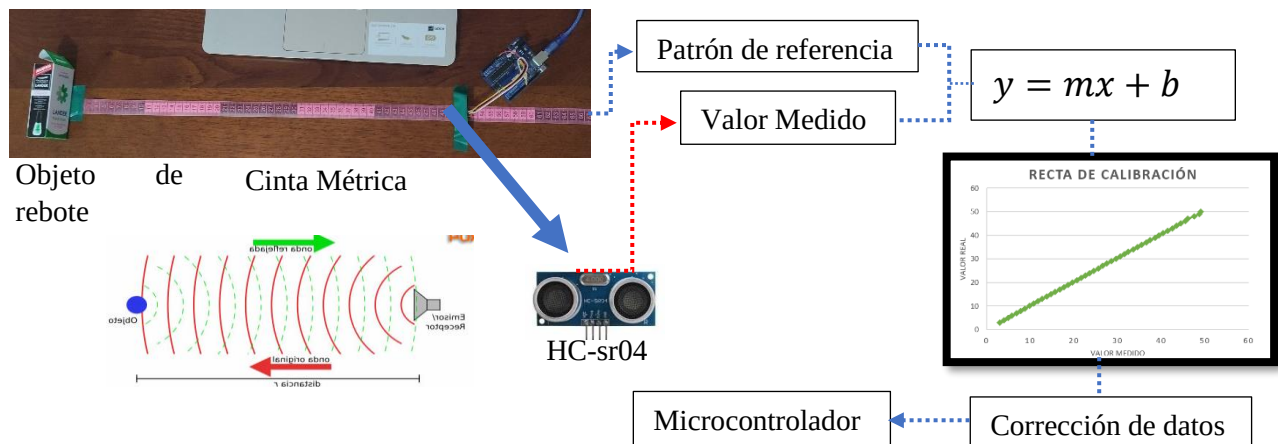


FIGURA 27: CALIBRACIÓN DE HC-SR04

*Fuente: Análisis, caracterización y calibración de sensores de bajo coste para Arduino, 2018
Sawan Shadadpuri Goplani*

Se toman muestras del valor real y del valor medido, empezando a 3 cm de distancia del sensor. Se realizan 50 mediciones con espacios de 1 cm de forma ascendente, las muestras permiten hallar una relación de proporcionalidad entre ambas medidas.

$$Distancia = \frac{time}{58}$$

Ecuación 5-5

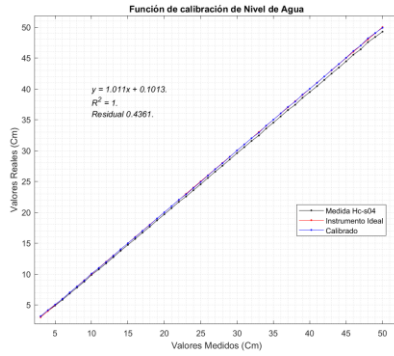
5.4.1 Datos Experimentales con el Ultrasónico

Se planteó un ajuste de medida mediante la técnica de *Regression Learner* en Matlab. Importando los datos de los valores medidos se halló una función de tendencia con el número de muestras de lo obtenido, a partir de los datos se observa una ecuación con línea de tendencia de primer grado [Ecuación 5-6] presentando similitud con los valores medidos por el sensor ultrasónico y la cinta métrica como valor real.

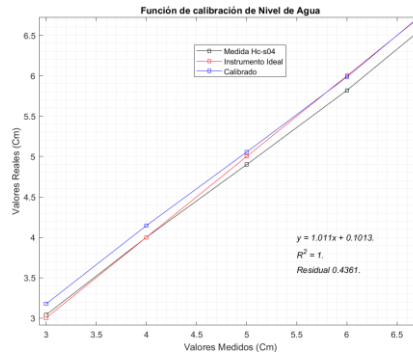
La representación de la recta de calibración se da con la siguiente ecuación:

$$\text{Distancia Corregida} = 1.011 * \text{Distancia Medida} + 0.1013 \quad \text{Ecuación 5-6}$$

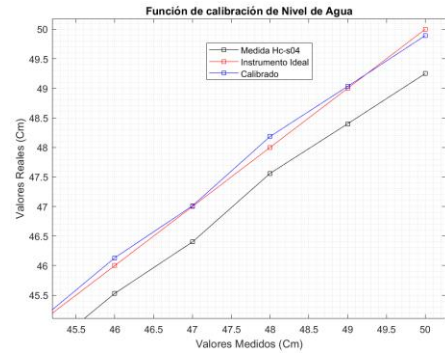
La *Figura 28a* representa la tendencia donde es medido el rango de 3cm a 50 cm. Con la ecuación anterior se redefinió el resultado de la distancia que devuelve el sensor y por consideración al comportamiento de la gráfica se describe lo siguiente. La *Figura 28b* se observa la medida del sensor entre 3 cm y 6 cm, el ajuste de la distancia realizada con la Ecuación 5-6 presenta un error que disminuye a medida que crece hasta 6 cm, y los datos que entrega el sensor en este rango sin calibrar tienen una precisión similar al valor real de una cinta métrica, la ecuación en este rango desajustó los valores.



(a) Ecuación de calibración



(b) Tendencia Inicial



(c) Tendencia Final

FIGURA 28: RECTA QUE RELACIONA LA MEDIDA REAL, MEDIDA DEL SENSOR CON LA OBTENIDA EN LA CALIBRACIÓN

Fuente: Elaboración propia, 2022

La distancia que se encontró situada en el rango de 6 cm a 50 cm [ver *Figura 28c*] se ajusta mejor los valores del sensor usando la Ecuación 5-6 que represento la ecuación de calibración, es decir, se correlacionan los valores medidos con el real. A continuación, se observa las 50 muestras (n) realizadas que representaron el error cuadrático medio (RMSE) que hay entre los datos del sensor sin calibrar y con la Ecuación 5-6 que corrige la distancia a un referente a un valor real. Con la ecuación RMSE se determinó los errores de los valores previstos (P_I) y observados O_I .

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_I - O_I)^2}{n}} \quad \text{Ecuación 5-7}$$

Con el siguiente grafico se deduce que la precisión de la curva de error sin calibrar el sensor crece de forma logarítmica, a medida que se incrementaron las distancias su error creció hasta el 0.75% y sus cuatro medidas de

error iniciales se mantuvieron inferiores a las que se calcularon con la ecuación de distancia corregida. En promedio se obtuvo un error de ± 0.3869 por cm sin calibrar el HC-sr04. En la *Figura 29* de igual forma se observa la curva de error calibrado que represento la re medida con la Ecuación 5-6, básicamente el error en sus 50 muestras se mantuvo constante y disminuyo el error a ± 0.0453 por cm.

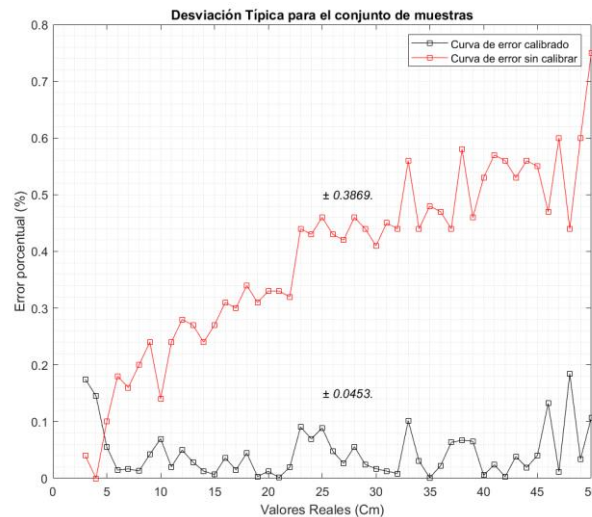


FIGURA 29: DESVIACIÓN TÍPICA TOMADAS DEL SENSOR ULTRASÓNICO

Fuente: Elaboración propia, 2022

Con los resultados obtenidos en la calibración, se representa la distancia corregida como la altura del tanque de agua para medir la cantidad de agua en mililitros.

$$\text{Volumen de agua} = \pi * (4 \text{ cm})^2 * \text{Distancia Corregida} \quad \text{Ecuación 5-8}$$

5.5 Anemómetro

El método de calibración se basa en la comparación de medida del anemómetro con la de un patrón de laboratorio como el túnel de viento. La calibración requiere de vientos estables y unidireccionales uniformes para obtener medidas reproducibles. La salida del anemómetro de prueba de calibración se recopila en un rango de configuraciones de velocidad del viento haciendo regresiones lineales, según los estándares IEC 61400-12-1 (Pass, 2019).

El proceso es dejar el anemómetro estabilizar durante cinco minutos en el túnel de viento para que no se produzcan grandes variaciones. Se inicia el proceso de identificar los efectos de la histéresis, es decir, se realizan pruebas con vientos ascendente y descendentes en pasos de 1m/s desde 0,3 hasta los 30m/s. Antes de registrar las lecturas de velocidad, se deja un tiempo adecuado de estabilización en condiciones de flujo estable, que usualmente tarda unos segundos (Bruce R, 2007).

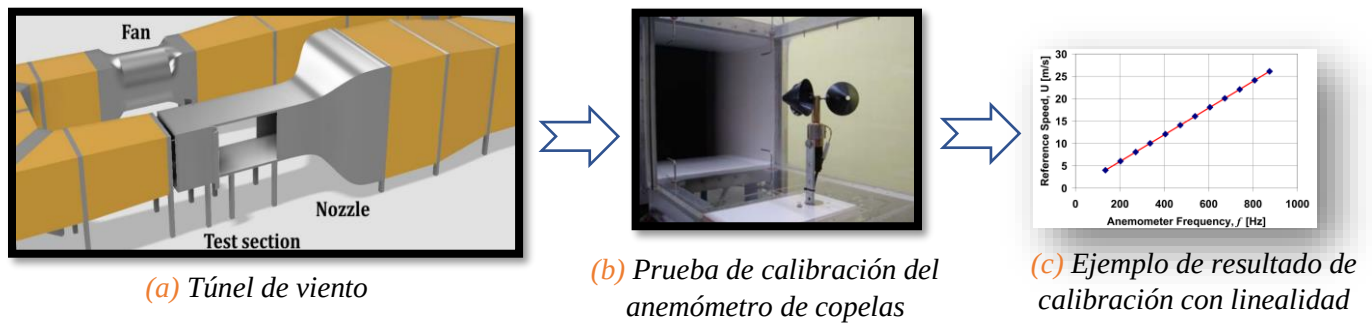


FIGURA 30: MÉTODO DE CALIBRACIÓN – ANEMÓMETRO

Fuente: *Anemometer Calibration Uncertainty, University of California, 2007*

Para poder hacer las lecturas desde el microcontrolador es necesario hacer una relación de velocidad y voltaje de salida con el Anemómetro *JL-FS2*, por el cual, es discretizada la señal con la siguiente ecuación (Olalla N. & Luis A., 2020).

$$V = 6 * U \quad \text{Ecuación. 5-1}$$

Donde:

- V es la velocidad esperada m/s
- 6 es el tamaño de la muestra
- U es el voltaje del anemómetro

Por falta de disponibilidad de un túnel de viento en los laboratorios de la universidad, no se realizó el proceso de calibración con el anemómetro de copelas, por tal razón, con los datos obtenidos solo se estima los márgenes de error ofrecidos por la hoja técnica del sensor y no por un proceso de calibración. En este documento solo se deja expresado el proceso de calibración para en un futuro hacer una caracterización con el túnel de viento.

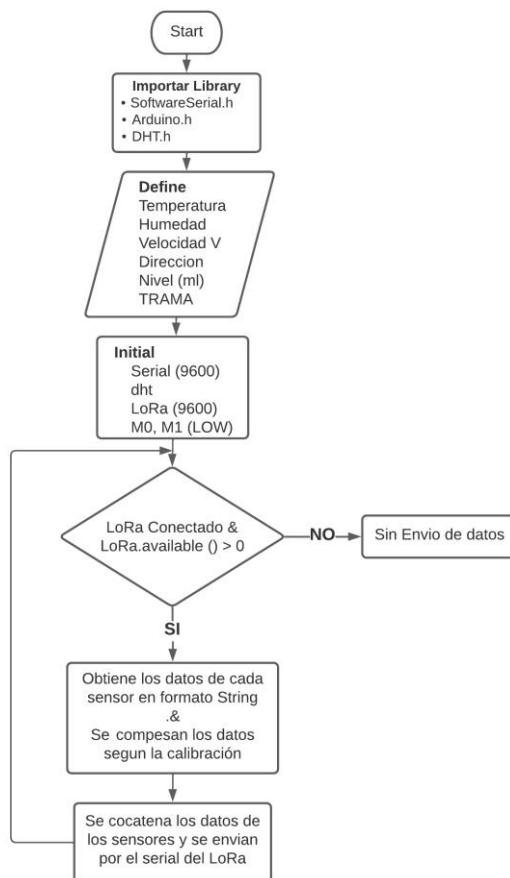
5.6 Algoritmo para adquisición de datos

El desarrollo de esta etapa, es programar en Arduino IDE la lectura analógica y digital de los sensores. Los datos de los sensores son corregidos según la calibración y son enviados por el puerto serial conectado al módulo LoRa.

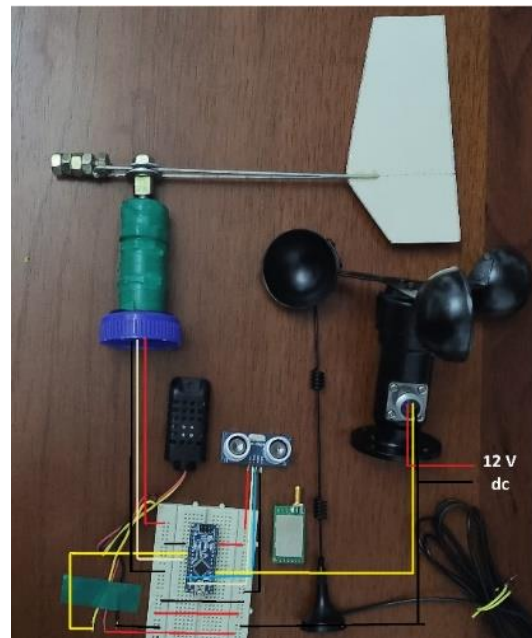
El diagrama de flujo [Figura 31a] consiste en la lectura de 5 sensores y la transmisión de datos a través de un módulo loRa. Inicialmente el primer bloque después de inicio del programa se hace una acción o proceso que define la librería del *softwareSerial*, con el fin de definir el *tx* y *rx* en otros pines del Arduino y no usar el que viene por defecto, el objetivo es dejar espacio para otras aplicaciones a futuro. La librería *DHT.h* permite reconocer la lectura del sensor Am2301 ya que la familia de este sensor pertenece al DHT21.

El siguiente bloque define las variables que tomaran lectura de cada sensor, en este caso se definieron todas las variables de formato “*carácter*” para enviar los datos por el puerto serial del módulo LoRa de forma conjunta, es decir, en trama de datos. El tercer bloque define la velocidad con la que transmitirá la información por el puerto serial y el programa desarrollado en LabVIEW, en este caso se deja a una velocidad de comunicación por defecto de 9600 baudios. Finalmente, en el bloque se da una inicialización del sensor DHT y el modo con el que trabajará el módulo LoRa, en este caso se dejan las dos entradas de M0 y M1 en estado bajo o 0 para trabajar en modo normal.

El diagrama de flujo entra ahora en una toma de decisión de enviar o no los datos leídos. Si el módulo LoRa no establece una comunicación con el módulo LoRa receptor, el programa arroja un mensaje indicando que no hay comunicación. Por otro lado, si hay comunicación el módulo transmite la trama de datos así no se tenga conectado los sensores, deja en *NaN* los espacios no leídos. **SI** hay comunicación el programa toma lectura de cada sensor, La lectura del sensor de temperatura y humedad leen directamente los datos del sensor sin ningún tipo de conversión debido a la librería DHT, los datos del viento son convertidos en señales de entrada analógica a valores de voltaje, considerando los 10 bits ofrecidos por el Arduino, por lo cual, el voltaje varía de 0 a 1023 en relación a los 5 voltios del Arduino. Para interpretar la lectura del tiempo del sensor ultrasónico en una distancia, es usada la Ecuación 5-5 para calcular la distancia en centímetros, según la hoja técnica del *HC-SR04*. Cuando se obtienen los valores de cada sensor se ingresan las ecuaciones obtenidas anteriormente en el proceso de calibración y se concatenan las lecturas en una variable llamada TRAMA, cada 30 segundos el dato leído de los sensores se enviará por el puerto serial del LoRa y repetirá el proceso de comunicación y lectura.



(a) Algoritmo de Adquisición y Transmisión de datos



(b) Conexión Sensores

FIGURA 31: LECTURA Y TRANSMISIÓN DE DATOS
Fuente: Elaboración propia, 2022

Con el proceso de calibración se obtienen resultados deseados de forma segura, así es posible confiar en la validez de las mediciones obtenidas, siguiendo un proceso sistemático y metodológico, el cual se basó en una

documentación que permitió determinar las desviaciones del instrumento elegido con respecto a los valores indicados por un instrumento de referencia de incertidumbre conocida.

Capítulo 6

Tratamiento De Datos Adquiridos

En este capítulo se toman los datos experimentales, se estudian las tendencias de los datos medidos para analizar la relación entre las variables climatológicas y la captación de agua. Como primer proceso, se determina cual es el procesamiento de datos que mejor se adapta a un sistema climático de acuerdo a una tasa de muestreo durante el día, que posteriormente son visualizados y almacenados los datos de los sensores desde una interfaz en LabVIEW en el dominio del tiempo. Basado en la información recolectada se comparan las variables climáticas con la cantidad de agua recolectada en ml para encontrar la variable de mayor peso a la hora de recolectar agua en la ciudad de Tunja como caso de estudio.

6.1.1 Taza de muestreo en variables climatológicos

El registro de datos meteorológicos es un proceso lento que cambia en horas, queda a criterio de estimaciones en evidencias sustanciales y experiencia de otros documentos la tasa de muestreo para la adquisición de datos digitales y analógicos en LabVIEW.

Los datos se obtienen por muestras durante una hora o periodos más cortos, de acuerdo al informe *EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)*. Para promedios cortos, es considerado intervalos máximos de 10 minutos, la estrategia de muestreo se basa en estimaciones de la media de mínimo 60 muestras para obtener un nivel de exactitud de cada variable. Los sistemas de grabación de datos analógicos pueden utilizar como respaldo, la velocidad del viento y los sistemas de registro analógico gráficos de franjas de trazado continuo.

Las estimaciones de la varianza deben basarse en al menos 360 muestras. Por lo tanto, se considera un muestreo de datos de la velocidad del viento y la dirección del viento con entradas analógicas cada 10 minutos para lograr precisiones recomendables debido a las ráfagas de viento que se presentan en intervalos cortos, por lo cual, se establece una distribución de Weibull donde esta función se puede usar para expresar la probabilidad de ocurrencia con los valores de velocidad del viento (Danitza M. et al, 2015). Para la obtención de la distribución de la probabilidad de la velocidad del viento se requiere de los siguientes parámetros.

Media Aritmética	$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$
Desviación Estándar	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{U})^2}{n - 1}}$
Parámetro de forma “K”	$K = \left(\frac{\sigma}{\bar{U}}\right)^{-1,086}$
Parámetro de “C”	$C = \frac{\bar{U}}{e^{r(1+\frac{1}{k})}}$
Distribución de Weibull	$P(U) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{U}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{C}\right)^K\right] \quad (K>0, U>0, C>1)$

Tabla 6.1: Parámetros de Weibull

Los parámetros K y C son parámetros de forma y de escala respectivamente precisando la distribución de Weibull. K no tiene unidades, sigma (σ) se obtiene a partir de la gráfica de la velocidad con respecto al tiempo para este caso el factor de escala es m/s. Para estandarizar el promedio de temperatura atmosférica y la humedad del aire se reportan muestras cada 30 segundos, obteniendo promedios cada 10 minutos donde se puede obtener la linealización de salida del sensor. Estos valores promediados se consideran como los valores instantáneos de las condiciones meteorológicas (*Measurements At Automatic Weather Stations, 2015*)

Teniendo en cuenta el capítulo 5 se determina el tiempo de descarga de la batería de acuerdo al consumo en estado de transmisión. El tiempo de descarga de una batería se calcula con la siguiente ecuación.

$$\text{Tiempo de descarga} = \frac{\text{Carga Electrica de la bateria}}{\text{Consumo electrico del sistema}} \quad \text{Ecuación 6-1}$$

$$\text{Tiempo de descarga} = \frac{20.000\text{mAh}}{137\text{mA}}$$

$$\text{Tiempo de descarga} = 146 \text{ Horas} - 6 \text{ Días}$$

6.1.2 Recolección de datos en LabVIEW

La información obtenida por los sensores es visualizada y almacenada desde una interface de LabVIEW (*Figura 32*), los datos llegan al módulo LoRa receptor que pasa a través del conversor *USB a TTL CP2102* hasta el puerto USB del PC. El programa desarrollado en LabVIEW recibe la trama de datos por medio de *Visa Serial* con velocidad de 9600 baudios, la información leída en el puerto es separada por medio del bloque *Match Pattern* en los datos correspondientes a la variable (Temperatura, Humedad, Velocidad del viento, Dirección del viento y nivel de agua) enviada desde el microcontrolador. Para establecer una visualización dinámica de cada variable en la interface, se transforma cada dato de formato carácter a entero (*Decimal String to Number*) para obtener los valores reales en la gráfica, con la información de tipo carácter se realiza un arreglo de datos (*Build Array*) para distribuir la información en un archivo Excel, donde establece una fecha y hora de los datos obtenidos en tiempo real; El diagrama de bloques de LabVIEW se encuentra en la *Figura Anexos 5*.

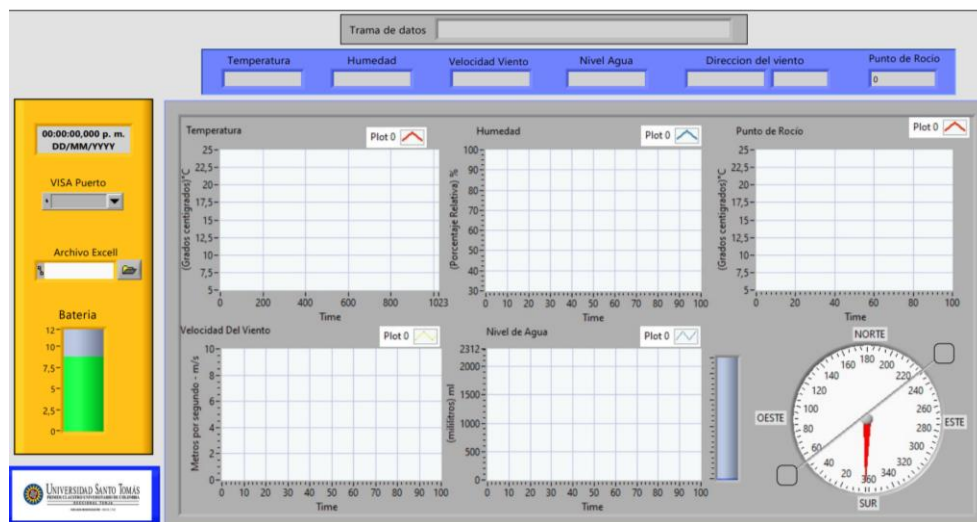


FIGURA 32: INTERFACE LABVIEW DE CAPTADOR DE NIEBLA

Fuente: Elaboración propia, 2022

Con los valores obtenidos de la Temperatura y Humedad es considerada la Ecuación 2-1 para determinar los valores relacionados al punto de rocío, la ecuación es implementada en el diagrama de bloques de LabVIEW para hallar la condensación atmosférica. El bosquejo del tanque en la interface de LabVIEW corresponde a la capacidad de almacenamiento establecido en las especificaciones de diseño realizadas anteriormente. La veleta de la interface indica la dirección del viento en relación a la posición del mecanismo, se debe reconocer las características de orientación del viento, a fin de que se obtenga los puntos muestreados para describir la rosa de vientos que traspasan la malla.

6.2 Correlación polinomial

Con los datos recolectados en LabVIEW se analiza las proporciones con respecto a la cantidad de agua recolectada, es importante encontrar el peso que tiene la temperatura, humedad y punto de rocío con respecto al nivel de agua recogida. Se obtiene y analiza los datos de nivel, temperatura y humedad, mediante el algoritmo de regresión polinómica (*Basic Fitting- MATLAB*), por el cual se considera el grado del polinomio. Una vez los datos son analizados, se menciona el coeficiente de determinación (R^2) que mostrara que tan cercano es la tendencia de los datos analizados y el coeficiente de correlación, el principal objetivo es buscar relaciones directas que mayor influyeron en la recolección de agua.

Para observar cómo se relaciona la variable de nivel de agua con la temperatura y la humedad como variables predictoras, se representa una gráfica de superficie en tres dimensiones para poder relacionar los valores de respuesta y condiciones operativas que son deseadas. Los resultados dados en una representación superficial son fundamentales para mostrar un contorno de muestra entre las relaciones ya mencionadas.

Finalmente, realiza la descripción de la rosa de vientos, anteriormente en el marco teórico varios autores mencionaron que la velocidad y dirección del viento genera impactos para recolectar agua, posiblemente el viento influye en mayor o menor medida la recolección de agua ya que es el que perturba el sistema recolector de agua.

Capítulo 7

Análisis de Resultados

En este libro se describieron diversos procesos para poder caracterizar los atrapanieblas, se hizo un abordaje en el diseño de una red captadora de niebla bidimensional, recolección de datos desde una tarjeta adquisidora con transmisión inalámbrica, calibración de sensores y relación de variables climatológicas con respecto a la captación de agua. En este capítulo se describen los resultados más importantes que se lograron obtener a través de la metodología propuesta para llevar a cabo el proceso de caracterización.

7.1 Sistema Captador de niebla

El captador de niebla fue construido con materiales fácilmente accesibles en la zona (madera, cable galvanizado, piezas de PVC, polisombra, etc.). Este diseño cumplió con las especificaciones del *Standard Fog Collector (SFC)* desarrollado por la escuela chilena de redes atrapanieblas, que se adopta de forma generalizada como unidad estándar de captación de agua de niebla.

El sistema bidimensional fue ubicado de forma perpendicular en la dirección del viento que predominaba, de esta forma podrá aumentar la eficiencia de recolección en la obtención de agua de niebla. La prueba se evaluó con un prototipo con medidas de 1 metro por 1 metro en la siguiente ubicación.



FIGURA 33: MAPA DE EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN – TUNJA, BOYACÁ

Fuente: Google Maps

La adquisición de datos fue ejecutada en el barrio Asís de la ciudad de Tunja, el lugar se encuentra a 7 minutos en automóvil desde el campus de la universidad Santo Tomás y a 2,97 kilómetros de distancia en línea recta. El lugar donde fue implementado el sistema existe una pendiente suave, adecuada para que se produzca el enfriamiento del aire de abajo hacia arriba donde se proyectaba el sistema, este proceso se conoce como la formación de niebla de tipo ladera.



FIGURA 34: ENSAMBLE DEL PROTOTIPO SEGÚN SFC

Fuente: Elaboración propia, 2022

Todo el trabajo de montaje y ensamble de la malla se realizó a nivel del suelo antes de subir la malla sobre una superficie elevada. Primero se instaló la malla tipo polisombra de corta duración y resistencia ya que la prueba no se realizaría en meses, para ello se necesita de mallas con tejido de polietileno de alta densidad, los cuales pueden durar años en la intemperie y son costosas.

Para la sujeción de la malla se utilizaron placas de madera rectangulares para templar de manera uniforme la malla, de esta manera la tensión en las zonas de fijación (tornillos) y deformaciones (malla) de la superficie se reduce el efecto del embolsamiento debido a la fuerza del viento. La canaleta de recolección tiene 3° grados de inclinación para desviar el flujo de agua hacia el tanque de reserva, el almacenamiento del tanque alcanza un máximo de 2302 cm^3 de agua, por el cual, fue medido con un vaso precipitado con intervalos de 100 ml para determinar la linealidad y capacidad de almacenamiento esperado.

De acuerdo a las dimensiones del atrapanieblas, fue necesario de una estructura auxiliar para su montaje, como la base de un tanque de agua. Es una estructura rígida que sirvió adecuadamente para sostener y asegurar el sistema al piso, a través de cables auxiliares de acero y bases soportantes para anclar los dos pilares. El trabajo de altura fue obligado a la utilización de elementos de seguridad (guantes, escalera, herramienta, entre otros), para sostener el sistema de los fuertes vientos en diferentes direcciones de anclaje. Finalmente se realizó la tensión de

cables, por el cual, se desarrolló manualmente con el apoyo de una pinza, para asegurar los perros 1/8” de cada cable tensionado.

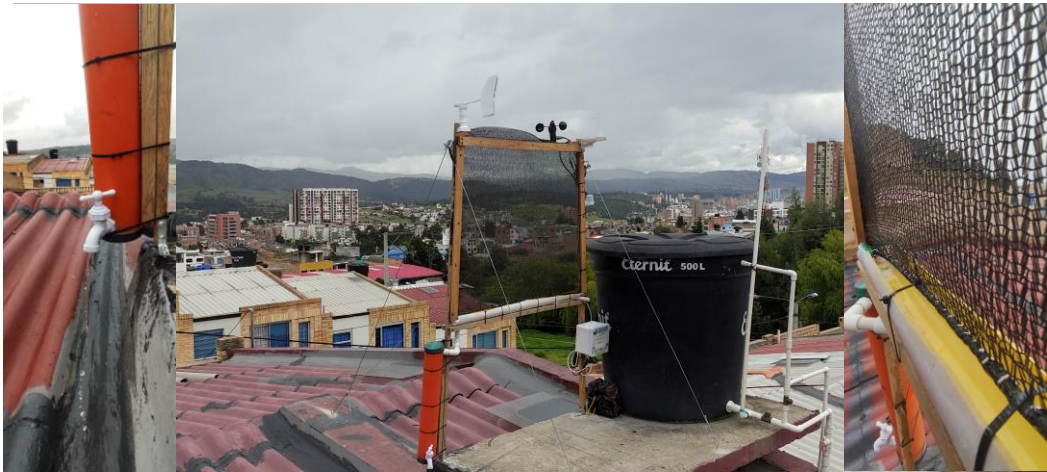


FIGURA 35: MONTAJE DEL SISTEMA CARACTERIZADO – SIN NIEBLA

Fuente: Elaboración propia, 2022

7.2 Monitoreo y taza de muestreo

El programa desarrollado en LabVIEW permitió monitorear el sistema y recolectar 17440 datos en Excel por un periodo de 6 días, el monitoreo del sistema se realizó desde la Universidad Santo Tomas seccional Tunja y el punto de prueba experimental se hizo a una distancia de 2.97 km, dicha comunicación tuvo línea de vista óptica entre los puntos mencionados.

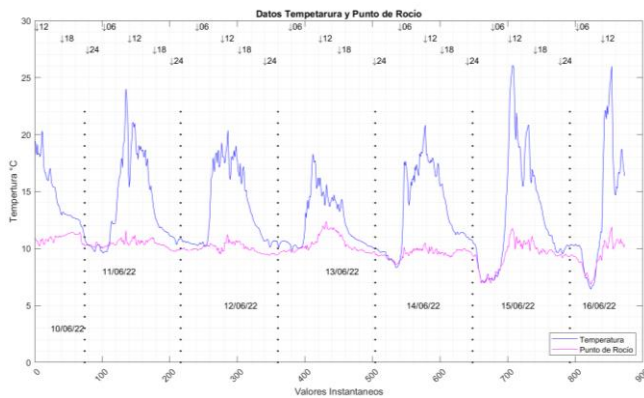
Durante la adquisición de datos se perdieron 280 tramas que representaron las 5 variables medidas, es decir, el 1.6 % de la información se perdió, en su mayoría se da cuando el sistema registraba temperaturas superiores a 21°C y en temperaturas inferiores se perdió una trama de datos cada 160 muestras de forma continua.



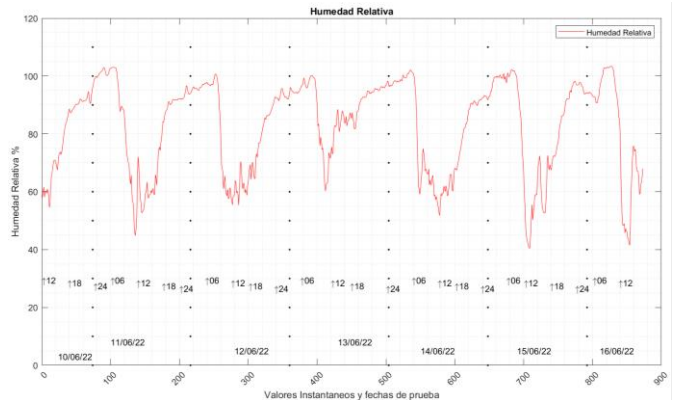
FIGURA 36: INTERFACE LABVIEW CON ADQUISICIÓN DE MUESTRAS

Fuente: Elaboración propia, 2022

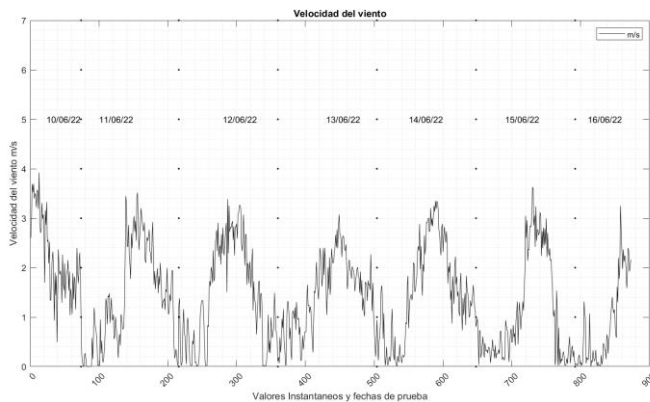
El microcontrolador y la interface tuvo una sincronización de 30 segundos para cada registro de dato, con el tiempo estimado se realizó promedios cada 10 minutos o cada 20 muestras para evaluar un nivel de exactitud en cada variable medida y no hacer un sobre muestreo, estos valores promediados se tuvieron en cuenta para realizar el tratamiento y análisis de recolección de agua de niebla. A continuación, se hace un resumen gráfico de los datos recolectados por la malla, por el cual, de 17440 muestras se lograron obtener 873 muestras durante los 6 días de prueba.



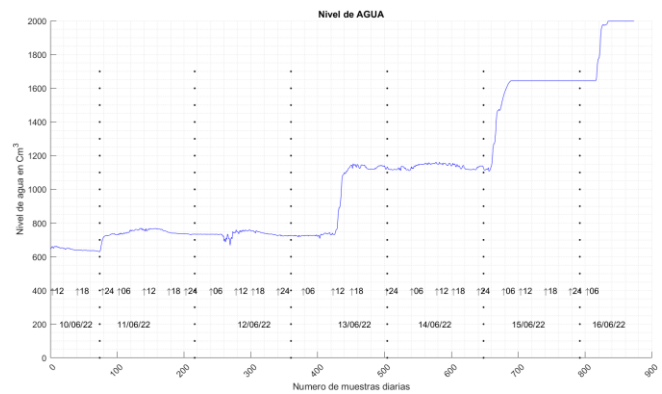
(a) Temperatura y punto de rocío °C



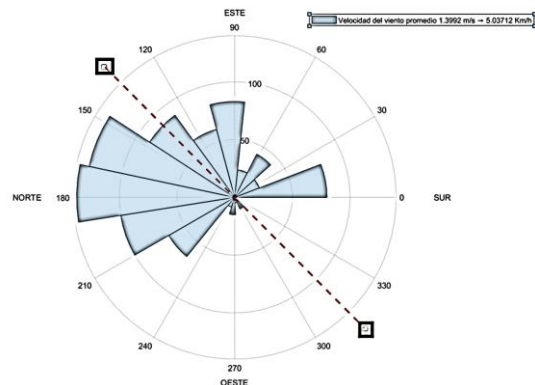
(b) Humedad Relativa %



(c) Velocidad del viento m/s



(d) Nivel de agua cm³



(e) Rosa de vientos (°)

FIGURA 37: RESUMEN DE VALORES INSTANTÁNEOS DE LAS 17440 A 873 MUESTRAS

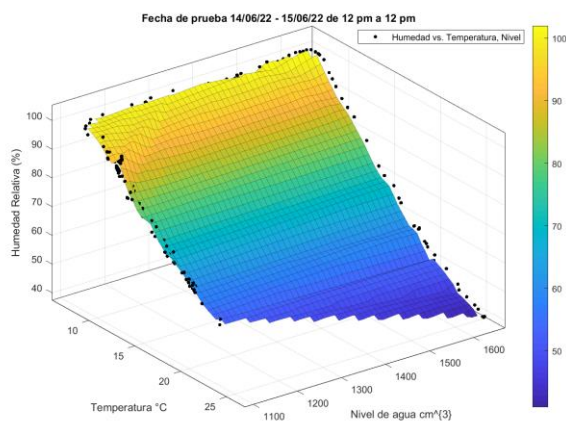
El resumen de adquisición de datos establece el número de muestras con su respectiva fecha e intervalos de 6 horas para identificar las condiciones climáticas diarias. En la *Figura 37a* se encuentra la temperatura atmosférica y el punto de rocío, en la *Figura 37b* se establece los niveles de humedades con subdivisiones hechas con puntos intermitentes que identifican el cambio de fecha, la *Figura 37c* establece la velocidad de viento diario, la *Figura 37d* muestra la cantidad de agua recolectada en el tanque y finalmente se visualiza la rosa de vientos que permite mostrar las direcciones de los vientos predominantes durante los 6 días.

7.3 Relación de variables climatológicas y captación de agua

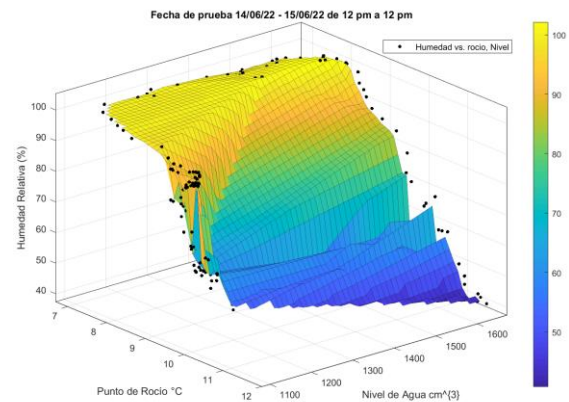
En la *Figura 38a* se puede observar el comportamiento del sistema captador de niebla durante 24 horas, específicamente la fecha del 14 al 15 de junio del 2022 donde la recolección de agua de niebla fue significativa. En primera instancia se relacionó las 5 variables medidas en tres dimensiones para lograr tener una visualización rápida de que variable fue importante a la hora de recolectar 537.92 cm^3 de agua durante 4 horas aproximadamente. En el eje Y de todos los gráficos [3D] es el nivel agua recolectada, en el eje X es la variable que se intercambié por medidas de Temperatura, Punto de rocío, velocidad del viento y dirección del viento y finalmente en el eje Z se estableció como variable fija la humedad relativa.

La *Figura 38a* tiene las proporciones medidas durante el día, cuando hay temperaturas altas en la ciudad de Tunja existen humedades relativas entre 51% y 82% y los niveles de elevación de agua en el tanque de almacenamiento son nulos. Ahora si se observa la *Figura 38[a-b]* la tendencia del nivel de agua crece lentamente cuando la temperatura atmosférica y el punto de rocío se vuelven del mismo valor, es decir, cuando la temperatura atmosférica y el punto de rocío tiene la misma temperatura se inicia el proceso una recolección de agua muy lenta teniendo en cuenta que la humedad relativa se encuentra cerca al 100 %.

En la zona de color amarillo que marca una humedad del 100% y punto de rocío entre 6.9°C y 8.2°C de la *Figura 38b* se mantiene constante y sin recolección de agua, solo se observa un crecimiento de agua cuando el valor del punto de rocío llega a una temperatura específica. Cuando la temperatura llega al mínimo, la captación de agua se ve reflejada en el eje del crecimiento del nivel de agua. Con el paso de las horas el tanque de agua reporta un incremento de 1106.52 cm^3 de agua a 1645.08 cm^3 , el proceso de llenado comenzó a detenerse cuando la temperatura atmosférica incremento 2°C y la humedad descendió paulatinamente.



(a) Relación Temperatura, Nivel Agua Vs Humeda Relativa



(b) Relación Rocío, Nivel Agua Vs Húmeda Relativa

FIGURA 38: RECOLECCIÓN DE AGUA EN 24 HORAS

Para entender mejor el comportamiento atmosférico que se mencionó, se determinó una curva de tendencia en gráficos de dos dimensiones para poder mostrar relaciones directas entre variables atmosféricas y el nivel de captación de agua. Las relaciones permitieron establecer un polinomio que se adaptó mejor al comportamiento de la variable y del mismo modo el coeficiente de determinación, también llamado R cuadrado, este refleja la bondad del ajuste al modelo.

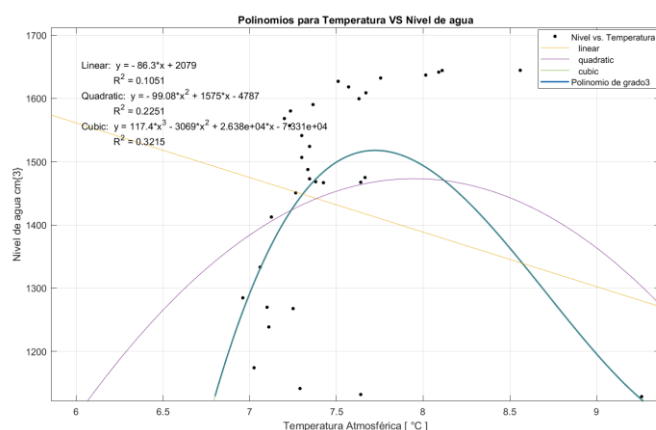
Rango de Coeficiente	Tipo de Correlación
$r = 1$	Perfecta
$0.8 < r > 1$	Muy Alta
$0.6 < r > 0.8$	Alta
$0.4 < r > 0.6$	Moderada
$0.2 < r > 0.4$	Baja
$0 < r > 0.2$	Muy Baja
$r = 0$	Nula

Tabla 7.1: Aproximado de Relación

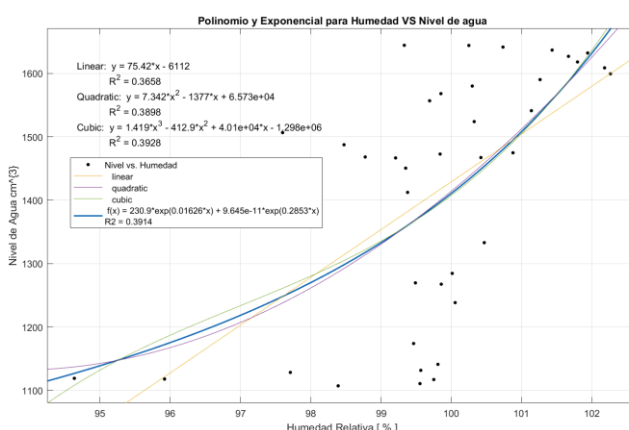
Fuente: Correlación Pearson, Juan Carlos Saravia

Cabe aclarar que las relaciones se hicieron donde hubo cambios de niveles de agua, es decir, que la correlación se efectuó en condiciones de incremento de agua de niebla en el tanque.

Durante la ejecución de las correlaciones no se encontró ningún tipo de relación lineal ya que la Bonda y el polinomio no tenía las condiciones necesarias para este tipo de tendencia. La *Figura 39a* se observa la dispersión de las variables de temperatura atmosférica y el nivel de agua, en la relación hay un patrón de curva donde la tendencia del modelo se adapta mejor a una función cúbica con coeficiente de determinación de 0.3215, es decir, un coeficiente de correlación de $r = 0.5670$ estos valores se relacionan con la Tabla 7.1 que identifica un aproximado de cuan fuerte es la relación entre la temperatura atmosférica y el nivel de agua, para los polinomios de grado 1 y 2 se obtuvo correlación de 0.31 y 0.46 respectivamente.



(a) Dispersión Temperatura y Nivel de agua del Tanque



(b) Dispersión Humedad y Nivel de agua del Tanque

FIGURA 39: CORRELACIÓN SEGÚN POLINOMIO Y COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

Fuente: Elaboración propia, 2022

Para el caso de la Humedad relativa vs el nivel de agua [Figura 38b] se logró una función cúbica con mejor relación de tendencia, con grados superiores del polinomio no se notaron cambios significativos en el coeficiente de determinación. Ambas graficas de la Figura 39 tienen en común el grado del polinomio, pero el coeficiente de determinación de la humedad es superior que el de la temperatura ya que su valor r es de 0.6267, por lo tanto, su tipo de correlación es alta y con polinomio de grado 1 y 2 el coeficiente de correlación sigue siendo alta.

Una vez determinado las ecuaciones y los coeficientes de determinación de la humedad y temperatura se establecen que tan importante es el punto de rocío, ya que esta variable es dependiente de la humedad y temperatura. En la Figura 40 se observa la dispersión del nivel de agua cuando se mantiene constante a cierta temperatura, cuando se reporta puntos de rocío superiores a 8.2°C la recolección de agua no crece de manera significativa, pero a medida que disminuye la temperatura se observa un crecimiento en el nivel de agua de forma constante. La relación polinomial que se adapta mejor a esta tendencia fue con una ecuación de 4to grado y su coeficiente de correlación es de 0.8191, tiene una correlación muy alta. Aun así, las ecuaciones con grado 2 y 3 tienen coeficientes de determinación de 0.5642 y 0.5848 y de acuerdo a su rango de correlación (0.75 y 0.76) su tipo es alto, en cambio el polinomio de grado 1 su correlación es de 0.15, es decir, una correlación muy baja.

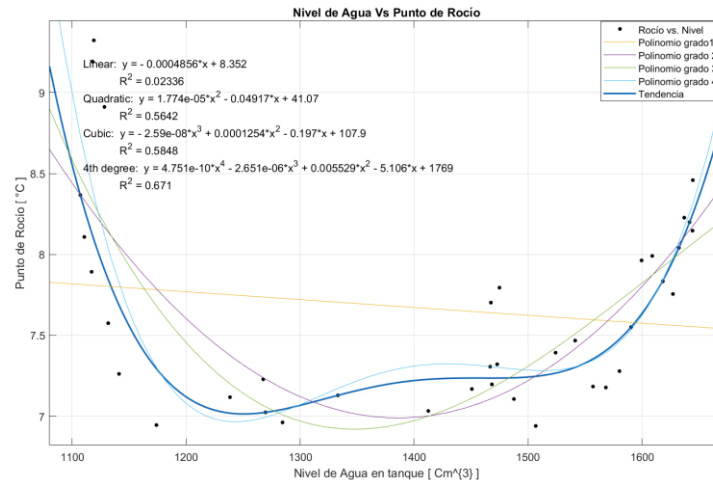


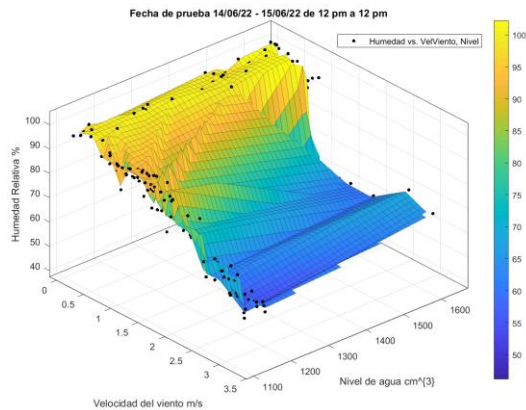
FIGURA 40: CORRELACIÓN DE AGUA Y PUNTO DE ROCÍO

Fuente: Elaboración propia, 2022

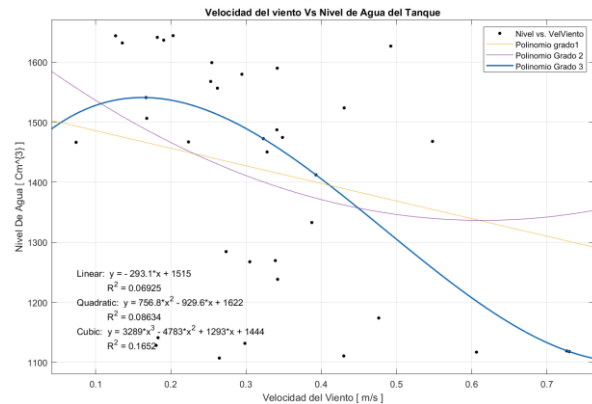
En conclusión, la variable que mayor peso o correlación tuvo fue el punto de rocío, siendo la variable dependiente de los valores de temperatura y humedad. De las variables independientes, la humedad obtuvo mayor peso ya que su correlación es alta y la temperatura obtuvo una correlación moderada. Todos los coeficientes de correlación fueron positivos.

Ahora se describe la perturbación que sufrió el sistema captador de niebla con los vientos durante el periodo de prueba. Cuando el sistema estaba sometido a un punto rocío recibió choques de vientos con velocidades entre 0.15 y 0.7 m/s para establecer una recolecta de agua constante. En la Figura 41a se observa el incremento de la velocidad del viento cuando el nivel del tanque estaba cerca de los 1640 cm^3 de agua y del mismo modo la humedad relativa baja de manera significativa, la velocidad del viento influyo en alguna medida la recolección de agua. Varios autores del marco referencial mencionaron que los vientos en ocasiones expulsan las gotas de agua adheridas a la malla por fuera de la canaleta.

Se determino una correlación para la velocidad del viento y el nivel de agua, la ecuación que mejor tendencia tiene es la función cubica con r^2 del 0.1612, es decir, un coeficiente de correlación del -0.4014 o una característica moderadamente negativa. Los demás polinomios de grados 1 y 2 tuvieron una correlación baja por lo que la velocidad del viento hace parte de la variable que menor peso obtuvo durante el análisis.



(a) Correlación de Viento, Nivel agua y Humedad

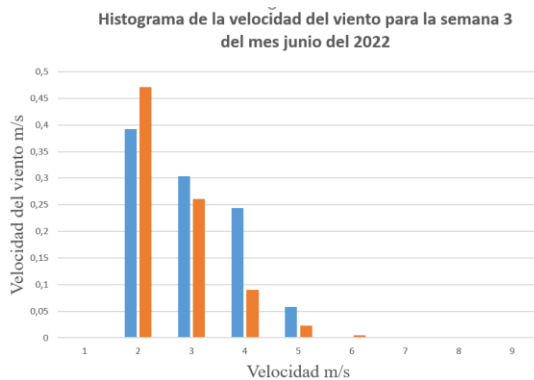


(b) Correlación de Velocidad del viento y Nivel de agua

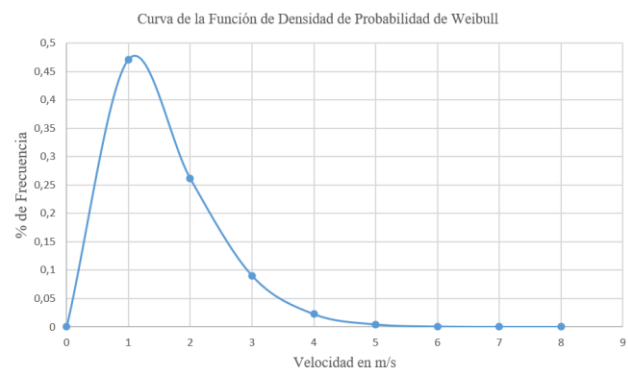
FIGURA 41: CORRELACIÓN VELOCIDAD DEL VIENTO Y AGUA

Fuente: Elaboración propia, 2022

En la evaluación del potencial del viento se hizo una distribución de Weibull donde se determinó cuantas veces se repite los valores de las velocidades en un rango de 0 a 8 m/s de acuerdo a una función de frecuencia en Excel de las 873 muestras obtenidas. En los resultados se observó que no se repiten datos después de los 4 m/s y para determinar el porcentaje de frecuencia se dividió los 8 datos en las 873 muestras para obtener un histograma en función de porcentaje de las frecuencias.



(a) Histograma de velocidad del viento



(b) Distribución de Weibull

FIGURA 42: CURVA DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE WEIBULL Y EL HISTOGRAMA

Fuente: Elaboración propia, 2022

De acuerdo a la cantidad de eventos (873) se determinó los valores de la Tabla 6.1 para realizar la distribución de Weibull. Con los parámetros de forma y de escala se logró conocer la distribución ajustada junto a la gráfica del histograma de frecuencia con las siguientes tablas.

σ	0,99304291
$\bar{U}$	1,40059164
K	1,4527372
C	1,55702055

U (m/s)	Frecuencia	% Frecuencia	Weibull
0	1	0,001144165	0
1	343	0,392448513	0,4712135
2	265	0,303203661	0,26128286
3	213	0,243707094	0,09014855
4	51	0,058352403	0,0224487
5	0	0	0,00429151
6	0	0	0,00065241
7	0	0	8,074E-05
8	0	0	8,274E-06

Tabla 7.2: Características de datos registrados

Fuente: Elaboración propia, 2022

En la *Figura 42b* se observa la gráfica característica para una k de 1.45 con una velocidad promedio 1.4 m/s, los eventos más frecuentes ejercidos sobre el sistema captador están en una velocidad de 1 m/s y la frecuencia después de esta velocidad disminuye la frecuencia de los eventos. Se generaron vientos de 4 m/s, pero muy poco frecuente, es decir, que con la cantidad de muestras realizadas se puede dimensionar el sistema recolector donde existe mayor frecuencia en la incidencia de viento y se puede captar en mayores proporciones niveles de agua como los observados en la *Figura 41*.

La *Figura 43a* se observa la rosa de vientos que determino la dirección del viento de norte a sur como viento predominante durante el incremento de agua, la gráfica demuestra que el choque del viento si se debe realizar de manera perpendicular a la malla para acumular y liberar las micropartículas de agua que se adhieren a la malla, esta mención de igual forma la hicieron algunos referentes bibliográficos sobre sistemas captadores de agua de niebla. La rosa de vientos de la *Figura 43b* representa las direcciones presentes durante las 24 horas de día.

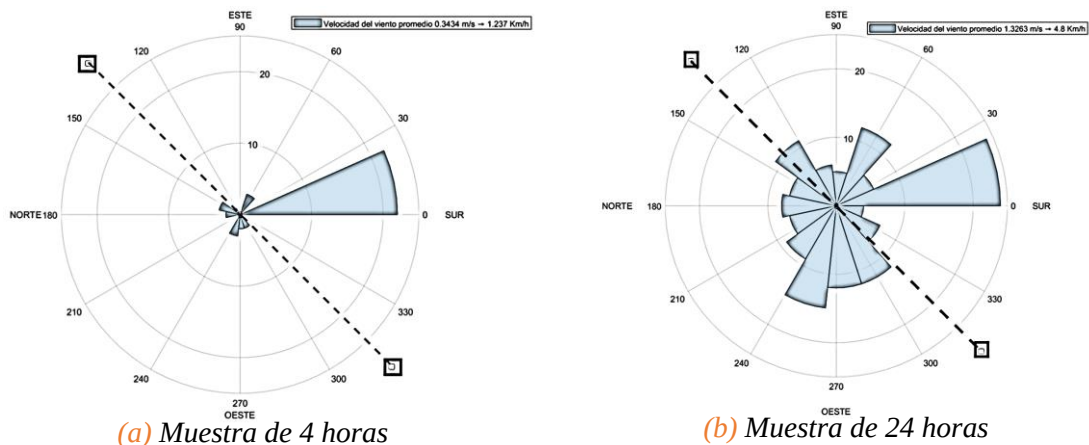


FIGURA 43: ROSA DE VIENTOS.

Fuente: Elaboración propia, 2022

De acuerdo a la *Figura 37d* no siempre habrá recolección de agua de niebla, el sistema dependerá de las condiciones climáticas que se presenten en la ciudad de Tunja, hay días donde no crece el nivel de agua en otros se debe al agua de lluvia. En la *Figura Anexos 6* es el claro ejemplo cuando no hay recolección de agua de ningún tipo, teniendo en cuenta la humedad como variable independiente de mayor peso, se ve reflejado en la gráfica que no crece el nivel de agua del tanque, no fue suficiente para establecer una condensación de agua sobre la malla ya que la variable del punto de rocío se vio afectada y su temperatura no permitió establecer una lluvia horizontal (niebla).

Para saber si es agua de lluvia, la *Figura Anexos 7* da una idea del comportamiento del sistema en este tipo de entornos, básicamente si hay crecimiento en el nivel de agua en el tanque y la humedad relativa se encuentra baja y el punto de rocío esta alto comparado con la *Figura 38b* se confirmaría la recolección de agua de lluvia. La niebla solo esta presente cuando la humedad relativa esta elevada y la temperatura atmosférica con el punto de rocío son iguales.

De acuerdo al número de muestras tomadas durante los 6 días, se observa una tendencia [*Figura 37a*] de recolección de agua de niebla significativa cuando el punto de rocío se establece entre la 00:00 horas y las 6:30 am, posiblemente los resultados podrían cambiar, las muestras se hicieron en épocas de invierno en la ciudad de Tunja.

El agua de niebla que se captó durante el periodo de muestreo solo puede usarse como agua de riego sin tener algún tipo de tratamiento, el agua no es apta para el consumo humano debe someterse a tratamientos de purificación (Rodolfo M. et al., 2015).

Una de las alternativas que puede generar la dimensión de este sistema es el riego de las plantas, estas requieren del 10 % de agua según la capacidad de la maceta (*Plagron, 2022*). Por ejemplo, si se recolecta 500 cm^3 de agua diaria para plantas con macetas cuadradas de 6*6*6 cm se está realizando el riego por cada planta de 21.6 cm^3 de agua o para un máximo de 23 macetas (*Jardinería On*).

8 Otros aportes

8.1 Presupuesto

La Tabla 8.1 es un resumen general de los materiales usados para el desarrollo del proyecto, se encuentra apartado por valor unitario y valor total de cada uno de los elementos y materiales implementados, la totalidad del proyecto fue financiado por el autor de este libro.

Elemento	Cantidad	Precio Unitario (COP)	Precio Total (COP)
Arduino Nano	1	\$ 37.000,00	\$ 37.000,00
Modulo Lora E21-TTL-100	2	\$ 52.000,00	\$ 104.000,00
Antena Omnidireccional Sma Macho 2.4 Ghz 5.8 Ghz 5dbi	2	\$ 28.000,00	\$ 56.000,00
Bornera 3 pines	4	\$ 600,00	\$ 2.400,00
Bornera 2 pines	2	\$ 400,00	\$ 800,00
Leds	3	\$ 500,00	\$ 1.500,00
Conector GP 2 pines	2	\$ 300,00	\$ 600,00
Regleta de Pines Header Macho - Hembra 1x40 2.54mm	2	\$ 1.000,00	\$ 2.000,00
Resistencias 1.5k Ω , 2.2k Ω , 4.7k Ω y 10k Ω	10	\$ 100,00	\$ 1.000,00
Regulador L7805	2	\$ 900,00	\$ 1.800,00
Kit de disipadores de calor	1	\$ 2.500,00	\$ 2.500,00
Condensador de tantalio 330 nf	4	\$ 1.100,00	\$ 4.400,00
Tarjeta PCB 2 capas	1	\$ 60.000,00	\$ 60.000,00
Cable - Alambre UTP Categoría 5E (5 Metros)	5	\$ 1.200,00	\$ 6.000,00
Potenciómetro 10 k Ω	1	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00
Sensor Am2301	1	\$ 27.000,00	\$ 27.000,00
Sensor HC-SR04	1	\$ 6.000,00	\$ 6.000,00
Anemómetro	1	\$ 268.000,00	\$ 268.000,00
Convertor USB A Serial Rs232 Uart Ttl Cp2102	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
Caja induma (15x15) cm	1	\$ 17.000,00	\$ 17.000,00
Polisombra 80% (1m)	2	\$ 9.500,00	\$ 19.000,00
Guaya galvanizada (1/8")	13	\$ 1.000,00	\$ 13.000,00
Perro Hg (1/8")	5	\$ 500,00	\$ 2.500,00
Tubo Ventilación (2m)	2	\$ 13.500,00	\$ 27.000,00
Tornillo Lámina Avellanado Negro 8X3/4	21	\$ 200,00	\$ 4.200,00
Madera de estructura	1	\$ 40.000,00	\$ 40.000,00
TOTAL:			\$ 714.700,00

Tabla 8.1: Presupuesto del proyecto

Fuente: Elaboración propia, 2022

Conclusiones

El sistema de captación de niebla de la presente investigación, es financieramente rentable ya que es un mecanismo de tipo artesanal con costos muy bajos. Mediante la utilización del simulador Autodesk inventor se evaluó un diseño de captador de niebla bidimensional más complejo para recolectar entre 3 y 4 litros de agua diarios, pero en base a falta de recursos económicos se desarrolló un modelo básico como el Neblinómetro SFC estándar para realizar el estudio. El estudio se realizó con una malla de coeficiente de sombra del 80 %, se mostró una eficiencia de colección de entre 350 cm^3 y 500 cm^3 de agua por día, en días lluviosos esta eficiencia de colección generaba un aumento de hasta 700 cm^3 de agua. Las muestras que se realizaron en una semana del mes junio del 2022 alcanzaron una recolecta de 2100 cm^3 de agua.

En la ingeniería electrónica es importante hacer un criterio de análisis y estudio de diversos elementos que mejor rendimiento y costo se adapten a un sistema, como el mecanismo recolector de agua de niebla. Antes de elegir los instrumentos necesarios para diseñar una tarjeta se deben conocer las condiciones con las que se exponen los elementos para elegir de manera correcta los dispositivos.

En esta investigación se determinó primero que variables influían en este tipo de sistemas y posteriormente se determina que rango de medidas se necesita medir, para poder saber elegir un instrumento correcto. Existen diversos sensores que miden la misma variable, pero en ambientes diferentes por lo que el costo-rendimiento varía. Es por eso que se realizó una descripción y comparación detallada de cada uno de los sensores, si se conoce bien las características dinámicas y estáticas de diversos instrumentos se podrá elegir y diseñar una tarjeta que mejor se adapte a las condiciones que se necesiten. Conociendo las características de consumo de cada sensor es posible hacer una tarjeta que adquiera los datos atmosféricos de forma conjunta.

Se optó por una transmisión inalámbrica para poder monitorear este sistema desde una distancia de 3 km, la instalación de este tipo de sistema se situó cerca a las afueras de la ciudad Tunja, es por eso que se usó tecnología LoRa, porque establece una comunicación con la radio frecuencia en diversos alcances. Se determinó la distancia entre el punto de monitoreo y el punto de prueba, para buscar un módulo que se acoplara bien al experimento, claramente los LoRa *E32-TTL-100*. Es importante considerar todos los factores que influyen en un sistema para encontrar el mejor rendimiento de un dispositivo que se acopló y del mismo modo reflejó los costos de diseño.

Con el proceso de calibración se obtiene resultados deseados de forma segura, se podrá confiar en la validez de las mediciones obtenidas, se siguió un proceso sistemático donde la metodología se basó en una documentación que permitió determinar las desviaciones del instrumento elegido con respecto a los valores indicados por un instrumento de referencia de incertidumbre conocida. En la calibración de sensores es claro que, a mayor número de datos registrados, se mejora la precisión de la ecuación que se obtenga de estos. Sin embargo, esto se ve limitado en el caso del sensor de temperatura y humedad, se necesita de equipos que generen numerosas humedades y temperaturas para establecer puntos de referencia con un sensor patrón. Es importante medir estas tendencias porque los sensores tienen fenómenos que se comportan diferente cuando toma lectura ascendente o descendente. Para calibrar otros sensores es aún más difícil, como el caso del anemómetro se necesita de laboratorios especializados para generar ambientes como los vientos. Para verificar el grado de exactitud medida por los sensores del sistema se recomienda en trabajos futuros comparar con estaciones meteorológicas *2401500086* e hidrológica *24017510* disponibles en la ciudad de Tunja en la página del **IDEAM**, de esta manera no se tiene el sesgo de una apreciación con sólo el registro del 2% de días del año.

Con la caracterización de un sistema recolector de agua a partir de niebla se pudo evaluar la relación entre la captación de agua y diferentes variables climatológicas según los datos tomados. Con los resultados se obtuvieron diferentes tipos de correlaciones que se interpretaron como el peso de cada variable para diferentes grados de polinomio, calculando así las proporciones de peso de cada variable con respecto a la cantidad de agua recolectada. Con el diseño del Neblinómetro SFC y el tipo de correlación se pudo constatar que la ciudad de Tunja cuenta con

las condiciones necesarias para implementar sistemas recolectores de agua de niebla, en el horario de la madrugada la variable de mayor peso es el punto de rocío, con esta medida se determinó la existencia de posible neblina y en segundo lugar la humedad que de acuerdo a la duración crece de manera significativa el nivel de agua. La perturbación del viento se relacionó como variable de menor peso, pero no significó que no tuviera validez en la recolecta, la dirección del viento si debe chocar de forma perpendicular a la malla y la velocidad del viento debe estar en rangos entre 0.3 y 0.7 m/s para obtener agua.

Las residencias de estrato 2 en promedio consumen 5 m^3 de agua al mes y este sistema optimizado puede generar 15 litros de agua al mes, si se considera una recolecta de 500 cm^3 de agua de niebla diaria. Es decir, que el sistema puede ahorrar el 0.3 % de consumo al mes, teniendo en cuenta que el diseño del sistema recolector es un modelo básico, existen diseños mucho más grandes para incrementar la cantidad de agua.

Trabajo Futuro

Como trabajo futuro, se puede diseñar un sistema mecánico que reconozca las condiciones necesarias para liberar una malla estilo cortina y gire sobre un eje la malla en la dirección del viento predominante o inclinación para recolectar agua de lluvia, una etapa de control. Con este posible desarrollo se tendrá cuidado de la malla por exponerse a vientos fuertes e innecesarios durante el día y se evita la pérdida de sombra durante el día ya que este sistema tiene un coeficiente de sombra que altera la luminosa.

Referencias

- [1] R. Tuesca, H. Ávila, A. Sisa, D. Pardo, “Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano”, Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales (IDEHA) Universidad del Norte P.G. 21, 22, Barranquilla, 2015
- [2] Ricardo Rodríguez Puerto, (21 de marzo 2012). Las fuentes de la Capital son la represa de Teatinos y diez pozos profundos. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-11403925>
- [3] Mónica P., Jessica L. & Ranndy, P., Diseño Mediante Modelos Matemáticos De Un Prototipo Para La Captación De Niebla En La Vereda De Leticia, Corregimiento De Pasacaballos (Bolívar), Como Método De Recolección De Agua, Universidad De San Buenaventura – Cartagena, 2016, p. 10-11
- [4] Colprensa. (25 de enero 2020). Caracol Radio [radio]. Caracol Tunja. https://caracol.com.co/emisora/2020/01/25/tunja/1579960451_976439.html
- [5] L. Muñoz Cárdenas, “Evaluación de la viabilidad de la utilización del agua atmosférica en la ciudad de Villavicencio, meta”, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, p. 13
- [6] D. Córdoba W. & O. González D., “Implementación de un sistema electrónico para el monitoreo meteorológico remoto y la captación de flujo nuboso en la parroquia del cañar canton”, Universidad de Azuay, Cuenca, Ecuador, 2012
- [7] IDEAM, 2021, “Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos”, Tunja-Boyacá <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>
- [8] Kevin Tobias M., “Análisis De Viabilidad Para La Implementación De Mallas Atrapanieblas En La Vereda San Antonio Bajo En El Municipio De Arbeláez - Cundinamarca”, (2020), p.p 15-17
- [9] Mussie F., Sabah A. Abdul-Wahab, Michael J. Savage, Thomas Kohler, Tseggai Gherezghiher, Hans Hurni, “Fog-water collection for community use”, (2014), P. 4-7
- [10] Jennifer Huertas R.& Paula Molina T., “Estudio De Prefactibilidad Para La Posible Implementación De Atrapanieblas En El Municipio De Ráquira”, (2016), P. 101,102
- [11] Hangarone (2018). Destillers exclusive. Recuperado de: hangarone.com.
- [12] Poveda, J. & Sanabria, J. (2017). Evaluación de la eficiencia de cinco materiales de malla para el sistema de atrapanieblas en el Municipio de Siachoque – Departamento de Boyacá. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Tunja, Colombia.
- [13] Osses et al. (2017). El clima desértico costero con nublados abundantes del desierto de Atacama y su relación con los recursos naturales energía solar y agua de niebla. Caso de estudio Alto Patache (20,5°S), región de Tarapacá, Chile. Revista de Geografía Norte Grande.
- [14] Kevin Tobias Mora A., “Análisis De Viabilidad Para La Implementación De Mallas Atrapanieblas En La Vereda San Antonio Bajo En El Municipio De Arbeláez - Cundinamarca”, (2020), P. 66, 67,68.
- [15] Carlos Espinosa A., “Patente De Invención Por Un Aparato Destinado A Captar Agua Contenida En Las Nieblas O Camanchacas”

- [16] Blanca C. Mendoza & Fredy R. Castañeda, “Criterios Metodológicos Para La Definición De Sistemas De Captación De Aguas Con Base En Lluvia Horizontal”, (Bogotá D.C 2014), P. 19
- [17] Cony G. Cabeza Garcia & Yudy K. Castillo Vargas, “Diseño De Un Sistema De Recolección De Agua Por Rocío Y Niebla Para El Abastecimiento De Agua En La Comunidad Del Barrio La Esperanza, Localidad De Chapinero”, (Bogotá D.C 2016), 28, 29
- [18] Carlos F. Piñeros R., “*ÁREA PRINCIPAL DE INGENIERÍA CIVIL DEL PROYECTO: SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO E INFRAESTRUCTURA VIAL*”, Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia, Tunja 2018, proyección social P. 19-20.
- [19] Daniel Valerio C., Antón G Martínez, Raquel Acero de la Cruz, Ariel Castaldo, José M. Perea & José M. Peinado “*METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN Y TIPIFICACIÓN DE SISTEMAS GANADEROS.*” Universidad de Córdoba, ISSN: 1698-4226 DT 1, Vol. 1/2004, pg. 7-8
- [20] Alcaldía de Medellín, “*Consideraciones y pautas técnicas para la elaboración de estudios de caracterización de grupos de valor, de interés y partes interesadas*”, Departamento Administrativo de planeación de información y evaluación, agosto de 2019
- [21] René Garreaud S. & Carolina Meruane N., “Instrumentos meteorológicos y humedad atmosférica”, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Geofísica, 2005, p
- [22] Rick Schellenberg, “How Hard Could That Be? Practical Humidity Calibration Experiences”, Veriteq Instruments, Inc., January, February, March 2001
- [23] Mike Coleman, “How to Accurately Calibrate a Hygrometer”, Fluke Calibration, dic. 04, 2019 - <https://la.flukecal.com/blog/how-accurately-calibrate-hygrometer>
- [24] M.Fossa & P.Petagna, “*USE AND CALIBRATION OF CAPACITIVE RH SENSORS FOR THE HYGROMETRIC CONTROL OF THE CMS TRACKER*”, University of Genova, Italy, Geneva 23, CH 1211, Switzerland, September, 2003
- [25] Deutsche windguard, “Calibration of wind direction sensors at Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services GmbH”, Oldenburger Str. 65 26316 Varel, Germany, 2018-07-23
- [26] Windspeed Ltd (Vector Instruments), 050-202-07 (S-W200P-7), W200P Potentiometer Windvane Specification Sheet, June 2003
- [27] P. Paredes G., Jose C. Ventura & C. Puican F. “*Construcción de un instrumento virtual para medir la dirección del viento, utilizando LabVIEW 8.0 y como sensores una veleta mecánica y un potenciómetro de precisión*”, Universidad Nacional del Santa, Departamento académico de energía y física, Nuevo Chimbote Perú, septiembre del 2012, pag. (23-25).
- [28] Sawan Shadadpuri Goplani, “*Análisis, caracterización y calibración de sensores de bajo coste para Arduino*”, Universidad de la Laguna, Septiembre 2018, pag. 62-65
- [29] Olalla Navarro, Luis A. “*Diseño y simulación de un sistema de predicción de generacion eólica basado en la investigación y predicción del clima*”, Universidad Fuerzas Armadas, agosto, 2020. Pag. 58-60
- [30] *Measurements At Automatic Weather Stations*, pag. 16, 2015 , Acceso 25 marzo 2022

Anexos

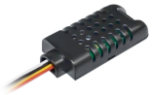
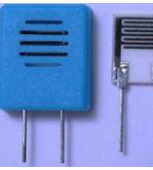
Variable	N°	Sensor	Descripción	Características eléctricas		Producto
Temperatura	1	Pt100 Sensor De Temperatura RTD 3 Hilos Wzp-035 50cm	La resistencia del RTD es una franja de platino de 100 ohmios a 0°C, el platino tiene un factor positivo y variación de resistencia en función de la temperatura de 0,3850/°C nominal. La conexión de 3 hilos resuelve el problema de error generado por los cables.	IDT: PT100 Exactitud: 1/3DIN(±0,1°C), Grado A(±0,15°C), Grado B(±0,3°C) Temperatura rango: 1/3DIN: 0~+150 °C ; Grado A: -50~+300°C; B: -70~+500°C; Precisión: ± 0,5 °C de -10 °C a + 85 °C Tamaño de la sonda: Diámetro: 3~ 9 mm, longitud: 3 mm ~ 1000 mm Material de la sonda: Acero inoxidable, cobre, niquelado cobreado, ABS, PVC. Cable: Serie UL (como UL1007) Conector: Molex, JST, DuPont, CWB, CJT, etc. Composición: tubo de PVC; tubo de fibra de vidrio; tubo de teflón Costo: \$ 60.000		
	2	Termocupla Tipo K E52-CA1DYM6 1M	Aleación de NI-CR, tiene un rango de 0 a 300°C y una sensibilidad de 41 uV/°C y resiste atmosferas humeda.	Voltaje de funcionamiento: 3. 0 ~ 5. 5V Circuito interno de compensación de unión fría integrada Resolución: 12 bits, 0. 25 grados; Tiempo de conversión: 0.17 s máximo 0.22 segundos. Consumo máximo: 1.5 mA. Rango de compensación de unión fría: - 20 ~ + 80 grados, Comunicación: SPI 3 Rango: 0-600 grados Exactitud: 41 mV/°C Costo: \$ 27.000		
	3	Sensor de humedad capacitivo y termistor tipo NTC - Am2301	Sensor de salida digital I²C con integración de humedad y temperatura en un solo chip, sus aplicaciones mas importantes son electrodomesticos, aplicaciones medicas, estaciones meteorologicas, entre otros. Alto rendimiento en entornos hostiles y su estructura de plastico esta diseñada para proteger los dos sensores.	Resolución: 0,1 %HR Rango: 0 - 99,9 %HR Precisión: 25 °C ±3 % HR Repetibilidad: ±1 %HR Lento: ±0,3 %RH	Alimentación: 3.3Vdc ≤ Vcc ≤ 5.5Vdc Corriente: 1 - 1,5mA Tiempo de sensado: 2s Comunicación: Protocolo I²C estándar Costo: \$ 30.000	
Humedad	1	Sensor de humedad capacitivo y termistor tipo NTC - Am2301	Sensor de polímero orgánico para detección de lluvia, estaciones meteorológicas o de uso científico. Son muy útiles en controles atmosféricos, control de sistemas médicos o interiores. Excelente linealidad, bajo consumo de energía y alta relación rendimiento-precio.	Resolución: 0,1 °C Rango: 0 - 99,9 %HR Precisión de medición temperatura: <±0,5°C Resolución Temperatura: 0.5°C Rango: -40 °C ~ 80 °C Repetitividad: ±0,2 °C		
	2	Sensor de humedad resistivo - Hr202	Sensor de polímero orgánico para detección de lluvia, estaciones meteorológicas o de uso científico. Son muy útiles en controles atmosféricos, control de sistemas médicos o interiores. Excelente linealidad, bajo consumo de energía y alta relación rendimiento-precio.	Rango de operación: humedad (20 - 95 % RH) Rango de temperatura de funcionamiento temperatura: (0 - 60 °C) Fuente de alimentación: 3,3 v - 5 v Consumo Máximo: 15 mA Frecuencia de operación: 500 Hz - 2kHz Potencia nominal: 0,2 mW Valor Central: 31 kΩ (a 25 °C, 1 kHz, 1 V CA, 60 % de HR) Exactitud: + -5%HR Histéresis: + -1%HR Tiempo de respuesta <10s Costo: \$ 12.000		
	3	Sensor por condensacion - S8000 Integrable	Los sensores de humedad tipo espejo son altamente precisos, tanto metrología como aplicaciones industriales, son de alta calidad en precisión, estabilidad y repetitividad.	Precisión : ±0,1°C (±0,18°F) Reproducibilidad : ±0,05°C (±0,09°F) Tecnología de medición : Espejo refrigerado Rango de punto de rocío : -40°C Rango de temperatura : -40 a +90°C : -40 a 120°C : -40 a +120°C Presiones de hasta 2 MPa (20 bar) Conectividad USB, Ethernet, RS485 o RS232 Registro de datos a tarjeta SD o vía comunicación digital		

Tabla Anexos 1: Variables de interés Temperatura y Humedad

Fuente: Elaboración propia, 2022

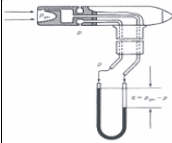
Velocidad del viento	1	Anemómetro de Copelas - Modelo: JL- FS2	Instrumento ideal para medir la velocidad del viento. Tiene rangos de medición de 0 a 30 m/s, con precisión de 3% y resolución del 0,5 m/s. Se puede obtener el nivel de velocidad del viento a traves de señal de voltaje de 0 a 5 voltios.	Estilo: tres tazas Material: aleación de aluminio. El modo de su señal de salida: 0-5 V (señal de voltaje) voltaje de suministro: DC 9-24V Consumo de energía: voltaje MAX≤0.3W Inicio de la velocidad del viento: 0,4-0,8 m / s Resolución: 0,1 m / s Rango efectivo de medición de la velocidad del viento: 0-30 m / s Error del sistema: ± 3% Distancia de transmisión: más de 1000 m Medio de transmisión: transmisión por cable Modo de conexión: sistema de tres cables Temperatura de trabajo: -40 °C ~ 80 °C Humedad de trabajo: 35% ~ 80	
	2	Sensor Anemómetro con tubo de pitot PCE-HVAC 2	Este sensor es polifuncional porque permite medir velocidad del viento, presión atmosférica, caudal y temperatura ambiental. La información puede ser transferida a un ordenador.	Rango de medición: 1 - 80 m/s Resolución: 0,01 m/s Precisión: Unidad m/s: ±2,5 % del valor de medición Alimentación: 1 x pila de 9 V Condiciones de funcionamiento: 0+50 °C / < 90 % H.r. sin condensación Condiciones de almacenamiento: -10+60°C / < 90 % H.r. sin condensación Memoria interna: 99 valores por parámetro Interfaz: USB	
	3	Sensor Anemómetro Filamento Caliente - modelo L.T- YK2005AH	Entrega una medición rápida y precisa, aun a velocidades de aire muy bajas. Es un instrumento que mide la velocidad del aire, flujo volumétrico, temperatura del aire y registra datos en tiempo real. Con un microprocesador presenta alta exactitud.	Dimensiones y peso: 203 x 76 x 38 mm, 515 g/ 1.13 LB. Rango: Velocidad del aire 0.2 a 20.0 m/s Resolución: 0.1 m/S, 0.7-72.0 km/h 0.1 Km/h Temperatura del aire: 0°C a 50°C / 32°F a 122°F Precisión: Velocidad del aire ± (5%) de lectura o ± (1%) Condiciones de operación: 0 a 50°C, Menos de 80% en H.R. Unidades de medición: m/S	
Nivel de agua	1	Sensor de transmision hidrostática - Presion Diferencial KIT0139	Adopta un alto rendimiento, tiene un chip que compensa la temperatura con la transmisión de nivel. Tiene un módulo que transforma la señal de corriente en voltaje para cualquier microcontrolador.	Longitud del cable: 16.4 ft. Rango de medición: 0.0-16.4 ft. Precisión: 0,5% Señal de salida: 4-20 mA. Tensión de funcionamiento: 12-36 V. Temperatura de funcionamiento: -4.0 °F a 158.0 °F. Capacidad de sobrecarga: 300%. Vida útil: 1 x 10 ^ 8 circulación de presión (77.0 °F). Material: acero inoxidable 316L. Clase de protección: IP68.	
	2	Medidor por ultrasonido - HC-SR04	Es un sensor ultrasonido que mide distancia. El sensor no se ve afectado por la luz u objetos de color negro. Empleado para proyectos con sistema de medición de nivel.	Voltaje de Operación: 5V DC Corriente de reposo: < 2mA Corriente de trabajo: 15mA Rango de medición: 2cm a 450cm Precisión: +- 3mm Ángulo de apertura: 15° Frecuencia de ultrasonido: 40KHz Duración mínima del pulso de disparo TRIG (nivel TTL): 10 µS Duración del pulso ECO de salida (nivel TTL): 100-25000 µS Dimensiones: 45*20*15 mm Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de otra 20ms (recomendable 50ms)	
	3	Medidor resistivo - HW-038	Realiza la detección de agua a través de la resistencia pull de 1MΩ. Es un sensor de bajo consumo eléctrico y alta sensibilidad.	Voltaje de funcionamiento: DC3-5V Corriente de funcionamiento: menos de 20mA Tipo de sensor: Analógico Área de detección: 40 mm x 16 mm Proceso de producción: FR4 de doble cara HASL Temperatura de funcionamiento: 10-30 °C Humedad: 10% -90% sin condensación Dimensiones del producto: 62 mm x 20 mm x 8 mm	

Tabla Anexos 2: Variables de interés Viento y Nivel de agua

Fuente: Elaboración propia, 2022

Lista de materiales de tarjeta de integración

Nº	MATERIAL	PROTEUS	REFERENCIA / Data.	N.º de producto de Digi-Key
1	Regulador de voltaje	Regulador Lora y Regulador Tem hum Niv	Regulador de voltaje 12v a 5	TS90115CYRMGCT-ND
2	Condensador 1	C_int_T.H.N y C_INT_LORA	Condensador de tantalio de 1 uf a 16v	478-7525-1-ND
3	Condensador 2	C_out_T.H.N y C_OUT_LORA	Condesandor de tantalio de 1uf a 10v	399-9449-1-ND
4	Microcontrolador	Regulador Arduino	Regulador de voltaje de 12 a 10.5 v	497-14163-1-ND
5	Condensador 3	C_INT_ARDUINO	Condensador de 0.33 uf a 16v	732-7661-1-ND
6	Condensador 4	C_OUT_ARDUINO	Condensador de 0.1 uf a 10v	399-C0805C104K8RAC7800CT-ND
7	Led	(Leds) D1, D2, Y D3	indicador de sensor	754-1590-ND
8	Resistencia 1	Resistencia LED	Resistencia de 1k de 1/2w	RHM1.00KAFCT-ND
9	Conector 1 macho-hembra	J1, J2	Conector header de 15 pines	PPTC161LFBN-RC
10	Conector 2 macho 2 pines	Alimentacion 12v	Bornera 2 pines	277-1667-ND
11	Conector 3 macho 3 pines	3 ENTRADA SENSOR	Bornera 3 pines	277-1578-ND
12	Conector 4 macho 4 pines	1 Entrada Sensor	Bornera 4 pines	277-1579-ND
13	Receptáculo Conector 4	-----	Conector hembra de los sensores - USB TYPE-B	 ED2982-ND
14	Conector 4 Posiciones Libre	-----	Conector Macho - Anemometro	1175-1014-ND
15	USB 2.0 Cable Macho B	-----	Cable entrada macho - Veleta, Am2301 y Nivel	123-A-USB20BM-OE-050BE28-ND
16	Conexión rápida Hembra	-----	Conexión Bateria	A27621CT-ND
17	Resistencia tx,rx pull up	rx y tx	Resistencia de 5.6 k de 1/4w	311-5.6KERCT-ND
18	Resistencia division de tension	tx	Resistencia de 1.4 k de 1/4	311-1.40KFRCT-ND
19	Resistencia division de tension 2	ground	Resistencia de 2.2 k de 1/4 w	13-RC1206FR-132K2LCT-ND

Tabla Anexos 3: Lista de materiales de tarjeta de integración

Esquemático de tarjeta de transmisión y recepción de datos

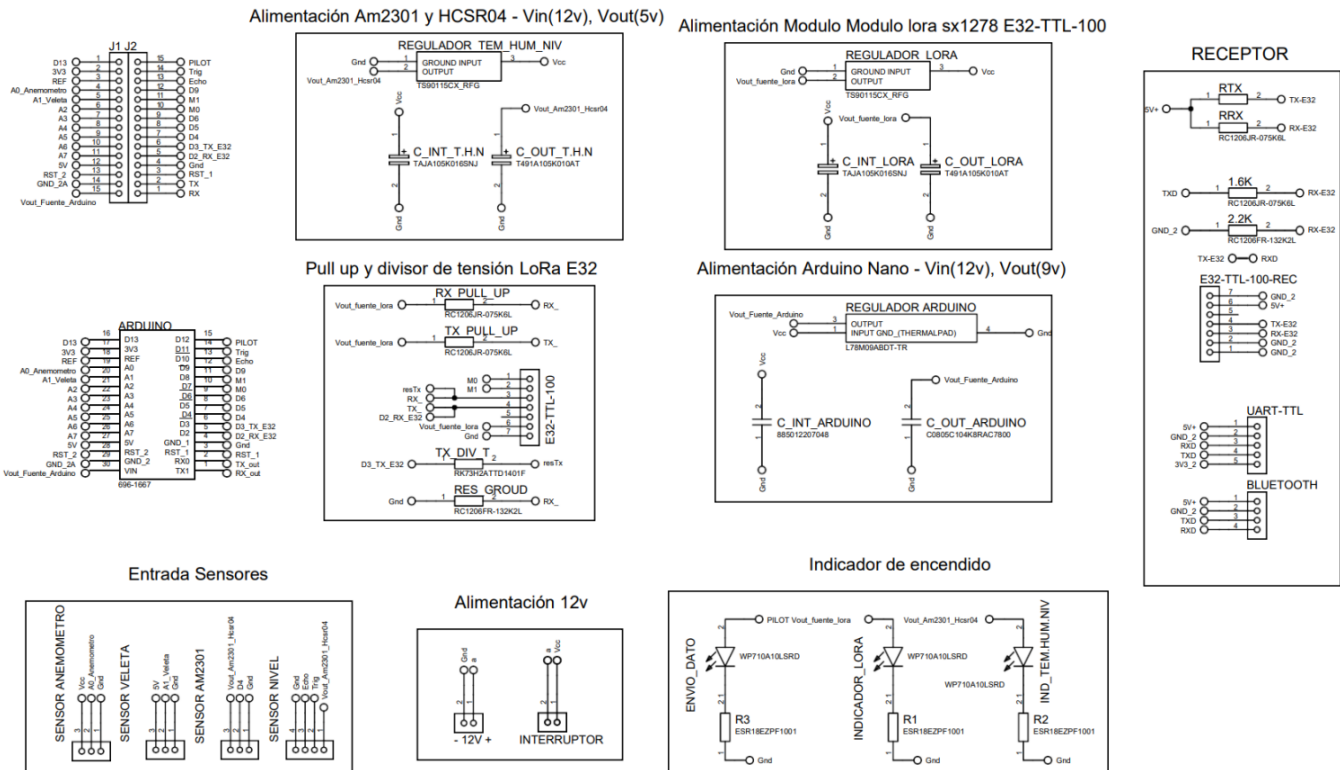
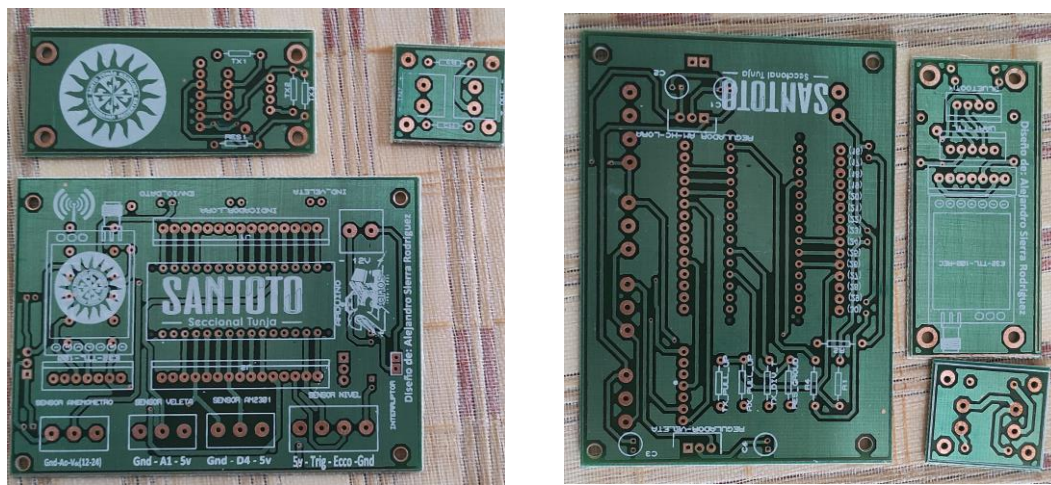


Figura Anexos 1: Esquemático de adquisición de datos

Fuente: Elaboración propia, 2022



(a) Capa superior

(b) Capa inferior

Figura Anexos 2: Fabricación de PCB de transmisión y recepción

Fuente: Elaboración propia, 2022

Montaje de veleta

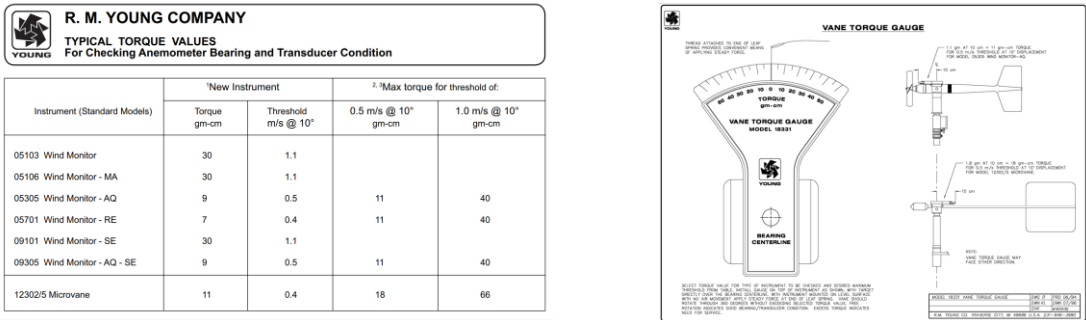
La tensión de salida de la señal se lee en la entrada analógica del Arduino con voltajes desde 0 hasta 5v, tensión de alimentación entregada por el Arduino. Este diseño tiene una banda muerta, cuando el cursor deslizante está dentro de la banda muerta, se comporta como un corto circuito. En la *Figura 9* se muestra el diseño guía que usó para montar la veleta de potenciómetro.



Figura Anexos 3: Sensor Veleta

Fuente: Elaboración propia, 2022

El cuerpo de la veleta que se observa en la Figura 0.3 de anexos está conformado por dos tapones roscado de PVC de ½”, en la parte inferior se posiciona el potenciómetro donde fue eliminado el seguro de final de carrera para que girara libremente el cursor deslizante los 360° sobre su eje. Se asegura el potenciómetro internamente a un tornillo sin cabeza de 9 cm x 8mm hasta la parte superior. Las dimensiones de la veleta fueron tomadas de la referencia S21210 incluyendo la direccional con el contrapeso.



(a) Vane Torque Gauge – R18331

(b) Valores de torsión para veletas

Figura Anexos 4: Torque para veletas

Fuente: Wind System Calibration

Bloques de interface LabVIEW

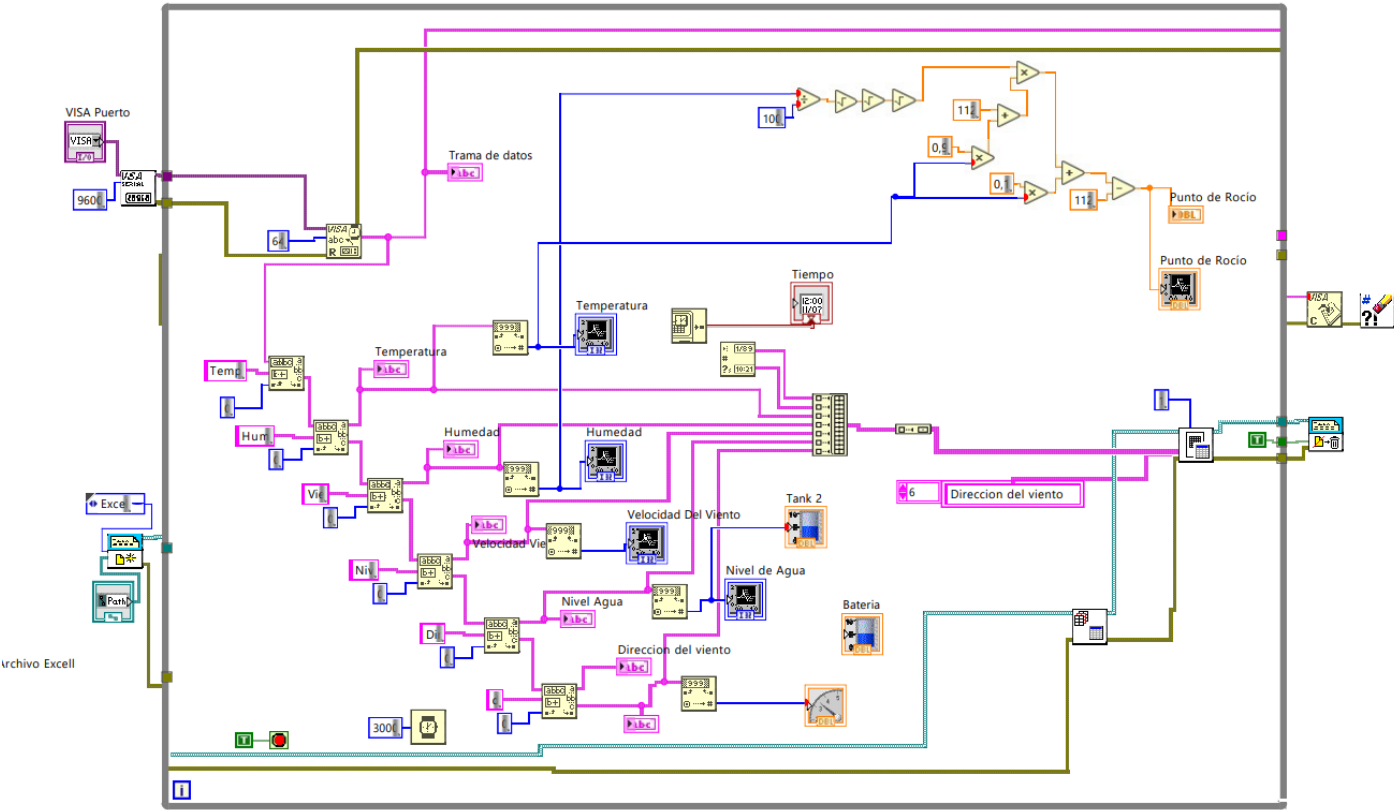


Figura Anexos 5: Diagrama de bloques de LabVIEW

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Posibles condiciones sin la existencia de neblina

Si la humedad relativa no se mantiene en el 100 %, no hay suficiente tiempo para generar una condensación de las partículas de agua sobre la malla, por lo tanto, la recolección de agua es nula. La dirección del viento predominante tiene que chocar de manera perpendicular a la posición de la malla para obtener niveles elevados de recolección, en este caso se presentó dos condiciones que no fueron favorables para obtener agua

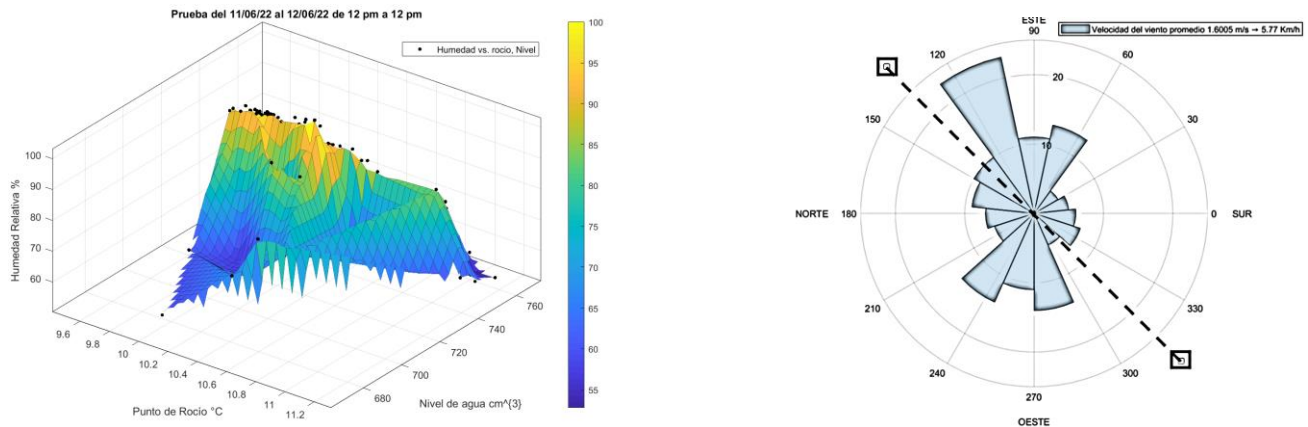


Figura Anexos 6: Sin recolección de agua

La ventaja del sistema recolector de niebla es la alternativa de recoger agua de lluvia, lo hace en menores proporciones por la posición que se encuentra la malla, está diseñada para captar rocío horizontal.

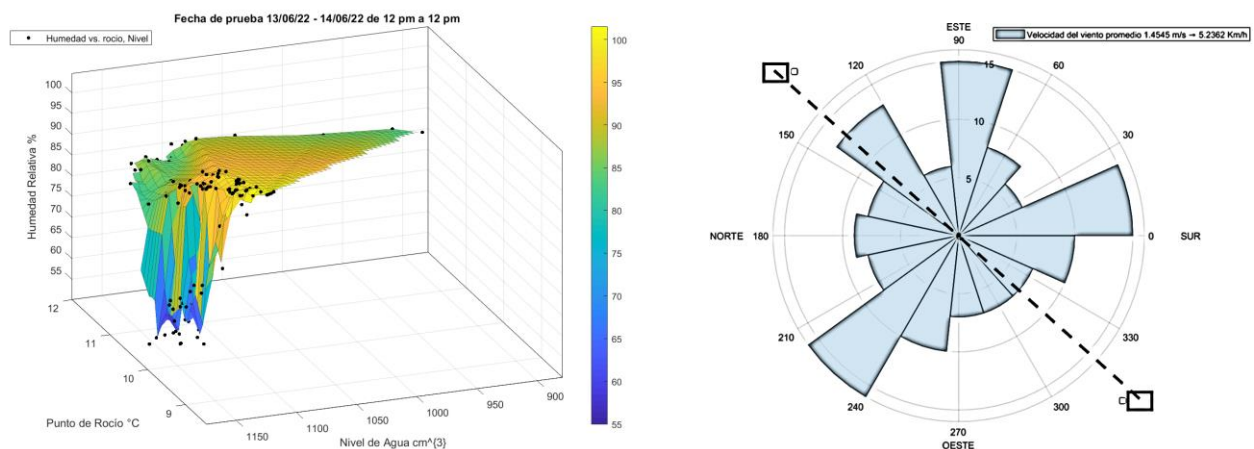


Figura Anexos 7: Recolección agua de lluvia

Link Base de Datos, Fuente Autor

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1MaX9rsZgUpaXnvjXGH0KHS6fFr3E3RrL/edit?usp=sharing&oid=102827683151653130839&rtpof=true&sd=true>

Código en IDE Arduino Transmisión de datos

```
#include "Arduino.h"
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial E32_TTL_100(2, 3); // RX, TX
#include "DHT.h" // libreria del sensor de temperatura
#define DHTTYPE DHT21 // DHT 11
#define DHTPin 4 //Pin del sensor DHT;
DHT dht(DHTPin, DHTTYPE); //
float t;
float h;
int TRIG = 11; // trigger en pin 11
int ECO = 10; // echo en pin 10
int LED = 12; // LED en pin 3
String datos; // TRAMA DE DATOS PARA COCATENAR
String stringT; // TEMPERATURA
String stringH; // HUMEDAD
String stringV; // VELETA

float DURACION; // HC-SR04
float DISTANCIA; // HC-SR04
float Volumen; // NIVEL DE AGUA DEL TANQUE
String stringD; // caracter de veleta
String stringN; // caracter de nivel
String stringB;

String Direccion;
float velocidad;
float voltaje;
float Grado_corregido; // variable de calibracion de veleta
float BATERIA;

void setup() {

pinMode(TRIG, OUTPUT); // trigger como salida
pinMode(ECO, INPUT); // echo como entrada
dht.begin(); // Inicializar el sensor DHT
Serial.begin(9600); // velocidad
pinMode(7, OUTPUT); // establece los modos de modulo LoRa
pinMode(8, OUTPUT); // establece los modos de operacion en 00|01|10|11
pinMode(LED, OUTPUT); // Indicador de transmision de datos
Serial.println("Cargando..."); // indica si transmite desde el monitor serial
E32_TTL_100.begin(9600); // se define la velocidad en tx y rx en otro puerto del arduino
//E32_TTL_100.println("Dato");
}

void loop() {

digitalWrite(7, LOW); // segun la hoja tecnica del LOr se deja en modo normal [0]
digitalWrite(8, LOW); // segun la hoja tecnica del LOr se deja en modo normal [0]
digitalWrite(LED, HIGH); // estado inicial del led indicador
delay(100);
digitalWrite(LED, LOW);
digitalWrite(TRIG, HIGH); // generacion del pulso a enviar
delay(1); // al pin conectado al trigger
digitalWrite(TRIG, LOW); // del sensor
DURACION = pulseIn(ECO, HIGH); // con funcion pulseIn se espera un pulso
// alto en Echo
float DISTANCIA = (DURACION / 58.2); // distancia medida en centimetros
float Distancia_Corregida = 1.011 * DISTANCIA + 0.1013; // ecuacion de calibracion ultrasonico
float tanque = 49.13 - Distancia_Corregida; // resta del espacio vacio y el agua del tanque
Volumen = 3.141592653589 * (4 * 4) * tanque; // nivel de agua en ml
stringN = String(Volumen); // caracter para enviar por el serial

float h = dht.readHumidity(); // Lectura de la humedad
float HR_Corregida = 1.065 * h - 1.676; // Ecuacion de calibracion humedad
float t = dht.readTemperature(); // Lectura de la temperatura
stringT = String(t); // envia el dato de temperatura en formato caracter
stringH = String(HR_Corregida); // Corrige el dato de la humedad con la ecuacion de calibracion
int valorAnemometro = analogRead(A0); // Leemos el pin analógico A0 para el anemometro
int ValorVeleta = analogRead(A1); // Leemos el pin analógico A1 para la veleta
float Grado_corregido = -5.277e-05 * ValorVeleta * ValorVeleta + 0.3545 * ValorVeleta + 34.2; // ecuacion de
```

```

//calibracion de veleta
// en los siguientes condicionales se define un rango de grados de la veleta y su respectiva direccion
if (Grado_corregido>=69.4 && Grado_corregido<=78.37){
  Direccion = 0.1;
}
if (Grado_corregido>78.37 && Grado_corregido<104){
  Direccion = 45;
}
if (Grado_corregido>=104 && Grado_corregido<=154){
  Direccion = 90;
}
if (Grado_corregido>154 && Grado_corregido<=180){
  Direccion = 135;
}
if (Grado_corregido>180 && Grado_corregido<=244){
  Direccion = 180;
}
if (Grado_corregido>244 && Grado_corregido<=264){
  Direccion = 225;
}
if (Grado_corregido>264 && Grado_corregido<=322){
  Direccion = 270;
}
if (Grado_corregido>322){
  Direccion = 315;
}
voltaje = valorAnemometro * (5.0 / 1023.0); //lectura analoga la convertimos ese valor en voltaje
velocidad = 6*voltaje; //El nivel de velocidad del viento es proporcional al voltaje de salida.
// se cocatena los datos para enviar los datos en formato caracter por el puerto del modulo LoRa
datos = " Temp " + stringT + " Hum " +stringH + " Vie " +velocidad + " Niv " +stringN+ " Dir " +Grado_corregido + " d" + Direccion ;

Serial.println("Mensaje Enviado...");
E32_TTL_100.println(datos); // transmision de datos por tx del modulo lora
delay(30000); // tiempo por el cual se toma lectura y envio dato
}

```