

Tecnológico de Costa Rica
Centro académico de Alajuela
Escuela de Ingeniería Electrónica
Programa de Licenciatura en Ingeniería Electrónica



Sistema de monitorización IoT para la producción de agua con cosechadores atmosféricos.

Informe del Trabajo Final de Graduación para optar por el título de
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Marvin André González Orozco

Alajuela, 29 de noviembre de 2023

Esta obra está bajo una licencia [Creative Commons «Atribución-NoComercial 4.0 Internacional»](#).



Declaro que el presente documento de proyecto de graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos y resultados experimentales propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de proyecto de graduación realizado y por el contenido del presente documento.

Marvin André González Orozco

Alajuela, 29 de noviembre de 2023

Céd: 2-0760-0292

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Centro académico de Alajuela
Escuela de Ingeniería Electrónica
Proyecto de Graduación
Acta de Aprobación

Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado *Sistema de monitorización IoT para la producción de agua con cosechadores atmosféricos.*, realizado por el señor Marvin André González Orozco y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador

LUIS ROBERTO
PEREIRA ARROYO
(FIRMA)
Firmado digitalmente
por LUIS ROBERTO
PEREIRA ARROYO
(FIRMA)
Fecha: 2023.11.29
13:29:19 -06'00'

Dr. Roberto Pereira Arroyo
Profesor Lector

JONATHAN
CEDEÑO
CHAVES (FIRMA)
Digitally signed by
JONATHAN CEDEÑO
CHAVES (FIRMA)
Date: 2023.11.29
21:26:59 +01'00'

MSc. Jonathan Cedeño Chaves
Profesor Lector

RENATO RIMOLO
DONADIO (FIRMA)
Firmado digitalmente por
RENATO RIMOLO DONADIO
(FIRMA)
Fecha: 2023.11.29 12:04:45 -06'00'

Dr. Renato Rímolo Donadio
Profesor Asesor

Alajuela, 29 de noviembre de 2023

Resumen

Este proyecto se realiza en la escuela de Ingeniería Electrónica del Tecnológico de Costa Rica, en colaboración con el proyecto del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) “Desarrollo de un sistema sostenible de cosecha de agua Atmosférica para uso comunitario y en sistemas productivos en Costa Rica”, el cual va a ser implementado en la escuela de playa Torres en isla Caballo ubicada en el golfo de Nicoya, Puntarenas.

La comunidad de Isla caballo presenta grandes problemas con el servicio de agua para el uso comunitario debido a la disminución de la intensidad de la lluvia, así como el daño que presentan los mantos acuíferos de la región que han llegado a dañar los pozos de los cuales se abastecen de agua.

Debido a esto, el DOCINADE planteó un proyecto en el cual fuera posible cosechar agua potable para poder satisfacer la escasez que presenta la zona, utilizando hidropaneles para la extracción atmosférica.

Este proyecto también busca que se pueda medir e informar la comunidad e investigadores las condiciones climatológicas, la cantidad de agua que se ha obtenido y la calidad de la misma utilizando dispositivos conectados a internet para que la información pueda ser monitorizada de manera remota sin tener que ir a visitar el lugar.

Por lo que en este proyecto se va a trabajar en el desarrollo de un prototipo de sistema IoT para el monitoreo remoto de la producción de agua por parte de los hidropaneles que componen el sistema de cosecha de agua atmosférica, utilizando sensores de flujo y mediciones de las variables meteorológicas para correlacionar la producción, de forma que se pueda determinar una relación entre la productividad y el clima en la ubicación del sistema y que además permita verificar que el sistema opere correctamente.

Palabras clave: Arduino, Cosechador de agua, IoT, Microcontrolador, Sensores

Abstract

This project is being carried out at the Electronic Engineering School of the Costa Rican Institute of Technology (TEC), in collaboration with the Doctorate in Natural Sciences for Development (DOCINADE) project entitled "Development of a sustainable Atmospheric Water Harvesting system for community and productive use in Costa Rica," which will be implemented at the Playa Torres School on Caballo Island, located in the Gulf of Nicoya, Puntarenas.

The community of Caballo Island faces significant water supply problems, both for communal use and due to the decrease in rainfall intensity and damage to the region's aquifers, which have affected the water wells they rely on. In response to this, DOCINADE proposed a project to generate potable water to alleviate water scarcity in the area using hydropanels. This project also aims to measure and report climatological conditions, the amount of water obtained, and its quality to the community and researchers using internet-connected devices, allowing remote access to this information without the need for physical visits.

This project addresses the development of an IoT system prototype for the remote monitoring of water production by the hydropanels that make up the atmospheric water harvesting system, using flow sensors and measurements of weather conditions.

This will allow the correlation of production, enabling determination of a relationship between productivity and climate at the location of the system, as well as providing feedback on the system's operational status.

Keywords: Arduino, IoT, Microcontroller, Sensors, Water Harvester

A mis padres y hermana, los cuales con amor y dedicación siempre me han ayudado y acompañado en cumplir mis sueños. Su arduo trabajo y apoyo incondicional han sido la clave para que pueda realizar este proyecto, son mi motivación para poder seguir adelante y estaré agradecido toda la vida por todo lo que han hecho por mi...

Agradecimientos

Agradezco a todos los profesores que me ayudaron en los distintos problemas que se me presentaron durante la carrera e incluso a adaptarme en las diferentes sedes que estuve presente, así como a mis amigos que siempre estuvieron para apoyarme. También al Tecnológico de Costa Rica por brindarme la oportunidad de estudiar y proporcionarme el equipo necesario para mi formación académica.

Marvin André González Orozco

Alajuela, 29 de noviembre de 2023

Índice general

Índice de figuras	III
Índice de tablas	V
1. Introducción	1
1.1. Diagrama general de la solución	4
1.2. Objetivos y estructura del documento	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Cosecha de agua	6
2.2. Hidropaneles	9
2.3. Sistema IoT	14
3. Sistema de monitoreo IoT para la producción de agua.	17
3.1. Descripción general del sistema	17
3.2. Descripción del hardware utilizado	18
3.2.1. Nodos de medición	19
3.2.2. Gateway o nodo central	20
3.3. Implementación del software	23
3.3.1. Estructura de los nodos de medición	23
3.3.2. Estructura del Gateway	25
4. Resultados y análisis	28
4.1. Prototipo Inicial	28
4.1.1. Costo del sistema	28
4.2. Pruebas de funcionamiento	30
4.2.1. Calibración de los sensores	31
4.2.2. Medición de volumen de agua	31
4.2.3. Prueba de comunicación entre nodos.	33
4.2.4. Prueba de envío de datos al servidor	34

4.3. Validación de los datos alojados en el servidor.	36
5. Conclusiones y recomendaciones	39
5.1. Conclusiones	39
5.2. Recomendaciones	40
Bibliografía	41
A.	44
A.1. Algoritmo para la calibración de los sensores de flujo	44

Índice de figuras

1.1. Ubicación Isla Caballo	2
1.2. Diagrama general del sistema IoT	5
2.1. Mapa de precipitaciones de Costa Rica [8]	7
2.2. Funcionamiento del sistema de cosecha de agua de lluvia. [10]	8
2.3. Hidropanel SOURCE. [14]	10
2.4. Diagrama de partes de un hidropanel SOURCE. [14]	11
2.5. Electroválvula. [16]	12
2.6. Hidropaneles ubicados en la Escuela de Ingeniería Electrónica en Cartago. [18]	12
2.7. Ubicación planificada de los sistemas de recolección de agua en Isla Caballo [18]	13
2.8. Sensor de flujo de agua. [23]	14
2.9. Raspberry Pi 4 y sus principales características. [24]	15
2.10. Arduino MEGA. [25]	16
3.1. Diagrama de bloques del sistema propuesto.	18
3.2. Diagrama detallado de la parte eléctrica del sistema.	19
3.3. Pines del Arduino MEGA compatibles con la función Interrupt. [26]	19
3.4. Diagrama de conexión del sensor de flujo Digiten FL-808.	20
3.5. Pinout de la Raspberry Pi 4 [27]	21
3.6. Diagrama de conexión de las electroválvulas.	22
3.7. Diagrama de conexión de la señal reset del Arduino.	22
3.8. Diagrama de flujo del nodo de medición.	24
3.9. Diagrama de flujo para la activación de los relays.	25
3.10. Diagrama de flujo para el posteo de datos en el servidor.	26
4.1. Maqueta del sistema propuesto.	30
4.2. Prueba de comunicación local	33

4.3. Mensaje de error en la comunicación entre el Arduino y la Raspberry Pi. . .	34
4.4. Visualización del Dashboard del servidor Cosecha de agua.	34
4.5. Confirmación de envío exitoso de datos.	35
4.6. Visualización de datos en el servidor.	35
4.7. Vista de gráficos de los datos almacenados en el servidor	37
4.8. Datos de volumen de agua, graficados en Microsoft Excel	38
A.1. Script para la calibración de los sensores de flujo	44

Índice de tablas

4.1. Costo y cantidad de los componentes que conforman el nodo de medición. .	29
4.2. Costo y cantidad de los componentes que conforman el nodo central. . . .	29
4.3. Resultados de la prueba de calibración del sensor de flujo	31
4.4. Resultados de la prueba de medición de volumen contenido	32

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años, el avance tecnológico ha desencadenado una transformación radical en nuestra vida cotidiana, redefiniendo nuestra interacción con el entorno que nos rodea. Este cambio es palpable en la forma en que, a través de dispositivos portátiles, como los teléfonos inteligentes, accedemos a un vasto universo de información y realizamos acciones de manera remota, desde cualquier lugar y en cualquier momento.

En este contexto de evolución tecnológica, una de las innovaciones más sobresalientes y de mayor impacto es el Internet de las Cosas (IoT)[1]. Esta revolucionaria tecnología ha posibilitado la conectividad en línea de objetos comunes, desde electrodomésticos hasta vehículos y sistemas de seguridad para el hogar.

Estos objetos interconectados pueden comunicarse entre sí, recopilar datos en tiempo real y tomar decisiones de manera autónoma o basada en comandos remotos, transformando la manera en que interactuamos con nuestro entorno físico y digital.

El impacto del IoT se extiende a diversas industrias y sectores, mejorando significativamente la calidad de vida de las personas. Desde la detección temprana de situaciones de peligro hasta la automatización de procesos en el hogar y la supervisión en tiempo real [2] de sistemas críticos, esta tecnología ha demostrado su capacidad para generar soluciones innovadoras que impulsan el progreso y la eficiencia en diferentes ámbitos de nuestra vida.

En este contexto de innovación y progreso tecnológico, el presente proyecto propone una solución centrada en la implementación de un sistema de monitoreo IoT para la producción de agua mediante cosechadores atmosféricos. El objetivo principal es facilitar la verificación y supervisión en tiempo real de la cantidad de agua producida por estos cosechadores, a través de una interfaz gráfica web intuitiva y de fácil acceso.

Los cosechadores de agua atmosférica seleccionados para este proyecto serán instalados en la escuela de Playa Torres, ubicada en la Isla Caballo, Puntarenas. Sin embargo, es necesario destacar que la Isla Caballo presenta desafíos específicos que requieren una adaptación cuidadosa del sistema para garantizar su correcto funcionamiento, teniendo en cuenta además las necesidades particulares de la población local y el entorno único en el que se desarrollará el proyecto.

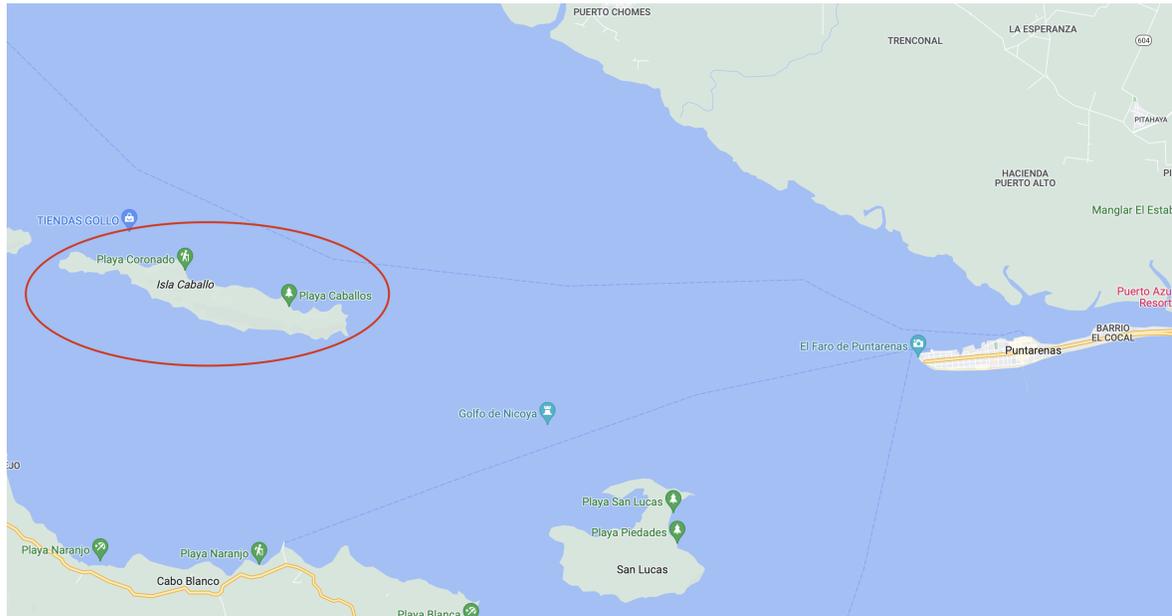


Figura 1.1: Ubicación Isla Caballo

La Isla Caballo, ubicada en el golfo de Nicoya, alberga a una población de poco más de 250 habitantes, como se muestra en la figura 1.1 [3]. Sin embargo, su aislamiento y la lejanía de la ciudad más poblada; Puntarenas [4], generan importantes obstáculos para acceder a servicios esenciales, como lo son la energía eléctrica y el agua potable.

El difícil acceso a estos servicios básicos, especialmente agua potable, destaca los problemas que enfrenta la población de Isla Caballo. La falta de acceso a servicios médicos y la dificultad para obtener agua limpia afectan directamente a la calidad de vida de los habitantes.

Otro punto desfavorable para los habitantes de Isla Caballo es que posee una topografía montañosa, lo que deriva que la mayoría de las viviendas se ubiquen principalmente en las playas de la isla, causando así que sus habitantes se dediquen principalmente a la pesca [4].

En cuanto al recurso hídrico, los habitantes dependen de pozos excavados por ellos mismos para almacenar agua. Sin embargo, en muchos casos, el agua resulta salina y no apta para el consumo [5]. Como solución, el Instituto de Acueductos y Alcantarillados (AyA) proporciona agua potable a la isla mediante lanchas, aunque este servicio resulta costoso para la mayoría de los habitantes.

La escasez de agua potable en Isla Caballo pone de manifiesto una serie de problemas graves que afectan a las zonas remotas del país. Por ejemplo, el EBAIS local enfrenta dificultades debido a la falta de agua limpia y dulce, indispensable para el adecuado lavado de manos, aseo del área y limpieza de instrumentos médicos.

Aunque si bien los pobladores se las ingenian para utilizar el agua obtenida de los pozos, tienen un acceso limitado a agua potable, ya que como se mencionó anteriormente la única forma de obtenerla es transportándola desde Puntarenas en recipientes plásticos, ya que los pozos existentes se contaminan con agua salada y no son utilizables.

Como parte integral de este proyecto, se planea la instalación de cosechadores de agua atmosférica en una escuela ubicada en Playa Torres. Esto no solo responde a las necesidades de la institución, donde el agua es vital para su funcionamiento, sino que también busca mejorar la calidad de vida de los estudiantes y profesores.

A pesar de los retos asociados con la falta de red eléctrica e internet fijo en la zona, el proyecto busca ser autosuficiente tanto en energía como en conexión a la red. La implementación de paneles solares y la conexión a la red celular mediante módems y tarjetas SIM son soluciones propuestas para superar estas limitaciones.

Es importante destacar que el diseño del sistema de cosechadores de agua atmosférica ya está en proceso de prueba en la escuela de Ingeniería Electrónica del Tecnológico de Costa Rica, utilizando hidropaneles para verificar su funcionamiento antes de su implementación en la Isla Caballo.

1.1. Diagrama general de la solución

Como se menciono anteriormente, la implementación de un sistema de monitoreo remoto para un proyecto como el de los cosechadores de agua atmosférica en la comunidad de Isla Caballo, es muy importante debido a la distancia y el difícil acceso con el que cuenta la escuela de Playa Torres.

El desarrollo va a permitir verificar cual es la cantidad de agua que se puede producir en una zona como esta para así poder ajustar los paneles, colocar mas o incluso plantear la reproducción de este proyecto en otras zonas del país.

Debido a que el sistema de hidropaneles no cuentan con sensores conectados a internet para poder monitorizar remotamente la cantidad de agua producida, es necesario buscar cuales se pueden utilizar que sean precisos, de bajo costo y eficientes energéticamente, para que puedan ser parte del proyecto.

Además de esto, es importante que logren satisfacer la necesidad de poder acceder a los datos en tiempo real de la cantidad de agua almacenada proveniente de los hidropaneles y que en caso de que se dañen se puedan reemplazar fácilmente.

Con el objetivo de poder visualizar con mayor claridad la propuesta del sistema IoT para el proyecto de cosecha de agua atmosférica, se muestra en la figura 1.2 un diagrama general de la solución propuesta.

En este diagrama se puede observar como el sistema IoT está compuesto por una fase de obtención de datos, los cuales se obtienen en las variables del sistema para luego ser enviadas a un microcontrolador (Raspberry Pi 4 en este caso); de la cual se abordara de manera más especifica en el siguiente capitulo.

Esta es la encargada de recibir los datos provenientes de los nodos de medición del sistema propuesto, para luego ser enviados a un servidor el cual permite que mediante un dispositivo conectado a internet, se puedan visualizar los datos el sistema desde cualquier parte del mundo, es decir sin importar a la distancia que estemos.

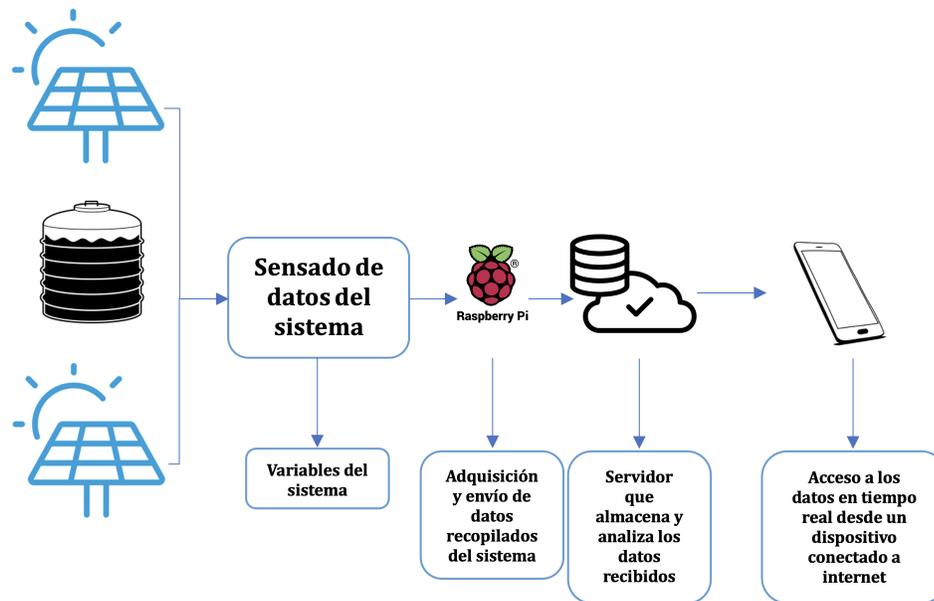


Figura 1.2: Diagrama general del sistema IoT

1.2. Objetivos y estructura del documento

Este proyecto tiene como principal objetivo el poder desarrollar e implementar un prototipo de sistema IoT autónomo, que permita monitorizar remotamente la cantidad de agua producida por los cosechadores de agua atmosférica por medio de nodos de medición y un gateway o nodo central mediante el uso de internet, con el fin de proporcionar información en tiempo real para mejorar la eficiencia del proceso de cosecha y asegurar un suministro sostenible de agua potable en la escuela de Playa Torres en la Isla Caballo.

Para ello se va a diseñar un sistema IoT que recolecte los datos generados por los sensores de flujo conectados a la tubería de los hidropaneles.

Además de esto se van a realizar pruebas y calibraciones para asegurar la precisión y confiabilidad de los sensores en el momento que estén realizando las mediciones.

Finalmente, para que las personas encargadas del proyecto puedan verificar estos datos de forma remota, se va a integrar un servidor en el cual los datos van a ser guardados.

Con respecto a la estructura del documento, en el capítulo numero 2, se presentan los conceptos teóricos que explican la solución propuesta en el capítulo 3. En el capítulo 4 se muestran las pruebas realizadas al sistema y el análisis de los datos obtenidos y finalmente en el capítulo 5 se mencionan las conclusiones obtenidas con este proyecto y las recomendaciones para actualizaciones futuras.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se comentan los aspectos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento del sistema propuesto, además que expone un panorama más amplio sobre la situación que se vive en la Isla Caballo, esto con el fin de comprender de una mejor manera porque es necesario el desarrollo de este proyecto.

2.1. Cosecha de agua

El agua es un recurso vital para la vida, todos los seres vivos la necesitamos para poder saciar la sed y poder alimentarnos, aunque también la utilizamos para actividades recreativas, agrarias o inclusive en la industria siendo en algunas ocasiones la materia prima principal de muchos emprendimientos.

Sin embargo, en los últimos años se ha presentado un problema muy serio y es que debido a los cambios climáticos que ha sufrido el planeta, el recurso hídrico de muchas zonas ha comenzado a escasear y el agua potable se ha tenido que racionar mucho debido a las sequías que sufren muchas zonas del planeta [6].

Estas afectan la economía de dichos lugares así como los ecosistemas en donde se encuentran. Si bien esta es una de las principales causas de la escasez, no son el único factor que afecta el acceso al agua potable sino también las inundaciones [7]. Esto ya que generalmente son las encargadas de contaminar los mantos acuíferos con sedimentos provenientes de otros lugares, destruirlos o incluso desviar ríos completamente eliminando permanentemente la fuente de agua. [7]

Costa Rica; aunque es un país tropical y está en una zona donde generalmente llueve mucho, no se escapa este problema debido a que en el último semestre, se ha reportado una importante disminución en la intensidad de las lluvias, en más de un 70% en algunas zonas del país [8] provocando así racionamientos de agua.

Zonas como Guanacaste y el Pacífico Norte son las más afectadas por esto [8] tal y como se muestra en la figura 2.1 donde se observa como Guanacaste y el golfo de Nicoya son las zonas donde menos ha llovido, y no es de sorprenderse que esas zonas es donde se más han presentado los problemas de sequías, provocando que los caudales de los ríos disminuyan y generando grandes problemas con el abastecimiento de agua potable.

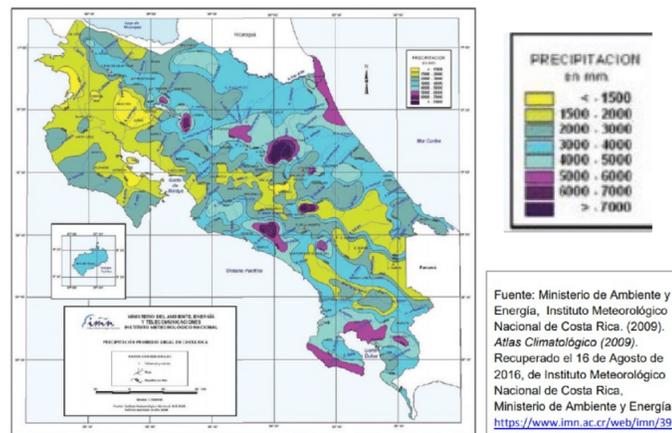


Figura 2.1: Mapa de precipitaciones de Costa Rica [8]

Debido a esto se han implementado varios tipos de sistemas para cosecha de agua con el fin de poder mitigar o al menos disminuir este tipo de problemáticas.

Uno de los sistemas más utilizados es el de cosechar agua pluvial también conocida como recolección de agua de lluvia [9]. Esta técnica consiste en recolectar y almacenar el agua que proviene de las lluvias para luego ser filtradas y utilizadas dependiendo de cómo se necesite, siendo una práctica sostenible y eficiente para la obtención de agua en lugares donde normalmente es el acceso al agua limitado o tiene un flujo irregular y también para lugares.

El funcionamiento de ese tipo de sistemas [10] consiste principalmente en la captación de agua que se realiza a través de superficies como techos y canoas tal y como se muestra en la figura 2.2, lo que hace que cuando llueve, esta agua sea dirigida hacia tuberías previamente construidas y se pueda proceder filtrar, esto con el objetivo de eliminar cualquier suciedad, sedimentos, insectos e inclusive hojas que estuvieran presente en el agua o en las estructuras en donde se recolecta.

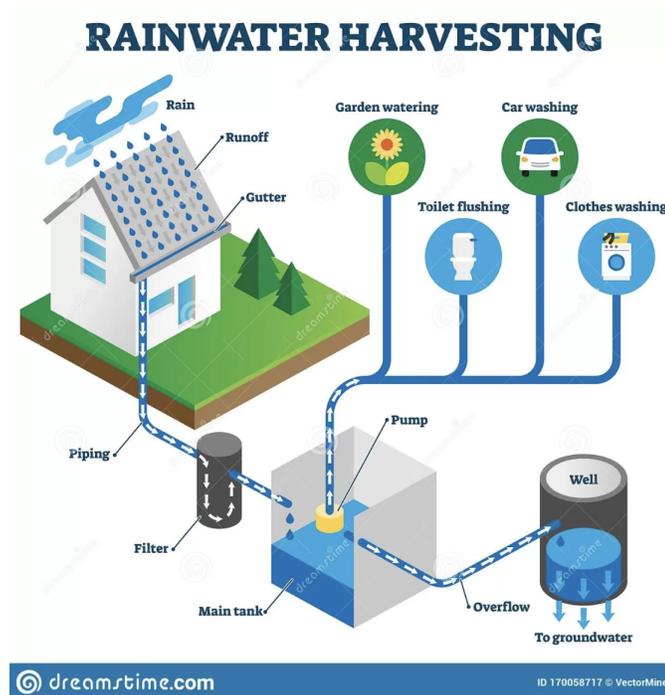


Figura 2.2: Funcionamiento del sistema de cosecha de agua de lluvia. [10]

El siguiente paso consiste en el almacenamiento de esta, en el cual se utilizan tanques diseñados para este fin y que generalmente poseen gran capacidad de almacenamiento para así poder ser utilizada cuando se requiera. [10]

Este tipo de sistemas de recolección de agua brindan una serie de ventajas como lo son la disminución de la dependencia de los sistemas de acueductos tradicionales, el uso de un recurso natural renovable como lo es el agua de lluvia y hablando por el tema económico para zonas de riesgo social o zonas muy aisladas también es muy beneficioso ya que el costo del agua cosechada por este método es muy bajo más aún si se compara con otros sistemas de recolección de agua [11].

Si bien las ventajas antes mencionadas justifican la utilización de este tipo de sistemas, también presenta una serie de desafíos sobre todo por el tema de la dependencia de la cantidad y frecuencia de las lluvias que se presentan en el lugar donde se implementará, más tomando en cuenta un lugar como lo es Isla Caballo la cual como se aprecia en la figura 2.1 es parte de las zonas donde la cantidad del recurso pluvial es menor.

Además de esto, también presenta el inconveniente que si un lugar no posee canchales o un techo adecuado para la cosecha de agua llovida podría limitar su aplicación por ejemplo en zonas indígenas donde generalmente las edificaciones son tipo cónicas, sin embargo el problema que más tiene este tipo de sistemas es con la calidad del agua, ya que dependiendo de la contaminación que esté presente en la zona el agua necesitara más procesos de

filtrado para poder ser consumida, lo que implica mantenimientos más seguidos y cambios periódicos en los sistemas de filtrado.

Debido a esta serie de inconveniencias que poseen los sistemas de cosecha de agua pluvial, el DOCINADE; el cual es un programa interuniversitario de doctorado de la región mesoamericana cuyo objetivo es el de desarrollar capacidades humanas de investigación científica para mejorar la calidad de vida del ser humano y su relación con la sostenibilidad [12], presenta una propuesta de proyecto en la cual en lugar de cosechar agua de lluvia utilizarán cosechadores de agua atmosférica, es decir recolecta el agua que se encuentra en el ambiente.

Estos sistemas utilizan la técnica basada en la extracción y condensación de la humedad que se encuentra en el aire para así obtener agua potable. La principal diferencia con la cosecha el agua pluvial es que este tipo de sistemas permiten recolectar agua en zonas donde casi no llueve o incluso en desiertos. [13]

Este tipo de cosecha de agua, por sus características, utilizan una serie de procesos y dispositivos más complejos y costosos si lo comparamos con el método de la recolección de agua de lluvia, ya que utiliza dispositivos llamados hidropaneles de los cuales en la siguiente sección se explicará su funcionamiento.

2.2. Hidropaneles

Los hidropaneles o AWG (atmospheric water generator) por sus siglas en inglés, son un dispositivo los cuales están diseñados para poder aprovechar la humedad presente en el aire con el fin de generar agua potable [13].

Estos, como se puede observar en la figura 2.3, se semejan mucho a lo que es un panel solar por lo que incluso en muchas ocasiones son confundidos por uno de estos, sin embargo, la función que realizan y la manera de operar es totalmente distinta a los paneles de los sistemas de producción de energía fotovoltaica.

El funcionamiento de los hidropaneles se basa principalmente en principios físicos [14] y una serie de procesos tecnológicos que involucran sensores sistema de calentamiento condensación filtración y distribución con el objetivo de poder extraer y condensar el vapor del agua que contiene el aire para su posterior conversión en agua líquida [15].

Además de esto los hidropaneles están formados por una serie de componentes los cuales se describen a continuación [14]:



Figura 2.3: Hidropanel SOURCE. [14]

- Marco y carcasa: Estos componentes forman la estructura del hidropanel, su función es el de proteger los distintos componentes que contiene el dispositivo.
- Panel solar: Como se aprecia en la figura 2.3, el hidropanel posee un panel solar en la parte central del mismo, el objetivo de este es el poder brindar autonomía al sistema para poder colocarlo en locaciones remotas sin tener que preocuparse de la red eléctrica.
- Material de absorción: Es uno de los principales componentes del hidropanel, ya que este es el encargado que absorber y retener la humedad que posee el aire con el fin de poder capturar y condensar el agua, generalmente se utiliza gel de sílice[14].
- Sistema de flujo de aire: Compuesto por entradas y salidas de aire, las cuales se encuentran entre el material de absorción. El objetivo de este es el asegurar que el aire húmedo entre en contacto con el material de absorción y se pueda capturar el vapor de agua que posee.
- Sistema de calentamiento y condensación: Estos dos sistemas, en conjunto son los encargados de liberar el vapor de agua del material absorbente para luego ser condensado y así formar gotas de agua.
- Sistema de recolección de agua: Similar al sistema de cosecha de agua llovida, este se encarga de recolectar las gotas de agua que se generaron en el sistema de calentamiento y condensación en un depósito que contiene el hidropanel, y una vez este se encuentre en su máxima capacidad, pasa a tanques por medio de tuberías para poder filtrarla y conservarla.

- Sistema de filtrado: Este sistema posee varias etapas de filtrado con el objetivo de purificar y tratar de eliminar todas las impurezas que contenga el agua recolectada.

Como se puede observar, los hidropaneles poseen una serie de subsistemas los cuales permiten hacer realidad el poder recolectar agua del aire, el cual como se explicó, el aire pasa a través de los diferentes sistemas mencionados anteriormente y que se pueden apreciar en la figura 2.4 para poder ser convertida en agua potable.

Una vez el agua está recolectada en los tanques y utilizando electroválvulas, figura 2.5, para controlar el flujo del agua almacenada en estos, el sistema se comporta similar al de la recolección de agua pluvial ya que se tiene que transportar en tuberías y filtrarla para que así pueda ser utilizada para consumo humano o bien para actividades recreativas.

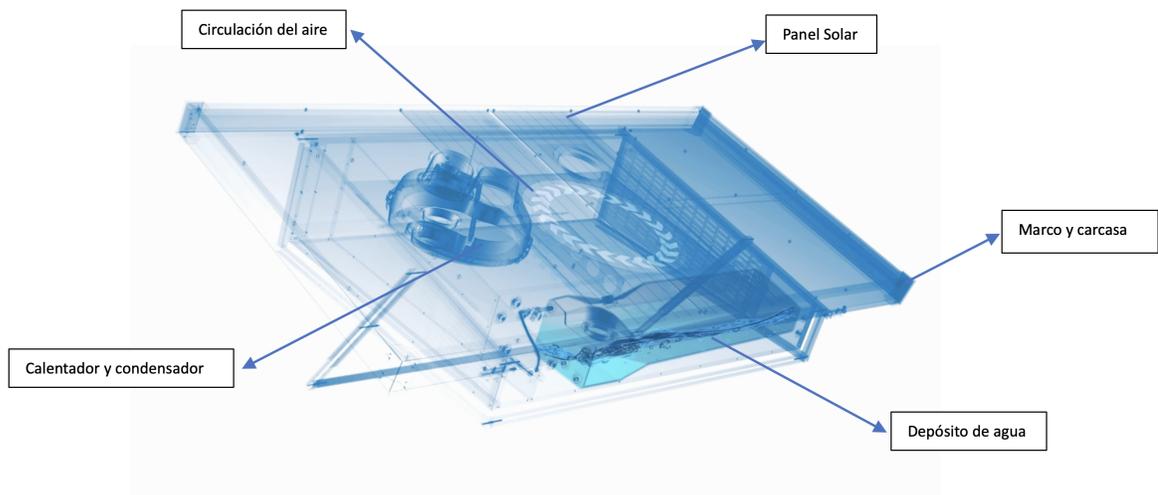


Figura 2.4: Diagrama de partes de un hidropanel SOURCE. [14]



Figura 2.5: Electroválvula. [16]

Sin embargo, es importante mencionar que el costo del agua sigue aumentando significativamente ya que estos paneles producen aproximadamente 5 litros de agua cada uno por día [14] [17], claro esta cantidad va a depender de la humedad que tenga el aire en ese momento es decir entre más humedad más cantidad de agua se puede obtener [14].



Figura 2.6: Hidropaneles ubicados en la Escuela de Ingeniería Electrónica en Cartago. [18]

Actualmente el Tecnológico de Costa Rica cuenta con un arreglo de hidropaneles en la azotea de la escuela de Ingeniería en Electrónica en Cartago, como se observa en la figura 2.6 , con los cuales se ha estudiado y se han realizado varias pruebas permitiendo al DO-CINADE diseñar un esquema de cómo se va a instalar los diferentes sistemas de cosecha de agua; el cual se puede encontrar en la figura 2.7 , para poder evaluar cuál sistema funciona mejor si el de recolección de agua pluvial o bien la cosecha de agua atmosférica y que a su vez la escuela de playa torres sea la más beneficiada de estas investigaciones.



Figura 2.7: Ubicación planificada de los sistemas de recolección de agua en Isla Caballo [18]

2.3. Sistema IoT

El internet de las cosas o IoT (internet of things) por sus siglas en inglés, se define como *”una red de interconexión digital entre dispositivos, personas y la propia Internet que permite el intercambio de datos entre ellos, permitiendo que se pueda capturar información clave sobre el uso y el rendimiento de los dispositivos y los objetos para detectar patrones, hacer recomendaciones, mejorar la eficiencia y crear mejores experiencias para los usuarios”* [19], es decir ya no solo computadoras, o teléfonos celulares se pueden conectar a internet, sino que también automóviles, sistemas de domótica (casas inteligentes), relojes o sistemas de monitoreo como los que se utilizan en el campo de la meteorología por ejemplo.

Estos dispositivos poseen antenas las cuales son capaces de conectarse a redes inalámbricas y de esa manera permiten recibir y transmitir datos para que estos puedan ser analizados por un sistema de adquisición de datos, el cual puede interpretar si una luz esta encendida, cual es la temperatura de una habitación o cual es la ubicación de un automóvil. [20]

También es importante mencionar que en el caso de sensores o dispositivos que recolecten datos no es necesario que estos posean antenas y sistemas independientes, ya que es posible conectarnos a una base central o hub la cual procese los datos y esta sea la que se conecte a internet, esto por varias razones ya que permite utilizar sistemas antiguos o “legacy”, así como también permite mantener el bajo costo de los sensores ya que al ser analógicos estos suelen ser más económicos (\$39 vs \$5) [21] [22] y generalmente poseen mejor versatilidad a la hora de su programación e instalación.



Figura 2.8: Sensor de flujo de agua. [23]

Como se mencionó anteriormente, el proyecto de cosecha de agua requiere un sistema que permita el monitoreo de los datos obtenidos por los sensores de flujo, los cuales se muestran en la figura 2.8.

Para ello es necesario utilizar sensores analógicos de bajo costo debido a la naturaleza del proyecto, además que es importante que se puedan conseguir fácilmente y que su reemplazo también sea sencillo. Por esta razón es necesario la utilización de una Raspberry Pi 4 la cual cumpla el papel de hub central del sistema.

La decisión de utilizar una Raspberry Pi como la encargada de la adquisición y envío de datos se debe a lo robusto que ha demostrado ser este dispositivo, lo económico que es ya que parte de los \$35 [24] y que además como se puede observar en la figura 2.9 posee una gran cantidad de puertos de conexión como los USB, Ethernet para la conexión cableada, y puertos de entradas y salidas analógicas.

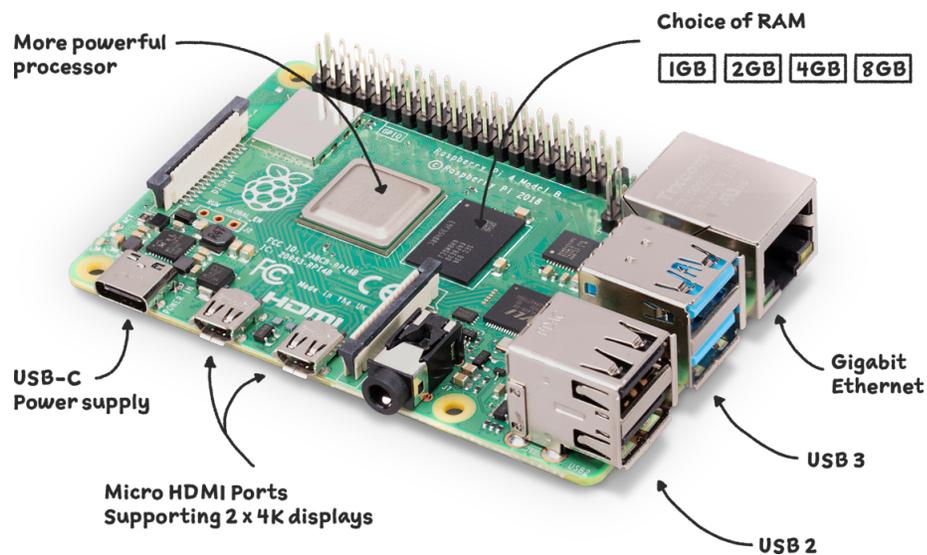


Figura 2.9: Raspberry Pi 4 y sus principales características. [24]

Algo importante a tomar en cuenta, es que la Raspberry Pi está diseñada para un entorno de aprendizaje por lo que una de sus mayores cualidades es que la misma es de código abierto lo que quiere decir que no es necesario pagar por una licencia para poder utilizar su entorno de programación lo que genera una mayor flexibilidad para poder crear proyectos como el del sistema de IoT para la cosecha de agua atmosférica, poder realizar mejoras del sistema según se requiera en el futuro o bien se implementen nuevos sistemas que beneficien a comunidades vulnerables.

Sin embargo en algunas ocasiones es necesario la utilización de placas programables como Arduino, figura 2.10, en conjunto con Raspberry Pi, esto ya que algunos componentes presentan incompatibilidades con esta ultima debido a que el driver para su funcionamiento no esta del todo optimizado o los puestos de comunicación de la Raspberry Pi no soportan el voltaje que entregan.

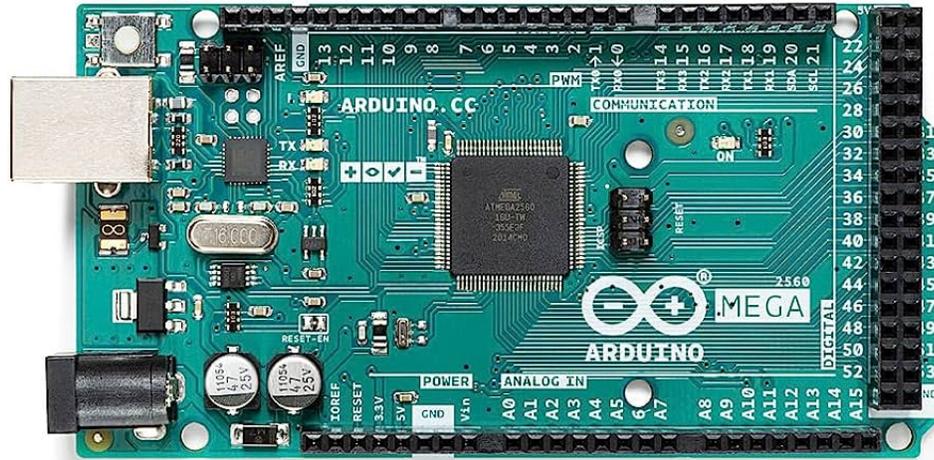


Figura 2.10: Arduino MEGA. [25]

Capítulo 3

Sistema de monitoreo IoT para la producción de agua.

En el presente capítulo, se presentan las etapas que forman parte del proceso de diseño del sistema IoT para monitorear la producción de agua con cosechadores atmosféricos.

Esta fase del proyecto se divide en dos grandes grupos: el hardware y el software. En lo que respecta al hardware, se brinda una visión global de los componentes eléctricos que se seleccionaron para poder implementar el sistema, los cuales fueron elegidos con base a su funcionalidad y la disponibilidad para poder integrarse al sistema.

En cuanto al software, se detallan los algoritmos los cuales son encargados poner en marcha a cada una de las etapas definidas en la propuesta de solución.

A nivel general, estas etapas comprenden la solución del problema planteado, lo cual involucra la captación de datos por medio de los sensores conectados a los nodos, la capacidad del gateway de interpretar estos datos, y la carga de estos datos en la nube para poder ser analizados.

3.1. Descripción general del sistema

El sistema planteado para la monitorización de la producción de agua con los cosechadores de agua, ubicados en Isla Caballo se divide en 4 etapas: El sensado de los datos, la interpretación de los estos por medio del nodo de medición, la recepción de los datos por medio del Gateway principal y la carga de los datos a la nube. Estas fases se presentan de una forma visual en la figura 3.1, en la cual se puede observar la propuesta diseñada

para implementar dicha solución.

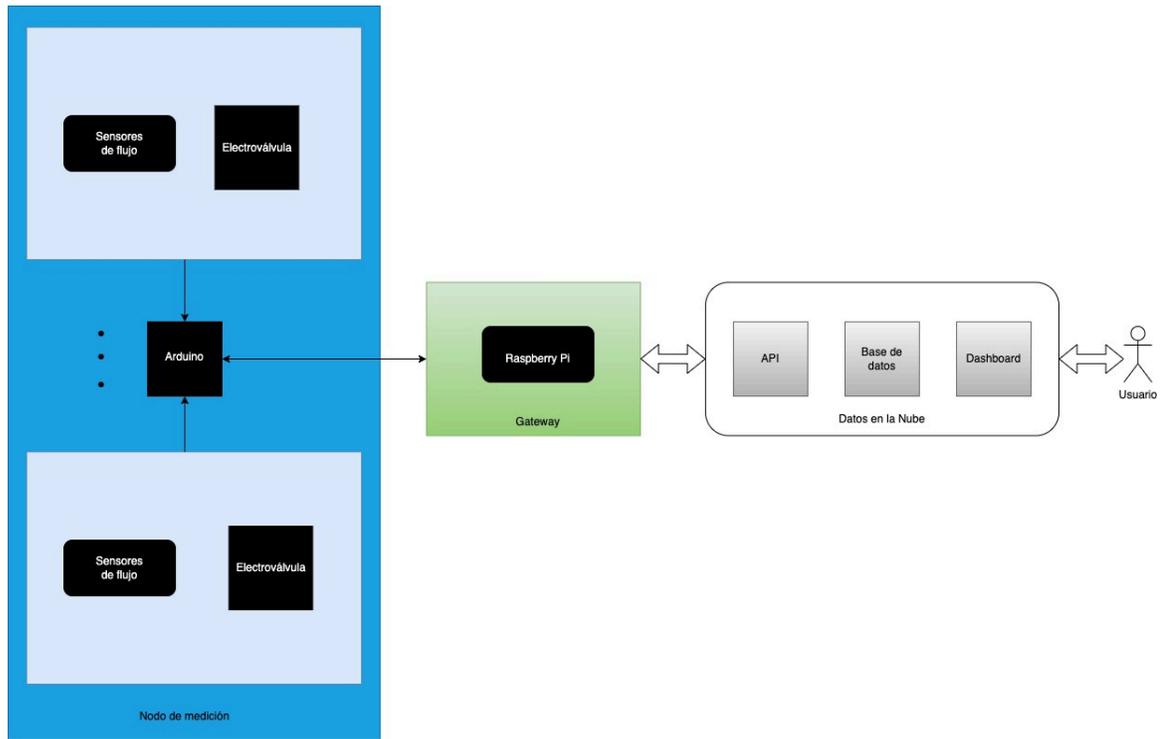


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema propuesto.

En términos generales, como se observa en la figura 3.1 el sistema está compuesto por nodos de medición, los cuales poseen un sensor de flujo de agua, electroválvulas y un Arduino, el gateway compuesto por una Raspberry Pi la cual es encargada de recibir los datos y transmitirlos a un servidor el cual es el encargado de procesar los datos y mostrarlos en un dashboard previamente diseñado. A continuación se detallan las diferentes etapas del sistema.

3.2. Descripción del hardware utilizado

Con el objetivo de poder implementar el sistema propuesto en la figura 3.1, se decidió utilizar sensores y equipo los cuales cumplieran con las funciones necesarias para el sistema y que además fueran de bajo costo para así poder replicarlo cuantas veces fuera necesario.

En la figura 3.2, se pueden observar los componentes electrónicos que conforman el sistema IoT propuesto, es decir los nodos y el gateway. A continuación se detallan los componentes.

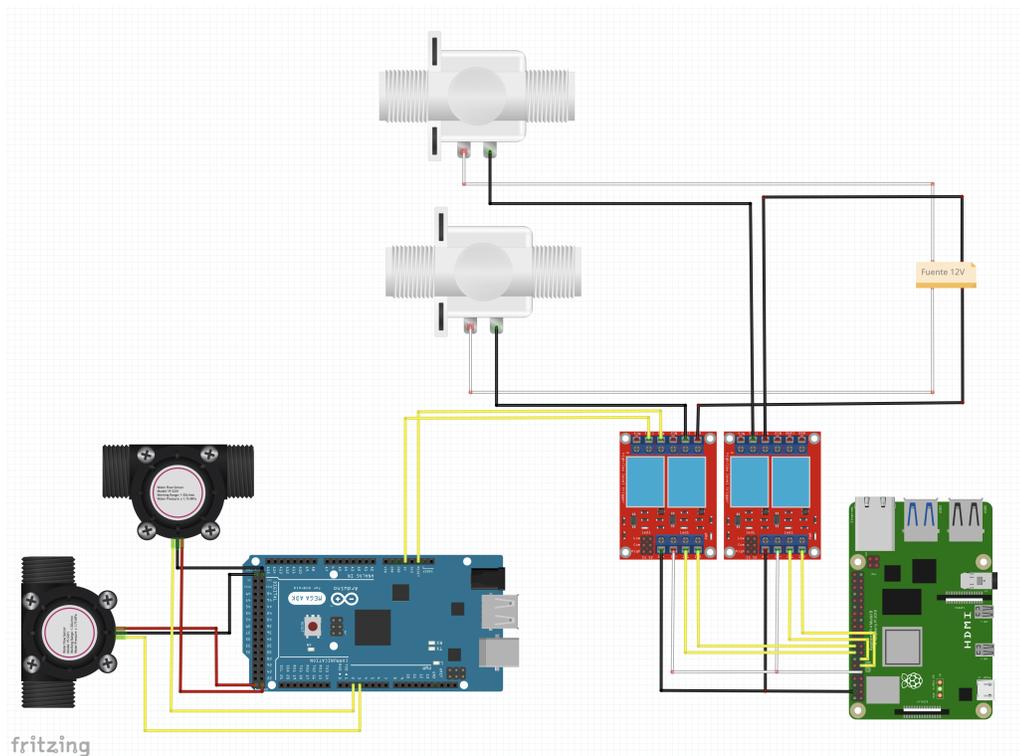


Figura 3.2: Diagrama detallado de la parte eléctrica del sistema.

3.2.1. Nodos de medición

Para poder cuantificar en un valor numérico el flujo de agua que generan los hidropaneles por medio del sensor de flujo descrito en la sección 2, es necesario el uso de los pines de entradas digitales del Arduino ya que permite leer cambios de estado digitales, es decir 1 y 0.

Es importante mencionar que los pines deben ser compatibles con la función de interrupción, la cual es la encargada de permitir que eventos externos interactúen con el microprocesador, en este caso el cambio de estado de la entrada conectada al sensor de flujo. Estos pines se pueden observar en la figura 3.3. En esta ocasión los pines utilizados fueron los pines 2 y 3 de la placa, sin embargo se pueden utilizar los pines que sean requeridos.

Arduino	Vector de interrupción					
	INT 0	INT 1	INT 2	INT 3	INT 4	INT 5
UNO	PIN 2	PIN 3				
MEGA	PIN 2	PIN 3	PIN 21	PIN 20	PIN 19	PIN 18
DUE	Cualquier Pin					
LEONARDO	PIN 3	PIN 2	PIN 0	PIN 1	PIN 7	

Figura 3.3: Pines del Arduino MEGA compatibles con la función Interrupt. [26]

La conexión de estos sensores es de forma cableada al Arduino utilizando de los pines de 5V para su alimentación. En la figura 3.4 se puede observar un diagrama de la conexión de los mismos, la cual esta implementada en una topología estrella ya que todos los sensores envían los datos a un punto en común, en este caso el Arduino.

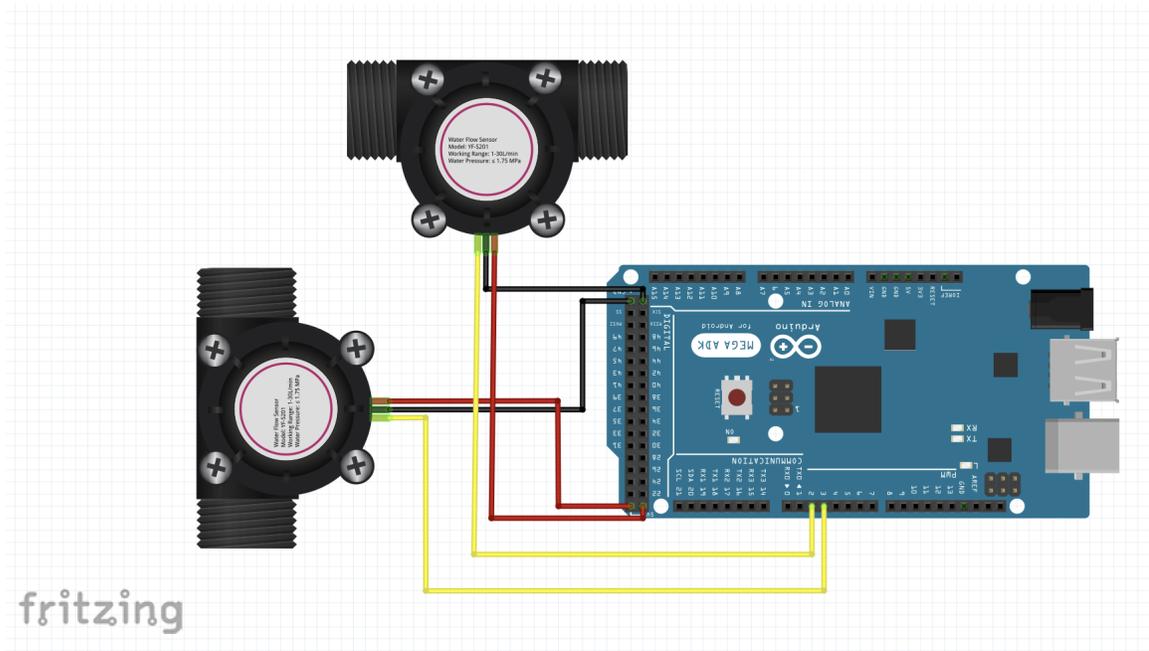


Figura 3.4: Diagrama de conexión del sensor de flujo Digiten FL-808.

Los sensores de flujo miden continuamente, es decir en el momento que un líquido pasa a través de ellos generan un pulso con información, por lo cual fue necesario la utilización de electroválvulas las cuales son las encargadas de limitar el paso del agua que contienen los tanques de los hidropaneles. Estas electroválvulas se deben colocar justo antes de los sensores de flujo, preferiblemente sin dejar espacios para así evitar errores en la lectura de los datos ya que una vez estas se abren dan paso a que el agua contenida fluya a través de los sensores de flujo.

3.2.2. Gateway o nodo central

El correcto funcionamiento de las electroválvulas depende de cuando estas se encienden (abren) o se apagan (cierran), por lo cual es necesario utilizar relays los cuales se encargan de cerrar el circuito eléctrico el cual brinda la energía a las electroválvulas, es decir cuando el relay esta encendido, la electroválvula abre y deja fluir el agua, y cuando el relay se apaga, la electroválvula se des-energiza y cierra el paso de la misma.

Este comportamiento solo es posible si se utilizan los contactos normalmente abiertos del relay, los cuales se representan con las siglas NO por sus siglas en ingles (Normally Open).

Para el control de cuando se abren y se cierran las válvulas es necesario una señal que controle los relays previamente mencionados, para ello se utiliza la Raspberry Pi, ya que brinda una mayor versatilidad en la programación de cuando es necesario la apertura y cierre de las mismas. En este caso se decidió realizar dos mediciones diarias, una a las 7 a.m para purgar el sistema y vaciar los tanques y otra a las 7 p.m para hacer la medición de cuanto se produjo durante el día.

Con el fin de poder controlar los relays con la Raspberry Pi, es necesario la utilización de los pines denominados GPIO, por sus siglas en ingles General Purpose Input Output. La Raspberry Pi 4 posee varios puertos GPIO, que se puede apreciar de una forma mas detallada en la figura 3.5.

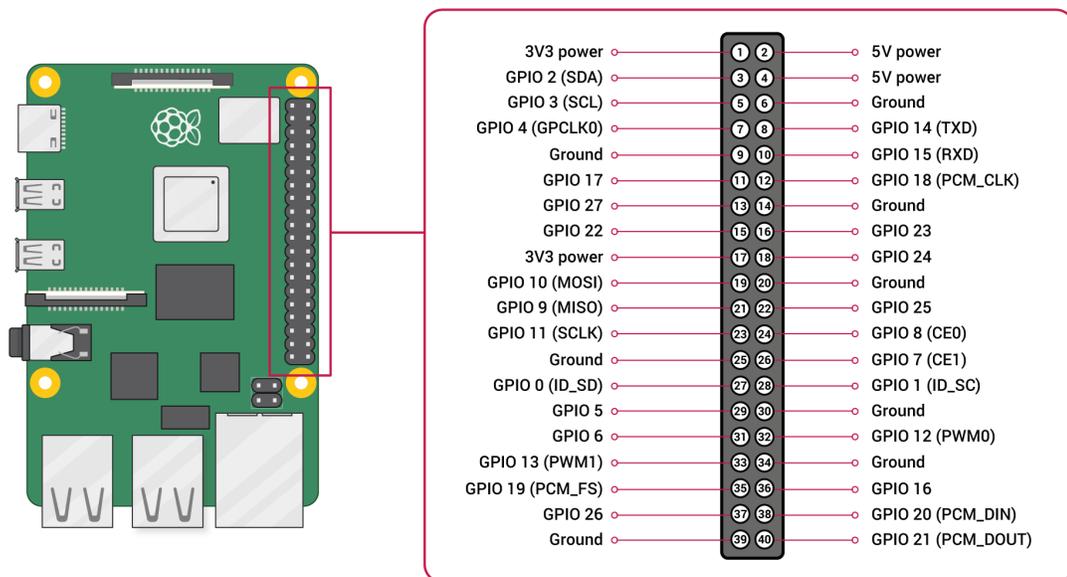


Figura 3.5: Pinout de la Raspberry Pi 4 [27]

Estos pines generan un pulso de de 3.3V o 0V según sea necesario, en este caso debido a la lógica que utilizan los relays (preguntar) es necesario una salida de 0V para la activación de los mismos.

La conexión de las electroválvulas se puede observar en la figura 3.6.

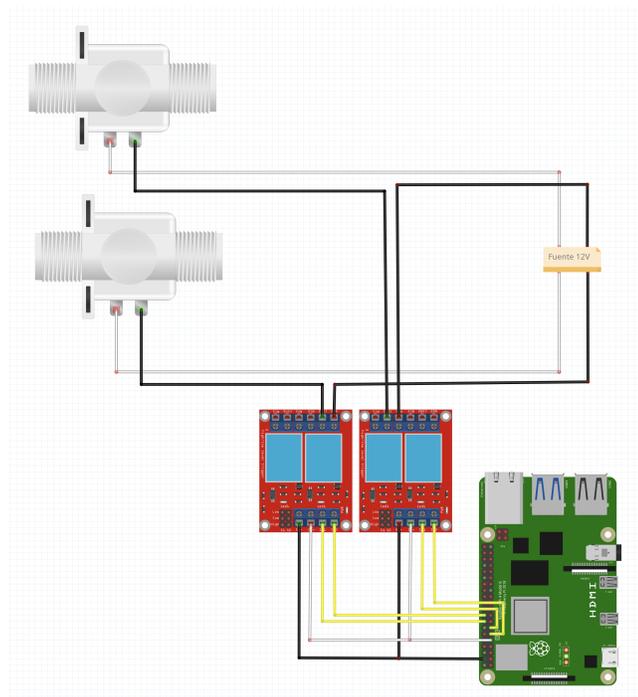


Figura 3.6: Diagrama de conexión de las electroválvulas.

Finalmente la conexión entre el Arduino y la Raspberry Pi se realiza de manera física por medio de un cable USB, esto debido a que el Arduino crea un puerto serial el cual es utilizado por la Raspberry para el procesamiento de los datos que arrojan los sensores de flujo. Cabe mencionar que existe un relay extra el cual se encarga de resetear el arduino físicamente todos los días a media noche, esto con el objetivo de evitar que queden datos guardados o se generen mediciones con errores a la hora de la obtención de los datos. El diagrama de conexión de este relay se muestra en la figura 3.7

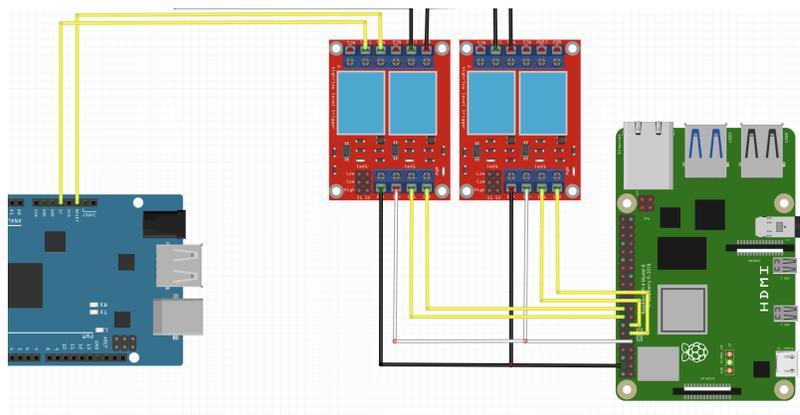


Figura 3.7: Diagrama de conexión de la señal reset del Arduino.

3.3. Implementación del software

En esta sección se describen de manera detallada la lógica utilizada para el correcto funcionamiento del hardware que se definió en la sección anterior. Para ello se describe la lógica de funcionamiento de los nodos de medición, del gateway, del servidor donde se almacenan los datos y el dashboard que permite la lectura de los datos.

3.3.1. Estructura de los nodos de medición

Para el correcto funcionamiento de los nodos de medición y por recomendación del proyecto Bio-carbono es necesario la utilización de un Arduino como procesador de datos, esto debido a que el driver que se utiliza en la Raspberry para poder utilizar los sensores de flujo de agua directamente en ella no se encuentra depurado al 100 %, lo que hace que genere lecturas erróneas y no se cumpla con un mínimo de 10 % de error en las lecturas. Por esta razón es necesario el uso de un Arduino junto con una Raspberry, presumiblemente por problemas en las librerías disponibles para esta última plataforma.

En el caso del Arduino, al estar en contacto directo con los sensores, es necesario seleccionar los pines encargados de recibir las pulsaciones generadas por los sensores, además de esto se debe utilizar la función `attachInterrupt()`, junto con el pin seleccionado para poder habilitar la lectura de datos.

Para la comunicación entre el Arduino y el sensor de flujo, se crea un que utiliza la lógica que se muestra en la figura 3.8. Dicha lógica lo que entiende es que necesita más de 1 litro por minuto para poder operar, este es un valor que el fabricante recomienda en su hoja de datos, por lo que el código compara los valores de flujo de los sensores que tenga conectados y con base a eso comienza a guardar los datos que generan las pulsaciones del sensor de flujo.

Luego de esto el Arduino busca si hay algún monitor serial disponible para poder mostrar los datos y en caso que si imprime los datos codificados en una cadena de texto tipo JSON para luego volver a verificar el flujo de agua y comenzar el proceso nuevamente.

Es importante mencionar que el flujo de agua solo puede estar presente si las electroválvulas están abiertas para que el agua pueda fluir, por lo que el código entre el Arduino y la Raspberry Pi deben estar sincronizados para poder actuar en el momento correcto.

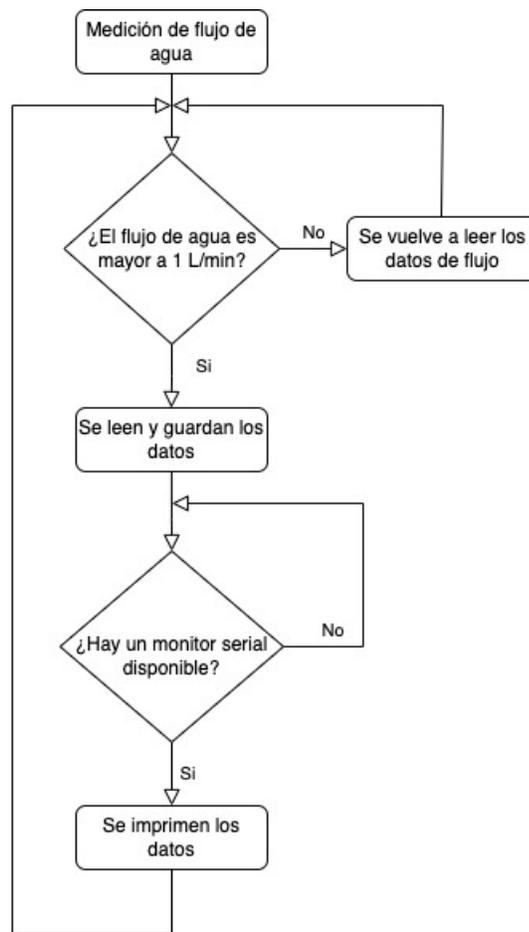


Figura 3.8: Diagrama de flujo del nodo de medición.

Como se mencionó en el capítulo anterior, los sensores de flujo son sensores de efecto hall, es decir posee un detector de campo magnético el cual describe cual es el flujo de agua dependiendo de la cantidad de vueltas que de la hélice contenida en el sensor. Existe una constante, la cual da el fabricante, que se encarga de "traducir" este campo magnético en valores numéricos, en este caso 4.8. Sin embargo es recomendable calibrar los sensores para que se ajusten a las distancias y anchuras de las tuberías que se utilizan, para ello se utiliza siguiente formula

$$K = \frac{n^{\circ} Pulsos}{Volumen * 60} \quad (3.1)$$

Donde la cantidad de pulsos es proporcional a las vueltas que da la hélice en el sensor de flujo, el volumen es la cantidad de agua que pasa por el sensor y K es el factor utilizado por el código para convertir los pulsos en valores numéricos.

Es necesario que a la hora de calibrar se ayude con recipientes con medidas grabadas para que sea lo más preciso posible.

3.3.2. Estructura del Gateway

El gateway, compuesto en este caso por una Raspberry Pi 4, es el encargado de la recepción de datos que provienen de los nodos de medición así como el encargado del envío de datos al servidor donde se van a alojar. Además de esto es el encargado de hacer que haya o no flujo de agua en los sensores, por lo que para su funcionamiento se implementaron dos lógicas distintas según su uso.

En el caso de los relays, estos deben poder activarse a una hora en específico, para ello se utiliza el `schedule()` en el código de Python encargado de la activación de los mismos. Este comando permite la programación de acciones a una hora definida, la lógica para ello se muestra en la figura 3.9.



Figura 3.9: Diagrama de flujo para la activación de los relays.

Se puede observar cómo al inicio del código se configuran cuáles son los puertos que se van a utilizar, luego de esto con la función `schedule()` se pueden programar a la hora que se requiera el realizar una acción específica, encender o apagar los relays para poder así activar o desactivar el flujo de agua en los sensores, además de poder reiniciar el arduino de una forma manual sin necesidad de interacción humana.

Para la parte de medición de datos, se implementa una lógica distinta a la utilizada en los relays, la cual se aprecia en la figura 3.10.

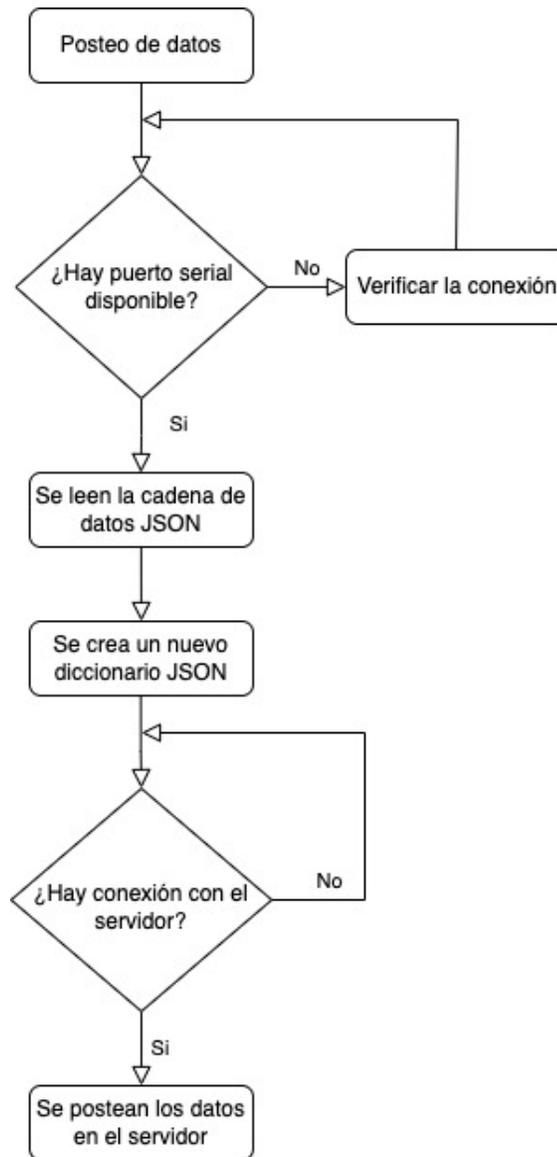


Figura 3.10: Diagrama de flujo para el posteo de datos en el servidor.

En el momento en que son seteados los puertos que se van a utilizar, es necesario la verificación del puerto serial, ya que si no está conectado correctamente el sistema genera un error indicando que hay que revisar la conexión entre el Arduino y la Raspberry; recordando que el Arduino también necesita que la conexión este correcta para que el código logre enviar los datos provenientes de los sensores.

En el momento que estos son verificados, el código de Python procede a leer la cadena de datos en formato JSON y la decodifica para extraer los datos de sensado, en este caso el nivel de agua de cada arreglo de paneles y el agua total recolectada por todo el sistema.

Una vez se extraen los datos, estos se guardan en variables localmente en el gateway. Esto ya que dichas variables con necesarias para crear una nueva cadena de datos tipo JSON con un formato específico, debido a que el servidor donde se aloja la base de datos necesita recibir diferentes parámetros atmosféricos para que sea posible guardar correctamente los datos, además de la identificación del Gateway para su correcta visualización.

Esta es la razón del porque que en el código se muestran valores de precipitación, luminosidad, presión, velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y humedad en valores 0.

Con respecto a la recepción de datos, se utiliza el servidor de la Escuela de Electrónica del TEC creado para este fin. Este servidor esta creado en la plataforma Angular la cual permite crear aplicaciones web utilizando protocolos HTTP, los cuales dicho sea de paso son los encargados de permitir la recepción y envío de datos.

Una de las ventajas de utilizar un API, es que gracias a ella solo es necesario la utilización de una instrucción junto a una dirección web para poder enviar o visualizar los datos, entre ellas:

- <http://201.207.53.225:3030/api/cosecha/AtmosphericReport/>
- [http://201.207.53.225:3030/api/cosecha/LastAtmospheric/:idDevice'](http://201.207.53.225:3030/api/cosecha/LastAtmospheric/:idDevice)
- <http://201.207.53.225:3030/api/cosecha/AtmosphericDevices/>

En primer lugar la instrucción “AtmosphericReport”, es la encargada de permitir que el gateway envíe los datos al servidor. Esta instrucción necesita recibir una cadena JSON en el siguiente formato:

```
“id_device” :” num”, ”Volumen” :val, ”Precipitacion” :val, ”Luminosidad” :val, ”Presion” :val,  
    ”Vel_Viento” :val, ”Dir_Viento” :val, ”Temperatura” :val, ”Humedad” :val
```

Razón por la cual, como se mencionó anteriormente, se necesitan enviar valores atmosféricos en 0.

En segunda instancia esta la instrucción ”LastAtmospheric/:idDevice”, la cual permite al usuario visualizar cual fue la última medición obtenida por algún gateway específico, el idDevice corresponde al número de identificación del dispositivo que se desea consultar.

La tercera instrucción corresponde a “AtmosphericDevices”, cuya función es la de verificar cuales dispositivos están actualmente conectados con el servidor. Esta función es de suma importancia ya que permite verificar cual es el idDevice del Gateway deseado.

Capítulo 4

Resultados y análisis

Este capítulo se enfoca en los resultados obtenidos con la implementación del sistema propuesto y el cumplimiento con los objetivos planteados. Los resultados se dividen en el desempeño de los sensores, los fallos presentes, la comunicación con el servidor y la visualización de los datos alojados en el mismo. Además se realiza un análisis en la precisión de su medición de flujo así como la precisión en enviar los datos al servidor.

4.1. Prototipo Inicial

Según la propuesta inicial del proyecto, el prototipo del sistema consiste en 2 sensores de flujos conectados al nodo de medición y este a su vez conectado a un gateway. Esto ya que la medición del flujo de agua se realiza por arreglo de hidropaneles, la cual se plantea en 6 hidropaneles, 3 por arreglo, tal y como se muestra en la figura 2.7. En esta ocasión no se definió una propuesta de para la alimentación eléctrica del sistema debido a que el proyecto ya cuenta con una solución solar para este fin, así como la conexión a internet por medio de un Módem celular.

4.1.1. Costo del sistema

El costo asociado al los componentes que conforman el sistema se dividen en el nodo de medición y el gateway. Con respecto al costo de los componentes del nodo se medición se puede observar en la tabla 4.1

Tabla 4.1: Costo y cantidad de los componentes que conforman el nodo de medición.

Nodo de medición		
Componente	Cantidad	Precio Total
Sensor de Flujo FI-808	2	\$22
Arduino	1	\$30
Feather M0 RFM95 LoRa*	1	\$35
Total		\$87*

Dicha tabla muestra el valor total de los componentes necesarios para implementar el nodo de medición. Un punto importante a tomar en cuenta es el que se incluye un modulo de transmisión LoRa el cual se podría utilizar en lugar de la conexión cableada si se desea utilizar en lugares lejanos, sin embargo en esta ocasión no fue utilizado, por lo que el costo del nodo de medición es de \$52.

En el caso del gateway, los costos de los componentes se muestran en la tabla [4.2](#)

Tabla 4.2: Costo y cantidad de los componentes que conforman el nodo central.

Nodo central		
Componente	Cantidad	Precio Total
Electroválvula 12V	2	\$76
Raspberry Pi 4	1	\$62
Modulo 4 relays 5V	1	\$7
Total		\$145

Estos costos asociados a los nodos tanto de medición como el nodo central corresponden a un caso en el que no se posean los componentes, sin embargo estos no son una inversión para este sistema debido a que el el proyecto principal de donde parte este, ya los había adquirido previamente.

4.2. Pruebas de funcionamiento

Para la validación, se consideró un montaje representativo para validar el prototipo, de forma en que posteriormente el sistema se pueda implementar para la medición de flujo del arreglo de 6 hidropaneles. La maqueta se puede apreciar en la figura 4.1

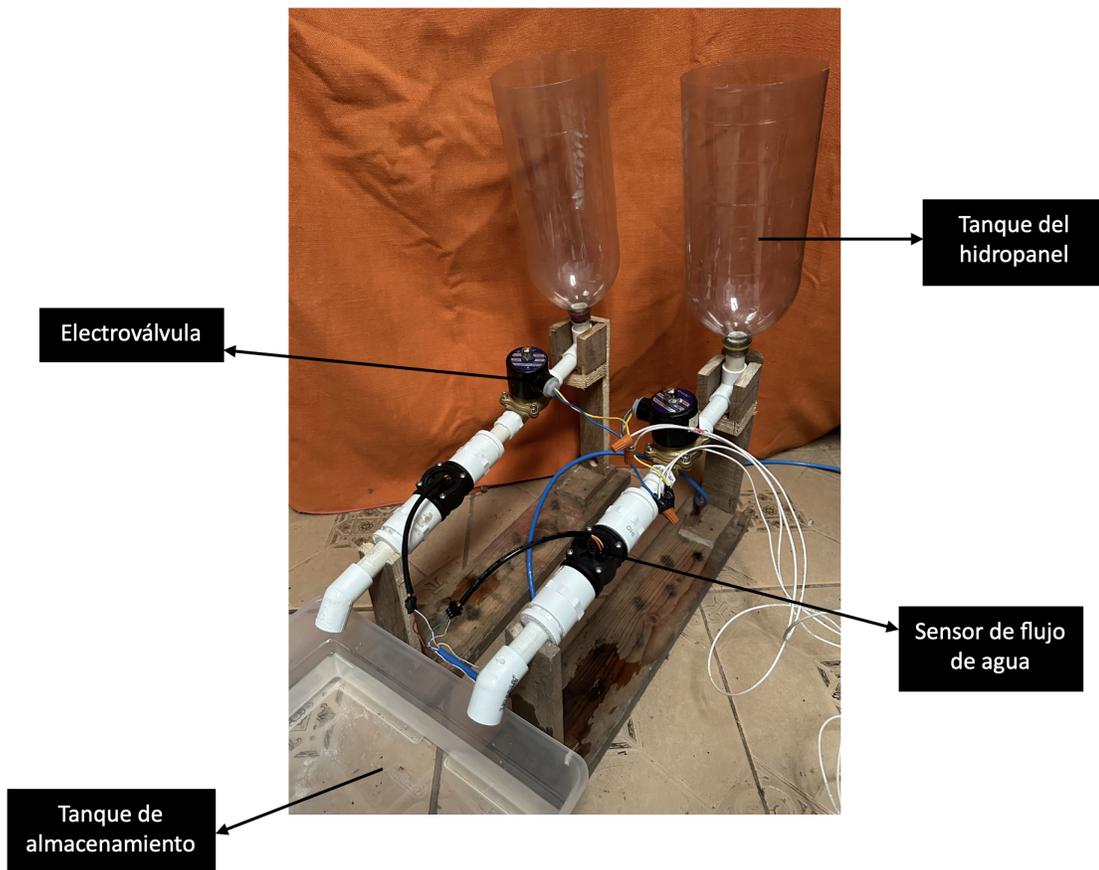


Figura 4.1: Maqueta del sistema propuesto.

En ella se puede observar dos botellas las cuales simulan los tanques de los hidropaneles, seguido están las electroválvulas que dan paso al agua para que pueda ser cuantificada por medio de los sensores de flujo para finalmente ser depositada en los tanques de almacenamiento. Es importante mencionar que los materiales utilizados en la confección de dicha maqueta son materiales 100 % reciclados.

4.2.1. Calibración de los sensores

Como parte del proceso de sensado del flujo del agua, es necesario utilizar un factor de conversión correcto, que en este caso nos lo brinda el fabricante 4.8. Sin embargo es recomendable realizar la comprobación de dicho valor con la formula 3.1 Por lo que utilizando el algoritmo mostrado en el anexo A.1, se procede a verificar dicho valor, para ello se realizaron 8 pruebas con diferentes recipientes los cuales poseen la capacidad de almacenar 100 mL, 500mL, 600mL y 1L de liquido. Los resultados de la prueba se muestran en la tabla 4.3

Tabla 4.3: Resultados de la prueba de calibración del sensor de flujo

Prueba de calibración		
Cantidad de agua	Pulsos	Factor resultante
100 mL	20	3.33
1L	217	3.61
600mL	135	3.75
100mL	22	3.66
500mL	103	3.43
1L	218	3.63
600mL	131	3.63
500mL	99	3.3

Una vez obtenido los datos, se obtiene la constante de conversión que se adapta al sistema propuesto, el cual fue el promedio de los valores resultantes, es decir, 3.5425.

4.2.2. Medición de volumen de agua

Con el valor correcto de constante de medición, se procede a realizar pruebas de medición del volumen de agua contenido en los recipientes. Para ello se utilizan nuevamente los recipientes antes mencionados y se obtiene los resultados mostrados en la tabla 4.4

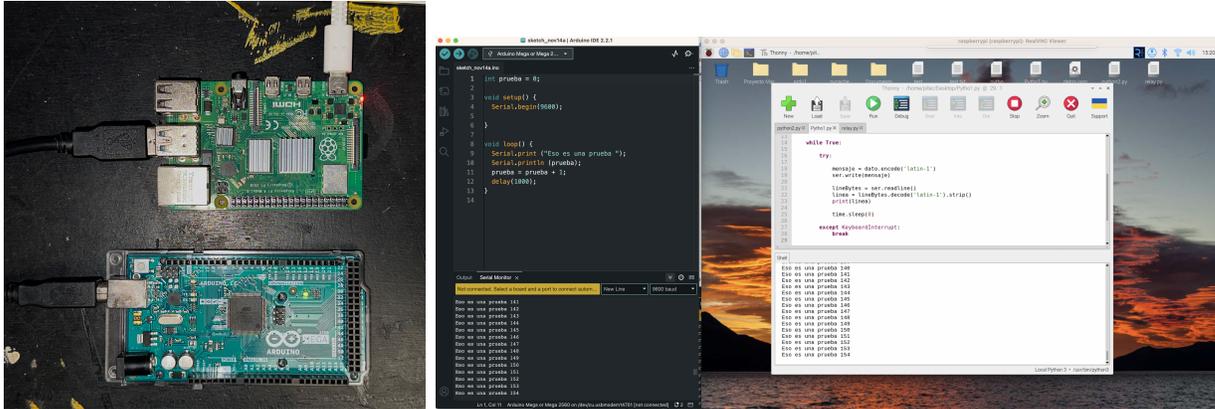
Tabla 4.4: Resultados de la prueba de medición de volumen contenido

Cantidad de agua L	Valor obtenido	Porcentaje de diferencia
1.50	1.47	2.00 %
1.00	0.985	1.50 %
0.50	0.512	2.40 %
1.50	1.53	2.00 %
1.00	0.985	1.50 %
0.60	0.617	2.83 %
0.50	0.489	2.20 %
1.00	1.025	2.50 %
1.50	1.476	1.60 %
0.20	0.197	1.50 %
0.50	0.485	3.00 %
0.60	0.615	2.50 %
2.00	1.968	1.60 %
0.60	0.5856	2.40 %
0.50	0.506	1.20 %
1.00	0.977	2.30 %
1.50	1.532	2.13 %
0.10	0.103	3.00 %
0.60	0.595	0.83 %
0.50	0.489	2.20 %
Promedio		2.06 %

Como se observa, el porcentaje de diferencia entre el valor real y el valor medido por el sensor es muy bajo, de un 2 %, esto gracias a la calibración manual que se describió en el punto anterior. El fabricante asegura un error de aproximadamente 10 % con el valor de la constante que brindan lo que confirma que es necesaria una calibración a la hora de implementar el sistema. Las pruebas fueron realizadas de manera aleatoria, es decir se midió el volumen deseado y se distribuyó de manera aleatoria entre los tanques que posee el prototipo.

4.2.3. Prueba de comunicación entre nodos.

Debido a la limitación mencionada en las librerías, fue necesario la utilización de dos tarjetas programables, el Arduino y la Raspberry, por esta razón es de suma importancia el verificar que exista comunicación entre ambos. Para ello se crea un script el cual envíe datos de prueba del Arduino a la Raspberry por medio de comunicación serial, dicho script cuenta con un contador para que se visualice de una forma más adecuada, y además de el el Arduino envía el texto “Esto es una prueba”.

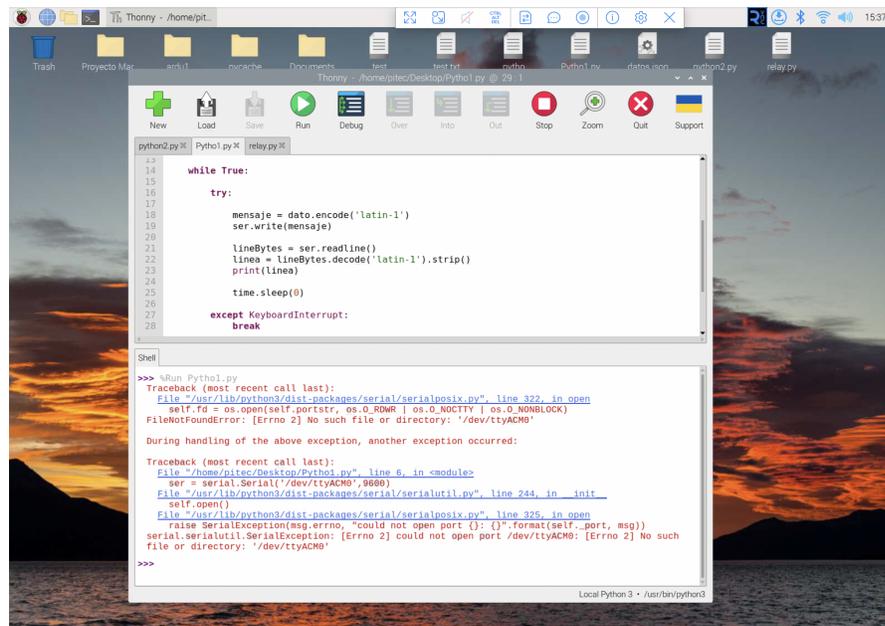


(a) Arduino conectado a la Raspberry Pi por medio de un cable USB

(b) Comunicación exitosa entre ambos módulos

Figura 4.2: Prueba de comunicación local

Como se observa en la figura 4.2, la comunicación entre ambos módulos funcionó sin problemas, ya que en caso que se genere el error presente en la figura 4.3 se tendría que verificar que la conexión física entre ellos este colocada de manera correcta o que el puerto serial que creó el Arduino este seteado de manera correcta en la Raspberry Pi, en caso que el error fuera este ultimo se debe utilizar el comando “dmesg — grep -v disconnect — grep -Eo ”tty(ACM—USB).”— tail -1”, el cual se ejecuta en la terminal de la Raspberry Pi y muestra cuales son los puertos seriales conectados en ese momento. Una vez verificada la conexión entre ambos módulos se procede a realizar una prueba de envío de datos entre la Raspberry Pi y el Servidor.



```

python2.py x Python.py x relay.py x
13
14 while True:
15     try:
16
17         mensaje = dato.encode('latin-1')
18         ser.write(mensaje)
19
20         lineBytes = ser.readline()
21         linea = lineBytes.decode('latin-1').strip()
22         print(linea)
23
24         time.sleep(0)
25
26     except KeyboardInterrupt:
27         break
28
Shell
>>> !run Python.py
Traceback (most recent call last):
  File "/usr/lib/python3/dist-packages/serial/serialposix.py", line 322, in open
    self.fd = os.open(self.portstr, os.O_RDWR | os.O_NOCTTY | os.O_NONBLOCK)
FileNotFoundError: [Errno 2] No such file or directory: '/dev/ttyACM0'

During handling of the above exception, another exception occurred:

Traceback (most recent call last):
  File "/home/pitcc/Desktop/Python.py", line 6, in <module>
    ser = serial.Serial('/dev/ttyACM0', 9600)
  File "/usr/lib/python3/dist-packages/serial/serialutil.py", line 244, in __init__
    self.open()
  File "/usr/lib/python3/dist-packages/serial/serialposix.py", line 325, in open
    raise SerialException(msg.errno, "could not open port {}: {}".format(self._port, msg))
serial.serialutil.SerialException: [Errno 2] could not open port /dev/ttyACM0: [Errno 2] No such
file or directory: '/dev/ttyACM0'
>>>
Local Python 3 • /usr/bin/python3

```

Figura 4.3: Mensaje de error en la comunicación entre el Arduino y la Raspberry Pi.

4.2.4. Prueba de envío de datos al servidor

Uno de los objetivos planteados en el proyecto es el de poder visualizar los datos de los sensores a través de un dashboard alojado en el servidor. Dicho dashboard pertenece a la escuela de Electrónica del TEC por lo que es necesario contar con credenciales para poder hacer uso de él.

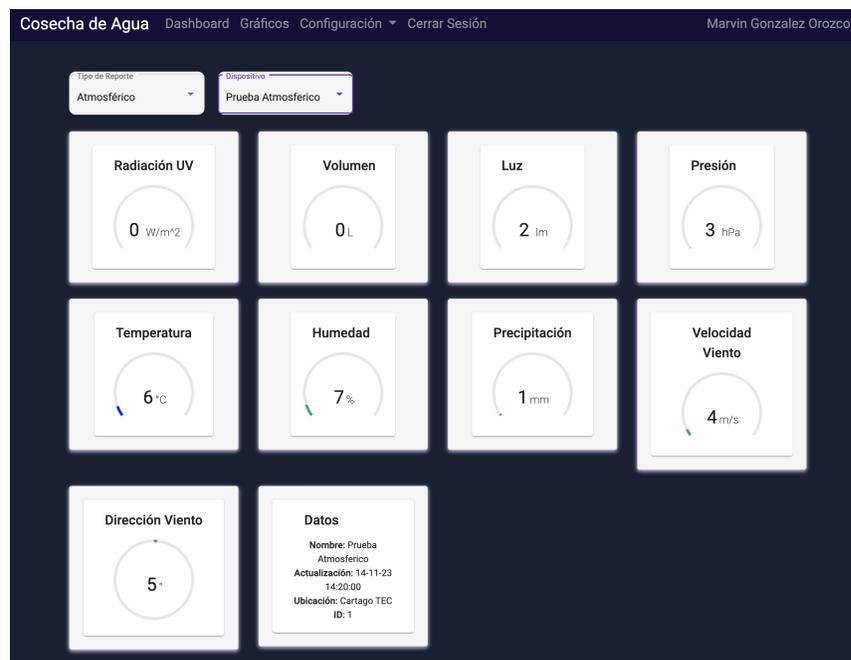
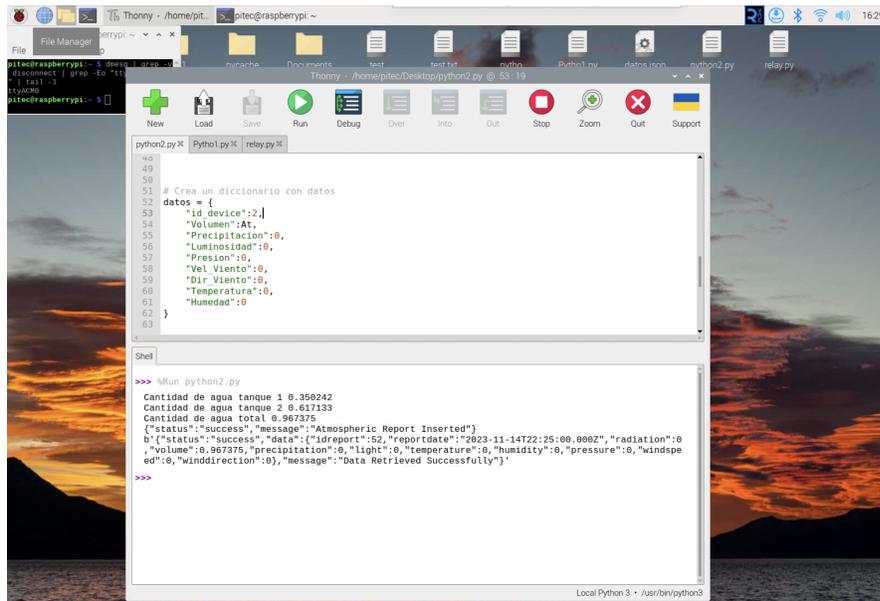


Figura 4.4: Visualización del Dashboard del servidor Cosecha de agua.

Como se puede apreciar en la figura 4.4, el Dashboard es bastante intuitivo, mostrando la información necesaria para verificar las condiciones atmosféricas en la zona donde se encuentre el Gateway. Para la prueba de comunicación entre el Gateway y el servidor se procede a realizar lecturas utilizando el recipiente de 1 litro de agua e imprimiendo en la consola de la Raspberry el estado de la recepción de datos. En esta prueba las electroválvulas fueron abiertas manualmente.



```

python2.py
40
49
50
51 # Crea un diccionario con datos
52 datos = {
53     "id_device":2,
54     "Volumen":1,
55     "Precipitacion":0,
56     "Luminosidad":0,
57     "Presion":0,
58     "Vel. Viento":0,
59     "Dir. Viento":0,
60     "Temperatura":0,
61     "Humedad":0
62 }
63
Shell
>>> %Run python2.py
Cantidad de agua tanque 1 0.356242
Cantidad de agua tanque 2 0.617133
Cantidad de agua total 0.967375
{"status":"success","message":"Atmospheric Report Inserted"}
b'{"status":"success","data":{"idreport":52,"reportdate":"2023-11-14T22:25:00.000Z","radiation":0,"volume":0.967375,"precipitation":0,"light":0,"temperature":0,"humidity":0,"pressure":0,"windspeed":0,"winddirection":0},"message":"Data Retrieved Successfully"}'
>>>
  
```

Figura 4.5: Confirmación de envío exitoso de datos.

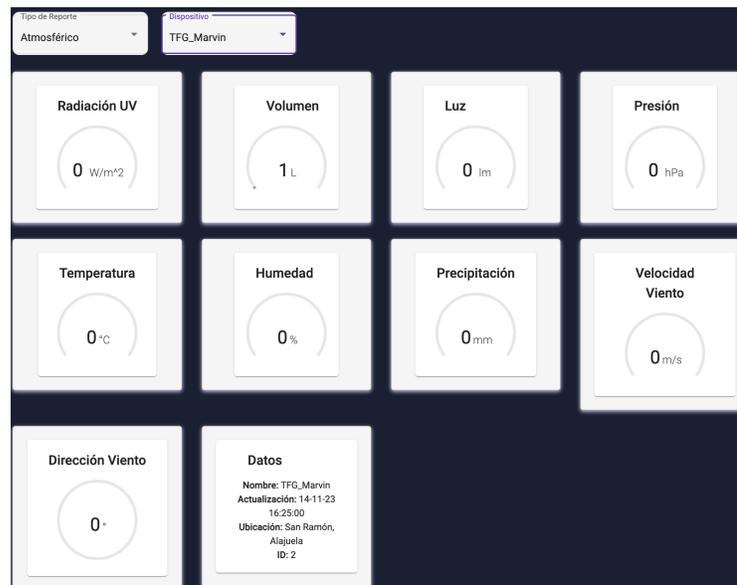


Figura 4.6: Visualización de datos en el servidor.

Una vez se llenaron los tanques y se puso en marcha el sistema de lectura de agua, se procede a realizar la prueba, en la cual el sistema responde satisfactoriamente tal y como se observan en las figuras 4.5, en donde se muestra como en la consola de la Raspberry Pi se logra leer que los datos fueron enviados satisfactoriamente, además de poder obtener los últimos datos provenientes de la base de datos del servidor.

También en la figura 4.6 se muestra el dashboard del servidor, en el que se encuentran los datos atmosféricos obtenidos por los sensores, siendo la del volumen la involucrada en este proyecto. Dicha casilla proyecta el número 1, haciendo alusión al dato obtenido por el prototipo, el servidor redondea los datos numéricos mostrados en el dashboard a la unidad más cercana.

Un punto importante a prestar atención en el dashboard es la casilla denominada datos, la cual incluye el nombre del dispositivo, así como la hora, la ubicación en donde se encuentra y el ID correspondiente al mismo.

Terminadas las pruebas de funcionamiento del prototipo se puede decir que el sistema opera de forma correcta, cumpliendo así los objetivos propuestos.

Los algoritmos creados para cada una de las etapas se pueden modificar según la necesidad, en el nodo de medición el código también permite ver en tiempo real cual es el flujo con el que el agua pasa por el sensor, así como también posee la capacidad de integrar más sensores.

En el caso del gateway este también permite ser modificado para enviar los datos de flujo o bien mostrar cual es el volumen de agua de manera individual para cada arreglo de paneles, sin embargo, el dashboard del servidor de cosecha de agua aun no es compatible con esta opción, pero se espera que se pueda implementar en próximas actualizaciones.

Los archivos y códigos implementados se pueden encontrar en el repositorio en GitHub del proyecto de cosecha de agua atmosférica.

4.3. Validación de los datos alojados en el servidor.

Para poder visualizar los datos alojados en el servidor de cosecha de agua es necesario acceder a la dirección IP del mismo, la cual es <http://201.207.53.225:4201/Login>, una vez se accede al mismo, es necesario acceder al apartado de gráficos, el cual permite visualizar los datos reales y no redondeados como se muestran en el dashboard. Estos datos se filtran por meses y días, lo que hace más sencilla su comprensión.

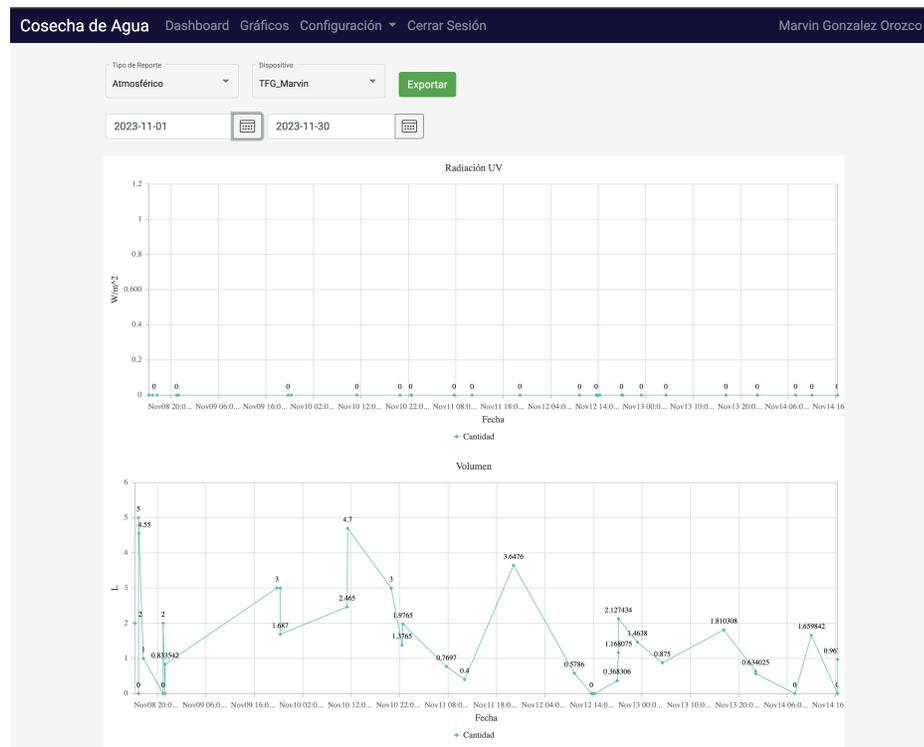


Figura 4.7: Vista de gráficos de los datos almacenados en el servidor

Tal y como se muestra en la figura 4.7, en el mes de noviembre, se cargaron datos desde el día 8 y estos han registrado diferentes niveles de volumen total del sistema, si bien estas mediciones fueron realizadas en ambientes controlados y con cantidades de agua definida, brinda un panorama de cómo pueden observarse los datos obtenidos por el sistema una vez se implemente en los arreglos de hidropaneles presentes en la Isla Caballo.

Otra de las funciones que posee el servidor es el de exportar los datos a un archivo con formato .xlsx lo que permite utilizar procesadores de datos más robustos para poder obtener curvas de tendencia, realizar comparaciones con otros datos atmosféricos y así por ejemplo relacionar que factores influyen en la producción de agua o cuales horas son en las que más se produce agua.

En la imagen mostrada en la figura 4.8, se puede apreciar un ejemplo de como los datos pueden ser utilizados, en ese caso se graficaron en forma de barras, y se construyó una línea de tendencia la cual muestra una línea decreciente, indicando que el nivel de agua ha disminuido por lo que sería bueno indagar y dar con esa razón del porque la cantidad de agua disminuyó.

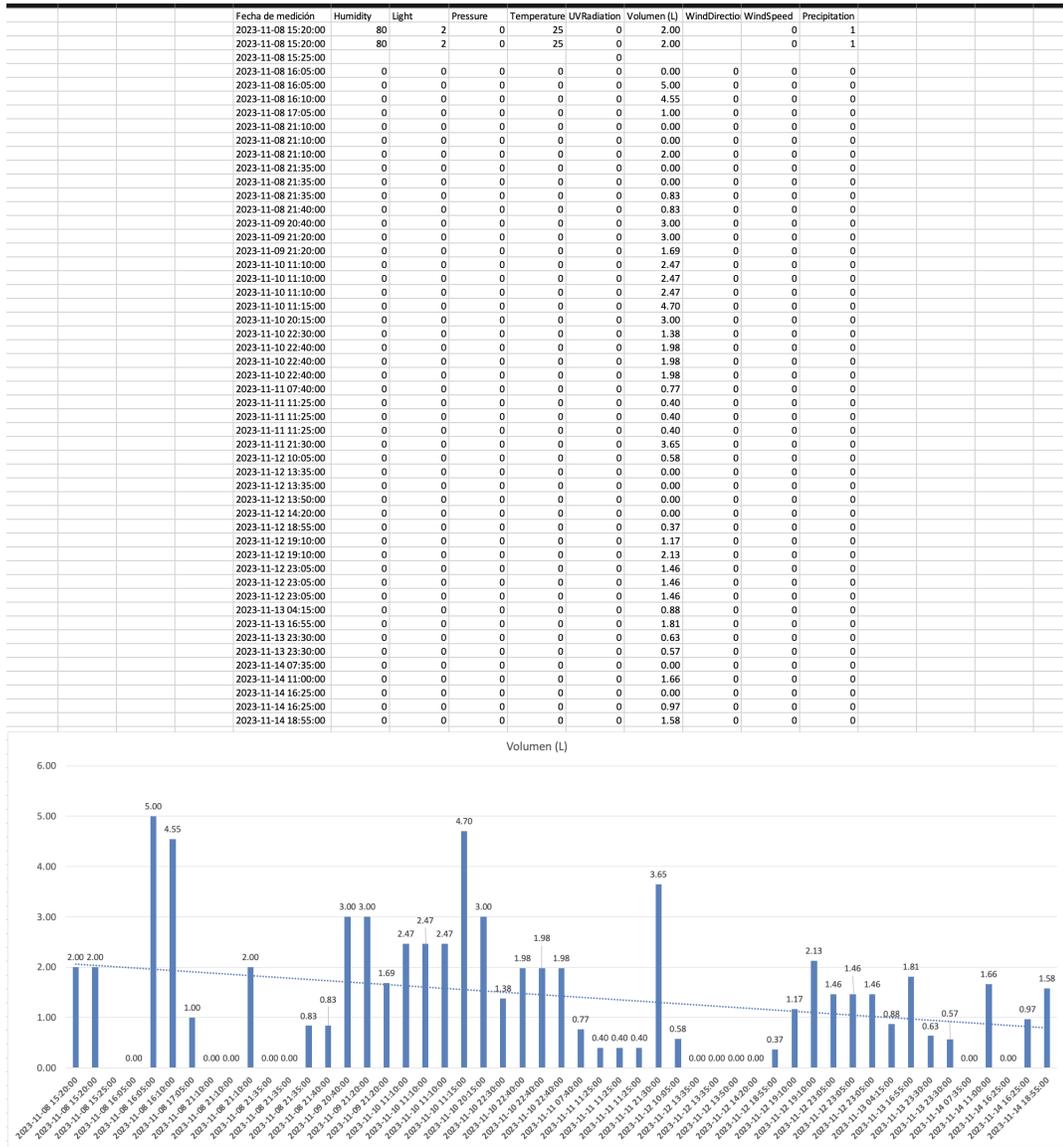


Figura 4.8: Datos de volumen de agua, graficados en Microsoft Excel

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El sistema de monitoreo por medio nodos de medición y un Gateway central, permite el cálculo del volumen de agua producido por los hidropaneles con una precisión menor al 5%. Esto se logra utilizando sensores comerciales de bajo costo, permitiendo así el poder replicarlo en diferentes zonas geográficas, especialmente las zonas en riesgo social como lo es la comunidad que habita en Isla Caballo.

Además de esto, gracias a la utilización de estos componentes y la claridad en la sintaxis de los scripts necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, permite realizar modificaciones dependiendo las necesidades del usuario final, por ejemplo, acoplarse a equipos ya existentes como lagunas, sistemas de recolección de agua de lluvia o incluso para calcular el flujo de agua en sistemas de riego.

Un aspecto importante para el adecuado funcionamiento del sistema, es el realizar una correcta calibración de los sensores de flujo ya que, aunque los fabricantes brinden el factor de conversión del sensor, este puede variar considerablemente dependiendo de la manera en que fue construido el sistema, el grosor de la tubería e incluso la distancia que existe entre la electroválvula y el sensor.

Lo que respecta a la parte IoT del sistema planteado, es que se logra la comunicación de los datos obtenidos por los sensores de flujo en un sistema central. Esto facilita al usuario el poder acceder de una forma rápida y remota a los datos, sin la necesidad de estar en el lugar donde se implementó facilitando así la toma de decisiones y el seguimiento en tiempo real de los datos.

Esto refuerza el hecho que el sistema puede ser implementado incluso en lugares remotos mientras se cuente con conexión a internet, además de esto, la interfaz IoT permite generar gráficos con los valores históricos guardados por las horas de medición así como las fechas en las que se registraron, e incluso permite la descarga de estos en formato .xlsx para así poder utilizar otras herramientas de procesamiento de datos según sea necesario.

La plataforma IoT del proyecto de Cosecha de Agua Atmosférica también permite visualizar cuales son los nodos que registran los datos, cuáles son sus identificadores, cual fue la última medición y la hora en la que fue registrada todo esto por medio de una interfaz sencilla y amigable para el usuario.

5.2. Recomendaciones

Como parte de las recomendaciones para la implementación en sitio, primeramente, es el elegir una carcasa adecuada para el mismo, ya que, si bien el proyecto del DOCINADE poseen carcasas destinadas a los nodos de medición y Gateway, sería recomendable el verificar su funcionamiento con el sistema antes de implementarlo en la isla ya que no todos los sistemas poseen las mismas características, sensores o general la misma cantidad de calor.

Otra de estas recomendaciones es el ser flexible con los componentes y módulos, esto ya que el sistema al ser de fácil implementación, brinda espacio para ser optimizado o adaptado a las necesidades que se presenten, por ejemplo el utilizar módulos LoRa para la conexión entre los módulos de medición y Gateway o el utilizar un solo nodo central para el sensado de todas las variables atmosféricas.

Sería recomendable también el poder buscar o utilizar sensores los cuales sean compatibles con el Gateway central (Raspberry Pi en este caso) o bien intentar corregir la librería que utilizan estos, para así poder prescindir del Arduino y simplificar el sistema.

Una de las recomendaciones más importantes es el hecho de tener claro cuáles son los horarios en los que se desean realizar las mediciones, esto ya que los sensores requieren un flujo de agua de al menos 1L/min para su correcto funcionamiento, y por tanto debe haber suficiente liquido en el tanque para que la medición sea precisa.

Como recomendación final, es aconsejable el utilizar un modelo distinto de electroválvulas debido a que en el momento de su operación estas se calientan mucho, lo que hizo que una fallara y no cerrara más, debido a esto se tuvo que reemplazar por otra, sin embargo, cabe la posibilidad que esta falle nuevamente.

Bibliografía

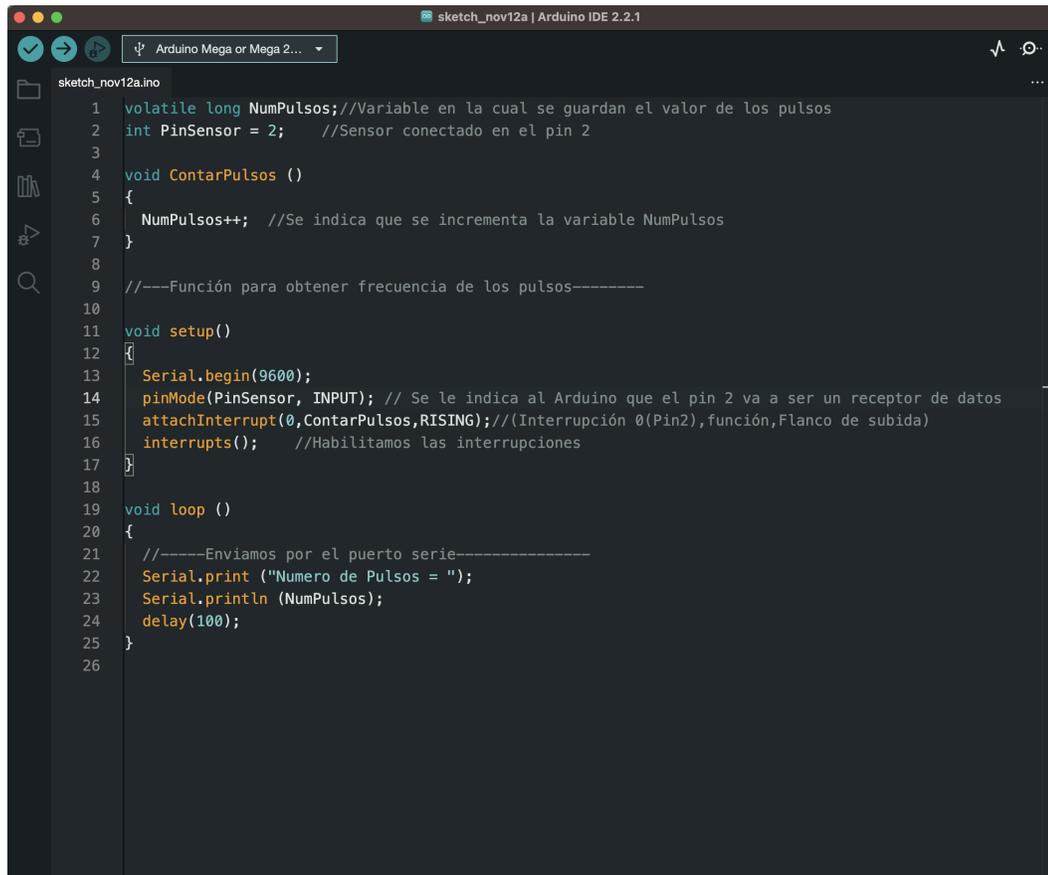
- [1] Marian Valverde Porras. En: *IoT, la revolucion tecnologica que irrumpe en toda nuestra cotidianidad* (2022). URL: <https://delfino.cr/2022/03/iot-la-revolucion-tecnologica-que-irrumpe-en-nuestra-cotidianidad>.
- [2] Humberto Ronquillo. En: *IoT y su aplicacion en el hogar* (2023). URL: <https://ruba.com.mx/iot-y-su-aplicacion-en-el-hogar/>.
- [3] Costa Rica Azul. En: *Isla Caballo: Un Paraíso natural con potencial Comunal de Salud y bienestar* (2013). URL: <https://costaricaazul.com/isla-caballo/>.
- [4] Instituto de Desarrollo Rural. En: *Caracterización del Territorio Puntarenas-Montes de Oro-Monte Verde* (2015). URL: <https://www.inder.go.cr/terpumm/Caracterizacion-Puntarenas-Montes-de-Oro-Monte-Verde.pdf..>
- [5] Mariela Macay. En: *Riesgos por consumo de agua salada* (2021). URL: <https://www.elsoldetampico.com.mx/local/riesgos-por-consumo-de-agua-salada-6676836.html..>
- [6] Jean Damascene. En: *Buena parte del planeta sufrió sequías más allá de lo normal en 2021* (2022). URL: <https://news.un.org/es/story/2022/11/1517182>.
- [7] Jocelyn Soto. En: *¿Cómo afecta el cambio climático el acceso al agua?* (2021). URL: <https://www.greenpeace.org/mexico/noticia/9460/como-afecta-el-cambio-climatico-el-acceso-al-agua/#:~:text=El%20agua%20de%20las%20inundaciones,de%20sufrir%20enfermedades%20como%20diarrea..>
- [8] Delfino. En: *Mayo fue un mes muy seco en la mayor parte del país* (2023). URL: <https://delfino.cr/2023/06/cinco-cantones-vivieron-el-mes-de-mayo-mas-seco-desde-que-se-tiene-registro>.
- [9] Guillermina Garcia. En: *Agua de lluvia, reutilizarla es una posible solución ante la sequía* (2022). URL: <https://thefoodtech.com/seguridad-alimentaria/agua-de-lluvia-reutilizarla-es-una-posible-solucion-ante-la-sequia/>.

- [10] Barbara Sanchez Amabilis. En: *La importancia del sistema de captación de agua de lluvia* (2022). URL: <https://inmobiliare.com/la-importancia-del-sistema-de-captacion-de-agua-de-lluvia/>.
- [11] Laura Rodriguez Rodriguez. En: *Agua de lluvia es aprovechada por estudiantes del Programa de Residencias Estudiantiles* (2017). URL: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2017/07/04/agua-de-lluvia-es-aprovechada-por-estudiantes-del-programa-de-residencias-estudiantiles.html>.
- [12] Docinade. En: *Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo* (2021). URL: <https://docinade.ac.cr/docinade/>.
- [13] Forbes Mexico. En: *Conoce los hidropaneles que producen agua ‘de la nada’* (2022). URL: <https://www.forbes.com.mx/conoce-los-hidropaneles-que-producen-agua-de-la-nada/>.
- [14] SOURCE®. En: *The world’s first renewable water supply* (2023). URL: <https://www.source.co>.
- [15] Business Insider. En: *Hidropaneles solares que sacan agua potable de la nada: la apuesta en la que invierten BlackRock y el fondo de Bill Gates* (2022). URL: <https://www.businessinsider.es/hidropaneles-solares-sacan-agua-nada-apuesta-bill-gates-1035815>.
- [16] Geerte. En: *amazon.com* (). URL: <https://www.amazon.com.mx/Vlvula-solenoide-elctrica-HFS-combustibles/dp/B018WRJYPY?th=1>.
- [17] Alfonso Lopez Suarez. En: *En La Guajira, los paneles solares también producen agua potable* (2020). URL: <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/en-la-guajira-los-paneles-solares-tambien-producen-agua-potable-538776>.
- [18] Dr. Renato Rimolo Donadio. En: *Desarrollo de un sistema sostenible de cosecha de agua atmosférica para uso comunitario y en sistemas productivos de Costa Rica* (2022).
- [19] Universidad de Malaga. En: *¿Qué es el Internet de las cosas (IoT) y por qué se le llama así?* (2023). URL: <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/en-la-guajira-los-paneles-solares-tambien-producen-agua-potable-538776>.
- [20] Red Hat. En: *¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?* (2023). URL: <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/en-la-guajira-los-paneles-solares-tambien-producen-agua-potable-538776>.

- [21] Amazon.com. En: *Sensor de temperatura Google Nest* (). URL: https://www.amazon.com/-/es/Google-Sensor-temperatura-nido-aprendizaje/dp/B07DGWXCNN/ref=sr_1_6?keywords=smart+temperature+sensor&qid=1692055409&sr=8-6.
- [22] Amazon.com. En: *Sensor de temperatura TMP36* (). URL: https://www.amazon.com/-/es/temperatura-TMP36-precisin-analgica-Raspberry/dp/B01GH32AQU/ref=sr_1_1?__mk_es_US=M&crid=BHZEAKCIEADY&keywords=analog%2Btemperature%2Bsensor%2Barduino&qid=1692055562&srefix=analog%2Btemperature%2Bsensor%2Barduino%2Caps%2C169&sr=8-1&th=1.
- [23] DIGITEN. En: *amazon.com* (). URL: <https://www.amazon.com/-/es/DIGITEN-Sensor-pulgada-Medidor-minuto/dp/B01EA3C6LS>.
- [24] raspberrypi.com. En: *Raspberry Pi 4* (). URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>.
- [25] ARDUINO. En: *amazon.com* (). URL: <https://www.amazon.com/-/es/ARDUINO-MEGA-2560-REV3-A000067/dp/B0046AMGW0>.
- [26] Nick Koumaris. En: *electronics-lab.com* (). URL: <https://www.electronics-lab.com/project/using-interrupts-with-arduino/>.
- [27] raspberrypi.com. En: *Raspberry Pi 4* (). URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>.

Apéndice A

A.1. Algoritmo para la calibración de los sensores de flujo

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "sketch_nov12a | Arduino IDE 2.2.1". The main editor area displays a C++ sketch named "sketch_nov12a.ino". The code defines a variable "NumPulsos" to store pulse counts, sets pin 2 as the sensor pin, and implements a "ContarPulsos" function that increments the counter. The "setup" function initializes the serial port at 9600 baud, configures pin 2 as an input, and attaches an interrupt to the "ContarPulsos" function. The "loop" function prints the current pulse count to the serial monitor every 100 milliseconds.

```
1 volatile long NumPulsos; //Variable en la cual se guardan el valor de los pulsos
2 int PinSensor = 2; //Sensor conectado en el pin 2
3
4 void ContarPulsos ()
5 {
6     NumPulsos++; //Se indica que se incrementa la variable NumPulsos
7 }
8
9 //---Función para obtener frecuencia de los pulsos-----
10
11 void setup()
12 {
13     Serial.begin(9600);
14     pinMode(PinSensor, INPUT); // Se le indica al Arduino que el pin 2 va a ser un receptor de datos
15     attachInterrupt(0, ContarPulsos, RISING); // (Interrupción 0 (Pin2), función, Flanco de subida)
16     interrupts(); //Habilitamos las interrupciones
17 }
18
19 void loop ()
20 {
21     //----Enviamos por el puerto serie-----
22     Serial.print ("Numero de Pulsos = ");
23     Serial.println (NumPulsos);
24     delay(100);
25 }
26
```

Figura A.1: Script para la calibración de los sensores de flujo