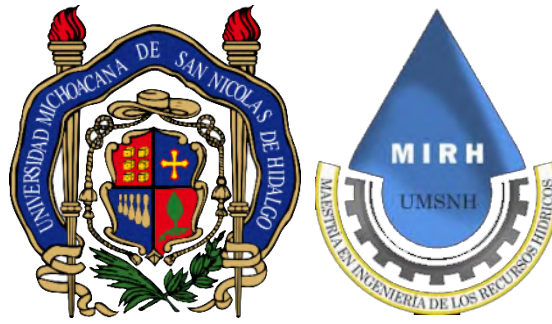




UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos
Facultad de Ingeniería Civil**

SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA MEDICIÓN Y MONITOREO DE CAUDALES EN FLUJOS A SUPERFICIE LIBRE BASADO EN SENSORES ELECTRÓNICOS DE BAJO COSTO

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

PRESENTA

Oscar Antonio Cedeño Acosta
Ingeniero Civil

ASESOR DE TESIS

Constantino Domínguez Sánchez
Doctor en Ingeniería Medioambiental

CO-ASESOR DE TESIS

Joel Hernández Bedolla
Doctor en Ingeniería Medioambiental

Morelia Michoacán, México noviembre de 2025

RESUMEN

Para países en donde se está en proceso de desarrollo los elevados costos de instrumentación, así como de dispositivos para medir y monitorear caudales en flujos a superficie libre afecta de una forma negativa en la gestión del recurso hídrico, en México existe una baja densidad de información de caudales, así como una actualización tardía en la base de datos en donde se incorporan, sin embargo se necesita información de los recursos hídricos para una buena gestión y planificación de los mismos, debido a estas carencias es que surge el interés de generar información suficiente en calidad, cantidad y en tiempo real. Como solución, en esta investigación se propone desarrollar un sistema de medición de caudales en flujos de superficie libre en base a sensores de bajo costo, enviando dicha información mediante un protocolo de comunicación efectivo a una base de datos y esta a su vez a una página web la cual permite adquirir los datos y visualizarlos en tiempo real para su gestión siendo confiables, para esto las mediciones obtenidas con los sensores pasaran por un proceso de calibración en laboratorio el cual conlleva la obtención de caudales en flujos a superficie libre con métodos tradicionales para posteriormente generar curvas de calibración gasto – tirante y desarrollar algoritmos de programación los cuales serán capaces de obtener los caudales. La utilización de sensores de bajo costo representa una ventaja significativa, ya que permite la implementación de una extensa red de monitoreo hidrométrico a un costo más accesible, en comparación con tecnologías tradicionales más costosas.

Palabras clave: Bajo costo, LoRa, hidrometría, ESP32, estación hidrométrica

ABSTRACT

In developing countries, the high costs of instrumentation and devices for measuring and monitoring discharge in free-surface flows negatively affect water-resources management. In Mexico, discharge information is sparse and database updates are often delayed. Yet timely and reliable hydrologic information is essential for effective planning and management. In response to these gaps, this research proposes the development of a low-cost system to measure discharge in free-surface flows using affordable sensors. The data will be transmitted via an efficient communication protocol to a database and then to a website that enables real-time acquisition and visualization for decision-making with reliable results. Sensor measurements will undergo laboratory calibration, which includes determining discharge in free-surface flows using traditional methods to generate discharge–stage calibration curves and to develop algorithms capable of computing discharge. The use of low-cost sensors offers a significant advantage, as it enables the deployment of an extensive hydrometric monitoring network at a more accessible cost compared to traditional, higher-priced technologies.

Keywords: low cost, LoRa, hydrometry, ESP32, hydrometric station

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	9
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
3.	OBJETIVOS	13
3.1	OBJETIVO GENERAL	13
3.2	OBJETIVOS PARTICULARES	13
4.	HIPÓTESIS	13
5.	ANTECEDENTES	14
6.	MARCO TEORICO	16
6.1.	GENERALIDADES	16
6.2.	ELEMENTOS DE UNA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA	18
6.2.1.	<i>Instrumentación</i>	18
6.2.2.	<i>Limnógrafo</i>	20
6.2.3.	<i>Controles artificiales</i>	21
6.2.4.	<i>Estructura de caída libre</i>	23
6.2.4.1.	<i>pozos tranquilizadores</i>	23
6.3.	ESTACIONES HIDROMÉTRICAS AUTOMATIZADAS EN MÉXICO	25
6.3.1.	SISTEMA DE TORNO DE ORILLA CONTROLADO REMOTAMENTE (HORNET PLUS)	26
6.4	ELEMENTOS TÍPICOS DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN MÉXICO	27
6.5	HIDROMETRÍA ULTRASÓNICA	29
6.5.1	<i>Técnica de tiempo de travesía</i>	30
6.6	MÉTODOS DE MEDICIÓN DE CAUDALES EN SECCIONES NATURALES DE RIO, O CANALES COMPUESTOS	33
6.6.1	<i>Método del canal dividido (DCM)</i>	33
6.6.2	<i>Método del canal único (SCM)</i>	35
6.6.3	<i>Coefficiente de rugosidad equivalente</i>	35
7.	METODOLOGÍA	37
7.1	CREACIÓN DE PROTOTIPOS	38
7.2	PROGRAMACIÓN DE SENSORES	39
7.3	DISEÑO DE CIRCUITO ELECTRÓNICO, DISEÑO DE PCB Y DISEÑO DE ESTRUCTURA	39
7.4	CALIBRACIÓN DE SENSORES EN LABORATORIO (PRUEBAS HIDRÁULICAS)	39
7.5	CICLO DE VIDA DEL DESARROLLO DE SISTEMAS (SDLC)	40
7.5.1	<i>Análisis de las necesidades del sistema.</i>	40
7.5.2	<i>Desarrollo y documentación del software.</i>	40
7.5.3	<i>Prueba y mantenimiento del sistema.</i>	41
7.5.4	<i>Implementación y evaluación del sistema.</i>	41
8.	RESULTADOS	42
8.1.	DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS	42
8.1.1.	<i>Caracterización de la zona de estudio</i>	42
8.2.	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE SITIO PARA INSTALACIÓN DEL SAMMCA PILOTO	43
8.2.1.	<i>Criterio de sección regular (Bordes Suaves)</i>	43
8.2.2.	<i>Criterio de dimensión de sección</i>	44
8.2.3.	<i>Criterio de zona de fácil acceso</i>	44
8.3	SELECCIÓN DE SITIO PARA INSTALACIÓN DEL SAMMCA PILOTO	45
8.4.	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	47
8.4.1.	<i>Sensor ultrasónico HC-SR04</i>	48
8.4.2.	<i>Placa de desarrollo ESP32</i>	49
8.4.3.	<i>Pantalla OLED 0.96" SSD1306</i>	50
8.5.	ESPECIFICACIÓN DE DISEÑO	51

8.5.1. Especificación de diseño escala laboratorio	51
8.5.2. Desarrollo de circuito electrónico	51
8.5.3. Ubicación de prototipo escala laboratorio	52
8.5.4. Desarrollo de algoritmo	54
8.5.5. Diseño de estructura escala laboratorio	55
8.6. IMPLEMENTACIÓN DE DISEÑO	56
8.6.1. Pruebas experimentales para obtención del caudal	56
8.6.2. Curvas de calibración	58
8.6.2.1. Integración de curvas de calibración a algoritmo	59
8.7. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN WIFI	61
8.7.1. Implementación de algoritmo en prototipo y comunicación WiFi	64
8.7.1.1. Diseño del algoritmo	64
8.8. IMPLEMENTACIÓN DE BASE DE DATOS (THINGSPEAK)	71
8.9. DESARROLLO Y DISEÑO DE LA BASE DE DATOS DEL SAMMCA	74
8.9.1 Creación de la base de datos "saih"	76
8.9.2. Importancia de la Creación de la Base de Datos	78
8.9.3. Diseño de la tabla "datos"	79
8.10. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN DEL SAMMCA	81
8.10.1. Protocolo de transmisión de datos LoRa	81
8.11. ARQUITECTURA INICIAL PARA EL PROTOCOLO DE TRANSMISIÓN DE DATOS LoRa	84
8.12. DESARROLLO DE ALGORITMO PARA COMUNICACIÓN Y ENVÍO DE DATOS CON LoRa.	85
8.13. DESARROLLO DE SITIO WEB	92
8.14. DISEÑO DE CIRCUITO PARA CONDICIONES DE CAMPO	94
8.15. DISEÑO DE PCB (PLACA DE CIRCUITO IMPRESO)	96
8.16. DISEÑO DE ESTRUCTURA ESCALA REAL DEL SAMMCA	99
8.17. GENERACIÓN DE CURVAS TIRANTE-GASTO EN CAMPO	101
8.18. IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA EN CAUCES NATURALES	107
9. CONCLUSIONES	111
10. REFERENCIAS	113
11. ANEXOS	116
11.1 ALGORITMO PRINCIPAL DE SENSORES HC-SR04 CON PANTALLA OLED	116
11.2 ALGORITMO THINGSPEAK	119
11.3 ALGORITMO LoRa	121
11.4 ALGORITMO PHP (POST-CLI-DATA)	123
11.5 ALGORITMO WIFI	125

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Estaciones hidrométricas en la República Mexicana (CONAGUA, 2018)</i>	10
<i>Figura 2 Estaciones hidrométricas en la ciudad de Morelia</i>	11
<i>Figura 3 Estación hidrométrica (CONAGUA, 2017)</i>	16
<i>Figura 4 Medidor con caseta, paneles solares, antena satelital y medidor de peso de alambre en el puente (WMO, 2010)</i>	18
<i>Figura 5 Estructura de canastilla en estación hidrométrica (WMO, 2010)</i>	18
<i>Figura 6 Molinete hidrométrico (Gurley Manual, 2022)</i>	19
<i>Figura 7 Aforador ADCP de efecto Doppler montado en un barco (IMTA, 2022)</i>	20
<i>Figura 8 Estructura típica de limnógrafo</i>	21
<i>Figura 9 Control artificial, vertedor de cresta ancha de concreto (WMO, 2010)</i>	22
<i>Figura 10 vertedero rectangular suprimido (WMO, 2010)</i>	22
<i>Figura 11 vertedor de cresta ancha de concreto, control con una muesca en V poco profunda en el centro (WMO, 2010)</i>	22
<i>Figura 12 Amortiguador de acero corrugado y galvanizado (WMO, 2010)</i>	24
<i>Figura 13 Amortiguador de bloques de concreto (WMO, 2010)</i>	25
<i>Figura 14. Sistema Hornet Plus en la estación Reynosa aguas debajo de la Presa Internacional</i>	26
<i>Figura 15. Hornet Plus (El Hornet Plus utiliza un polipasto avanzado que puede medir la profundidad, el ángulo del cable y los recuentos)(HyQuets, 2022)</i>	27
<i>Figura 16 Caseta y canastilla de estación hidrométrica "Álvaro Obregón" México</i>	28
<i>Figura 17 Limnógrafo de estación hidrométrica "Álvaro Obregón" Michoacán</i>	28
<i>Figura 18 Molinete hidrométrico de estación "Av. Michoacán" Morelia.</i>	29
<i>Figura 19. Funcionamiento de un aforador de tiempo de tránsito.</i>	31
<i>Figura 20. Método de la "sección intermedia" para estimación del gasto.</i>	32
<i>Figura 21. Conjunto de medición para el aforador de tiempo de tránsito</i>	32
<i>Figura 22. Sección de un canal compuesto con rugosidad "n" variable en cada subsección.</i>	34

<i>Figura 23. Sección transversal de río con rugosidad “n” variable en cada subsección.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 24 Ruta metodológica para el desarrollo del sistema</i>	<i>37</i>
<i>Figura 25 Diagrama de flujo de creación de prototipos (Stair & Reynolds, 2010).</i>	<i>38</i>
<i>Figura 26 Fases del ciclo del desarrollo de sistemas (Kendall, 2011)</i>	<i>41</i>
<i>Figura 27 Localización geográfica de la zona de estudio.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 28 Caracterización de secciones de acuerdo a su morfología</i>	<i>43</i>
<i>Figura 29 Sección de río elegida para instalación del SAMMCA piloto</i>	<i>46</i>
<i>Figura 30. Realizando la medición de la corriente de la sección seleccionada.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 31. Sensor ultrasónico HC-SR04.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 32. Placa de desarrollo ESP32</i>	<i>49</i>
<i>Figura 33. Pantalla OLED 0.96” SSD1306.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 34. Circuito electrónico de prototipo</i>	<i>52</i>
<i>Figura 35. Ubicación de prototipo.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 36. Diagrama de flujo de algoritmo de prototipo.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 37. Estructura para sensores escala laboratorio</i>	<i>55</i>
<i>Figura 38. Secciones elegidas con estructura para sensores.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 39. Obtención de caudales mediante métodos tradicionales.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 40. Curva de calibración "Tirante-Gasto" de la sección rectangular.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 41. Curva de calibración "Tirante-Gasto" de la sección trapezoidal.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 42. Diagrama de flujo de algoritmo con ecuación de curvas de calibración.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 43. Diagrama de flujo del bloque 1</i>	<i>65</i>
<i>Figura 44 Diagrama de flujo del bloque 2.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 45 Diagrama de flujo del bloque 3</i>	<i>69</i>
<i>Figura 46. Creación de canal en cuenta de ThingSpeak.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 47. Diagrama de flujo de algoritmo para conexión de ThingSpeak.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 48. Datos de caudal enviados por los sensores ultrasónicos a la base de datos ThingSpeak.....</i>	<i>74</i>

<i>Figura 49 Base de datos “saih” y tabla “datos” creada en MySQL</i>	<i>80</i>
<i>Figura 50. Placa de desarrollo ESP32 LoRa Wifi V2 y Módulo LoRa REYAX RYLR998</i>	<i>84</i>
<i>Figura 51. Diagrama de arquitectura propuesta de protocolo de comunicación</i>	<i>85</i>
<i>Figura 52 GATEWAY Mikrotik wAP LoRa9 kit</i>	<i>87</i>
<i>Figura 53 Circuito electrónico del SAMMCA</i>	<i>96</i>
<i>Figura 54 Diagrama del diseño de la placa de circuito impreso para el SAMMCA</i>	<i>98</i>
<i>Figura 55. Modelo 3D de la PCB del SAMMCA</i>	<i>99</i>
<i>Figura 56. Propuesta de estructura para sensores en sección de río</i>	<i>100</i>
<i>Figura 57. Método de dovelas para la generación de curvas de calibración</i>	<i>101</i>
<i>Figura 58. Obtención de tirante manualmente (23 cm)</i>	<i>102</i>
<i>Figura 59 Mediciones en campo para datos de las curvas de calibración</i>	<i>103</i>
<i>Figura 60 Obtención de topografía en la zona de estudio</i>	<i>104</i>
<i>Figura 61 Sección transversal del río una vez obtenida la topografía</i>	<i>104</i>
<i>Figura 62 Curva “Tirante – Gasto” de la sección de estudio</i>	<i>105</i>
<i>Figura 63 Curva “Velocidad – Gasto” de la sección de estudio</i>	<i>106</i>
<i>Figura 64 Instalación de sensores en zona de estudio</i>	<i>107</i>
<i>Figura 65 Datos enviados a la base de datos exitosamente</i>	<i>110</i>

1. INTRODUCCIÓN

Para planificar el desarrollo socioeconómico de un país, es necesario llevarlo de la mano con un desarrollo sustentable; esto implica que, cada desarrollo y generación de infraestructura, además de satisfacer una necesidad humana, debe preservar y cuidar el medio ambiente.

Uno de los ejes principales para lograr una adecuada planificación de desarrollo sustentable, es la correcta administración de los recursos hídricos, la cual, a su vez solo es posible si se cuenta con información precisa sobre la condición de cantidad y calidad de agua que se desplaza a través de las regiones de escurrimiento superficial tales como: ríos, arroyos y corrientes tributarias.

El uso de la información del comportamiento hidrométrico es muy variado, ya que la mayoría de sectores de la economía de un país, disponen de esta en la planificación y desarrollo de objetivos. El agua es un recurso de valor inestimable para todas las naciones, y a medida que aumenta la competencia por el acceso a dicho recurso, se resalta aún más la importancia y utilidad de la información hidrométrica.

Es importante demostrar los beneficios de la información hidrométrica (Leandro & Hillman Gerardo, 2019). El conocimiento de la cantidad y la calidad del agua es de vital importancia para el abastecimiento de agua potable municipal e industrial, el control de avenidas, el diseño y operación de presas, la generación de energía hidroeléctrica, la irrigación, las actividades recreativas relacionadas con el agua, la navegación fluvial, el cuidado y preservación de flora y fauna, el drenaje, el tratamiento de aguas residuales y la potabilización (Viessman Warren et al., 1989).

Según la *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA) (2018), las estaciones hidrométricas miden la cantidad de agua que fluye en ríos, canales, tuberías y a la salida de las presas, por lo que sirven para conocer la cantidad disponible del recurso. El caudal es generado originalmente por la precipitación pluvial, así como por la entrada de agua subterránea a los canales superficiales. También deben considerarse las descargas asociadas a los diversos usos del agua. En ocasiones los cauces, y por consiguiente los flujos de agua, están regulados por presas y otras obras de control operadas por el hombre.

En 2018, CONAGUA contaba con 3090 estaciones climatológicas en operación, de las cuales sólo 815 eran estaciones hidrométricas (Figura 1) registrando caudales en ríos, obras de toma en presas, etc. y operadas por personal capacitado y autorizado, o bien. algunas de ellas operando de manera automatizada. En ambos tipos de estaciones (automatizadas y de operación manual), los costos de instrumentación e infraestructura, así como la capacitación del personal de operación, resultaban en costos elevados.



Figura 1 Estaciones hidrométricas en la República Mexicana (CONAGUA, 2018)

La zona de estudio corresponde a la ciudad de Morelia, la cual cuenta con algunas estaciones hidrométricas de distintas procedencias (Figura 2). Sin embargo, la mayoría de ellas cuenta con información desactualizada y/o discontinua temporalmente (Solís-Alvarado et al., 2015), todas estas funcionan de manera manual por personal autorizado, realizando aforos implementando diferentes métodos de cálculo (Rantz, et al., 1982), y para la obtención de los datos para el cálculo se cuenta con infraestructura, dispositivos mecánicos y en algunos casos con dispositivos electrónicos, los cuales poseen costos elevados realizando.

Una vez realizados los aforos el operador procede a realizar los correspondientes cálculos manualmente, para posteriormente enviar los datos a oficinas gubernamentales para resguardo de los mismos,

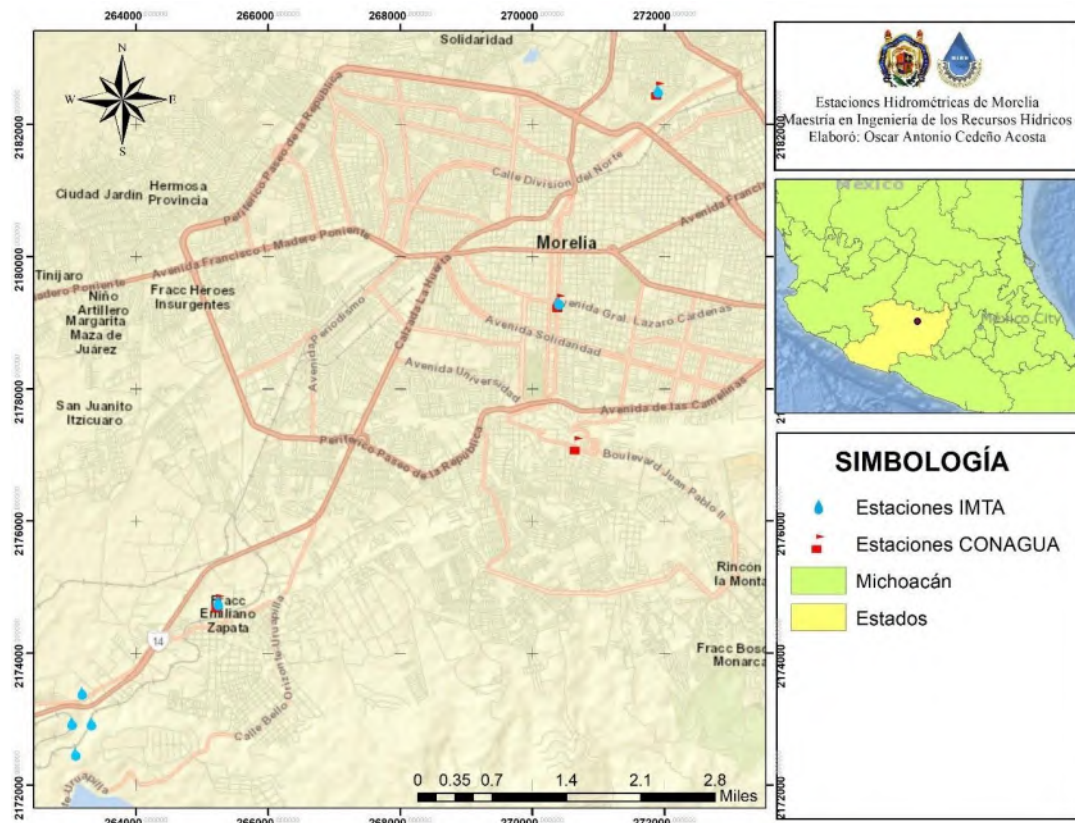


Figura 2 Estaciones hidrométricas en la ciudad de Morelia

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para países en vías de desarrollo, el monitoreo de variables hidrométricas en cuencas y cauces naturales, se ve condicionado por los elevados costos de instrumentación para la generación de dispositivos de medición, así como para la capacitación de personal para operar y monitorear dichos dispositivos.

Como consecuencia, al no contar con una red hidrométrica de calidad, es difícil una adecuada gestión del recurso hídrico y, por tanto, de la toma de decisiones para mantener su aprovechamiento en una forma sustentable.

México no es la excepción, pues se cuenta con una limitada red de estaciones hidrométricas funcionales, de las cuales, es aún menor la cantidad que opera de forma automatizada y con los estándares de calidad y precisión requeridos. Además, cabe mencionar que los datos con los que, si se cuenta, rara vez tienen accesibilidad general al público, y cuando la tienen, es en periodos desactualizados.

Surge de lo anterior, una necesidad imperativa de generar una red de dispositivos de medición, con un costo de construcción atractivo, pero que mantenga un nivel de error aceptable dentro de los parámetros de precisión requeridos.

El presente trabajo de investigación, presenta una propuesta de estación hidrométrica (para medición de caudales en secciones de río o cauces naturales), mediante la implementación de sensores electrónicos de bajo costo.

Se plantea, además la implementación de un protocolo de comunicación que permita enviar los valores medidos a una base de datos, y esta a su vez a una página web donde cualquier usuario pueda acceder a la información en tiempo real.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Crear un sistema automatizado de bajo costo capaz de calcular caudales a partir de datos medidos en tiempo real de tirante y velocidad en conductos de superficie libre basado en sensores.

3.2 Objetivos Particulares

- Crear un dispositivo de medición de tirantes y velocidad con el uso de tecnologías de bajo costo que envíe automáticamente los datos medidos a una base de datos.
- Diseñar una base de datos que soporte la captura, administración, manipulación y análisis de datos a gran escala.
- Desarrollar una interfaz web la cual permita visualizar en tiempo real la información y descarga de datos.

4. HIPÓTESIS

Empleando tecnología de bajo costo, es posible desarrollar un sistema automatizado que devuelva datos de tirante, velocidad y caudal capaz de enviar la información a una base de datos para su administración y análisis además de visualizarla en tiempo real en cantidad y calidad.

5. ANTECEDENTES

De acuerdo con la literatura se han encontrado diversos desarrollos de sistemas relacionados con la medición de variables hidráulicas, además de estudios e investigaciones las cuales conllevan el uso de sensores de bajo costo además de utilizar bases de datos o aplicaciones, en donde se lleva a cabo el desarrollo web, estos trabajos y estudios incorporan los conceptos de bajo costo, medición de variables hidráulicas, sensores, construcción y desarrollo de instrumentación, los cuales se relacionan directamente con el desarrollo de este trabajo.

(Martinez et al., 2020) construyen, calibran e implementan un equipo ultrasónico para el aforo de cauces naturales, mediante la medición de los tirantes y obtener funciones de calibración caudal-tirante para avenidas. El equipo ultrasónico consistió en un microcontrolador Arduino modelo ATMEGA al cual se les conectó un lector microSD CATALEX V1.1, una pantalla LCD, un reloj de tiempo real alimentado por un convertidor-regulador de voltaje. Dicho instrumento se calibró en el laboratorio de hidráulica del departamento de la carrera de irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Y posteriormente se validó instalándose en un punto de aforo en el río Chapingo.

(Guerra & Toapaxi, 2016) diseñan e implementan un transductor electrónico para la medición de flujo a canal abierto por lo que diseñan un molino utilizan sensores los cuales son sensor de efecto hall, sensor HC-SR04 estos conectados a una placa Arduino UNO R3 además de también un módulo de tarjeta micro SD, un módulo RTC DS1307, Real Time Clock y una pantalla LCD de 16x2 para la visualización de los datos, para la alimentación implementan paneles solares.

(Ayala & Albóniga, 2015) en el Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA) se diseñó un dispositivo electrónico de medición de caudal de agua para canales abierto, aplicable para cualquier estructura hidráulica que relacione el nivel del agua de una sección de área conocida, por lo que para su diseño utilizaron el microcontrolador Arduino UNO R3, un potenciómetro como elemento sensor de desplazamiento para convertir el mismo en una señal eléctrica, además de añadirle una pantalla LCD de 16x2 para la representación visual física de los datos, generando así una solución de bajo costo, para crear la medición electrónica con gran precisión del caudal y consumo del agua en distintas estructuras hidráulicas y en este caso para el método de riego por inundación.

(Corapi et al., 2021) diseñan un sistema de monitoreo de caudal y tirante para laboratorio piloto de hidráulica en tiempo real además de almacenar los datos en un servidor IoT (Internet de las Cosas), donde el prototipo consta de un sensor de presión diferencial MPX 5500 y sensores ultrasónicos HC-SR04 ambos de bajo costo, con un microcontrolador Arduino y un Shield Ethernet W1500 el cual hace la comunicación de internet a la placa de Arduino para así subir los datos a la nube.

(Chusin & Pilaguano, 2020) Implementan un sistema de monitoreo para la medición de caudal en el río de San Pablo Ecuador con sensores de bajo costo los cuales almacenas la información en la nube además de que cuenta con una interfaz web que permite visualizar el valor actual del caudal en cada momento desde la instalación de dichos sensores, realizando un SAT (Sistema de Alerta Temprana) utilizando el microcontrolador Arduino y un sensor de flujo YF-S201 para la medición del caudal los cuales son de bajo costo.

6. MARCO TEORICO

6.1. Generalidades

Definición: **Estación hidrométrica.** Las estaciones hidrométricas son reglas graduadas colocadas escalonadamente en un río, arroyo, laguna o embalse (Figura 3) que miden la cantidad de agua disponible en estos cuerpos de agua originados por las lluvias y los escurrimientos (CONAGUA, 2017).

Estas estaciones son de fundamental importancia ya que al conocer la cantidad de agua que fluye por un flujo superficial, así como también su calidad, los personales tomadores de decisiones podrán gestionar el recurso hídrico como lo puede ser en la distribución de abastecimiento de agua potable, la irrigación de los campos hasta la generación de la energía hidroeléctrica (Atlas del Agua en México, 2018).



Figura 3 Estación hidrométrica (CONAGUA, 2017)

Las estaciones hidrométricas generalmente se encuentran ubicadas en secciones de control ¹ en ríos, o en puntos estratégicos donde sea más fácil la recolección de datos, como es el caso de puentes peatonales de cruce, en dicho caso, las estaciones pueden contar con distintos elementos para la recolección de datos, como una canastilla para el operador, o un limnógrafo.

Existen diferentes tipos de dispositivos y estaciones hidrométricas para mediciones de caudales en conductos de superficie libre las cuales pueden ser manuales o automáticas. Actualmente, en países desarrollados las más utilizadas son las estaciones automáticas basadas en sensores de alta calidad (Sauer, 2002), por lo que su costo es elevado, para su construcción se deben de tener algunas consideraciones como: la correcta ubicación para el registro de niveles y mediciones de descargas, por lo que se debe de estimar la etapa máxima en la cual el control de nivel bajo de agua será efectivo; las tomas, transductores u orificios deben ubicarse aguas arriba del control de agua baja, a una distancia igual a por lo menos tres veces la profundidad del agua en el control en esa etapa máxima estimada, si los sensores de nivel de agua están ubicados más cerca del control, pueden estar en una región donde las líneas de corriente tienen curvatura vertical (Manual On Stream Gauging Volume I, 2010), en la Figura 4 se muestra una estación de aforo que satisface los requisitos de construcción para la medición de caudal.

En la construcción de una estación también se debe de tener en cuenta una estructura la cual sea movable en donde el operador pueda realizar el aforo, la estructura más conocida es la canastilla (CONAGUA, 2008)

¹ **Sección de control:** es una sección de flujo, donde se tiene una relación única entre tirante y caudal ($y - Q$). Generalmente se ubica en un punto donde se propicie la condición de régimen crítico.



Figura 4 Medidor con caseta, paneles solares, antena satelital y medidor de peso de alambre en el puente (WMO, 2010)



Figura 5 Estructura de canastilla en estación hidrométrica (WMO, 2010)

6.2. Elementos de una estación hidrométrica

6.2.1. Instrumentación

Para la obtención de datos de caudal en flujos a superficie libre es necesario contar con dispositivos de medición mecánicos o electrónicos los cuales permiten cuantificar dicha variable, el dispositivo más común y el más usado es el molinete hidrométrico (Figura 6) el

cual puede ser mecánico o en algunos casos electrónico, estos dispositivos son de medición puntual lo que hace necesario la operación manual con operarios para realizar aforos sin embargo, no es el único dispositivo para obtención del caudal, también existen dispositivos con tecnología más avanzada como el uso de aforadores ultrasónicos Doppler (Figura 7) los cuales obtienen el gasto en base a ondas ultrasónicas registrando niveles y velocidades, estos últimos pueden requerir el uso de operarios (Camnasio & Orsi, 2011)

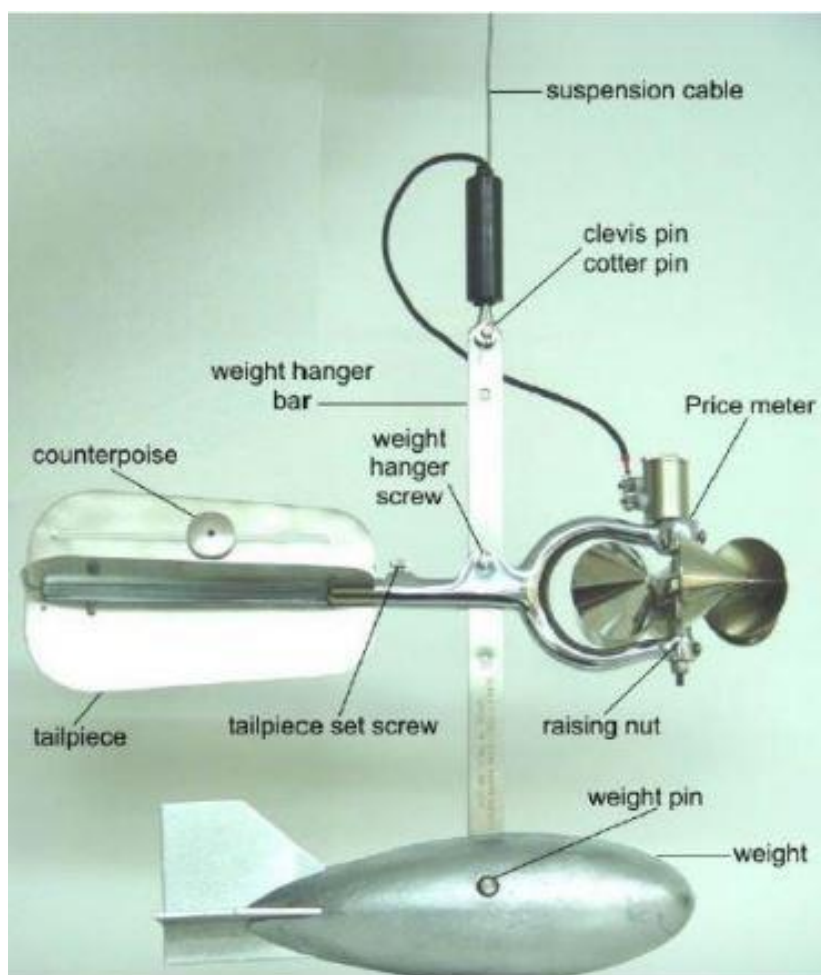


Figura 6 Molinete hidrométrico (Gurley Manual, 2022)

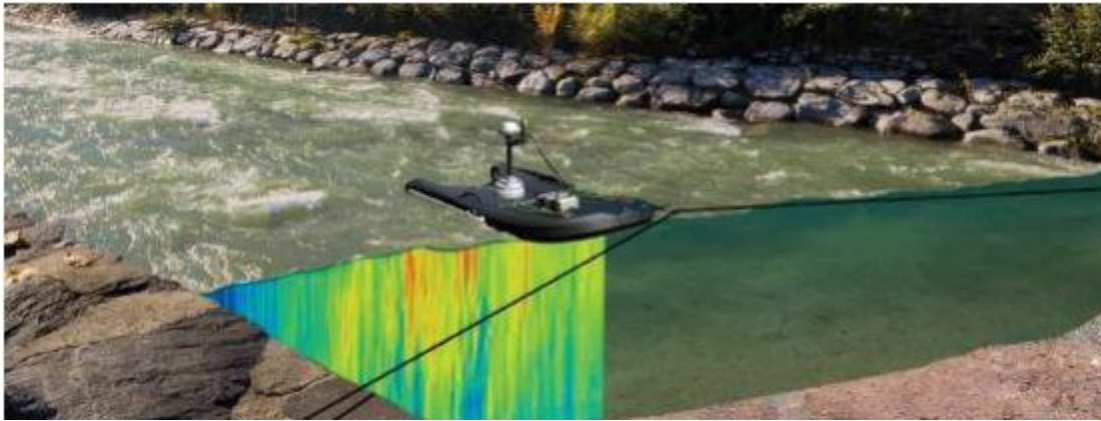


Figura 7 Aforador ADCP de efecto Doppler montado en un barco (IMTA, 2022)

Para utilizar los dispositivos mencionados anteriormente se debe de contar con distintos elementos de infraestructura para la obtención precisas de los caudales, ya que no en cualquier parte del flujo a superficie libre pueden ser colocados, además de también requerir de algún tipo de refugio para ser almacenados y en todo caso energizados.

6.2.2. Limnógrafo

El limnógrafo es un equipo de medición que grafica los niveles o fluctuación del nivel de un río o lago, utiliza un sistema mecánico de poleas con flotador y contrapeso (Kennedy Arturo et al., 1992). Estos equipos dejaron de utilizarse y fabricarse alrededor de la década de los años 80 aunque actualmente en países en proceso de desarrollo aún se siguen utilizando. En países desarrollados se utiliza un equipo con el mismo método de medición que registra digitalmente el nivel, esto puede ser basado en sensores o en diseños de circuitos electrónicos los cuales son capaces de obtener los niveles de manera precisa (Ortega-Gaucin, 2012)

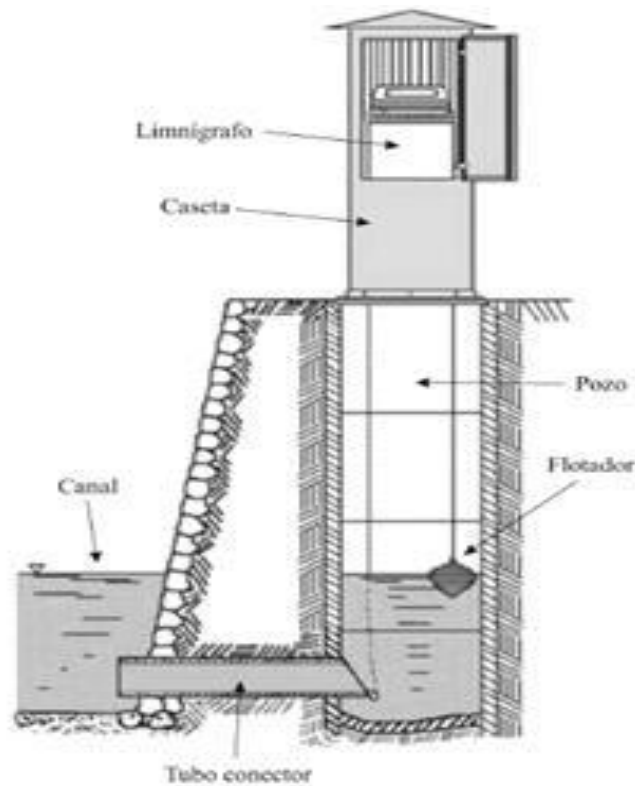


Figura 8 Estructura típica de limnógrafo

6.2.3. Controles artificiales

La *Organización Meteorológica Mundial* (WMO) (2010), menciona que para la construcción de una estación hidrométrica se necesita un “tipo de control artificial” el cual es una estructura construida en un canal de corriente para estabilizar y contraer el canal en una sección y, por lo tanto, simplificar el procedimiento para obtener registros precisos de descarga, los controles construidos en cauces naturales suelen ser en su mayoría vertedores (Figura 9), que dependiendo del tipo del cauce es el tipo de vertedor además de también verificar si el cauce transporta sedimentos o agua clara (Organización Internacional de Normalización, 1995).



Figura 9 Control artificial, vertedor de cresta ancha de concreto (WMO, 2010)



Figura 10 vertedero rectangular suprimido (WMO, 2010)



Figura 11 vertedor de cresta ancha de concreto, control con una muesca en V poco profunda en el centro (WMO, 2010)

El costo suele ser el factor principal para decidir si se debe construir o no un control artificial para reemplazar un control natural inferior. El costo de la estructura se ve más afectado por el ancho de la corriente y el tipo o condición del lecho y el material del banco. El ancho de la corriente gobierna el tamaño de la estructura, y el lecho y el material gobiernan el tipo de construcción que debe usarse para minimizar las fugas debajo y alrededor de la estructura. Si se va a utilizar un control artificial, el tipo y la forma de la estructura a construir dependen de las características del canal o cauce natural, las condiciones de flujo, el rango de descarga a medir, la sensibilidad deseada y la pérdida de carga máxima permitida (remanso). (Carter, RW y Davidian, Jacob, 1968).

6.2.4. Estructura de caída libre

Los dispositivos de medición requieren algún tipo de refugio para instrumentos y, en el caso de los medidores que usan sensores o medidores mecánicos, también requieren un pozo amortiguador. En muchos casos, estas estructuras brindan la protección necesaria contra el vandalismo y los peligros naturales como la lluvia, las inundaciones, el viento y los rayos. Las siguientes secciones describen las diversas estructuras utilizadas en todo el mundo (Manual On Stream Gauging, 2010) .

6.2.4.1. pozos tranquilizadores

Los pozos tranquilizadores o pozo de amortiguamiento protegen al dispositivo de medición y amortigua las fluctuaciones en la corriente causadas por el viento y la turbulencia. Los pozos amortiguadores están hechos de concreto, concreto armado, bloques de concreto, tubería de concreto, tubería de acero, tubería de aluminio, plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y ocasionalmente madera, esto dependerá de la zona en donde se requiera

construir además de la corriente del flujo Pueden colocarse en la orilla del flujo a superficie libre, como se muestra en la Figura 12, pero a menudo se colocan directamente en el arroyo y se unen a pilares o pilares de puentes (Organización Internacional de Normalización, 2000).

El pozo de amortiguación debe tener la profundidad suficiente para que la parte inferior esté al menos 0.3 m por debajo de la etapa anticipada y su parte superior por encima del nivel de la inundación de 200 años. El interior del pozo debe ser suficiente para permitir la operación libre de todo el equipo (Smith, Winchell, Hanson, RL & Cruft, RW, 1965).



Figura 12 Amortiguador de acero corrugado y galvanizado (WMO, 2010)



Figura 13 Amortiguador de bloques de concreto (WMO, 2010)

6.3. Estaciones hidrométricas automatizadas en México

En México, se registra una cantidad reducida de estaciones hidrométricas automáticas en comparación con las estaciones hidrométricas manuales. No obstante, en las fronteras de México con Estados Unidos, los ríos son objeto de monitoreo mediante estaciones hidrométricas automáticas que incorporan dispositivos de tecnología avanzada, los cuales recogen datos de variables hidráulicas de forma automática (CONAGUA, 2022). El dispositivo más utilizado para esta hidrometría es el “Sistema de Torno de Orilla Controlado Remotamente” de la marca Hornet Plus el cual requiere de infraestructura para su funcionamiento y monitorea ciertos los flujos de agua que pasan por la frontera de México con Estados Unidos.



Figura 14. Sistema Hornet Plus en la estación Reynosa aguas debajo de la Presa Internacional

6.3.1. Sistema de torno de orilla controlado remotamente (Hornet Plus)

El sistema de tornos de orilla de “HyQuest Solutions”, Hornet Plus, se ha desarrollado para realizar mediciones de caudal en ríos desde tornos de orilla fijos. El Hornet Plus utiliza un Perfilador Acústico de Corriente Doppler (ADCP) o un molinete mecánico conectado a un peso de medición adecuado para medir la descarga. Cuenta con un sistema de poleas avanzado que mide la profundidad, el ángulo de deriva y contador de molinete, y envía la información al mando a distancia (HyQuest, 2022).

El Hornet Plus se maneja desde la orilla de un arroyo o río. Usando un control remoto de mano, el operador puede maniobrar el dispositivo de detección de flujo con solo presionar un interruptor, para atravesar la sección del canal que se va a medir.

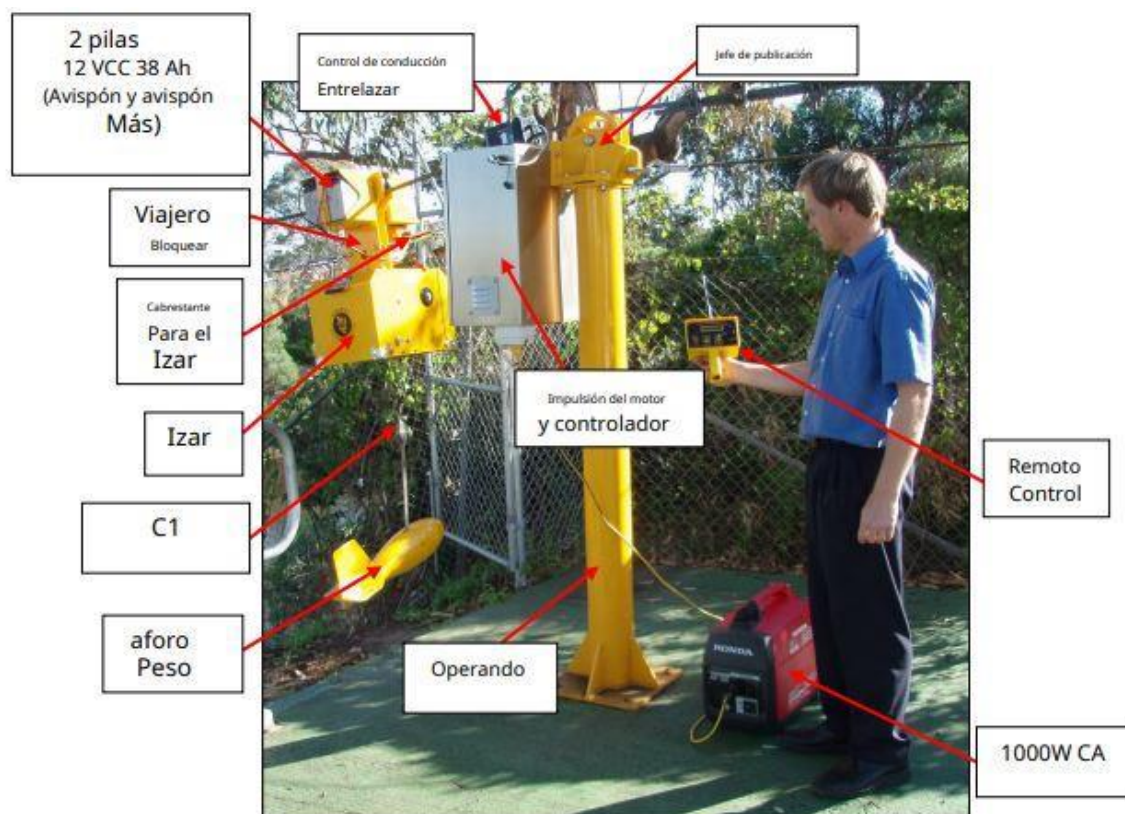


Figura 15. Horner Plus (El Horner Plus utiliza un polipasto avanzado que puede medir la profundidad, el ángulo del cable y los recuentos)(HyQuets, 2022)

6.4 Elementos típicos de estaciones hidrométricas en México

Actualmente en México la mayoría de estaciones hidrométricas existentes son manuales por lo que cuentan con la mínima infraestructura requerida para su funcionamiento. Los principales elementos con los que cuentan en infraestructura son casetas de control (Figura 16) y resguardo de dispositivos, canastilla de aforo, limnógrafo (Figura 17), vertedores y en la parte de instrumentación se cuenta con molinetes hidrométricos y en algunos casos con dispositivos de efecto Doppler (CONAGUA 2018).

El envío de datos se realiza de forma manual, al realizar el aforo el operador procede a hacer los cálculos necesarios para el cálculo del caudal y envía la información a oficinas de acuerdo a la procedencia de la estación.



Figura 16 Caseta y canastilla de estación hidrométrica "Álvaro Obregón" México



Figura 17 Limnógrafo de estación hidrométrica "Álvaro Obregón" Michoacán



Figura 18 Molinete hidrométrico de estación "Av. Michoacán" Morelia.

6.5 Hidrometría ultrasónica

El sonido es un disturbio mecánico del medio en el que se propaga y tiene un amplio rango de frecuencias. El rango audible para los humanos va desde aproximadamente 50 Hz hasta 15 Hz. A este rango se le llama “sónico”, a las frecuencias menores a 50 Hz se les llama “subsónicas” y aquellas que pasan los 15,000 Hz son “ultrasónicas”. Los sistemas de tiempo de tránsito operan en el rango ultrasónico, normalmente entre los 100 KHz y 1 MHz. Una de las principales ventajas del ultrasonido es que la señal viaja en trayectorias aproximadamente rectas, a diferencia del sonido de media o baja frecuencia, que se difunde en todas las direcciones. El desempeño de estos sistemas depende en gran medida de las características

de la propagación del sonido en el agua. La velocidad del sonido en el agua es independiente de la frecuencia, pero depende de la temperatura, salinidad y presión, aunque en canales de riego, el efecto de la presión no es importante. Básicamente, se tienen dos modalidades para estimar el gasto en corriente usando las técnicas de ultrasonido: tiempo de travesía (o tiempo de tránsito) y efecto Doppler. El efecto Doppler se utiliza en modalidades fijas y móviles. A continuación, se describe brevemente cada técnica y modalidad (González Edmundo & Cuellar Gustavo A., 2014).

Viendo lo anterior se tienen dos modalidades para estimar el gasto en corriente usando las técnicas de ultrasonido: tiempo de travesía (o tiempo de tránsito) y efecto Doppler. El efecto Doppler se utiliza en modalidades fijas y móviles. A continuación, se describe brevemente cada técnica y modalidad.

6.5.1 Técnica de tiempo de travesía

Un pulso ultrasónico viaja más rápido en la dirección de la corriente del agua que en sentido contrario. La velocidad de un pulso de sonido que viaja en una diagonal a través de la corriente en la dirección de ésta se incrementará en virtud de la componente de la velocidad de la corriente. Por el contrario, un pulso de sonido viajando aguas arriba se retrasará. La diferencia en el tiempo de tránsito en las dos direcciones puede usarse para la velocidad del sonido en el agua, y la componente de la velocidad del agua a lo largo de la trayectoria por la que viajan los pulsos ultrasónicos (González Edmundo & Cuellar Gustavo A., 2014)

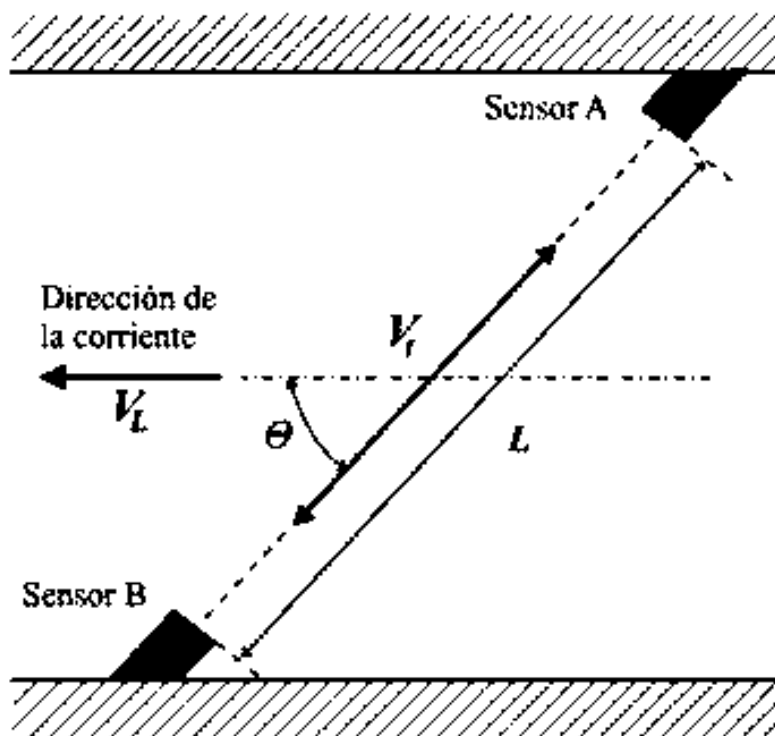


Figura 19. Funcionamiento de un aforador de tiempo de tránsito.

Teniendo en cuenta lo anterior y como se muestra en la Figura 19 para obtener una mayor claridad, en la Figura 20 se informa que H_n es la altura de cada uno de los pares de sensores; V_n es la velocidad calculada en cada una de las franjas horizontales y W_n es el ancho de cada una de estas mismas franjas. En el caso del aforador de tiempo de tránsito se tiene un “conjunto de medición” consistente en: a) sensores; b) cables de conexión entra el sensor y la unidad electrónica; c) unidad electrónica; d) sensor de nivel (para calcular el área; e) caseta de protección; f) gabinete; g) pozo de lectura; h) celda o panel fotovoltaico; i) batería y j) caseta de protección. El arreglo general se muestra en la Figura 21 (González Edmundo & Cuellar Gustavo A., 2014).

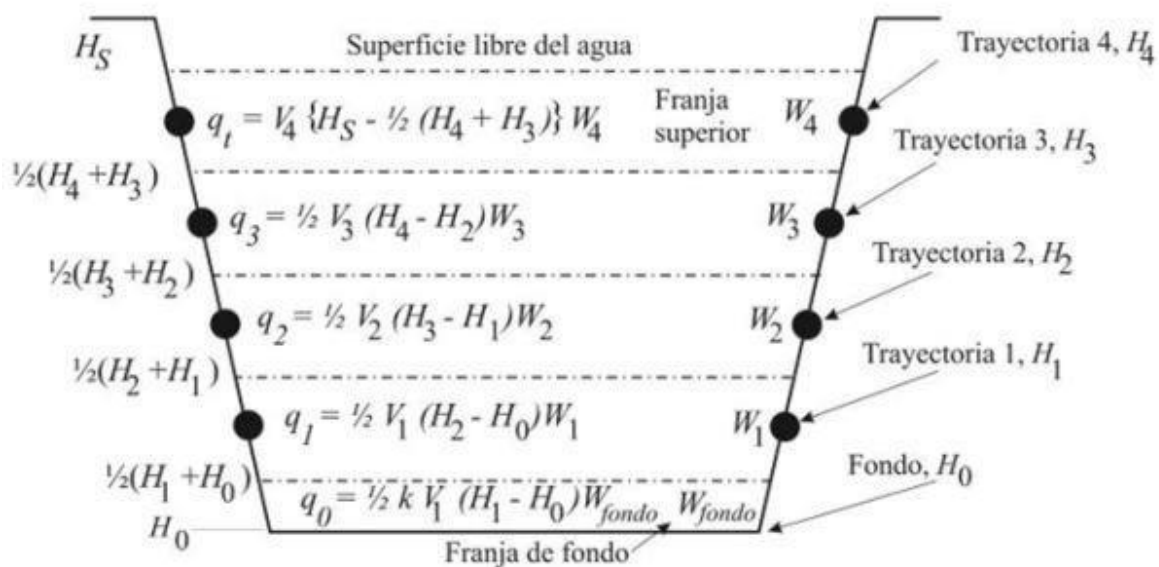


Figura 20. Método de la "sección intermedia" para estimación del gasto.

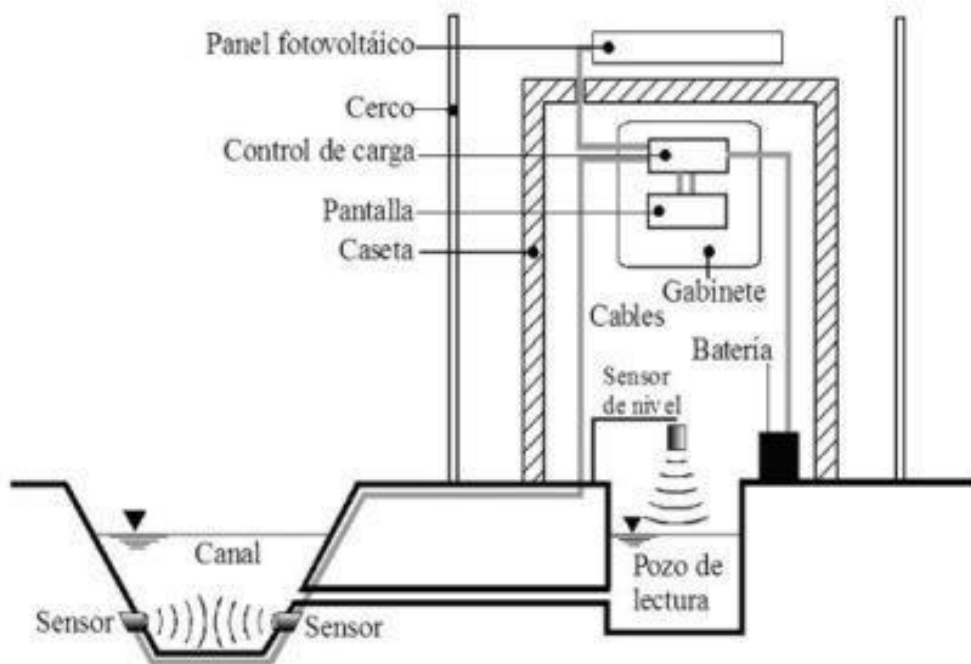


Figura 21. Conjunto de medición para el aforador de tiempo de tránsito

Se aclara que el arreglo anterior se ocupa para el caso de un aforador de tiempo de tránsito colocado en una corriente a superficie libre. El arreglo básico de una estación de aforo ultrasónico está configurado con una sola trayectoria acústica, y el par de transductores pueden montarse en un plano vertical. Si fuera posible montar los transductores sobre rieles verticales y desplazarlos sobre estos, sería posible determinar el perfil de velocidades de una manera análoga a como se haría con un molinete. En este caso, los transductores se colocarían en una elevación tal que el muestreo de velocidades se acerque lo más posible al valor de la velocidad media de la sección (González Edmundo & Cuellar Gustavo A., 2014)

6.6 Métodos de medición de caudales en secciones naturales de río, o canales compuestos

Para la obtención del caudal en flujos de superficie libre se utilizan distintos métodos e instrumentación tales como:

Método del canal dividido, método de un solo canal, métodos de área y velocidad, método de relación escala – gasto, método de compuertas, etc. (Herschy & Reginald W., 1995) e instrumentos como equipos acústicos basados en efecto Doppler, aforadores de tiempo de travesía, molinetes mecánicos y electrónicos, velocímetros electromagnéticos etc. de los cuales nos enfocaremos en los dos primeros.

6.6.1 Método del canal dividido (DCM)

El cálculo de flujo uniforme en una sección compuesta, o sección de río con rugosidad variable, se realiza dividiendo verticalmente la sección general, en subsecciones más pequeñas, y se resuelve aplicando por separado la ecuación de Manning para cada

subsección, obteniendo la velocidad media en dicha sección y el gasto correspondiente (Sotelo, 2002). La suma de estos gastos individuales proporciona el gasto total (Ec. 6.3.1).

$$Q_T = \sum A_i \cdot \bar{u}_{1i} = \left(\sum \frac{A_i \cdot R_{hi}^{2/3}}{n_i} \right) S_0^{1/2} \quad (6.3.1)$$

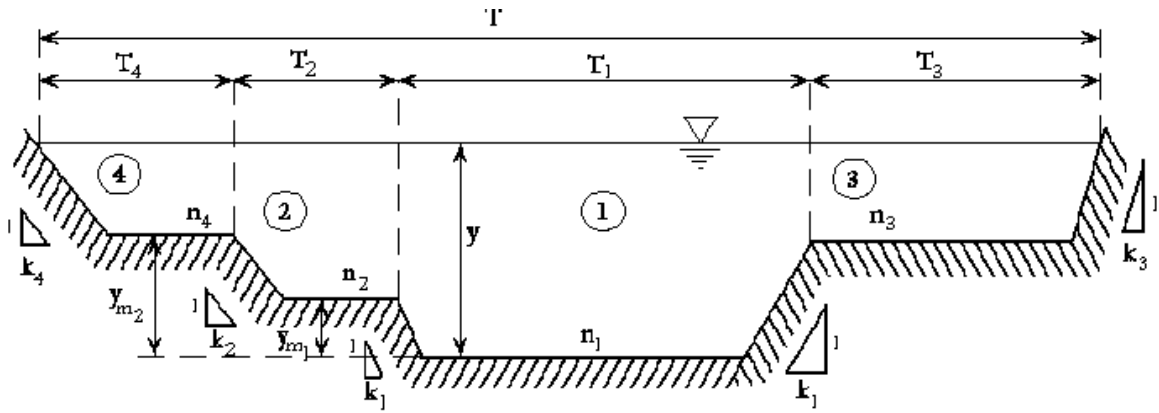


Figura 22. Sección de un canal compuesto con rugosidad “n” variable en cada subsección.

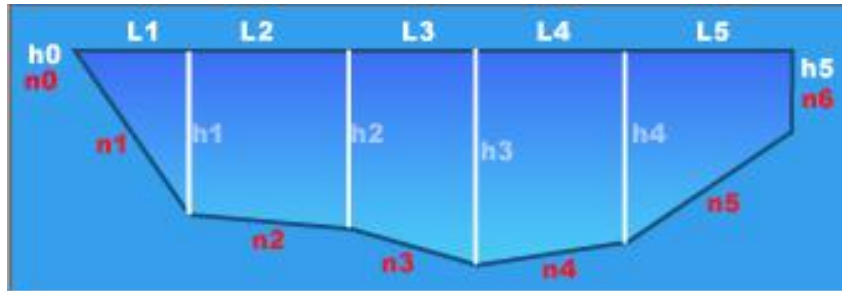


Figura 23. Sección transversal de río con rugosidad “n” variable en cada subsección.

El DCM es ampliamente utilizado por su versatilidad en secciones compuestas irregulares, aún hoy en día por softwares de diseño como HEC-RAS, sin embargo, Wormleaton & Hadjipanós (1982) advierten que el error en el cálculo de la descarga de las subsecciones puede ser alto dependiendo el caso.

6.6.2 Método del canal único (SCM)

La experiencia en campo y laboratorio obtenida por algunos autores (Posey, 1947), indica que es posible tratar a algunas secciones compuestas o secciones de río como si fueran sencillas, esto cuando la profundidad relativa aumenta de cierto punto ($h_r \geq 0.5$). En estos casos usando el valor total de A , de P , de R_h y empleando un coeficiente de rugosidad equivalente n_e . Bajo tal suposición la forma que adquiere la ecuación de Manning es la siguiente:

$$Q_T = \frac{A_T}{n_e} R_{h_T}^{2/3} S_0^{1/2} \quad (6.3.2)$$

Sin embargo, cuando $h_r < 0.5$, se acusa una fuerza de fricción en los canales laterales distinta de la del canal central, por lo que es necesario dividir la sección en varias subsecciones (Sotelo, 2002).

6.6.3 Coeficiente de rugosidad equivalente

En ocasiones, la sección de un canal tiene a lo largo del perímetro mojado rugosidades distintas, por lo que se tienen diferentes valores de n . Este caso está fuera de la hipótesis de aplicación del modelo de cortante de Chezy-Manning, pero para seguir aplicándolo tal como se menciona en el SCM, en forma práctica se asume que se puede tener un valor de rugosidad equivalente n_e aplicable a todo el perímetro mojado.

Definición de rugosidad equivalente. Sea que el perímetro mojado se puede descomponer en una serie de perímetros mojados tal que $P = \sum_{i=1}^n P_i$, entonces se tiene el vector $\mathbf{P} = (P_1, \dots, P_n)$, y para cada elemento se tienen los correspondientes vectores de coeficientes $\mathbf{n} =$

$(n_1, \dots, n_n)$ y áreas hidráulicas $\mathbf{A} = (A_1, \dots, A_n)$, tal como se muestra en la Figura 22, por lo tanto existe una rugosidad equivalente tal que $n_e = n_e(\mathbf{P}, \mathbf{n}, \mathbf{A})$.

Para calcular n_e existen diferentes modelos:

$$n_e = \left[\frac{\sum (p_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3} = \left[\frac{p_1 n_1^{1.5} + p_2 n_2^{1.5} + \dots + p_n n_n^{1.5}}{P} \right]^{2/3} \quad (6.3.3)$$

(Horton & Einstein, 1933)

$$n_e = \left[\frac{\sum (p_i n_i^2)}{P} \right]^{1/2} = \left[\frac{p_1 n_1^2 + p_2 n_2^2 + \dots + p_n n_n^2}{P} \right]^{1/2} \quad (6.3.4)$$

(Mühlhofer, 1933)

$$n_e = \frac{PR_h^{\frac{5}{3}}}{\sum \left[\frac{p_i R_{hi}^{\frac{5}{3}}}{n_i} \right]} = \frac{PR_h^{\frac{5}{3}}}{\frac{p_1 R_{h1}^{\frac{5}{3}}}{n_1} + \frac{p_2 R_{h2}^{\frac{5}{3}}}{n_2} + \dots + \frac{p_n R_{hn}^{\frac{5}{3}}}{n_n}} \quad (6.3.5)$$

(Lotter, 1933)

7. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del sistema es necesario seguir una metodología la cual abarque todas las necesidades. Se presenta a continuación la ruta metodológica que se seguirá en la presente investigación (Figura 24).

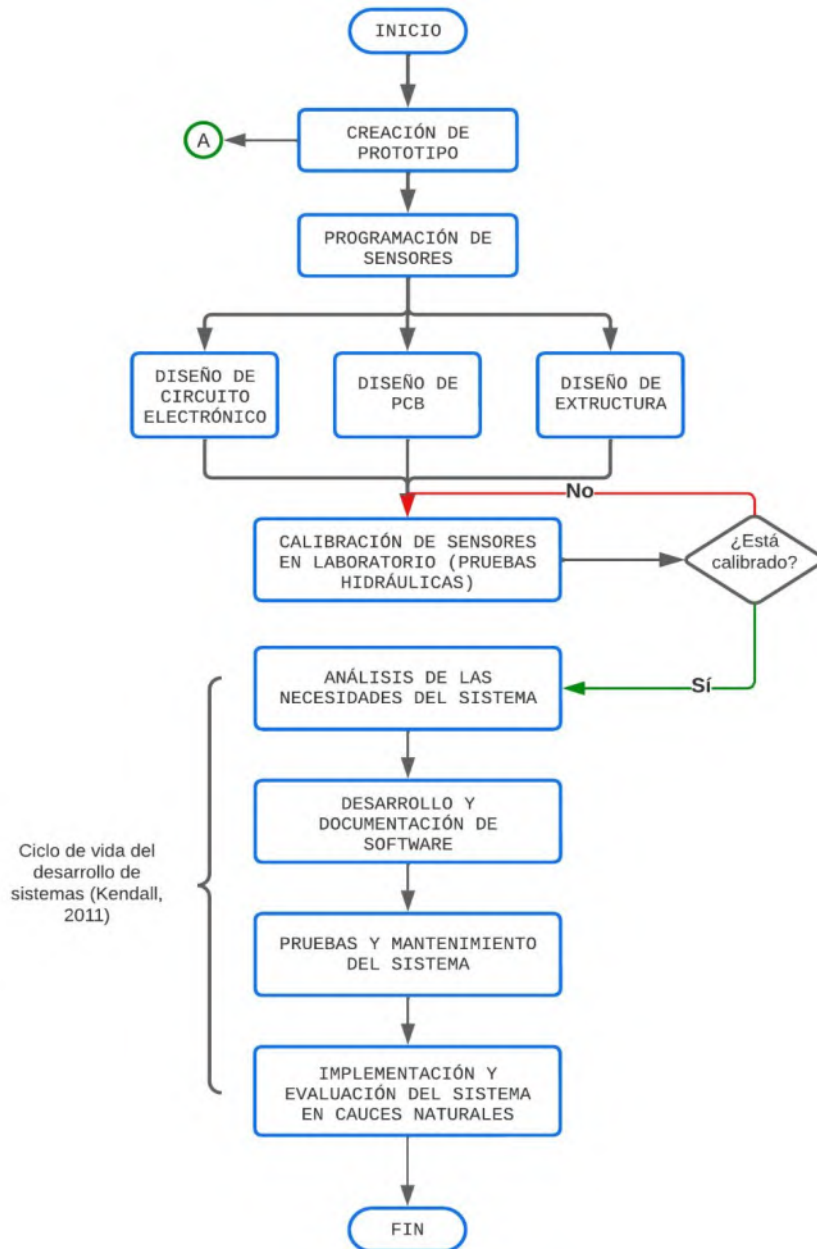


Figura 24 Ruta metodológica para el desarrollo del sistema

7.1 Creación de prototipos

En la creación de prototipos se recopilará la información que permite establecer prioridades y redirigir los planes sin sufrir algún tipo de repercusión por lo que se deben de hacer diferentes iteraciones para analizar los requerimientos y soluciones alternativas al problema para satisfacer todas las necesidades del sistema. La creación del prototipo comienza con la construcción de un modelo preliminar por lo que se sigue una metodología la cual cubre todas necesidades la cual se muestra en la Figura 25. Existen dos tipos de prototipos; El operativo y el no operativo, el primero realiza resultados reales, realiza cálculos además de acceder a archivos de datos reales y editar datos de entrada y el no operativo simplemente es una maqueta que incluye especificaciones y formato de salida y entrada (Stair et al., 2010).

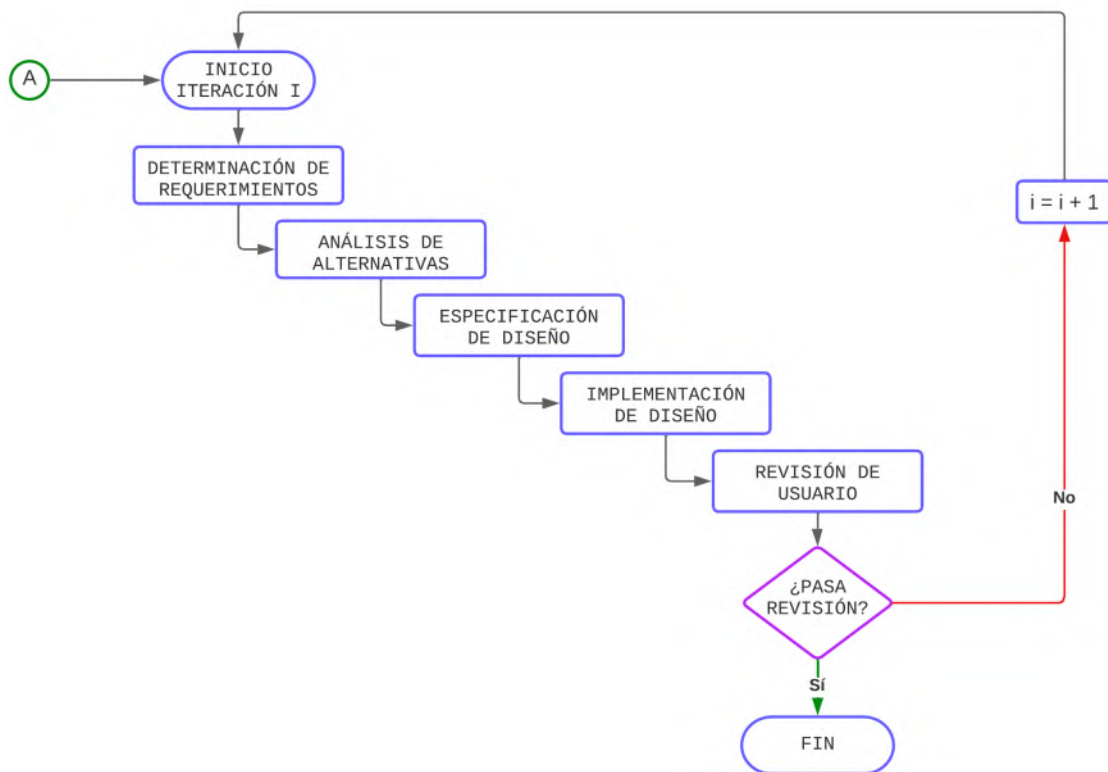


Figura 25 Diagrama de flujo de creación de prototipos (Stair & Reynolds, 2010).

7.2 Programación de sensores

En esta etapa se programarán sensores ultrasónicos con lenguaje C++ utilizando un IDE (Entorno de desarrollo integrado) que se adapte a las necesidades de programación en el cual se desarrollarán algoritmos que sea capaces de calcular las descargas en flujos de superficie libre.

7.3 Diseño de circuito electrónico, diseño de PCB y diseño de estructura

En esta etapa se diseñará primeramente un circuito electrónico el cual contendrá los sensores, módulos, microcontroladores etc. necesarios para la obtención y envío de información, a la par se diseñará una placa de circuito impreso (PCB) la cual conectará el circuito con los componentes y conductores quedando dentro de una estructura mecánica y al mismo tiempo se diseñará una estructura la cual sea capaz de contener los sensores en la zona de estudio.

7.4 Calibración de sensores en laboratorio (Pruebas hidráulicas)

Para la calibración de los sensores se utilizarán los canales primaticos de sección y pendiente variable del laboratorio de hidráulica “Ing. David Hernández Hueramo” de la UMSNH con los cuales se obtendrán los caudales con métodos tradicionales para posteriormente crear curvas de gasto – tirante con lo cual obtendremos los gastos con los sensores ultrasónicos interpolando en la curva realizando un algoritmo.

7.5 Ciclo de vida del desarrollo de sistemas (SDLC)

Todo diseño de sistema de información requiere un análisis y una metodología en fases, de acuerdo con lo cual los sistemas se desarrollan mejor al utilizar un ciclo específico de actividades del analista y los usuarios, por lo que se debe de seguir una metodología para que así el sistema de información diseñado se pueda desarrollar de una manera adecuada.

El ciclo se divide en siete fases, como se muestra en la Figura 26. Sin embargo, al contar con la metodología de creación de prototipos la cual incluye algunos de estas fases aplicaremos solamente 4 de estos ciclos.

Aunque cada fase se presenta de manera discreta, y nunca se puede llevar a cabo como un paso separado, sino que varias actividades pueden ocurrir al mismo tiempo, e incluso se pueden repetir (Kendall, 2011). las fases que utilizaremos se describirán en este apartado las cuales se deben de seguir para el diseño del sistema de la estación hidrométrica.

7.5.1 Análisis de las necesidades del sistema.

En esta fase se realiza un análisis detallado de los requerimientos de las necesidades del sistema para así realizar una propuesta en donde involucre todo lo investigado anteriormente y llegar a satisfacer las fases anteriores.

7.5.2 Desarrollo y documentación del software.

Esta fase se desarrolla el software al igual de manuales de procedimiento y prototipos para así documentar al usuario en el uso del software y que medidas e indicaciones realizar en caso de problemas en el mismo.

7.5.3 Prueba y mantenimiento del sistema.

Una vez desarrollado el sistema antes de llegar al usuario se deben de realizar pruebas para así detectar problemas o errores, por lo que en esta fase se encuentra la calibración del sistema. Esta fase se debe de hacer durante toda la vida del sistema por lo que se deben de realizar manuales para así de forma detallada conocer sobre el mantenimiento del mismo.

7.5.4 Implementación y evaluación del sistema.

En esta fase se implementa el sistema desarrollado en el cual se aplican métodos de validación e instalación del equipo en la zona de estudio, además de crear la base de datos para almacenar las variables para posteriormente ser visualizadas y capaces de descargar (Kendall, 2011).



Figura 26 Fases del ciclo del desarrollo de sistemas (Kendall, 2011)

8. RESULTADOS

8.1. Determinación de los requerimientos

8.1.1. Caracterización de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la ciudad de Morelia, y de manera puntual al dren del río chiquito (Figura 27), esto debido a que se realizaron consultas a distintos operadores de estaciones hidrométricas procedentes de la CONAGUA que recopilan datos de caudal manualmente, los cuales reconocen al dren del río chiquito como el dren de mayor influencia en la ciudad en cuanto a mediciones hidrométricas se refiere.

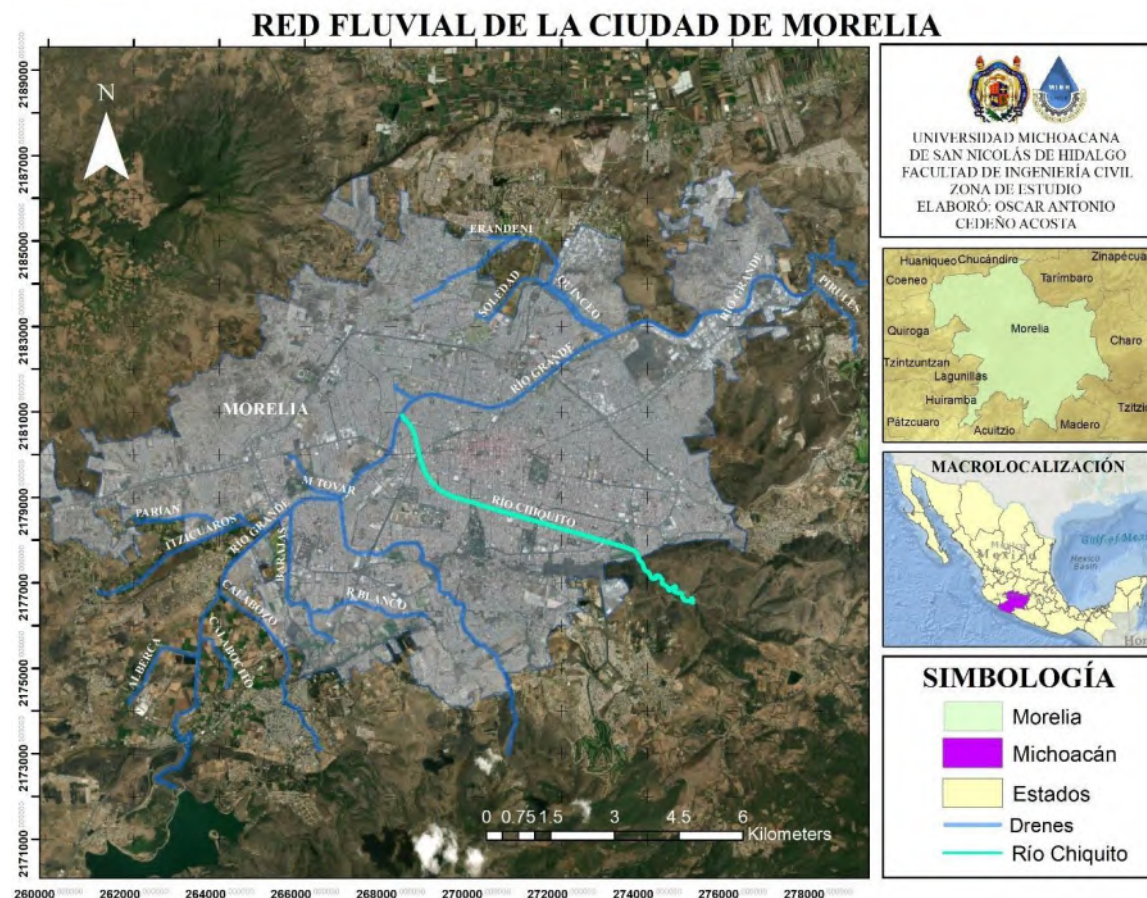


Figura 27 Localización geográfica de la zona de estudio

La selección precisa del sitio dentro del drenaje del río chiquito destinado para la instalación del Sistema Automatizado para la Medición y Monitoreo de Caudales (SAMMCA), se fundamenta en diversos criterios, los cuales serán expuestos en el subtema siguiente.

8.2. Criterios de selección de sitio para instalación del SAMMCA piloto

8.2.1. Criterio de sección regular (Bordes Suaves)

La consideración de la sección del río para la instalación del sistema de monitoreo impone el requisito de que dicha sección exhiba características de un perfil regular con bordes suavemente delineados (Figura 28). Este criterio se basa en la necesidad de garantizar un entorno hidráulico propicio para la eficaz operación del sistema, donde la presencia de bordes suaves facilita la estabilidad hidráulica y minimiza el riesgo de eventos erosivos, contribuyendo así a la integridad y confiabilidad del dispositivo de monitoreo.

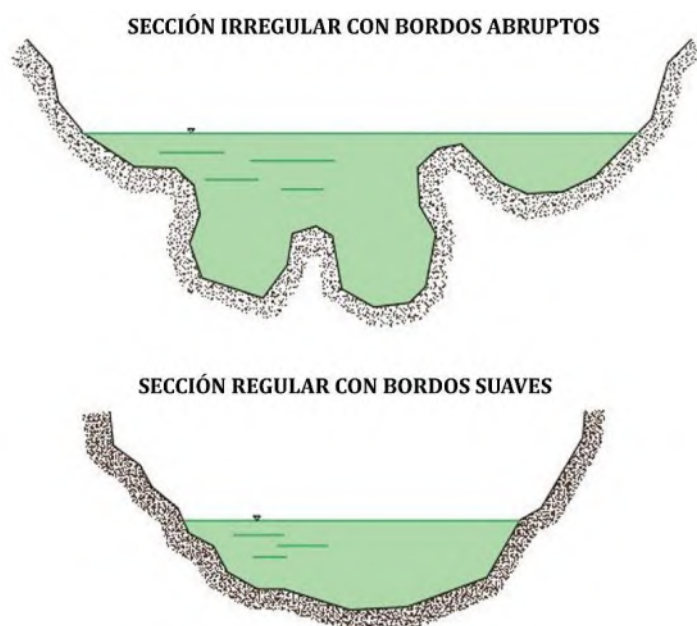


Figura 28 Caracterización de secciones de acuerdo a su morfología

8.2.2. Criterio de dimensión de sección

La determinación del ancho de la corriente en la sección del río destinada a la implementación del SAMMCA establece un parámetro máximo de 4 metros. Esta restricción se fundamenta en consideraciones técnicas, hidráulicas y operativas de índole meticulosa. Primordialmente, la elección de un ancho de corriente de 4 metros o inferior obedece a la necesidad de optimizar la precisión de las mediciones de caudales. Reducir la amplitud de la corriente contribuye a mitigar la variabilidad en las velocidades del flujo, favoreciendo así una respuesta hidráulica más homogénea. Además, la limitación en el ancho proporciona un entorno más controlado, minimizando la posibilidad de interferencias con las estructuras referentes al sistema.

Dicha restricción busca mejorar la relación señal-ruido en las mediciones, reduciendo potenciales distorsiones en los datos recolectados en la etapa piloto. Esta medida también responde a criterios de seguridad asegurando la integridad del equipamiento de monitoreo a largo plazo. Posteriormente, una vez se haya alcanzado estabilidad en el sistema, se procederá a la expansión del mismo hacia escalas superiores.

8.2.3. Criterio de zona de fácil acceso

Este criterio se justifica mediante consideraciones logísticas y operativas de considerable importancia. La accesibilidad eficiente a la ubicación del sistema en el río es esencial para garantizar un despliegue efectivo y mantenimiento regular. La selección de zonas de fácil acceso no solo facilita la instalación inicial del SAMMCA, sino que también posibilita intervenciones de inspección, reparación y actualización. Esta consideración es esencial para optimizar la operatividad del sistema a lo largo del tiempo.

Además, la elección de zonas de fácil acceso respalda la seguridad operativa al minimizar los desafíos logísticos asociados con la movilización de equipos. Esto, a su vez, contribuye a la reducción de tiempos de inactividad, asegurando una disponibilidad constante del sistema para la recopilación de las variables hidráulicas en estudio.

8.3 Selección de sitio para instalación del SAMMCA piloto

Una vez analizados los criterios anteriormente mencionados, se llevó a cabo un recorrido a lo largo del cauce con el propósito de evaluar las condiciones hidráulicas y topográficas, con especial atención a los criterios predefinidos. Este recorrido respaldado por un análisis detallado, fue crucial para garantizar la identificación de una sección que cumpliera con lo antes mencionado.

Ya realizado el recorrido se efectuó la selección de una específica sección del río para llevar a cabo la instalación del SAMMCA piloto. Este proceso de elección se ha regido por una evaluación meticulosa, considerando factores tales como una sección medianamente regular con presencia de bordes suavemente delineados, la restricción del ancho de la corriente a 4 metros o menos, conforme a los estándares hidráulicos y operativos predefinidos y, además, se ha priorizado la accesibilidad eficiente a la ubicación, a fin de asegurar un despliegue operativo efectivo y facilitar intervenciones de mantenimiento de manera pronta y segura. Esta decisión se fundamenta en los criterios anteriores ya que se pretende obtener eficiencia operativa además de cuidar la integridad del sistema y la capacidad de respuesta ante eventualidades.

En la Figura 29, se puede observar la elección de la sección del río que ha sido seleccionada conforme a los criterios mencionados, destacando la fácil accesibilidad y la presencia de un

perfil regular con bordes suavemente delineados además de tener un ancho de corriente de 3.84 metros (Figura 30).



Figura 29 Sección de río elegida para instalación del SAMMCA piloto



Figura 30. Realizando la medición de la corriente de la sección seleccionada

8.4. Análisis de Alternativas

Previo a la toma de decisiones cruciales y la creación del prototipo, se hace imperativo llevar a cabo un análisis de alternativas. Este proceso, fundamentado en la exploración y evaluación de diversas opciones, proporciona una base informada para seleccionar la mejor solución en cuanto al hardware del sistema se refiere. Al considerar múltiples perspectivas y posibilidades, se garantiza una toma de decisiones estratégica, en el caso del SAMMCA se utilizó tecnología ultrasónica, ya que esta cuenta con distintas ventajas para la medición precisa de niveles de agua en un entorno fluvial las cuales se mencionarán a continuación.

- **Precisión y Rapidez:** Los sensores ultrasónicos son conocidos por su capacidad para proporcionar mediciones precisas de distancias ya que utilizan ondas ultrasónicas para medir la distancia entre el sensor y la superficie del agua con gran exactitud. Además, la velocidad con la que estas mediciones se realizan es rápida, permitiendo obtener datos en tiempo real sobre la variación de niveles de agua en la sección del río.
- **No Intrusivo:** La tecnología ultrasónica es no intrusiva, lo que significa que no requiere contacto directo con el agua ni la instalación de sensores en el lecho del río. Esta característica minimiza la interferencia con el entorno y evita posibles perturbaciones en el hábitat acuático.
- **Adaptabilidad a Condiciones Ambientales:** Los sensores ultrasónicos son capaces de adaptarse a una variedad de condiciones ambientales. Su operación no se ve afectada por factores como la turbidez del agua o la presencia de sedimentos, lo que garantiza mediciones confiables incluso en entornos fluviales variables.

- **Amplitud de Alcance:** Los sensores ultrasónicos, tienen un amplio rango de alcance que facilita la medición en cuerpos de agua con diferentes niveles de profundidad.
- **Eficiencia Energética:** Estos sensores son conocidos por su eficiencia energética, lo cual es esencial para implementaciones a largo plazo. La capacidad de realizar mediciones precisas con un consumo de energía relativamente bajo contribuye a la sostenibilidad operativa del sistema.

La integración de la tecnología ultrasónica con un microcontrolador es esencial para optimizar la funcionalidad y la eficacia del sistema de monitoreo. Los sensores, en nuestro caso, tienen la función primordial de recopilar datos críticos, pero para maximizar su utilidad, es necesario contar con un componente que pueda procesar, interpretar y gestionar dicha información de manera eficiente. Por lo tanto, se realizó el análisis de alternativas seleccionando sensores ultrasónicos, un microcontrolador y una pantalla OLED para la creación del prototipo para la medición de caudales los cuales se describen a continuación.

8.4.1. Sensor ultrasónico HC-SR04

El sensor HC-SR04 (Figura 31), es un sensor de distancia de bajo costo que utiliza ultrasonido para determinar la distancia de un objeto en un rango de 2 a 450 cm. (Naylamp, 2022). Destaca por su pequeño tamaño, bajo consumo energético, buena precisión y bajo costo Este sensor se utilizará para las mediciones de tirantes realizando un algoritmo en el lenguaje de programación C++ el cual obtendrá la distancia de la superficie libre del agua hasta la posición en donde se encuentre el sensor enviando una onda ultrasónica la cual utilizaremos para obtener el tirante real que pasa sobre la sección realizando una sencilla operación que posteriormente se explicará más a fondo.



Figura 31. Sensor ultrasónico HC-SR04

Tabla 1. Especificaciones técnicas del sensor HC-SR04

Voltaje de operación	Corriente de trabajo	Precisión	Ángulo de apertura	Frecuencia de ultrasonido	Dimensiones	Costo
5V DC	15mA	+ - 3mm	15°	40 kHz	45*20*15 mm	\$30.00 MXN

8.4.2. Placa de desarrollo ESP32

La placa de desarrollo ESP32 (Figura 32), es una serie de SoC (por sus siglas en inglés, System on Chip) y módulos de bajo costo y bajo consumo de energía, el cual incluye dos núcleos, además de Wifi y Bluetooth de modo que, se puede intercambiar información a la nube y en simultáneo administrar datos de un sensor de forma precisa (José Guerra Carmenarte, 2021).

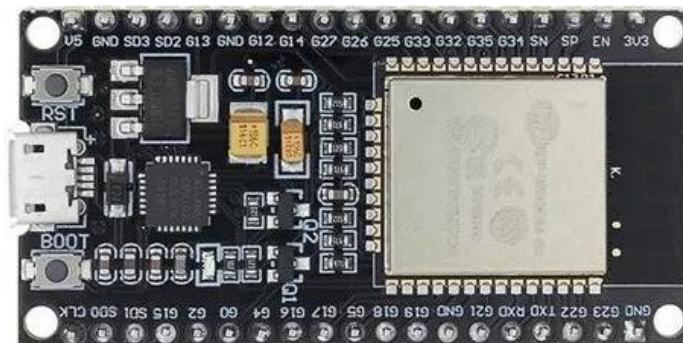


Figura 32. Placa de desarrollo ESP32

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la placa de desarrollo ESP32

Frecuencia de operación	SRAM	FLASH	Temperatura de trabajo	GPIO	PWM	Costo
160 MHz	448 KB	520 KB	-40°C a 125°C	34	16 canales	\$150.00 MXN

8.4.3. Pantalla OLED 0.96" SSD1306

Las pantallas OLED se destacan por su gran contraste, mínimo consumo de energía y buena calidad de imagen. El display Oled 0.96" I2C SSD1306 posee una resolución de 128 x 64 píxeles, permitiendo controlar cada píxel individualmente y mostrar tanto texto como gráficos. Además, por ser de tipo OLED no necesita de retroiluminación (Backlight) como los LCD, lo que hace que su consumo de energía sea mucho menor y aumenta su contraste (UNIT, 2020). El display posee interfaz de comunicación de tipo I2C. Diseñado para trabajar a 5V directamente gracias a su regulador de voltaje en placa y puede trabajar con sistemas de 3.3V o 5V sin necesidad de conversores (Naylamp, 2022a). Posee 4 (Figura 33) . Esta pantalla nos ayudará a visualizar físicamente los datos y respuestas de los módulos del circuito ya que también es necesario observar de manera física el correcto funcionamiento del sistema una vez instalado en la sección propuesta del río.

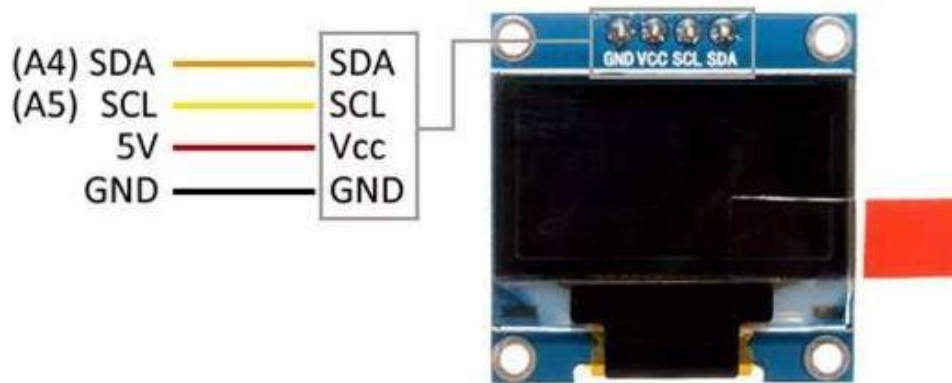


Figura 33. Pantalla OLED 0.96" SSD1306

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la pantalla OLED 0.96" SSD1306

Voltaje de operación	Resolución	Interfaz	Dimensiones	Temperatura de trabajo	Pines	Costo
3.3V – 5V DC	128x64 pixeles	I2C	27x27x3 mm	-30°C -70°C	4	\$80.00 MXN

8.5. Especificación de diseño

8.5.1. Especificación de diseño escala laboratorio

Dentro de la fase de especificación del diseño se contempla la implementación de un prototipo a escala de laboratorio como fase inicial del proceso. Este enfoque metodológico se orienta hacia la validación y optimización de los componentes clave del sistema en un entorno controlado antes de su despliegue en el terreno.

La creación de este prototipo a escala laboratorio permitirá realizar pruebas meticulosas y detalladas de los sensores ultrasónicos, del microcontrolador y de otros elementos cruciales del SAMMCA. Este enfoque proporciona la oportunidad de ajustar parámetros y verificar el rendimiento del sistema bajo diversas condiciones simuladas, lo que contribuirá a perfeccionar la funcionalidad y robustez del sistema antes de su implementación a mayor escala.

8.5.2. Desarrollo de circuito electrónico

En esta fase se procedió al desarrollo de un circuito electrónico para el desarrollo del prototipo escala laboratorio que incorpora los sensores esenciales. Este proceso se ha llevado a cabo con una atención particular a la precisión y funcionalidad del diseño, con el objetivo de garantizar mediciones confiables de los niveles de agua.

El diseño del circuito se ha centrado en la integración del sensor ultrasónico HC-SR04 y el microcontrolador ESP32, asegurando una comunicación fluida y eficiente entre ambos componentes. Además de agregar también la pantalla OLED como parte de la visualización físicas de las variables hidráulicas. Este proceso de desarrollo del circuito electrónico no solo abarca la conexión física de los componentes, sino también implica la programación cuidadosa del microcontrolador para interpretar, procesar y gestionar los datos provenientes del sensor ultrasónico.

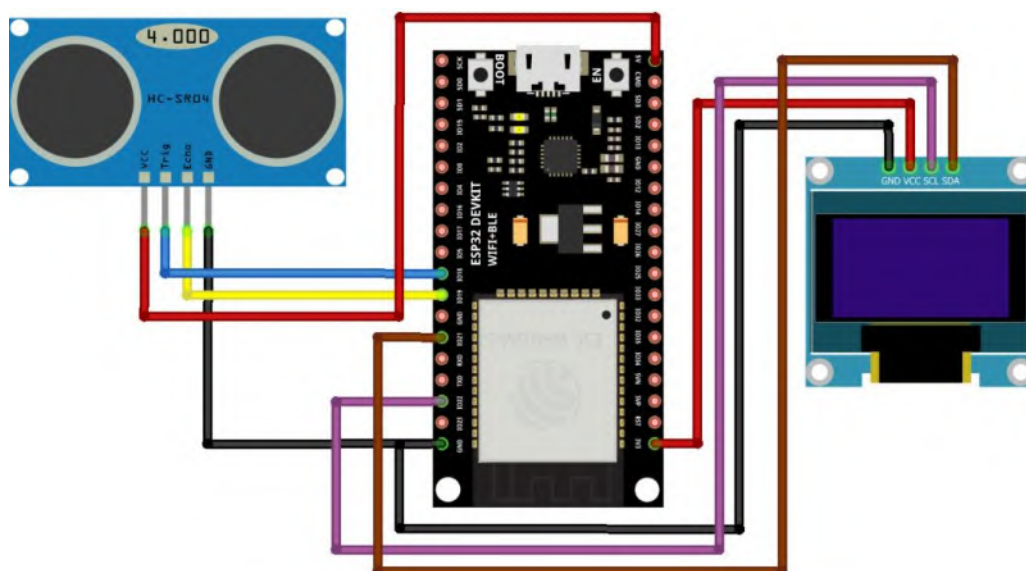


Figura 34. Circuito electrónico de prototipo

8.5.3. Ubicación de prototipo escala laboratorio

La ubicación estratégica del prototipo se determinó en el Laboratorio de Hidráulica "Ing. David Hernández Hueramo" de la UMSNH (Figura 35), esto debido a la necesidad de contar un entorno controlado y especializado que facilite el ajuste del prototipo antes de su despliegue en condiciones de campo. Dicho lo anterior se determinó utilizar el "canal de flujo

lento” para llevar a cabo las pruebas, en virtud de sus características particulares ya que este canal presenta secciones rectangulares y trapeciales, proporcionando un entorno hidráulico representativo de diversas configuraciones fluviales. La versatilidad del canal permite simular condiciones variables de caudal y profundidad del agua, proporcionando un escenario propicio para evaluar la capacidad de respuesta y la precisión del prototipo en diferentes situaciones.

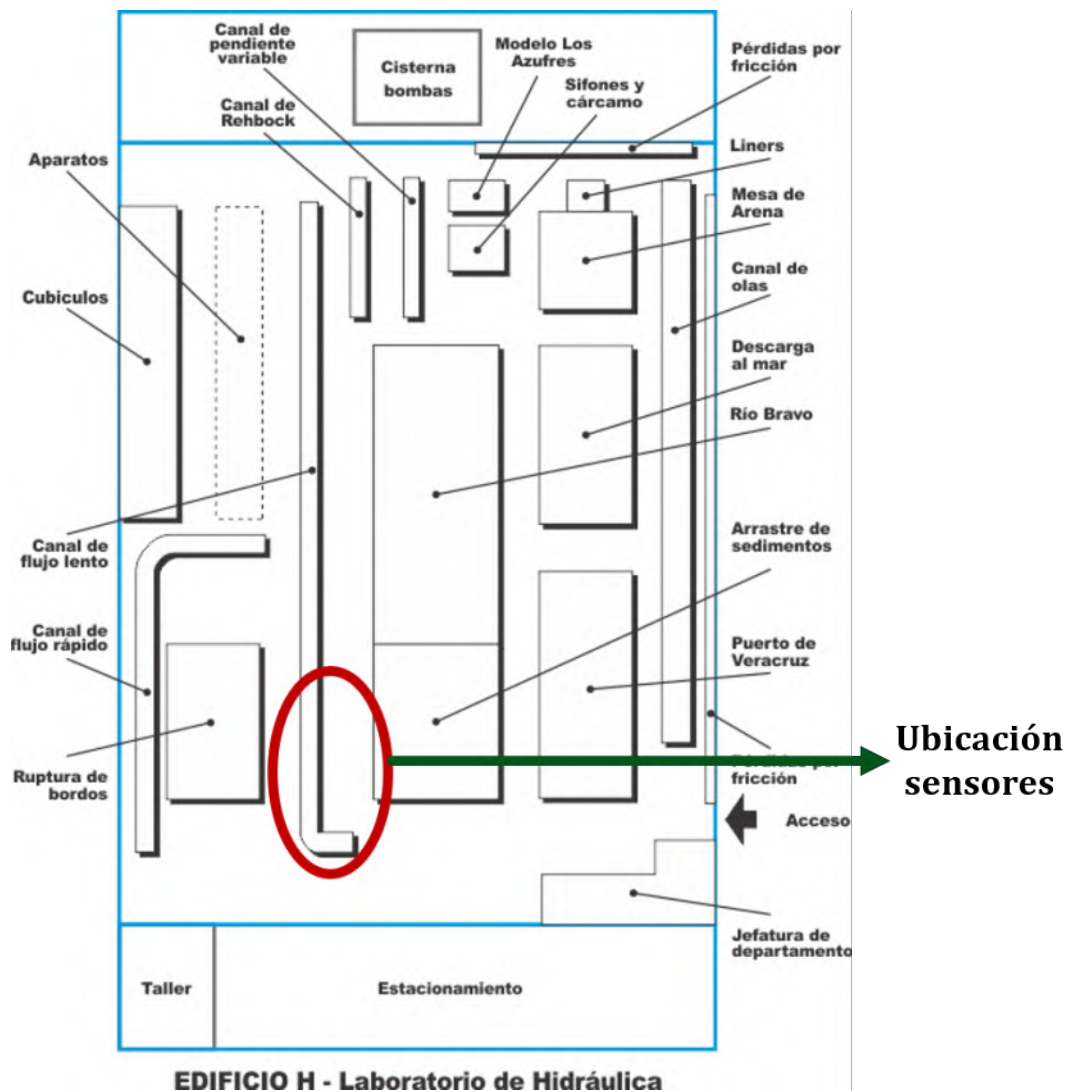


Figura 35. Ubicación de prototipo

8.5.4. Desarrollo de algoritmo

Una vez clara la ubicación del prototipo se llevó a cabo la programación de los sensores, en particular el sensor ultrasónico HC-SR04, mediante el empleo del lenguaje de programación C++. La elección de C++ como lenguaje de programación se basa en su capacidad para manejar la manipulación de datos y operaciones a nivel de hardware, esenciales en el contexto de la captación y procesamiento de las mediciones de caudales fluviales. Por lo que se procedió a diseñar un algoritmo (Figura 36), para la obtención de la distancia, programando el sensor para el envío de pulsos ultrasónicos hacia la superficie libre del agua.

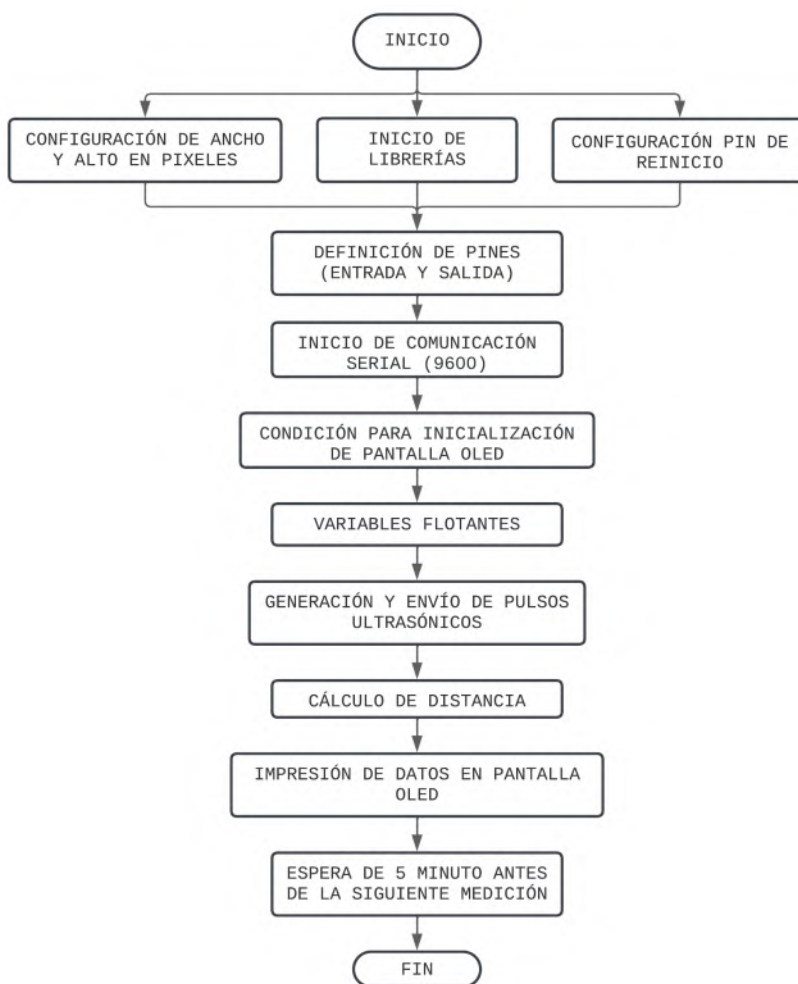


Figura 36. Diagrama de flujo de algoritmo de prototipo

8.5.5. Diseño de estructura escala laboratorio

Una vez desarrollado el algoritmo seguidamente se llevó a cabo la construcción de una estructura a nivel de laboratorio destinada a albergar y posicionar los sensores ultrasónicos (Figura 37). Esta estructura fue diseñada y adaptada para su implementación en secciones rectangulares y trapeciales, con el propósito de facilitar pruebas sistemáticas y representativas en el Laboratorio de Hidráulica.

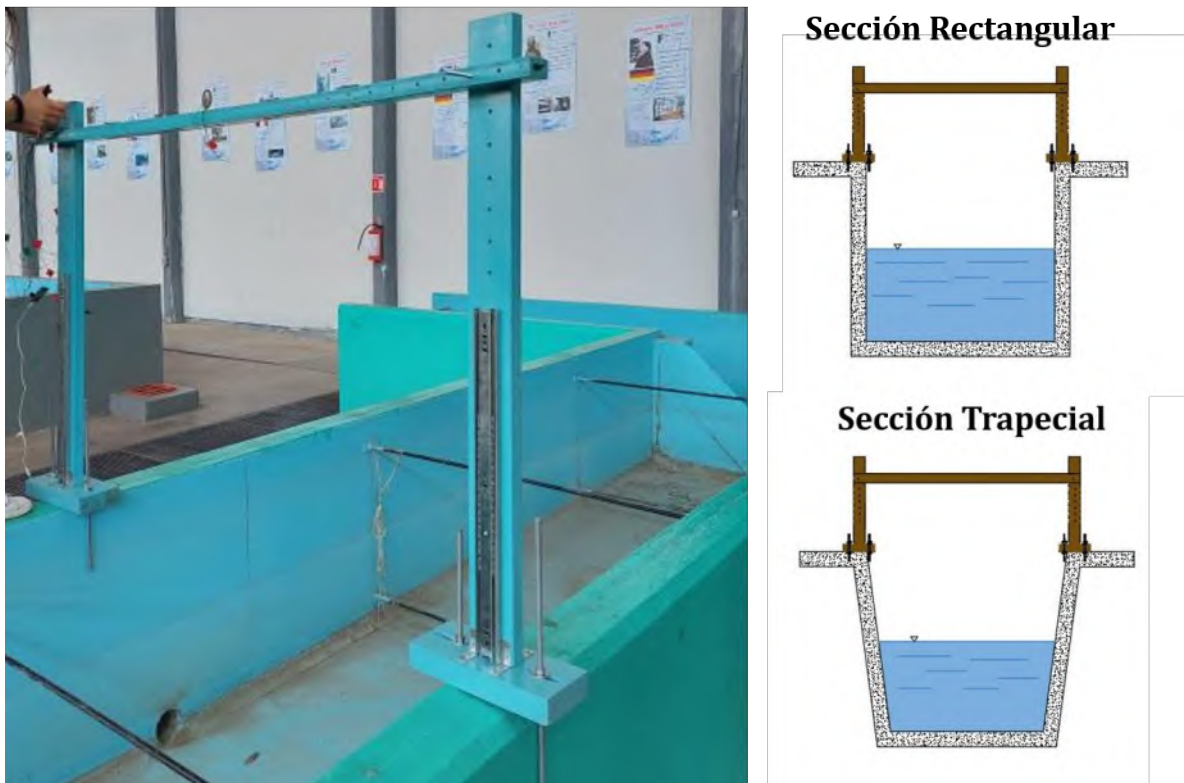


Figura 37. Estructura para sensores escala laboratorio

Continuando con el desarrollo del prototipo a escala laboratorio, se procedió a hacer el cálculo del tirante real que pasa sobre las secciones agregando al algoritmo una diferencia de distancias realizando la siguiente operación:

$$\text{Tirante} = h - h_1$$

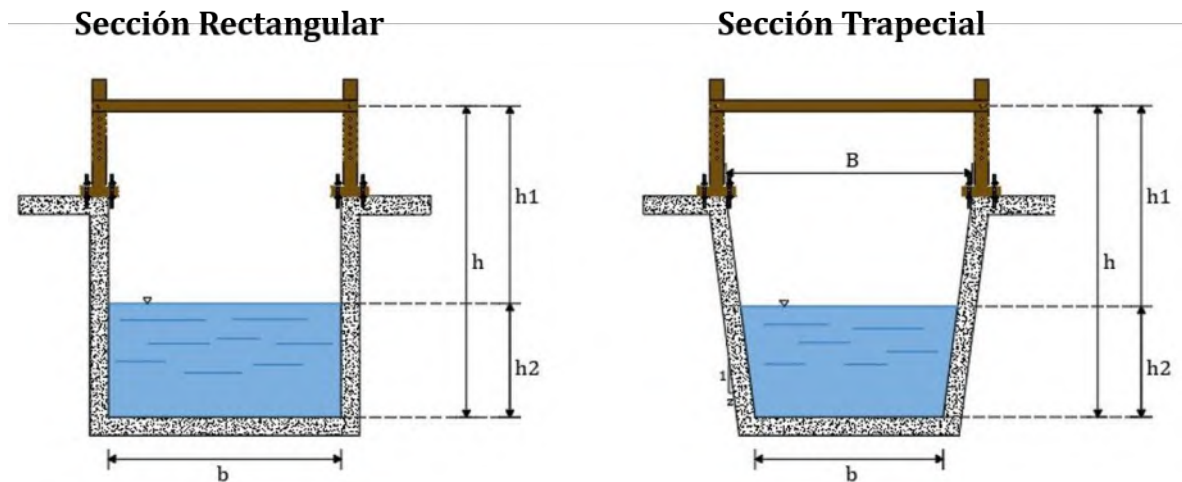


Figura 38. Secciones elegidas con estructura para sensores

Y así obtenemos el tirante real que esta pasando sobre la sección con los sensores, por lo que se procedió a subir el algoritmo a la placa de desarrollo (Figura 36).

8.6. Implementación de diseño

8.6.1. Pruebas experimentales para obtención del caudal

Esta etapa se centró en la obtención de datos necesarios para el prototipo en cuanto a la calibración de los sensores para obtener el caudal que pasa sobre la sección. Con el objetivo de lograr resultados confiables, hemos planificado llevar a cabo un proceso de obtención de gastos mediante métodos tradicionales, específicamente mediante el uso del método del flotador y el método del molinete. La razón fundamental detrás de esta elección metodológica radica en la necesidad de variar los gastos de manera controlada y sistemática utilizando las sección rectangular y la sección trapecial del laboratorio de hidráulica obteniendo los tirantes con los sensores ultrasónicos para posteriormente realizar curvas de calibración “tirante-gasto” y “tirante-área” con las cuales obtendremos una ecuación la cual se ingresará al

algoritmo para que el sensor calcule el caudal en base al tirante que esté obteniendo (Figura 39).



Figura 39. Obtención de caudales mediante métodos tradicionales

Realizado los métodos de obtención de caudales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4. Datos de caudal obtenidos en pruebas experimentales

Tirante (m)	Caudal por método de flotador (m³/s)	Caudal por método del molinete (m³/s)
0.1130	0.0127	0.0120
0.1568	0.0235	0.0248
0.1942	0.0376	0.0398
0.2378	0.0558	0.0590
0.2550	0.0659	0.0710

Es imperativo destacar que la calidad y fiabilidad de nuestras curvas de calibración dependerán en gran medida de la precisión de los datos iniciales obtenidos mediante estos

métodos tradicionales. Este enfoque, respaldado por su robustez y confiabilidad histórica, nos proporcionará una base para el desarrollo y la mejora continua del prototipo.

La necesidad de realizar estas pruebas con dos métodos responde a la necesidad de obtener los datos con diferentes métodos y ver las variaciones que existe entre un método y otro, por lo que se pudo observar en la Tabla 4 existe una variación muy pequeña del método del flotador con respecto al método del molinete. Tabla 4. Datos de caudal obtenidos en pruebas experimentales

8.6.2. Curvas de calibración

La etapa de la elaboración de las curvas de calibración tirante-gasto es fundamental para garantizar la confiabilidad de las mediciones de los sensores en condiciones hidráulicas variables. Para llevar a cabo la elaboración de las curvas de calibración, nos centraremos en la relación entre el tirante de agua y el gasto correspondiente en diferentes puntos a lo largo del rango de operación de los sensores ultrasónicos. Este proceso nos permitirá comprender mejor cómo las variaciones en el nivel del agua se correlacionan con los flujos de agua medidos por los sensores.

La metodología que se implementó fue con la recopilación de los datos experimentales de obtención de caudal en condiciones controladas. Es importante destacar que la elaboración de estas curvas no solo contribuirá a optimizar la precisión de nuestros sensores ultrasónicos, sino que también proporcionará una herramienta para la interpretación de datos en entornos reales. La comprensión detallada de la relación entre el tirante y el gasto nos permitirá realizar extrapolaciones confiables y mejorar la capacidad predictiva de nuestros sensores en diversas condiciones hidráulicas.

Dicho lo anterior y con los datos obtenidos se procedió a realizar las curvas tirante-gasto para las secciones rectangular y trapecial (Figura 40 y Figura 41) que se encuentran en el canal de flujo lento y así obtener la ecuación de la curva para posteriormente ingresarla al algoritmo y así obtener el caudal que pasa por la sección mediante el tirante que obtenga el sensor ultrasónico.

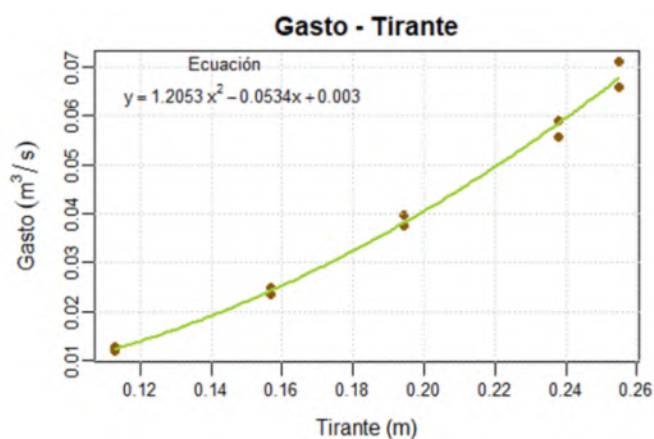


Figura 40. Curva de calibración "Tirante-Gasto" de la sección rectangular

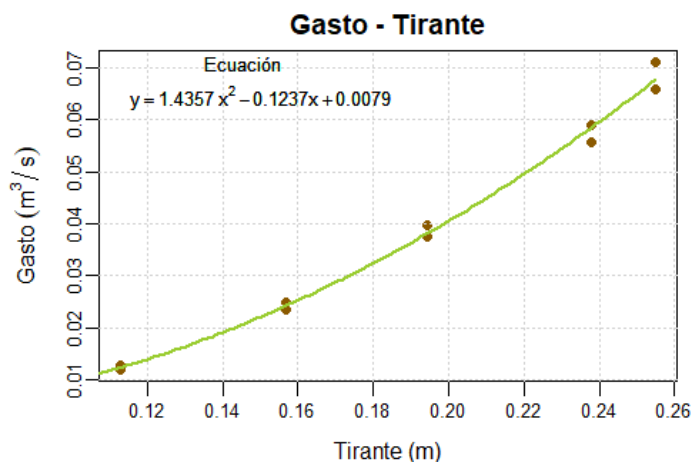


Figura 41. Curva de calibración "Tirante-Gasto" de la sección trapecial

8.6.2.1. Integración de curvas de calibración a algoritmo

Obtenidas las ecuaciones de las curvas de calibración de la sección rectangular y trapecial, resultado de las pruebas experimentales, se ha integrado en el algoritmo realizado

anteriormente. Este algoritmo ingresando las ecuaciones tiene como objetivo principal calcular el caudal, aprovechando la relación establecida entre el tirante de agua y el gasto registrado durante la fase de calibración.

El proceso de integración implica la implementación de la ecuación de las curvas de calibración en el algoritmo de C++ de los sensores ultrasónicos, permitiendo que estos dispositivos realicen cálculos en tiempo real. De esta manera, cada medición del tirante de agua se traduce automáticamente en una estimación del caudal, facilitando la monitorización continua y en tiempo real de los flujos. La estructura del algoritmo es la siguiente:

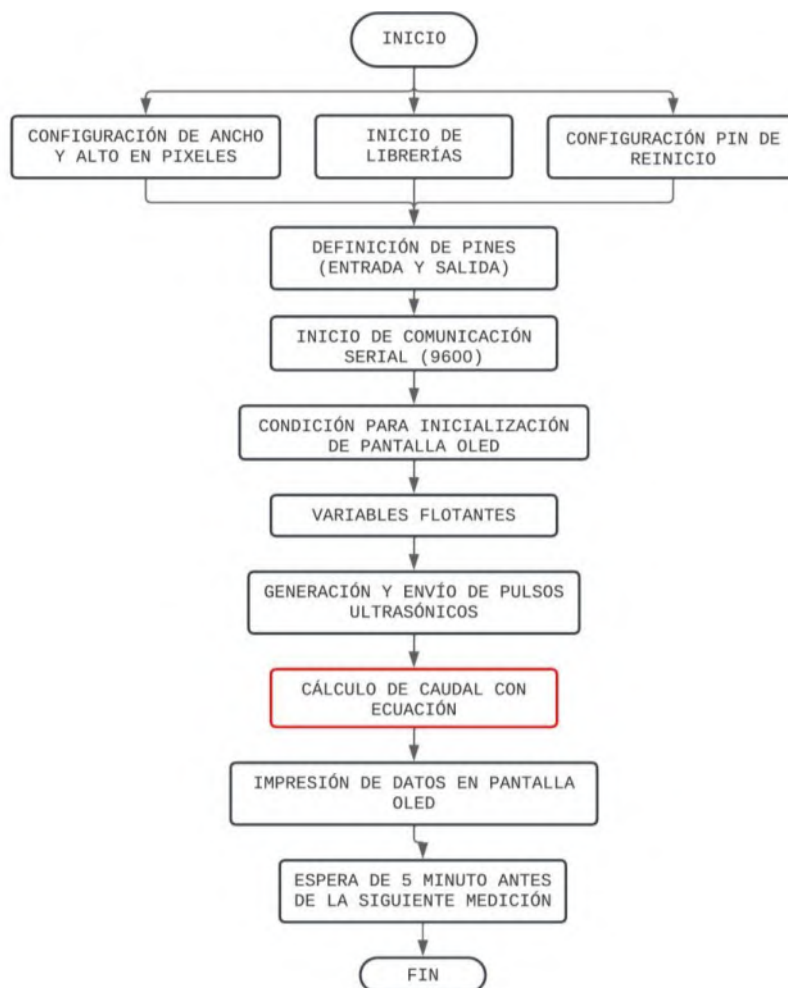


Figura 42. Diagrama de flujo de algoritmo con ecuación de curvas de calibración

8.7. Protocolo de comunicación WiFi

El protocolo de comunicación WiFi (Fidelidad Inalámbrica), se ha consolidado como una de las tecnologías más empleadas para la transmisión de datos en aplicaciones de monitoreo y control debido a su flexibilidad, alcance y capacidad de integrarse en infraestructuras de redes existentes. En el contexto de nuestro trabajo el cual es un sistema automatizado para la medición y monitoreo de caudales en flujos a superficie libre, el uso del WiFi presenta tanto ventajas significativas como desventajas críticas que deben ser cuidadosamente consideradas las cuales describiremos a continuación.

Ventajas del Protocolo de Comunicación WiFi

- **Conectividad Inalámbrica:** La capacidad de transmitir datos de manera inalámbrica elimina la necesidad de cables físicos, lo que facilita la instalación en ubicaciones de difícil acceso y reduce los costos y esfuerzos de mantenimiento. Esta característica es particularmente útil en entornos de monitoreo ambiental, donde la flexibilidad en la colocación de sensores es crucial.
- **Acceso a Redes Existentes:** El WiFi permite la integración directa con redes de internet ya establecidas, permitiendo el acceso remoto a los datos desde cualquier lugar con conectividad. Esto es fundamental para sistemas de monitoreo que requieren supervisión y análisis continuos, ya que los datos pueden ser revisados y gestionados en tiempo real.
- **Alta Velocidad de Transmisión:** El WiFi ofrece altas velocidades de transmisión de datos, lo que es beneficioso para aplicaciones que requieren el envío rápido y eficiente

de grandes volúmenes de datos. Esta capacidad es esencial cuando se trabaja con sistemas que generan datos con alta frecuencia o cuando se necesita una respuesta inmediata a eventos específicos.

- **Compatibilidad y Estándares:** La tecnología WiFi sigue estándares internacionales (IEEE 802.11), lo que garantiza la compatibilidad con una amplia gama de dispositivos y plataformas. Esta interoperabilidad facilita la expansión y actualización del sistema sin necesidad de cambios significativos en la infraestructura existente.

Desventajas del Protocolo de Comunicación WiFi

- **Dependencia de la Conectividad a Internet:** Una de las mayores limitaciones del WiFi es su dependencia de la conectividad a internet. En áreas rurales o remotas, la cobertura de red puede ser inconsistente o inexistente, lo que compromete la capacidad del sistema para transmitir datos de manera continua y fiable. Esta vulnerabilidad puede resultar en la pérdida de datos críticos y en la necesidad de soluciones complementarias para garantizar la integridad del monitoreo.
- **Consumo Energético:** El WiFi, aunque conveniente, es conocido por su consumo energético relativamente alto en comparación con otras tecnologías de comunicación inalámbrica como LoRa. En aplicaciones de monitoreo ambiental donde los dispositivos pueden funcionar con baterías o fuentes de energía limitadas, el alto consumo energético puede reducir significativamente la vida útil del sistema y aumentar los costos operativos debido a la necesidad de recargas o reemplazos frecuentes.

- **Interferencias Electromagnéticas:** Las redes WiFi pueden ser susceptibles a interferencias de otros dispositivos electrónicos y redes cercanas, lo que puede degradar la calidad de la señal y afectar la fiabilidad de la transmisión de datos. En entornos urbanos densos o industriales, donde la congestión del espectro es común, estas interferencias pueden resultar en la pérdida de paquetes de datos y en la necesidad de retransmisiones, aumentando la latencia y reduciendo la eficiencia del sistema.
- **Seguridad y Vulnerabilidades:** Aunque el WiFi ofrece diversas opciones de seguridad (como WPA2), sigue siendo vulnerable a ataques cibernéticos si no se implementan y gestionan adecuadamente. La protección de datos sensibles y la prevención de accesos no autorizados requieren medidas de seguridad adicionales, como la encriptación robusta y la gestión constante de contraseñas y accesos, lo que puede añadir complejidad y costos al sistema.
- **Escalabilidad Limitada:** La escalabilidad del WiFi es otra preocupación importante. A medida que se incrementa el número de dispositivos conectados a una red, el rendimiento puede disminuir debido a la congestión y al limitado ancho de banda disponible. Esto puede ser un desafío significativo en proyectos de monitoreo a gran escala, donde múltiples sensores deben transmitir datos simultáneamente sin afectar la calidad del servicio.

8.7.1. Implementación de algoritmo en prototipo y comunicación WiFi

8.7.1.1. Diseño del algoritmo

Dada la revisión de las ventajas y desventajas del protocolo de comunicación WiFi, se diseñó un algoritmo para el microcontrolador ESP32 y el sensor ultrasónico HC-SR04. El objetivo del algoritmo es medir los tirantes del canal y enviar estos datos, junto con los cálculos de caudal, a una base de datos en la nube. Este proceso se realiza a través del protocolo WiFi, destacando la importancia de una conexión estable y eficiente para la transmisión de datos.

El algoritmo se divide en 3 bloques funcionales: configuración del hardware, conexión a la red WiFi, y envío a base de datos, en este caso utilizaremos una base de datos en la nube llamada ThingSpeak la cual es gratuita hasta un cierto número de datos. A continuación, se presenta el código correspondiente a cada bloque, seguido de un diagrama de flujo que ilustra el proceso completo.

Bloque 1: Configuración del Hardware

En el bloque de configuración del hardware (Figura 43), se establecen las configuraciones iniciales necesarias para que el ESP32 pueda interactuar correctamente con el sensor ultrasónico HC-SR04. Se definen los pines utilizados para el control y la lectura de señales del sensor, y se configura el puerto serie para la salida de datos de depuración. Este bloque es esencial para asegurar que el hardware esté correctamente inicializado antes de comenzar con las mediciones y la transmisión de datos. Una configuración adecuada garantiza que los datos obtenidos sean precisos y que la comunicación entre los componentes del sistema sea fiable. Además, la inicialización del puerto serie permite monitorear el estado del sistema y

diagnosticar posibles problemas durante el desarrollo y la operación siendo esto muy importante tratándose de monitoreo constante.

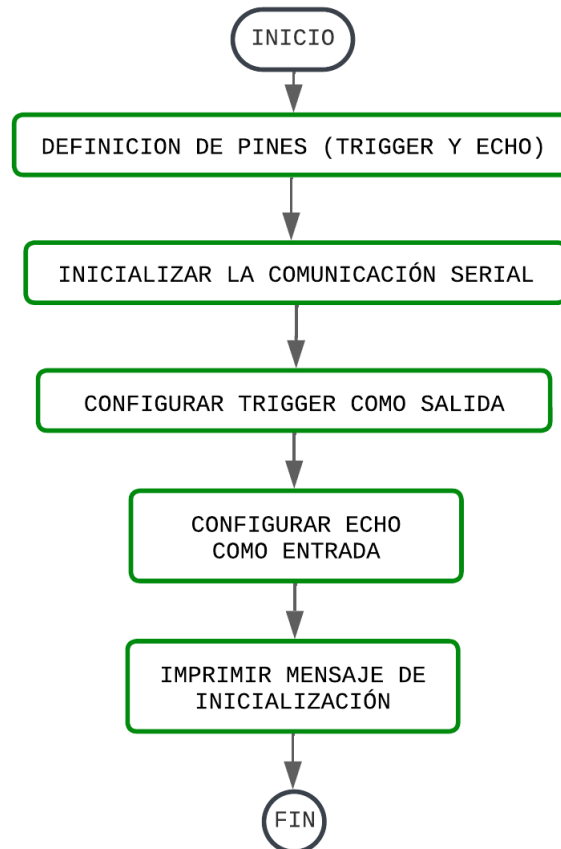


Figura 43. Diagrama de flujo del bloque 1

Descripción de Cada Paso del Diagrama

- **Inicio:** El proceso comienza con la inicialización del sistema.
- **Definir Pines:** Se definen los pines TRIGGER y ECHO que se utilizarán para el control del sensor ultrasónico. En este caso, TRIGGER se asigna al pin 5 y ECHO al pin 18 del ESP32.

- **Inicializar Comunicación Serial:** Se inicia la comunicación serial con una velocidad de 115200 baudios para permitir la salida de datos de depuración y otros mensajes informativos.
- **Configurar TRIGGER como Salida:** El pin definido como TRIGGER se configura como una salida digital. Este pin se usará para enviar pulsos ultrasónicos.
- **Configurar ECHO_PIN como Entrada:** El pin definido como ECHO_PIN se configura como una entrada digital. Este pin recibirá los pulsos reflejados por los obstáculos y será utilizado para medir el tiempo de vuelo del pulso.
- **Imprimir Mensaje de Inicialización:** Se imprime un mensaje de inicialización en el monitor serial para indicar que el sistema está configurado y listo para comenzar.
- **Fin:** El proceso de configuración del hardware se completa y el sistema está listo para realizar mediciones.

Bloque 2: Conexión a la Red WiFi

El bloque de conexión a la red WiFi es fundamental para establecer la comunicación entre el ESP32 y el servidor ThingSpeak, donde se almacenarán los datos recopilados por el sensor ultrasónico. Este bloque utiliza las librerías “WiFi.h” y “HTTPClient.h” para gestionar tanto la conexión a la red como el envío de datos. Una conexión estable a la red WiFi es esencial para asegurar que los datos sean transmitidos de manera fiable y oportuna. El código implementado busca la red especificada y se conecta a ella, imprimiendo mensajes de estado en el monitor serie para facilitar el diagnóstico de problemas de conectividad. Este bloque es

fundamental en el envío de datos ya que da las instrucciones para una conexión WiFi eficiente de acuerdo a las necesidades del sistema.

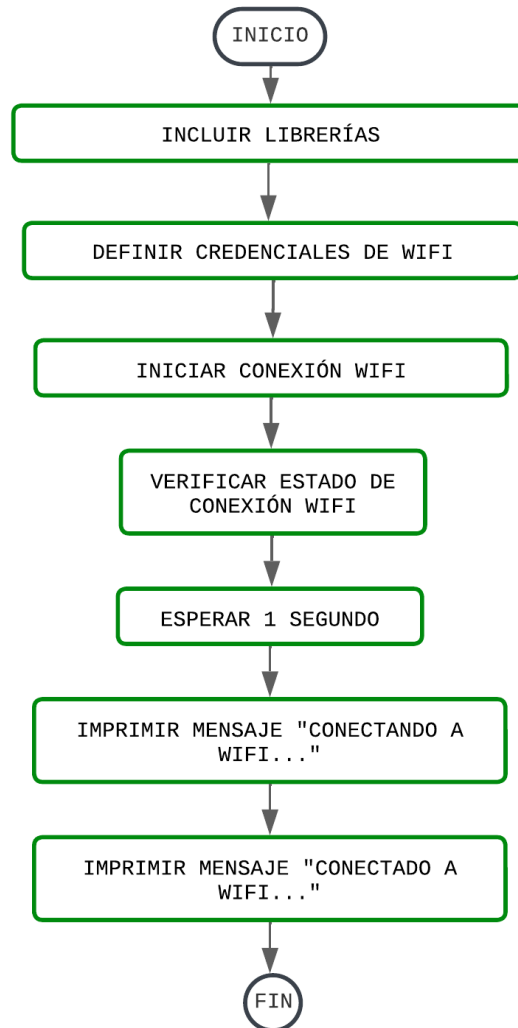


Figura 44 Diagrama de flujo del bloque 2

Descripción de Cada Paso del Diagrama

- **Incluir Librerías WiFi.h y HTTPClient.h:** Se incluyen las librerías necesarias para gestionar la conexión WiFi y la comunicación HTTP.

- **Definir Credenciales de WiFi:** Se definen las credenciales (SSID y contraseña) necesarias para conectar el ESP32 a la red WiFi.
- **Iniciar Conexión WiFi:** Se inicia el proceso de conexión utilizando las credenciales definidas.
- **Verificar Estado de Conexión WiFi:** Se entra en un bucle que verifica constantemente el estado de la conexión.
- **Esperar 1 Segundo:** Si el ESP32 aún no está conectado, espera 1 segundo antes de volver a verificar.
- **Imprimir Mensaje "Conectando a WiFi...":** Durante el proceso de conexión, se imprime un mensaje en el monitor serie indicando que se está intentando conectar a la red.
- **Imprimir Mensaje "Conectado a WiFi":** Una vez establecida la conexión, se imprime un mensaje confirmando que el ESP32 está conectado a la red WiFi.

Bloque 3: Envío de Datos a ThingSpeak

En el bloque 3 se establece la comunicación con el servidor ThingSpeak utilizando las librerías WiFi.h y HTTPClient.h. Este bloque es crucial para enviar los datos medidos por el sensor ultrasónico a la plataforma ThingSpeak, donde se pueden visualizar y analizar en tiempo real.

Desde un punto de vista **ingenieril**, el diseño de este bloque implica una serie de pasos meticulosos para asegurar la integridad y la fiabilidad de la comunicación. Se comienza

incluyendo las librerías necesarias (WiFi.h y HTTPClient.h), que proporcionan las funciones fundamentales para gestionar la conexión a redes WiFi y realizar solicitudes HTTP. La elección de estas librerías se basa en su robustez y amplia compatibilidad con el ESP32, facilitando una integración eficiente con la red y el servidor de datos

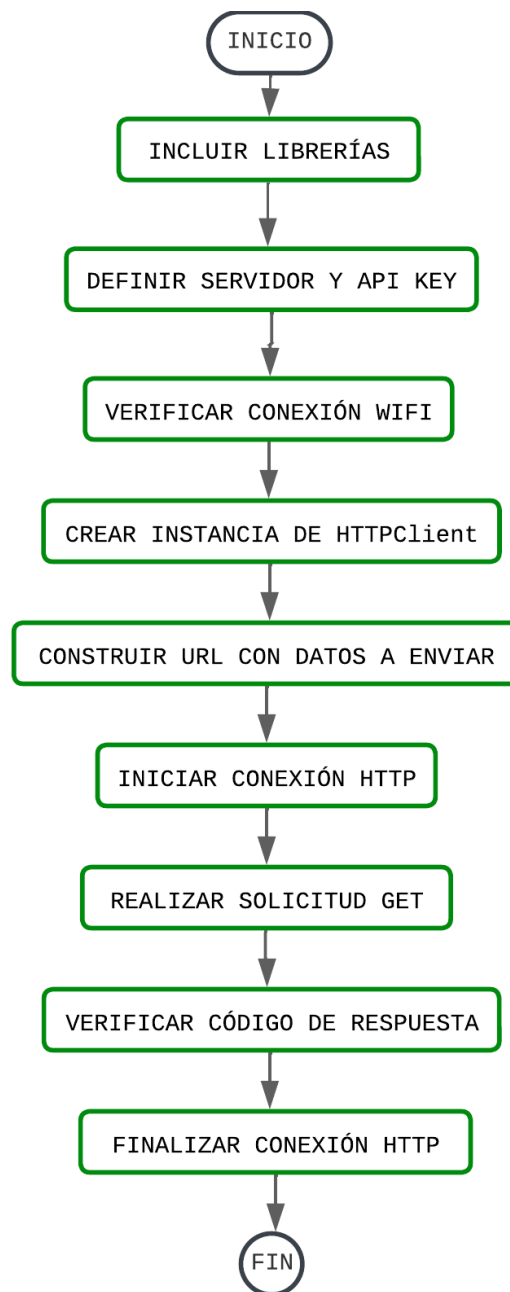


Figura 45 Diagrama de flujo del bloque 3

Descripción de Cada Paso del Diagrama

- **Incluir Librerías WiFi.h y HTTPClient.h:** Se incluyen las librerías necesarias para manejar la conexión WiFi y las solicitudes HTTP. Estas librerías proporcionan las funcionalidades requeridas para establecer la conexión con ThingSpeak y enviar datos.
- **Definir Servidor y API Key:** Se definen las constantes server y apiKey que almacenan la URL del servidor de ThingSpeak y la clave de API necesaria para autenticar las solicitudes. La URL de ThingSpeak se utiliza para enviar los datos, y la clave de API asegura que solo los dispositivos autorizados puedan enviar datos a la cuenta de ThingSpeak.
- **Verificar Conexión WiFi:** Antes de intentar enviar los datos, se verifica si el ESP32 está conectado a una red WiFi. Si la conexión WiFi no está establecida, no se puede enviar la solicitud HTTP, y se debe imprimir un mensaje de error.
- **Crear Instancia de HTTPClient:** Se crea una instancia de la clase HTTPClient, que es necesaria para realizar la solicitud HTTP GET. Esta instancia gestionará la comunicación entre el ESP32 y el servidor de ThingSpeak.
- **Construir URL con Datos a Enviar:** Se construye la URL completa para la solicitud HTTP GET. Esta URL incluye la clave de API y el valor del campo que se enviará a ThingSpeak. La URL se forma concatenando el servidor, la clave de API y el valor del campo en un solo string.

- **Iniciar Conexión HTTP:** Se inicia la conexión HTTP utilizando el método `begin()` de `HTTPClient`, pasando la URL construida. Este método configura la solicitud que se realizará al servidor de ThingSpeak.
- **Realizar Solicitud HTTP GET:** Se realiza la solicitud HTTP GET mediante el método `GET()` de `HTTPClient`. Este método envía la solicitud al servidor y devuelve el código de respuesta HTTP, que indica el estado de la solicitud.
- **Verificar Código de Respuesta:** Se verifica el código de respuesta HTTP obtenido. Si el código es mayor que 0, significa que la solicitud se realizó correctamente, y se imprime el código de respuesta en el monitor serial. Si el código es 0 o negativo, se imprime un mensaje de error con la descripción del problema.
- **Finalizar Conexión HTTP:** Se finaliza la conexión HTTP utilizando el método `end()` de `HTTPClient`. Esto libera los recursos asociados con la solicitud y cierra la conexión con el servidor de ThingSpeak.
- **Imprimir Mensaje "WiFi no está conectado":** Si el ESP32 no está conectado a la red WiFi, se imprime un mensaje en el monitor serial indicando que no se puede enviar la solicitud debido a la falta de conexión WiFi.

8.8. Implementación de base de datos (ThingSpeak)

Esta etapa se enfoca en la integración de la plataforma ThingSpeak como una herramienta para la gestión y almacenamiento de datos. ThingSpeak, reconocida por su versatilidad y capacidad para gestionar datos en tiempo real, se ha convertido en la plataforma elegida para

alojar la información recopilada por los sensores ultrasónicos por lo que se diseñó un algoritmo específico que opera en tiempo real y que se encarga de recolectar y almacenar las variables obtenidas por los sensores de manera sistemática en la base de datos de ThingSpeak, esto gracias al chip Wifi que integra la placa de desarrollo con el cual es capaz de enviar de forma inalámbrica los datos obtenidos de caudal de los sensores. Este algoritmo ha sido desarrollado con el objetivo de optimizar la eficiencia del proceso de almacenamiento, asegurando la disponibilidad de los datos para su análisis subsiguiente.

La implementación de ThingSpeak y el algoritmo asociado no solo simplifican la gestión de los volúmenes de datos, sino que también brindan la capacidad de acceder a estos datos de manera remota y en tiempo real. Por lo que se procedió a crear una cuenta (Figura 46) y crear un canal público el cual albergará los datos obtenidos en tiempo real, para esto el diseño del conlleva una visualización física y virtual la cual sea amigable para su uso.



Figura 46. Creación de canal en cuenta de ThingSpeak

La estructura del algoritmo para la base de datos sigue la estructura del apartado anterior en donde se realiza una conexión a WiFi y este se muestra en la figura siguiente:

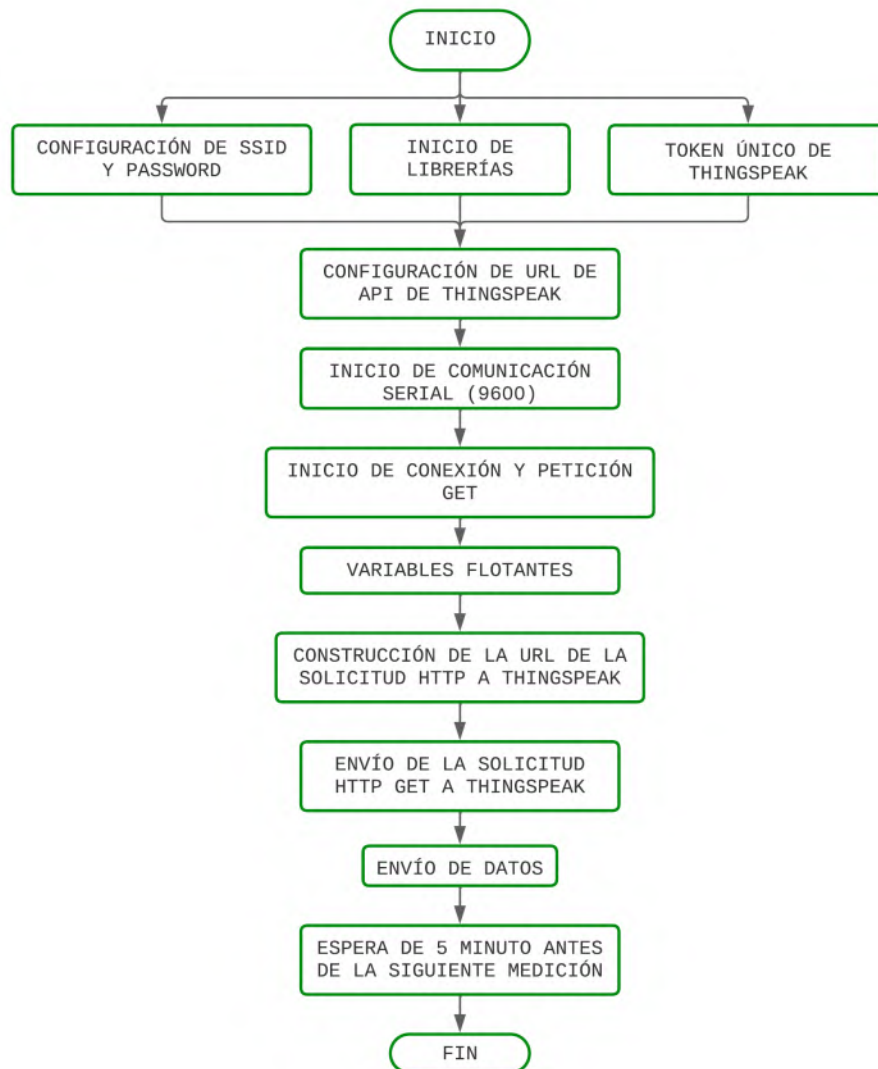


Figura 47. Diagrama de flujo de algoritmo para conexión de ThingSpeak

Realizado el algoritmo se procedió a subirlo a la placa de desarrollo ESP32, por lo que una vez obtenidos los caudales mediante los métodos experimentales con cada caudal se realizó una lectura con los sensores para visualizar la relación del dato obtenido con los sensores respecto al dato obtenido con los métodos tradicionales y a su vez la visualización virtual de cada lectura del sensor en la base de datos de ThingSpeak.

Por lo que se puede observar en la Figura 48 que los datos se subieron correctamente a la base de datos y que la relación de los datos obtenidos con los sensores ultrasónicos con respecto a los datos medidos con métodos tradicionales tiene una relación confiable.

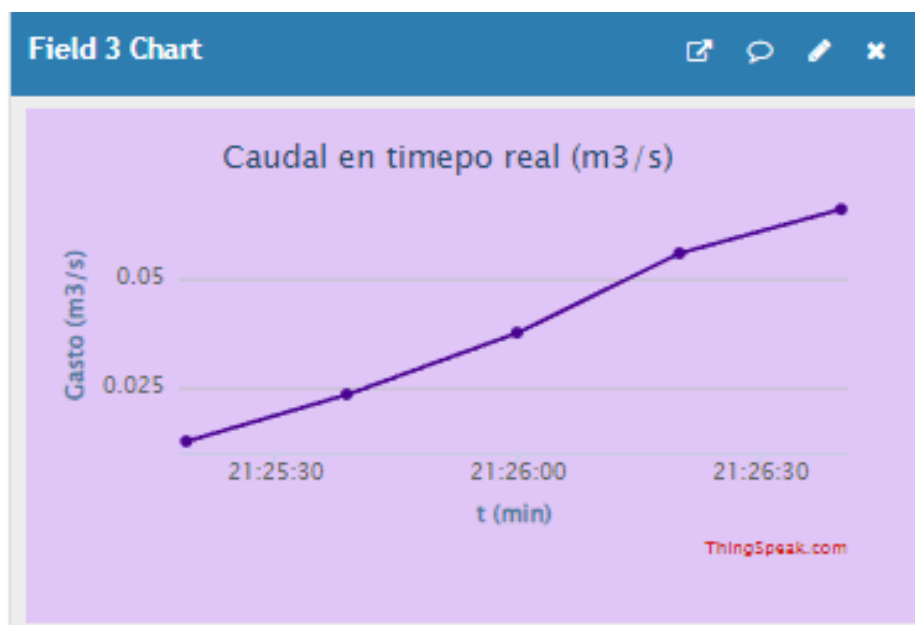


Figura 48. Datos de caudal enviados por los sensores ultrasónicos a la base de datos ThingSpeak

8.9. Desarrollo y diseño de la base de datos del SAMMCA

El diseño y la implementación de una base de datos robusta y eficiente es crucial en la arquitectura de sistemas complejos como el Sistema Automatizado para la Medición y Monitoreo de Caudales (SAMMCA). En el contexto de SAMMCA, la base de datos no solo almacena datos, sino que actúa como el núcleo del sistema, facilitando la gestión, análisis y visualización de grandes volúmenes de datos recolectados por los sensores distribuidos. Este apartado detalla el desarrollo y la importancia de la base de datos MySQL utilizada en

SAMMCA, la cual ha sido estructurada para optimizar la operación del sistema y garantizar la integridad de los datos.

Elección de MySQL como Sistema de Gestión de Bases de Datos (SGBD)

La elección de MySQL como el SGBD (Sistema de Gestión de Base de Datos) para SAMMCA se fundamenta en una serie de características técnicas y ventajas operativas que lo hacen particularmente adecuado para el proyecto. MySQL es un sistema de gestión de bases de datos relacional (RDBMS) de código abierto que se destaca por su rendimiento, fiabilidad y escalabilidad. Los principales motivos para su elección incluyen:

- **Rendimiento y Escalabilidad:** MySQL es conocido por su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos con alta eficiencia. Su arquitectura optimizada para consultas rápidas y transacciones simultáneas es crucial para gestionar los datos generados por múltiples sensores en tiempo real.
- **Flexibilidad en el Diseño de Esquemas:** MySQL permite la creación de esquemas de base de datos altamente estructurados y normalizados, lo cual es esencial para la integridad de los datos y la eficiencia en las consultas.
- **Seguridad y Mecanismos de Respaldo:** MySQL ofrece avanzadas funciones de seguridad, incluyendo control de acceso basado en roles y cifrado de datos. Además, proporciona opciones de respaldo y recuperación que aseguran la disponibilidad continua de los datos.

- **Amplio Soporte y Comunidad Activa:** La amplia base de usuarios y el soporte de la comunidad facilitan la resolución de problemas y la implementación de mejoras continuas en el sistema.

Diseño de la Base de Datos

La base de datos llevara el nombre "saih" que significa Sistema Automático de Información Hidrológica la cual ha sido diseñada para capturar y almacenar de manera eficiente los datos medidos por los sensores del SAMMCA. En el siguiente apartado se detallará la creación y diseño de dicha base.

8.9.1 Creación de la base de datos “saih”

La creación de una base de datos es el primer paso fundamental en el diseño e implementación de un sistema de gestión de datos, por lo que se ha establecido una base de datos denominada "saih". Esta base de datos actúa como el repositorio central para la recolección, almacenamiento y gestión de datos procedentes de los sensores utilizados en el proyecto.

Comando SQL para la creación de la base de datos

La base de datos "saih" se creó utilizando el siguiente comando SQL:

CREATE DATABASE saih;

Explicación del comando utilizado:

1. Sintaxis del Comando:

- **CREATE DATABASE:** Este es el comando SQL utilizado para definir y crear una nueva base de datos en el sistema de gestión de bases de datos (SGBD). Es un comando fundamental en SQL que establece un nuevo espacio de almacenamiento para los datos.
- **saih:** Es el nombre que se le asigna a la base de datos. En este caso, "saih" representa el Sistema Automatizado para la Medición y Monitoreo de Caudales, alineado con los objetivos del proyecto.

2. Proceso de Ejecución:

- **Inicialización:** Al ejecutar el comando `CREATE DATABASE saih;`, el SGBD MySQL inicializa un nuevo esquema en el sistema. Este esquema es una colección de objetos de base de datos, como tablas, vistas, y procedimientos almacenados, que forman la estructura del almacenamiento de datos.
- **Asignación de Espacio:** MySQL reserva espacio en el sistema de archivos para la base de datos "saih". Esto incluye la creación de archivos de datos y de índice necesarios para el almacenamiento y la gestión de la información.
- **Metadatos:** El sistema registra los metadatos asociados con la base de datos, tales como el nombre, las propiedades de almacenamiento y las configuraciones de seguridad.

3. Consideraciones Técnicas:

- **Esquema y Nombres:** La base de datos "saih" debe ser creada con un nombre que sea único dentro del sistema de gestión de bases de datos. Los nombres de base de datos son sensibles a mayúsculas y minúsculas dependiendo de la configuración del sistema operativo subyacente.
- **Accesibilidad y Privilegios:** Tras la creación de la base de datos, es crucial establecer los privilegios adecuados para los usuarios que interactuarán con ella. Esto se hace utilizando comandos adicionales como GRANT para otorgar permisos específicos a los usuarios o roles.
- **Estructuración de Datos:** Una vez creada la base de datos, se procede a definir la estructura de las tablas y otros objetos necesarios. Este paso incluye la creación de tablas, índices, relaciones y demás elementos esenciales para el almacenamiento de datos.

8.9.2. Importancia de la Creación de la Base de Datos

Fundación del Sistema de Datos: La base de datos "saih" proporciona la estructura fundamental para almacenar y organizar los datos recolectados por los sensores del SAMMCA. Sin una base de datos adecuada, el sistema no podría gestionar eficientemente la información.

Integridad y Coherencia: Crear una base de datos bien definida asegura que los datos se almacenen de manera estructurada y coherente. Esto es esencial para mantener la integridad de la información y facilitar el acceso y análisis de datos.

Escalabilidad y Mantenimiento: Una base de datos bien diseñada puede escalar con el crecimiento del sistema. Permite la adición de nuevas tablas y campos según sea necesario, y facilita el mantenimiento y actualización de los datos.

Seguridad y Control: La creación de la base de datos también implica establecer las políticas de seguridad y control de acceso. Esto es fundamental para proteger los datos contra accesos no autorizados y garantizar que la información sea accesible solo para usuarios y aplicaciones autorizados.

8.9.3. Diseño de la tabla “datos”

Dentro de la base de datos "saih", se creó la tabla "datos" para almacenar las lecturas de los sensores. La definición de la tabla es la siguiente:

```
CREATE TABLE datos (  
    id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,  
    est VARCHAR(255) NOT NULL,  
    fecha DATETIME NOT NULL,  
    tmp FLOAT NOT NULL,  
    tirante FLOAT NOT NULL,  
    velocidad FLOAT NOT NULL,  
    caudal FLOAT NOT NULL,  
);
```

Descripción Técnica de los Campos:

- **id:** Clave primaria de tipo entero con incremento automático. La clave primaria garantiza la unicidad de cada registro y facilita la identificación rápida de los datos.

El incremento automático asegura que cada nuevo registro recibe un identificador único sin necesidad de intervención manual.

- **est:** Campo de texto (VARCHAR) que almacena la identificación de la estación o sensor. La longitud de 255 caracteres permite una flexibilidad suficiente para incluir identificadores descriptivos.
- **fecha:** Campo de tipo DATETIME que registra la fecha y hora en que se tomó la medición. Este campo es crucial para el análisis temporal de los datos y la sincronización con otros eventos.
- **tirante, velocidad y caudal:** Campos de tipo FLOAT que almacenan las mediciones obtenidas por los sensores. Cada campo está diseñado para capturar un tipo específico de dato, desde temperatura hasta pH, proporcionando una visión completa de las condiciones medidas en el campo.

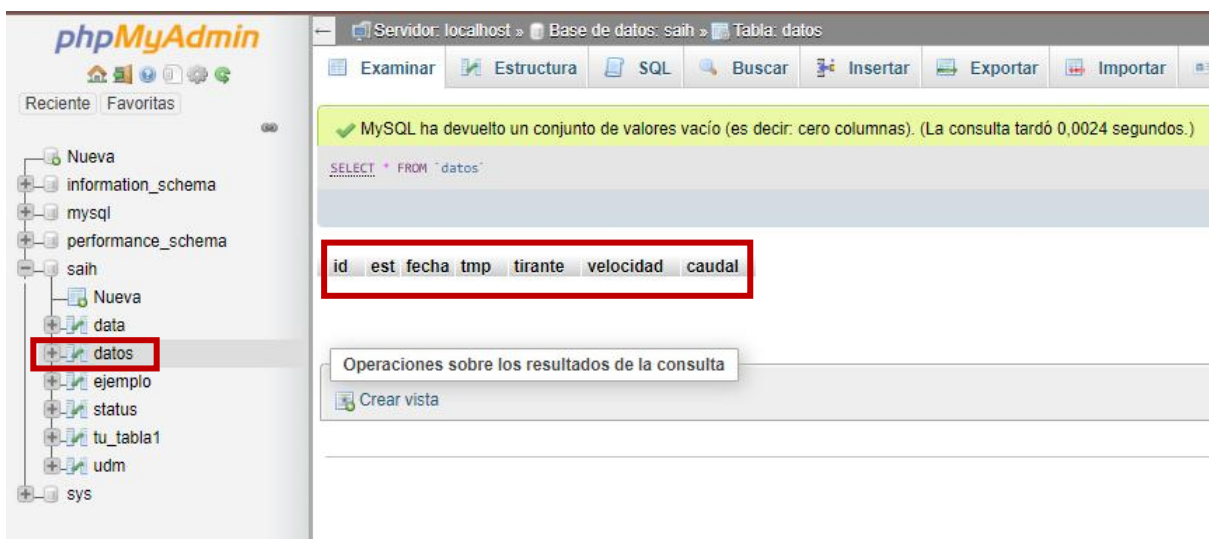


Figura 49 Base de datos “saih” y tabla “datos” creada en MySQL

8.10. Protocolo de comunicación del SAMMCA

8.10.1. Protocolo de transmisión de datos LoRa

En el desarrollo del SAMMCA, se enfrentó la decisión crítica de seleccionar un protocolo de comunicación adecuado que cumpliera con los requisitos de largo alcance, eficiencia energética y robustez en entornos variados. Tras una evaluación exhaustiva de las opciones disponibles, se determinó que el protocolo LoRa (Long Range) representaba la solución más adecuada en comparación con WiFi, particularmente para las necesidades específicas del proyecto.

El protocolo LoRa, basado en la modulación de espectro expandido (chirp spread spectrum), ofrece una serie de ventajas que superan las capacidades de WiFi en el contexto de aplicaciones de monitoreo a largo alcance. La elección de LoRa se fundamenta en varias razones clave:

- **Alcance Extendido:** LoRa es conocido por su capacidad para proporcionar comunicación a distancias significativamente mayores en comparación con WiFi. Mientras que las redes WiFi típicamente tienen un rango limitado a unos pocos cientos de metros, LoRa puede alcanzar hasta 15 kilómetros en entornos abiertos y hasta 10 kilómetros en áreas urbanas. Esta característica es crucial para el SAMMCA, que requiere la transmisión de datos desde sensores ubicados en áreas extensas y remotas.
- **Eficiencia Energética:** Una de las mayores ventajas de LoRa es su diseño orientado a la eficiencia energética. Los dispositivos basados en LoRa pueden operar con baterías durante años debido a su bajo consumo de energía en modo de espera y en

transmisión. En contraste, los dispositivos WiFi requieren una mayor cantidad de energía para mantener conexiones activas y transmitir datos a alta velocidad, lo que puede resultar en costos operativos más altos y una duración de batería mucho menor.

- **Resiliencia a Interferencias:** LoRa utiliza técnicas de modulación robustas que le permiten funcionar eficazmente en entornos con alta interferencia electromagnética. Esto es especialmente relevante en aplicaciones de monitoreo ambiental, donde las interferencias pueden afectar la calidad de la comunicación. WiFi, al operar en bandas de frecuencia más congestionadas, puede experimentar mayores niveles de interferencia y una degradación de la señal.
- **Costo Operativo:** La implementación de redes LoRa generalmente conlleva menores costos operativos en comparación con WiFi, debido a la menor necesidad de infraestructura de red y al menor impacto de la congestión de red. En un proyecto como el SAMMCA, que puede involucrar múltiples nodos de sensores distribuidos, la reducción de costos es un factor importante a considerar.

Dentro del ecosistema LoRa, se evaluaron diferentes módulos para su integración en el SAMMCA. Tras realizar pruebas con la placa de desarrollo ESP32 LoRa WiFi V2, se concluyó que el módulo LoRa Reyax RYLR998 ofrecía un conjunto de características que lo hacía superior para los requisitos del proyecto.

El Reyax **RYLR998** se destacó por varias razones:

- **Frecuencia y Alcance:** El módulo RYLR998 opera en la banda de 915 MHz, que está alineada con las regulaciones del espectro en México para aplicaciones de LPWAN. Esta banda proporciona un balance óptimo entre alcance y capacidad de

penetración, permitiendo comunicaciones de hasta 15 kilómetros en campo libre. Las pruebas realizadas con el RYLR998 confirmaron su capacidad para mantener una conexión estable y de largo alcance, incluso en entornos desafiantes.

- **Eficiencia Energética:** El Reyax RYLR998 está diseñado con un enfoque en el bajo consumo energético, lo que permite un funcionamiento prolongado con fuentes de alimentación limitadas. Esta característica es particularmente beneficiosa para aplicaciones de monitoreo remoto, donde la necesidad de una larga duración de la batería es crítica.
- **Facilidad de Integración:** El módulo RYLR998 ofrece interfaces UART, facilitando su integración con microcontroladores como el ESP32. Esta compatibilidad simplifica el proceso de desarrollo y permite una integración fluida en el sistema existente del SAMMCA. La capacidad del módulo para ser configurado mediante comandos AT proporciona flexibilidad adicional en la adaptación a diferentes requisitos de comunicación.
- **Pruebas Comparativas:** Durante el proceso de evaluación, se realizó una comparación entre el RYLR998 y la placa de desarrollo ESP32 LoRa WiFi V2. Aunque la placa de desarrollo ofrecía capacidades integradas para WiFi y LoRa, el módulo Reyax RYLR998 demostró ser más eficiente en términos de consumo energético y alcance. Además, su diseño específico para aplicaciones LoRa y su rendimiento superior en pruebas de largo alcance confirmaron su idoneidad para el proyecto.

La decisión de utilizar el protocolo LoRa y el módulo Reyax RYLR998 para el SAMMCA se basó en una evaluación detallada de las necesidades del proyecto y las características de

los diferentes métodos de comunicación. LoRa dio una solución robusta y eficiente en términos de alcance, consumo energético y costo operativo, lo que lo convirtió en una opción ideal para el monitoreo en áreas extensas y remotas.



Figura 50. Placa de desarrollo ESP32 LoRa Wifi V2 y Módulo LoRa REYAX RYLR998

8.11. Arquitectura inicial para el protocolo de transmisión de datos LoRa

La creación de una arquitectura sólida desde el inicio no solo es una práctica recomendada, sino que se convierte en un componente fundamental para el éxito de cualquier proyecto que involucre la transmisión de datos a larga distancia. La propuesta de una arquitectura inicial en el protocolo LoRa nos servirá como un marco conceptual que guiará todo el desarrollo y la implementación subsiguiente. Esta arquitectura define la estructura y las interconexiones

entre los elementos clave del sistema, estableciendo las bases para una comunicación eficiente y confiable.

Dicho lo anterior y basándonos en la importancia de diseñar una arquitectura inicial, se desarrolló una propuesta para el protocolo de comunicación (Figura 51), la cual se basa en dos placas de comunicación LoRa la primera para transmitir los datos obtenidos de los sensores ultrasónicos y la segunda para recibirlos. Estas placas de desarrollo están diseñadas con un alcance de 10 kilómetros en condiciones sin interferencia física, por lo que es una opción que beneficia la transmisión de datos ya que tienen un largo alcance y bajo consumo energético.

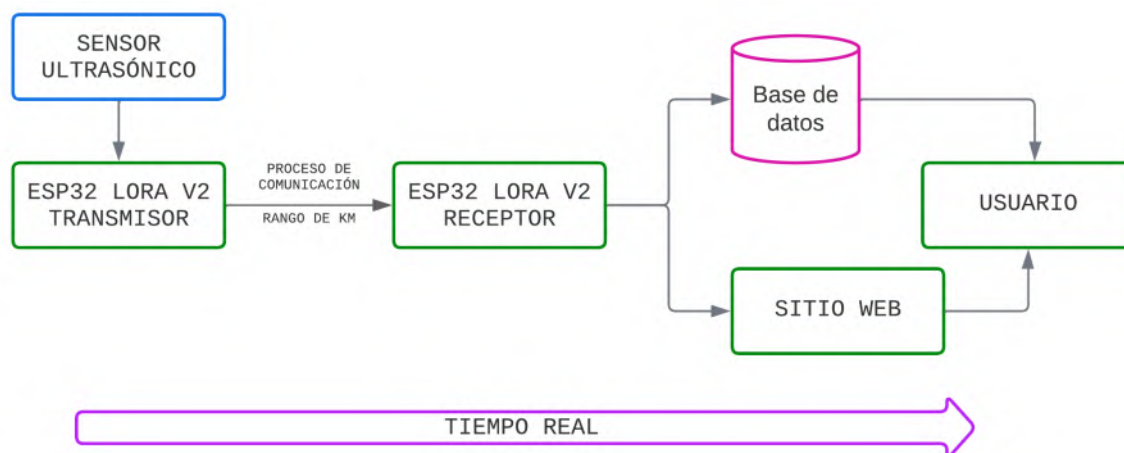


Figura 51. Diagrama de arquitectura propuesta de protocolo de comunicación

8.12. Desarrollo de algoritmo para comunicación y envío de datos con LoRa.

El desarrollo del algoritmo para la comunicación y el envío de datos utilizando el protocolo LoRa y el almacenamiento en una base de datos MySQL es un componente importante del

SAMMCA. Este apartado detalla los pasos y consideraciones técnicas para implementar el algoritmo, asegurando una transmisión de datos eficiente y confiable desde los sensores ultrasónicos hasta la base de datos. Se presenta una descripción detallada del algoritmo, la configuración del hardware y software, y el flujo de datos desde el sensor hasta la base de datos. Además, se utilizan un emisor basado en ESP32 y un receptor que actúa como gateway, específicamente el Mikrotik wAP LR9 kit.

El Mikrotik wAP LR9 kit es un gateway LoRaWAN que se utiliza en el SAMMCA para recibir datos transmitidos desde sensores a través del protocolo LoRa. Este gateway es importante para la transmisión eficiente y confiable de datos desde múltiples nodos sensores hacia un servidor central, donde los datos son procesados y almacenados en una base de datos MySQL. La elección del Mikrotik wAP LR9 kit (Figura 52) se basa en sus características avanzadas y su capacidad para operar en redes LoRaWAN, lo que lo convierte en una opción robusta y adecuada para nuestro sistema.

Características del Mikrotik wAP LR9 Kit

El Mikrotik wAP LR9 kit ofrece varias características que lo hacen ideal para su uso en el SAMMCA:

- **Compatibilidad con LoRaWAN:** El wAP LR9 kit es compatible con el protocolo LoRaWAN, lo que permite la comunicación a largas distancias con bajo consumo de energía.
- **Frecuencia de Operación:** El dispositivo opera en la frecuencia de 902-928 MHz, que es adecuada y regulada para el uso de LoRa en México.

- **Conectividad Ethernet y WiFi:** El gateway tiene interfaces Ethernet y WiFi, lo que facilita su integración con redes existentes y su conexión a Internet para la transmisión de datos al servidor.
- **Alta Capacidad de Manejo de Datos:** Puede gestionar múltiples dispositivos LoRa simultáneamente, lo que es crucial para aplicaciones que involucran varios nodos sensores.
- **Fácil Configuración y Administración:** El wAP LR9 kit se puede configurar fácilmente utilizando la interfaz de usuario de Mikrotik, que es intuitiva y rica en funciones.



Figura 52 GATEWAY Mikrotik wAP LoRa9 kit

El Mikrotik wAP LR9 kit actúa como un intermediario entre los nodos sensores LoRa y el servidor donde se almacenan los datos. A continuación, se describen los pasos y componentes involucrados en esta integración:

- **Recepción de Datos LoRa:** Los nodos sensores, equipados con módulos LoRa Reyax RYLR998, envían los datos de las mediciones al Gateway.
- **Procesamiento en el Gateway:** El Gateway Mikrotik wAP LR9 kit recibe los datos y los prepara para su transmisión al servidor.
- **Transmisión al Servidor:** Utilizando su conectividad Ethernet o WiFi, el Gateway envía los datos al servidor central, donde se ejecuta un script PHP para almacenar los datos en una base de datos MySQL.

Configuración del Hardware y Software

El sistema utiliza un módulo ESP32 para interactuar con un sensor ultrasónico y un módulo LoRa Reyax RYLR998 para la transmisión de datos. El Mikrotik wAP LR9 kit recibe los datos y los transmite a la base de datos MySQL. La base de datos MySQL almacena las mediciones recibidas, por lo que a continuación detallaremos en bloques el algoritmo.

Bloque 1: Configuración del Hardware

En este bloque se inicializan los pines del ESP32 y se configura el sensor ultrasónico:

```
#define TRIGGER_PIN 5  
#define ECHO_PIN 18  
void setup() {  
  Serial.begin(115200);
```

```

    pinMode(TRIGGER_PIN, OUTPUT);
    pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
    Serial.println("Inicializando...");
}

```

Este bloque es esencial para asegurar que el hardware esté correctamente inicializado antes de comenzar con las mediciones y la transmisión de datos. La correcta inicialización garantiza que el sensor ultrasónico funcione adecuadamente y que los pines del ESP32 estén configurados para enviar y recibir señales.

Bloque 2: Conexión y Configuración del Módulo LoRa

Para la transmisión de datos, se configura el módulo LoRa Reyax RYLR998 en el ESP32.

Este bloque asegura que el módulo LoRa esté listo para enviar datos al receptor.

```

#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial LoRa(2, 3); // RX, TX

void configurarLoRa() {
    LoRa.begin(115200);
    LoRa.println("AT+ADDRESS=1");
    LoRa.println("AT+NETWORKID=6");
    LoRa.println("AT+BAND=915000000");
    Serial.println("Configuración de LoRa completa");
}

```

Este bloque configura el módulo LoRa Reyax RYLR998 con los parámetros necesarios, incluyendo la dirección del dispositivo, el ID de la red y la frecuencia de operación. La configuración correcta es vital para asegurar la transmisión exitosa de datos al gateway.

Bloque 3: Lectura de Datos del Sensor

En este bloque, el ESP32 realiza la lectura de los datos del sensor ultrasónico y calcula la distancia medida:

```
long medirDistancia() {  
    digitalWrite(TRIGGER_PIN, LOW);  
    delayMicroseconds(2);  
    digitalWrite(TRIGGER_PIN, HIGH);  
    delayMicroseconds(10);  
    digitalWrite(TRIGGER_PIN, LOW);  
    long duracion = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);  
    long distancia = duracion * 0.034 / 2;  
    return distancia;  
}
```

La función “medirDistancia” activa el sensor ultrasónico, mide el tiempo que tarda el pulso en regresar y calcula la distancia en base a ese tiempo. Esta medición es fundamental para obtener datos precisos del nivel del agua.

Bloque 4: Envío de Datos a través de LoRa

Una vez que se han leído y calculado los datos del sensor, se envían al receptor (gateway) Mikrotik wAP LR9 kit utilizando el módulo LoRa.

```
void enviarDatosLoRa(long distancia) {  
    String mensaje = "Distancia: " + String(distancia) + " cm";  
    LoRa.println("AT+SEND=2,24," + mensaje);  
    Serial.println("Datos enviados: " + mensaje);  
}
```

En este bloque, se construye un mensaje con la distancia medida y se envía a través del módulo LoRa al receptor. Este proceso es esencial para la transmisión de datos a largas distancias sin la necesidad de infraestructura WiFi.

Bloque 5: Recepción y Almacenamiento de Datos en la Base de Datos

El Mikrotik wAP LR9 kit actúa como un gateway, recibiendo los datos enviados por el módulo LoRa del ESP32. Estos datos luego se envían a un servidor que ejecuta un script PHP para almacenarlos en la base de datos MySQL.

Descripción del Código PHP (Anexo)

- **Conexión a la Base de Datos:**
 1. Se establecen los parámetros de conexión (\$servername, \$username, \$password, \$dbname).
 2. Se crea una nueva conexión con new mysqli().
 3. Se verifica si la conexión fue exitosa y, en caso de fallo, se muestra un mensaje de error y se detiene la ejecución del script.
- **Obtención de Datos:**
 1. Se obtienen los valores enviados desde el sensor a través de la solicitud POST: \$est, \$fecha, \$tirante, \$velocidad, \$caudal.
- **Preparación y Ejecución de la Consulta SQL:**
 1. Se prepara una consulta SQL para insertar los datos en la tabla datos.
 2. Se ejecuta la consulta con \$conn->query(\$sql).
 3. Se verifica si la consulta se ejecutó correctamente y se muestra un mensaje de éxito o error.
- **Cierre de la Conexión:**
 1. Se cierra la conexión a la base de datos con \$conn->close().

El flujo completo del sistema se puede resumir en los siguientes pasos:

1. **Configuración del hardware:** Inicializar el ESP32 y el sensor ultrasónico.
2. **Configuración de LoRa:** Configurar el módulo LoRa Reyax RYLR998 para la transmisión de datos.
3. **Lectura de datos:** Medir la distancia utilizando el sensor ultrasónico.
4. **Envío de datos:** Transmitir los datos medidos al Gateway Mikrotik wAP LR9 kit a través de LoRa.
5. **Recepción de datos:** El Gateway recibe los datos y los envía al servidor.
6. **Almacenamiento de datos:** El servidor ejecuta un script PHP que inserta los datos en la base de datos MySQL.

Este algoritmo asegura una comunicación eficiente y confiable desde el sensor hasta la base de datos, utilizando LoRa para la transmisión de datos a largas distancias y PHP para el almacenamiento seguro en la base de datos.

8.13. Desarrollo de sitio web

El desarrollo del sitio web juega un papel fundamental en la gestión y visualización de los datos recogidos por el sistema de monitoreo hidrológico. La creación de un sitio web bien diseñado permite una interacción eficiente y accesible con los datos, facilitando la toma de decisiones informadas por parte de los usuarios.

Importancia del Desarrollo del Sitio Web

Accesibilidad y Disponibilidad de Información: Un sitio web permite que los datos sean accesibles desde cualquier lugar con conexión a Internet, lo cual es crucial para la monitorización en tiempo real de las condiciones hidrológicas.

Visualización de Datos: Utilizando gráficos y tablas, el sitio web puede presentar los datos de manera clara y comprensible, lo que facilita la interpretación de la información por parte de los usuarios.

Interactividad: Los usuarios pueden interactuar con el sistema, seleccionar parámetros específicos, filtrar datos por fechas o estaciones, y exportar información para análisis más detallados.

Notificaciones y Alertas: El sitio web puede integrarse con sistemas de notificación para alertar a los usuarios sobre condiciones críticas o eventos específicos, mejorando la capacidad de respuesta ante emergencias.

El sitio web para el SAMMCA se ha desarrollado utilizando una plantilla gratuita de Bootstrap, complementada con estilos CSS personalizados para adaptar la apariencia y funcionalidad a las necesidades específicas del proyecto.

Explicación del Código (Anexo)

Importación y Configuración Inicial:

- Se importa el archivo de configuración config.php que establece la conexión con la base de datos y define variables globales.
- Se incluyen las funciones necesarias desde functions.php.

Estructura del Documento HTML:

- El documento HTML define la estructura del sitio web, incluyendo el encabezado (header) con el menú de navegación y los indicadores.

- Se utilizan estilos personalizados (style.css) y scripts (custom.js) para mejorar la apariencia y funcionalidad del sitio web.

Visualización de Indicadores:

- Los indicadores de temperatura, humedad y precipitación se muestran en tarjetas (cards), cada una con su propio diseño y funcionalidad.
- La función `get_kpi($node_0, "tmp")` se utiliza para obtener y mostrar el valor de cada indicador desde la base de datos.

Tabla de Datos:

- Se muestra una tabla que presenta los datos más recientes recogidos por el sistema.
- Los datos se obtienen de la base de datos utilizando una consulta SQL y se despliegan dinámicamente en el HTML.

8.14. Diseño de circuito para condiciones de campo

El diseño de un circuito para condiciones de campo debe abordar diversos desafíos para garantizar un funcionamiento confiable en entornos adversos. La selección de componentes es un paso fundamental, comenzando con el microcontrolador adecuado. El ESP32 es una excelente opción debido a su bajo consumo de energía, capacidad de procesamiento robusta y sus módulos integrados de WiFi y Bluetooth, que lo hacen versátil para distintas aplicaciones. En el caso de sistemas que usan comunicación LoRa, el ESP32 puede combinarse eficazmente con el módulo Reyax RYLR998, aprovechando la capacidad de transmisión de largo alcance de LoRa.

Cuando se trata de sensores, es crucial seleccionar aquellos que sean duraderos y precisos. Por ejemplo, sensores de humedad del suelo o sensores de profundidad ultrasónicos deben

estar diseñados para soportar condiciones extremas como humedad, temperaturas extremas y exposición a elementos ambientales.

La alimentación del circuito también es un aspecto importante a considerar. En condiciones de campo, es ideal utilizar fuentes de energía que puedan operar en diversos ambientes, como baterías de larga duración o paneles solares, combinados con un sistema de gestión de energía para maximizar la eficiencia. Se debe prever un diseño de circuito que incluya reguladores de voltaje robustos y circuitos de protección para evitar daños por sobrevoltaje o cortocircuitos.

El diseño del circuito impreso (PCB) debe considerar la robustez mecánica y la protección contra condiciones ambientales adversas. Usar encapsulados adecuados y recubrimientos protectores puede ayudar a prevenir la corrosión y el daño físico.

Para optimizar la funcionalidad del sistema de medición y monitoreo de caudales en flujos a superficie libre, se diseñó un circuito electrónico meticulosamente elaborado que integra todos los componentes esenciales. Este diseño incluye sensores electrónicos, módulos de comunicación y componentes de control, dispuestos estratégicamente para garantizar una precisión óptima y minimizar las interferencias. Además, se incorporó un sistema de alimentación adaptable, permitiendo que el dispositivo funcione eficientemente con una batería. Esta característica de independencia energética es fundamental para su implementación en campo, ofreciendo una solución robusta y confiable que no depende de fuentes de alimentación externas. Durante el proceso de diseño, se aplicaron criterios avanzados de ingeniería para asegurar una gestión eficiente de la energía, estabilidad en las comunicaciones y resistencia a condiciones ambientales adversas. El resultado es un circuito

electrónico altamente eficiente y confiable, capaz de proporcionar un rendimiento constante y preciso en aplicaciones de monitoreo continuo en entornos desafiantes (Figura 53).

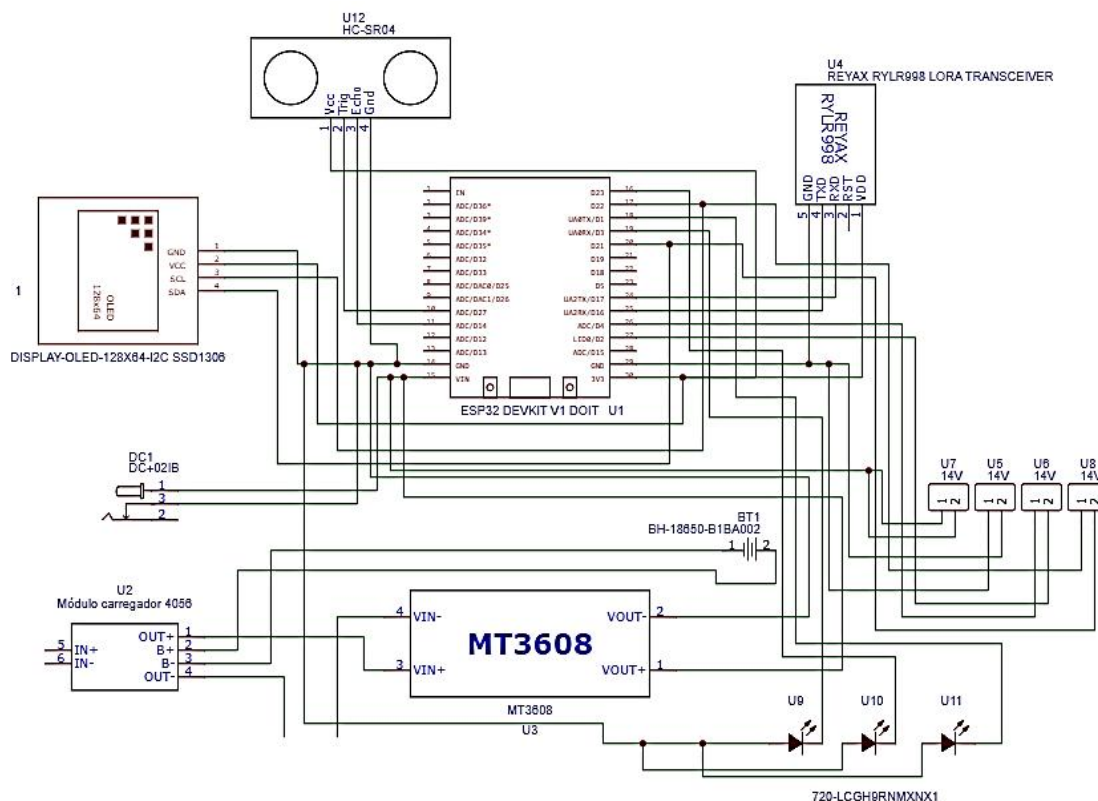


Figura 53 Circuito electrónico del SAMMCA

8.15. Diseño de PCB (Placa de Circuito Impreso)

En este apartado se presenta el diseño de la PCB (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), ya que la PCB es el componente esencial que alojará y conectará electrónicamente los diversos elementos y módulos que componen el sistema SAMMCA. Su diseño personalizado será clave para optimizar la interconexión de componentes críticos, garantizando la integridad de la señal, la eficiencia energética y la estabilidad del sistema en

su conjunto. Por lo que destacamos puntos clave sobre la importancia de diseñar una PCB dedicada para el SAMMCA de acuerdo a la experimentación realizada:

- **Integración Personalizada:** El diseño de una PCB específica para el SAMMCA permitirá la integración personalizada de todos los componentes, adaptándose de manera óptima a los requisitos y especificaciones únicas del sistema.
- **Optimización del Espacio:** Una PCB bien diseñada nos permitirá una disposición eficiente de los componentes en un espacio limitado, reduciendo la complejidad del sistema y mejorando la accesibilidad para futuras actualizaciones o mantenimiento.
- **Mejora de la Eficiencia Energética:** La disposición estratégica de los componentes en la PCB puede contribuir significativamente a la eficiencia energética del sistema SAMMCA, lo cual es esencial para un funcionamiento sostenible y de largo plazo.
- **Minimización de Interferencias:** Un diseño de PCB cuidadoso nos ayudará a minimizar las interferencias electromagnéticas y garantiza una transmisión de señal limpia, fundamental para la precisión y confiabilidad de las mediciones y operaciones del sistema.

Vistos todos los puntos anteriores de acuerdo a la experimentación Para garantizar la integración eficiente de todos los componentes necesarios para la medición y monitoreo de caudales en flujos a superficie libre, se diseñó una placa de circuito impreso (PCB) personalizada. Este diseño incorpora cuidadosamente todos los sensores electrónicos, módulos de comunicación y componentes de control, asegurando su disposición óptima para minimizar interferencias y maximizar la precisión de las mediciones. Además, se implementó

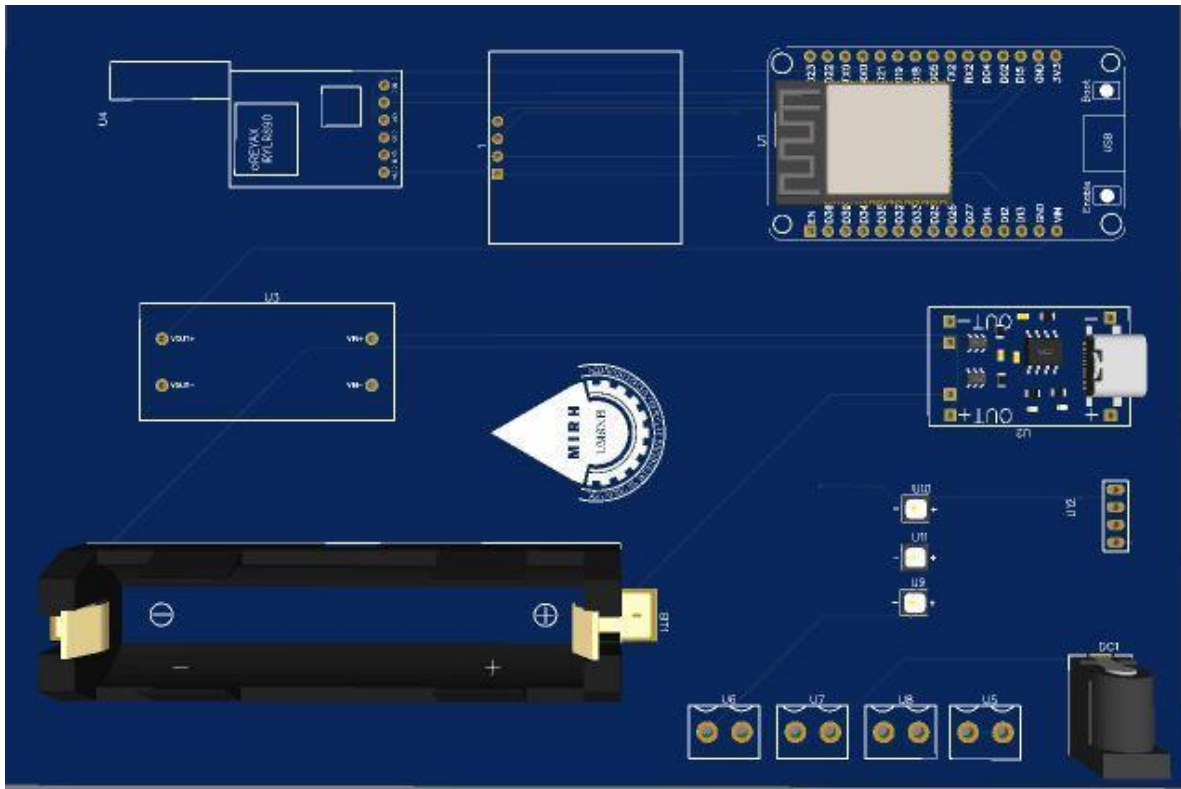


Figura 55. Modelo 3D de la PCB del SAMMCA

8.16. Diseño de estructura escala real del SAMMCA

En esta etapa se busca mejorar la capacidad de observación de los datos de las variables hidráulicas de estudio, destacando la importancia de adaptar la tecnología a las complejidades específicas de este entorno. El diseño propuesto de la estructura abarca desde la ubicación estratégica de los sensores hasta consideraciones de fácil acceso de la sección de río de los criterios de selección mencionados anteriormente. Dicho esto, se tuvo en consideración algunos aspectos de diseño como lo son consideraciones de seguridad y durabilidad, recalcando atención especial a la seguridad y durabilidad de la estructura en un entorno fluvial, contemplando aspectos como la resistencia a la corrosión y la estabilidad estructural.

Así como también como la Facilidad de Mantenimiento: Enfoque en la facilidad de acceso para operaciones de mantenimiento y calibración, asegurando una gestión eficiente y segura de las tareas de mantenimiento.

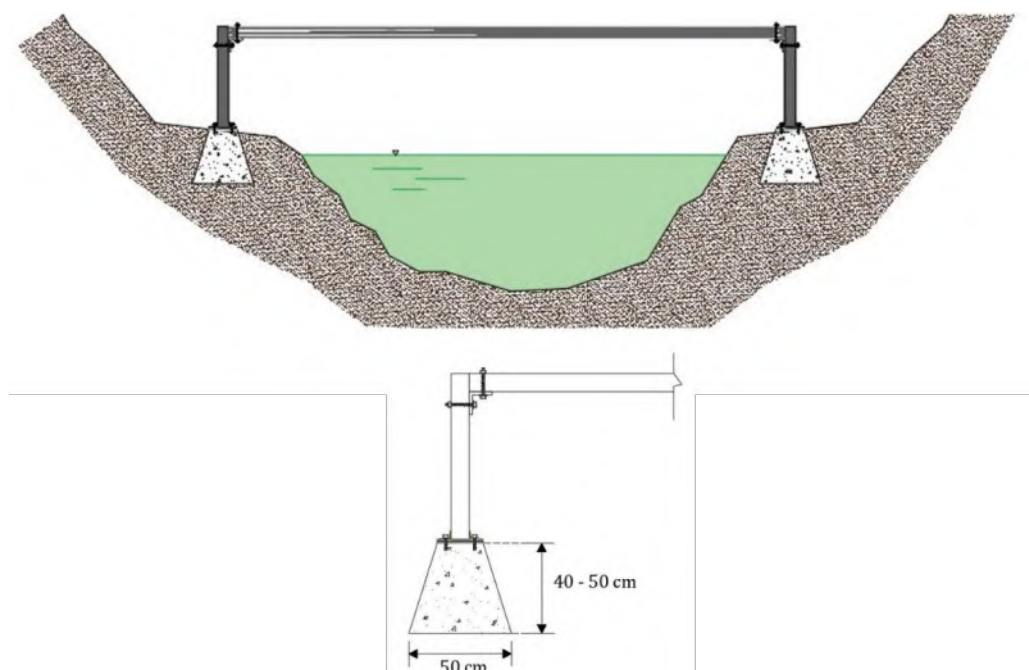


Figura 56. Propuesta de estructura para sensores en sección de río

La propuesta de la estructura para los sensores consta de dos dados de concreto de sección trapezoidal como pequeña cimentación de dimensiones de base mayor de 50 cm, base menor de 30 cm y una altura de 50 cm los cuales estarán armados con varilla de 3/8", para los postes y la viga se utilizará perfil de aluminio rectangular hueco de 4"x 8", lo que a su vez los postes estarán atornillados a la placa de la base menor con dos ángulos y estos a su vez también estarán atornillados a la viga con un ángulo de cada lado, en donde estarán instalados los sensores al centro para realizar las mediciones (Figura 56).

8.17. Generación de curvas tirante-gasto en campo

Este proceso implica la realización de pruebas experimentales, durante las cuales generaremos dovelas en incrementos sucesivos para medir el tirante y el gasto correspondientes a cada variación. El procedimiento para la obtención de dichas curvas se basa en un enfoque experimental detallado, donde se llevarán a cabo sucesivas dovelas en la sección del río. Después de cada dovela, se medirán y registrarán cuidadosamente los tirantes de agua y los correspondientes flujos o gastos. Este proceso se repetirá sistemáticamente, permitiéndonos recopilar datos variados y construir curvas que reflejen la relación entre el tirante y el gasto en condiciones específicas de la sección del río.

Además de también obtener el área ya que se necesita conocer el área de la sección transversal para obtener el caudal que fluye por la misma, para este proceso generaremos otra curva de “Tirante-Área” y para esto sacaremos una curva de ajuste para seguidamente integrar y obtener el área bajo la curva, y así conocer el complemento de esa área siendo ésta el área real de la sección (Figura 57).



Figura 57. Método de dovelas para la generación de curvas de calibración



Figura 58. Obtención de tirante manualmente (23 cm)

En la generación de curvas tirante-gasto en campo, se han llevado a cabo una serie de mediciones iniciales para establecer una base de datos sólida y representativa. Estas mediciones son fundamentales para la calibración precisa del sistema, y su fiabilidad aumenta exponencialmente con la cantidad de datos recopilados. Entendiendo la importancia crítica de una calibración rigurosa, se ha planificado la realización de mediciones adicionales en distintas condiciones de flujo y ubicaciones. La acumulación de más datos permitirá refinar progresivamente las curvas tirante-gasto, incrementando la precisión en la representación de la relación entre el tirante y el gasto. Este enfoque iterativo no solo mejora la exactitud de las

estimaciones de caudal, sino que también robustece la capacidad del sistema para adaptarse a diversas condiciones hidráulicas.

Actualmente, se dispone de un conjunto de datos que ya ha sido procesado y que demuestra la viabilidad del enfoque propuesto.



Figura 59 Mediciones en campo para datos de las curvas de calibración

Una vez en la zona de estudio, procedimos a realizar la recolección de datos esenciales para el desarrollo de las curvas tirante-gasto. Esta etapa inicial es esencial, ya que permite establecer una base sólida para las mediciones subsiguientes. Primero, llevamos a cabo un detallado levantamiento topográfico del sitio, lo cual nos permitió obtener las características exactas de la sección transversal del río (Figura 61). Este proceso involucró el uso de equipos de topografía para capturar las dimensiones físicas y la morfología del cauce, aspectos

fundamentales para entender la dinámica del flujo y su interacción con la estructura del río. Los datos topográficos recabados son imprescindibles para la posterior modelación hidráulica y para asegurar que las estimaciones de caudales sean lo más precisas posible, adaptadas específicamente a las condiciones naturales y geométricas del área estudiada.



Figura 60 Obtención de topografía en la zona de estudio

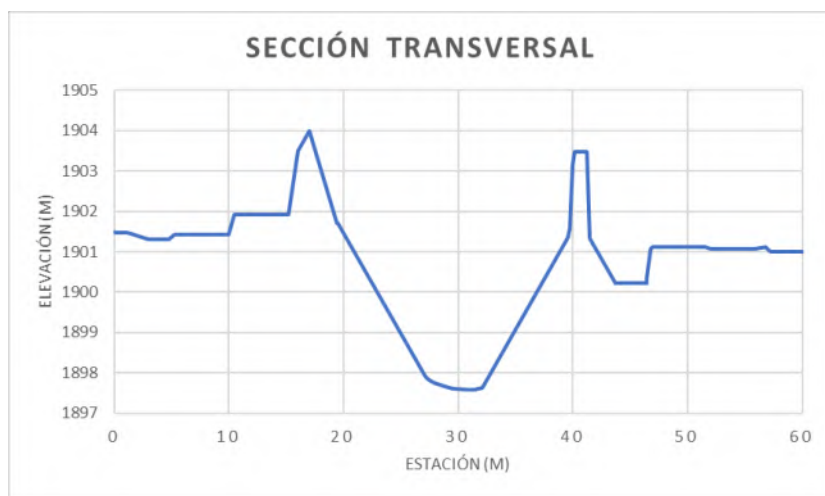


Figura 61 Sección transversal del río una vez obtenida la topografía

Seguidamente, con los datos obtenidos en campo, procedimos a la generación de las curvas tirante-gasto, aplicando el método de Leopold y Maddock (Figura 62). Este proceso fue meticuloso y requirió de la aplicación de técnicas estadísticas para transformar las mediciones topográficas y de profundidades en estimaciones fiables de caudal. Utilizamos técnicas de regresión y análisis de flujo para modelar la relación entre el tirante (profundidad del agua) y el gasto (volumen de flujo), lo que resultó en curvas que describen de manera precisa cómo varía el caudal en función de los cambios en la profundidad del río. Las curvas finalizadas, fundamentadas en el enfoque de Leopold y Maddock, fueron representadas gráficamente, mostrando una correlación clara y directa entre ambas variables. Estas curvas son importantes para la calibración de nuestros dispositivos de medición y para garantizar que nuestras futuras predicciones y monitoreos de caudales sean acertados y reflejen las condiciones reales del río en el área de estudio.

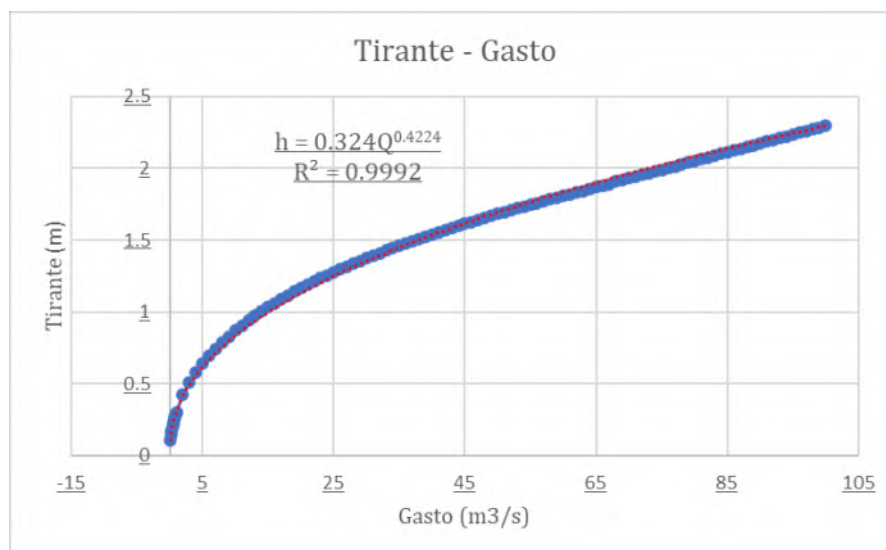


Figura 62 Curva “Tirante – Gasto” de la sección de estudio

Los resultados obtenidos tras aplicar iteraciones sucesivas fueron muy reveladores y cumplen con los criterios establecidos por Leopold y Maddock. Determinamos los valores de los

coeficientes $\alpha_2 = 0.324$ y $\beta_2=0.4224$, junto con $\alpha_3=4.8315$ y $\beta_3=0.2909$. Al validar estos resultados, observamos que la multiplicación de los coeficientes α , conforme a Leopold y Maddock, $0.6388 \times 0.324 \times 4.8315 = 0.999 \approx 1$, lo que indica un excelente ajuste del modelo. Además, la suma de los coeficientes β , $0.2867 + 0.4224 + 0.2909 = 1$, confirma la consistencia y precisión de nuestras estimaciones.

Seguidamente, procedimos a desarrollar la curva de velocidad-gasto para complementar nuestro análisis del comportamiento hidráulico del río. Esta curva se obtuvo mediante mediciones directas de la velocidad del flujo en diversos puntos a lo largo de la sección transversal del río, utilizando equipos especializados para garantizar precisión en cada dato recogido. Posteriormente, correlacionamos estas velocidades con los gastos correspondientes, generando así una curva (Figura 63) que ilustra claramente la relación entre la velocidad del agua y el volumen de flujo.

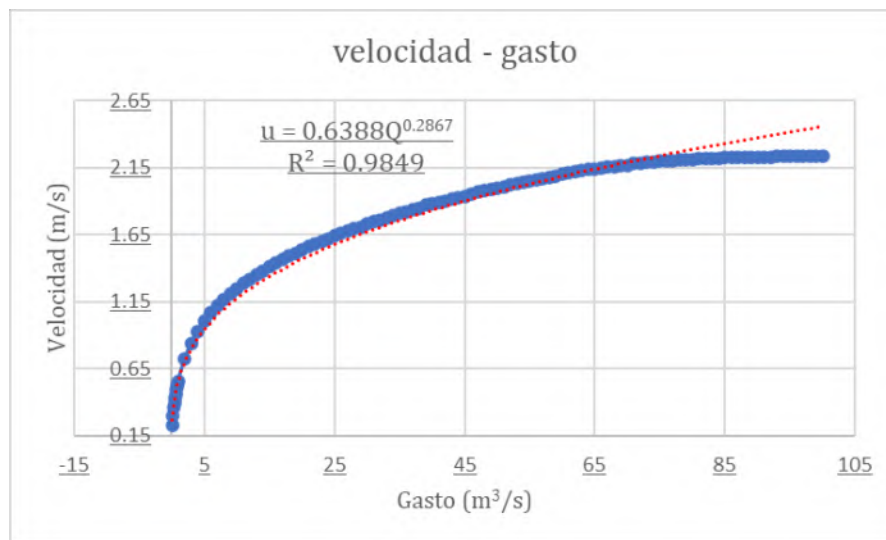


Figura 63 Curva “Velocidad – Gasto” de la sección de estudio

8.18. Implementación y evaluación del sistema en cauces naturales

En esta sección iniciamos nuestra fase de campo desplazándonos a la zona de estudio seleccionada. Para la instalación de nuestro sistema de sensores, optamos por aprovechar la infraestructura existente; en particular, una viga de acero de un puente que atraviesa el río. Esta decisión estratégica no facilitó la instalación, además de que también garantizó la estabilidad y seguridad del equipo en un entorno natural dinámico. Los sensores fueron cuidadosamente montados en la viga, asegurando su óptima orientación y fijación para captar datos precisos del flujo del agua. Esta configuración permitió una integración casi imperceptible con el entorno, minimizando la interferencia humana y a la vez que proporcionaba un punto de observación elevado y centrado, ideal para nuestras mediciones hidrométricas.

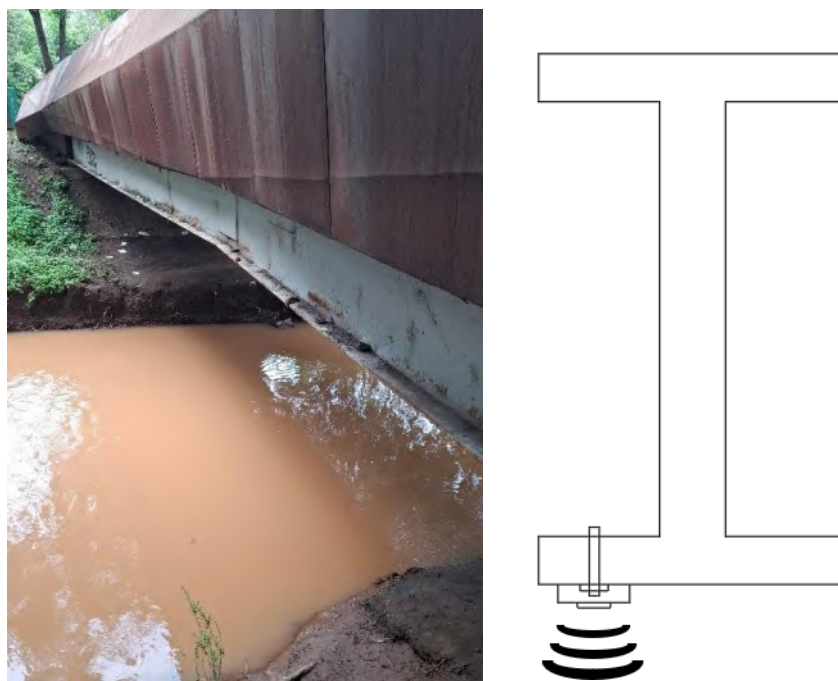


Figura 64 Instalación de sensores en zona de estudio

Una vez instalado el dispositivo en la sección seleccionada del río, procedimos al monitoreo continuo de los caudales. Para validar la precisión y eficacia de nuestro sistema, simultáneamente realizamos aforos utilizando un molinete mecánico calibrado y un molinete digital. Estas herramientas permitieron la medición directa del gasto, ofreciendo así un marco comparativo para evaluar el desempeño de nuestro dispositivo. Los datos recabados con los molinetes fueron esenciales para calibrar nuestro sistema, asegurando que las mediciones automáticas reflejen con exactitud las dinámicas hidrológicas del río bajo diversas condiciones de flujo.

Tabla 5 Comparativa de caudales obtenidos

Iteración	Caudal molinete mecánico (m³/s)	Caudal molinete digital (m³/s)	Caudal dispositivo desarrollado (m³/s)
1	1.25	1.17	1.18
2	1.15	1.07	1.08
3	1.55	1.47	1.48
4	0.95	0.87	0.88
5	1.35	1.27	1.28
6	1.30	1.22	1.23
7	1.05	0.97	0.98
8	1.65	1.57	1.58
9	0.85	0.77	0.78
10	1.45	1.37	1.38

El molinete mecánico tendió a registrar ligeramente valores más altos, lo cual podría atribuirse a su calibración o al método de medición. Por su parte, el molinete digital y el

dispositivo desarrollado mostraron una menor variabilidad entre las mediciones, destacando su potencial para estudios de precisión en condiciones de flujo dinámico.

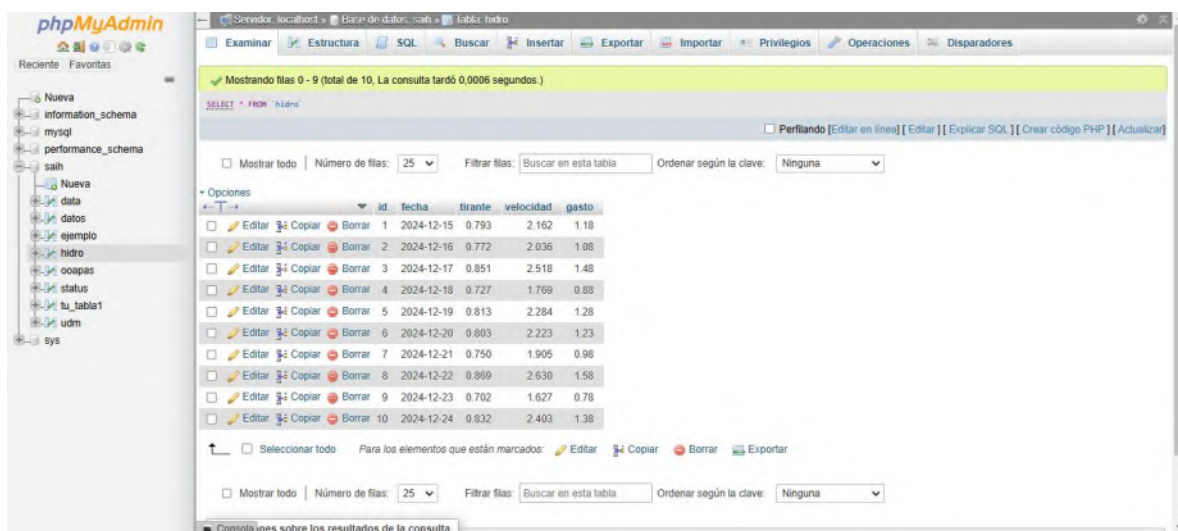
Las pruebas realizadas evidencian que tanto los molinetes mecánicos como los digitales, junto con nuestro dispositivo desarrollado, son efectivos para la medición de caudales en cauces naturales.

Además de las mediciones de gasto, también se hace el registro de velocidades y tirantes del río, los cuales fueron obtenidos utilizando nuestro dispositivo desarrollado. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en diez iteraciones diferentes correspondientes a los gastos anteriores, reflejando la capacidad del dispositivo para adaptarse y registrar las variaciones en la velocidad y profundidad del agua bajo distintos escenarios hidrológicos:

Tabla 6 Datos obtenidos por el dispositivo

Iteración	Tirante (m)	Velocidad (m/s)
1	0.793	2.162
2	0.772	2.036
3	0.851	2.518
4	0.727	1.769
5	0.813	2.284
6	0.803	2.223
7	0.750	1.905
8	0.869	2.630
9	0.702	1.627
10	0.832	2.403

En concordancia con los objetivos de integración tecnológica de nuestro proyecto, los datos de velocidades y tirantes obtenidos mediante nuestro dispositivo no solo se registraron de manera local, sino que también se transmitieron en tiempo real a la base de datos especialmente desarrollada para este estudio. Paralelamente, estos datos fueron integrados a la plataforma de visualización en nuestra página web, permitiendo un acceso fácil y en tiempo real a los resultados. Esta funcionalidad facilita el seguimiento continuo del comportamiento del río por parte de investigadores y gestores de recursos hídricos.



Mostrando filas 0 - 9 (total de 10, La consulta tardó 0.0006 segundos.)

SELECT * FROM hidro

☐ Perfilando [Editar en línea] [Editar] [Explicar SQL] [Crear código PHP] [Actualizar]

☐ Mostrar todo | Número de filas: 25 | Filtrar filas: Buscar en esta tabla | Ordenar según la clave: Ninguna

Opciones

					id	fecha	tirante	velocidad	gasto
☐	Editar	Copiar	Borrar		1	2024-12-15	0.793	2.162	1.18
☐	Editar	Copiar	Borrar		2	2024-12-16	0.772	2.036	1.08
☐	Editar	Copiar	Borrar		3	2024-12-17	0.851	2.518	1.48
☐	Editar	Copiar	Borrar		4	2024-12-18	0.727	1.769	0.88
☐	Editar	Copiar	Borrar		5	2024-12-19	0.813	2.284	1.28
☐	Editar	Copiar	Borrar		6	2024-12-20	0.803	2.223	1.23
☐	Editar	Copiar	Borrar		7	2024-12-21	0.750	1.905	0.98
☐	Editar	Copiar	Borrar		8	2024-12-22	0.969	2.630	1.58
☐	Editar	Copiar	Borrar		9	2024-12-23	0.702	1.627	0.78
☐	Editar	Copiar	Borrar		10	2024-12-24	0.832	2.403	1.38

☐ Seleccionar todo | Para los elementos que están marcados: Editar Copiar Borrar Exportar

☐ Mostrar todo | Número de filas: 25 | Filtrar filas: Buscar en esta tabla | Ordenar según la clave: Ninguna

Consolas sobre los resultados de la consulta

Figura 65 Datos enviados a la base de datos exitosamente

9. CONCLUSIONES

Primeramente, revisando los resultados de la obtención de caudales por los métodos tradicionales de medición, como el método del flotador y el método del molinete, han demostrado tener una estrecha relación y ofrecen resultados comparables en nuestras investigaciones. La implementación de ambos métodos ha revelado consistencia en las mediciones de caudales en ambientes controlados en laboratorio. Esto es crucial, ya que sugiere que ambos enfoques pueden ser utilizados indistintamente con confianza en nuestro estudio, brindando flexibilidad en la elección de la técnica de medición según las condiciones específicas del entorno o los recursos disponibles en la sección de río seleccionada.

Seguidamente también se observó la estrecha relación entre los caudales obtenidos mediante los métodos tradicionales del flotador y el molinete, y aquellos medidos con los sensores basados en las curvas de calibración generadas en laboratorio, destaca la coherencia de nuestro enfoque integral en la medición de caudales en ambientes controlados.

También se analizó la transmisión de datos a través de la ESP32 con conexión WiFi, y se ha llegado a la conclusión de que su eficiencia se ve comprometida debido a la inestabilidad observada en la transmisión de datos en condiciones específicas de nuestro entorno de estudio. Esta inestabilidad puede ser atribuida a factores como interferencias electromagnéticas, limitaciones de cobertura y variaciones en la calidad de la señal, lo cual ha impactado negativamente en la confiabilidad de la transmisión de datos.

Como consecuencia a estos problemas identificados, se ha tomado la decisión estratégica de cambiar a un protocolo de comunicación LoRa ya que tiene una capacidad de operar a larga distancia y superar obstáculos de manera más eficiente que las tecnologías convencionales

de transmisión inalámbrica. La implementación de LoRa no solo busca mejorar la estabilidad de la transmisión de datos, sino también garantizar una conectividad más robusta y consistente en el entorno específico de nuestro proyecto.

La evaluación del desempeño de los sensores HC-SR04 en nuestro entorno de estudio ha tenido limitaciones significativas, especialmente en situaciones donde la exposición al agua y condiciones ambientales adversas es inevitable. Como respuesta a esta observación, se hace evidente la necesidad de migrar hacia sensores ultrasónicos impermeables que puedan resistir de manera efectiva las condiciones ambientales más desafiantes. Los sensores HC-SR04, aunque son eficientes en entornos controlados, han demostrado ser susceptibles a la interferencia del agua y otros factores externos en condiciones de campo.

Por otro lado, las bases de datos comerciales, a pesar de ofrecer ventajas notables en términos de accesibilidad y rapidez de implementación, tienden a presentar restricciones significativas en cuanto a la cantidad de datos que pueden gestionar de manera eficiente. En proyectos de monitoreo que involucran la recopilación constante de datos provenientes de una variedad de sensores y dispositivos, esta limitación puede resultar inhibidora para el desarrollo y la expansión del sistema en el tiempo por lo que se optará por desarrollar una base de datos propia para almacenar las variables hidráulicas de estudio.

10. REFERENCIAS

- Ayala Julio, & Albóniga Roberto. (2015, December 24). Dispositivo electrónico de medición del caudal de agua para canales abiertos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 1–10.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93243475016>
- Camnasio, E., & Orsi, E. (2011). Calibration Method of Current Meters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(3), 386–392. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000311](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000311)
- Chusin Lisintuña William Rolando, & Pilaguano Vega Jonathan Javier. (2020). *Implementación de un Sistema de Monitoreo de Caudal de Río San Pablo* [Universidad Técnica de Cotopaxi].
<http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6860/1/UTC-PIM-000227.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2018). *Atlas del Agua en México* .
https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/AAM_2018.pdf
- CONAGUA. (2022). *Estaciones Hidrométricas en México* .
- Corapi, P. ;, Chacón, A., Carolina, X., Nieto, G., Alejandro, J., Bajaña, V., Francisco, W., & Corapi, P. (2021). Sistema de Monitoreo de Caudal y Tirante para el Laboratorio Piloto de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. *Periodicidad: Anual*, 13, 2021.
<http://portal.amelica.org/ameli/journal/593/5932716001/5932716001.pdf>
- González Edmundo & Cuellar Gustavo A. (2014). *Manejo y distribución del agua en distritos de riego* (Martínez Gema, Ed.).
- Guerra María, & Toapaxi John. (2016). *Diseño e Implementación de un Transductor Electrónico para la Medición de Flujo a Canal Abierto en los Afluentes de la Mmicrocuenca del Río el*

Pisque en el Cantón Cayambe [Universidad Politécnica Salesiana].

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13086/1/UPS%20-%20ST002212.pdf>

HyQuest. (2022). *Hornet / Hornet Plus Cableway Gauging Systems*.

José Guerra Carmenate. (2021). *ESP32 Wifi y Bluetooth en un solo chip*.

https://Programarfacil.Com/Esp8266/Esp32/#Que_es_el_ESP32.

Kendall, K. E. (2011). *Análisis y Diseño de Sistemas* (8va Edición). Pearson .

[http://cotana.informatica.edu.bo/downloads/Id-](http://cotana.informatica.edu.bo/downloads/Id-Analisis%20y%20Diseno%20de%20Sistemas_Kendall-8va.pdf)

[Analisis%20y%20Diseno%20de%20Sistemas_Kendall-8va.pdf](http://cotana.informatica.edu.bo/downloads/Id-Analisis%20y%20Diseno%20de%20Sistemas_Kendall-8va.pdf)

Kennedy Arturo, Fragoza Fernando, Peña Efrén, & Moreno Eduardo J. (1992). *Manual de Aforos* .

Subcoordinación Editorial, IMTA.

[http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/971/IMTA_028.pdf?sequence=1](http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/971/IMTA_028.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
&isAllowed=y

Leandro, A., & Hillman Gerardo. (2019). *Instalación de Estaciones Hidrométricas y Meteorológicas* .

[https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/24949/05-08-](https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/24949/05-08-2019%20Informe%20PS%201.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[2019%20Informe%20PS%201.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/24949/05-08-2019%20Informe%20PS%201.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Martinez Antonio, Prado Víctor, Flores Felipe R., Pérez Genaro, & Torres Julio. (2020). *Equipo*

ultrasónico para el aforo de causas naturales (construcción, calibración e implementación). 1–
17.

[https://www.researchgate.net/publication/346503788_Equipo_ultrasonico_para_el_aforo_d](https://www.researchgate.net/publication/346503788_Equipo_ultrasonico_para_el_aforo_de_causas_naturales_construccion_calibracion_e_implementacion)
[e_causas_naturales_construccion_calibracion_e_implementacion](https://www.researchgate.net/publication/346503788_Equipo_ultrasonico_para_el_aforo_de_causas_naturales_construccion_calibracion_e_implementacion)

Naylamp. (2022a). *Display Oled 0.96" I2C SSD1306*. <https://naylampmechatronics.com/oled/850-display-oled-096-i2c-12864-ssd1306.html>

Naylamp. (2022b). *SENSOR ULTRASONIDO HC-SR04*. <https://Naylampmechatronics.Com/Sensores-Proximidad/10-Sensor-Ultrasonido-Hc-Sr04.Html>.

Ortega-Gaucin, D. (2012). *Hidrometría Básica Aplicada a la Operación de Distritos y Unidades de Riego*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4047.4963>

Solís-Alvarado, Y., Sanvicente-Sánchez, H., García-Hernández, J., Martínez-Castillo, G., & Mendoza-Betanzos, & R. (2015). Location and search via the web of hydrometric information of the Mexican National Hydrometric Network. *Transactions on Ecology and The Environment*, 200, 1743–3541. <https://doi.org/10.2495/WS150071>

Sotelo, G. (2002). *Hidraulica en Canales*. <https://es.scribd.com/document/386763365/hidraulica-de-canales-sotelo-avila-pdf>

Stair, Ralph., Reynolds, George., & Stair, R. M. (2010). *Principios de sistemas de información*. 706.

Viessman Warren, Lewis Gary L., & Knnap John W. (1989). *Introduction To Hydrology* (4ta Edition). <https://es.scribd.com/document/344734328/Introduction-to-Hydrology-by-Warren-Viessman>

Manual On Stream Gauging Volume I, Pub. L. No. 1044, 1 1 (2010).

https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=219

11. ANEXOS

11.1 Algoritmo principal de sensores HC-SR04 con pantalla OLED

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define SCREEN_RESET -1

#define TRIGGER_PIN_1 4
#define ECHO_PIN_1 5
#define TRIGGER_PIN_2 14
#define ECHO_PIN_2 12
#define TRIGGER_PIN_3 16
#define ECHO_PIN_3 17

#define NUM_READINGS 5 // Número de lecturas para el promedio

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
SCREEN_RESET);

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  pinMode(TRIGGER_PIN_1, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN_1, INPUT);
  pinMode(TRIGGER_PIN_2, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN_2, INPUT);
  pinMode(TRIGGER_PIN_3, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN_3, INPUT);
```

```

if(!display.begin(SSD1306_I2C, 0x3C)) {
    Serial.println(F("Error al inicializar la pantalla OLED"));
    while (1);
}

display.display(); // Inicializar con la pantalla en blanco
delay(2000);
display.clearDisplay();
}

void loop() {
    float distance_1 = getAverageDistance(TRIGGER_PIN_1, ECHO_PIN_1);
    float distance_2 = getAverageDistance(TRIGGER_PIN_2, ECHO_PIN_2);
    float distance_3 = getAverageDistance(TRIGGER_PIN_3, ECHO_PIN_3);
    float average_distance = (distance_1 + distance_2 + distance_3) / 3.0;
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(2);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
    display.setCursor(0,0);
    display.print(F("Promedio:"));
    display.setTextSize(3);
    display.setCursor(0,20);
    display.print(average_distance);
    display.setTextSize(1);
    display.setCursor(90,50);
    display.print(F("cm"));
    display.display();

    delay(1000); // Puedes ajustar este valor según sea necesario
}

```

```

}

float getAverageDistance(int trigger_pin, int echo_pin) {
    long duration = 0;
    float distance = 0;
    for (int i = 0; i < NUM_READINGS; i++) {
        digitalWrite(trigger_pin, LOW);
        delayMicroseconds(2);
        digitalWrite(trigger_pin, HIGH);
        delayMicroseconds(10);
        digitalWrite(trigger_pin, LOW);
        duration = pulseIn(echo_pin, HIGH);
        distance += duration * 0.034 / 2.0; // Convertir a centímetros
    }
    distance /= NUM_READINGS;
    return distance;
}

```

11.2 Algoritmo ThingSpeak

```
#include <WiFi.h>

#include <HTTPClient.h>

// Datos de conexión WiFi

const char* ssid = "TU_SSID";

const char* password = "TU_CLAVE_WIFI";

// API Key y nombre del campo en ThingSpeak

const String apiKey = "API_KEY";

const String fieldName = "field1"; // Cambiar a "field2", "field3", etc., según el campo deseado en
ThingSpeak

// URL de la API de ThingSpeak

const char* server = "api.thingspeak.com";

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  WiFi.begin(ssid, password);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {

    delay(1000);

    Serial.println("Connecting to WiFi...");

  }

  Serial.println("Connected to WiFi");

}

void loop() {

  // Valor de prueba para enviar a ThingSpeak (puedes reemplazarlo con cualquier valor que desees
  enviar)

  int valueToSend = 123;

  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {

    HTTPClient http;
```

```
// Construir la URL de la solicitud HTTP a ThinkSpeak
```

```
String url = "http://";  
url += server;  
url += "/update?api_key=";  
url += apiKey;  
url += "&";  
url += fieldName;  
url += "=";  
url += String(valueToSend);
```

```
Serial.print("Sending value to ThinkSpeak: ");  
Serial.println(valueToSend);  
http.begin(url);
```

```
// Enviar la solicitud HTTP GET a ThinkSpeak
```

```
int httpResponseCode = http.GET();  
  
if (httpResponseCode > 0) {  
  Serial.print("HTTP Response code: ");  
  Serial.println(httpResponseCode);  
} else {  
  Serial.print("Error in HTTP request. Error code: ");  
  Serial.println(httpResponseCode);  
}  
http.end();  
}
```

```
// Esperar un tiempo antes de enviar la siguiente medición
```

```
delay(5000); // Envío cada 5 segundos (se recomienda no enviar datos con una frecuencia menor a  
15 segundos) }
```

11.3 Algoritmo LoRa

```
#include <Wire.h>

#include <LoRa.h>

#include <Ultrasonic.h>

const int trigPin = 5; // Pin de trigger del sensor ultrasónico

const int echoPin = 4; // Pin de eco del sensor ultrasónico


const int loraCsPin = 18; // Pin CS para el módulo LoRa

const int loraResetPin = 14; // Pin de reset para el módulo LoRa

const int loraFreq = 915E6; // Frecuencia LoRa (puede cambiar según la región)


Ultrasonic ultrasonic(trigPin, echoPin);

int distancia;


void setup() {
  Serial.begin(115200);

  if (!LoRa.begin(loraFreq)) {
    Serial.println("Error inicializando el módulo LoRa. Verifica la conexión.");
    while (1);
  }
  LoRa.setPins(loraCsPin, loraResetPin, -1);
}

void loop() {
  // Medir la distancia con el sensor ultrasónico

  distancia = ultrasonic.read();

  // Enviar la distancia a través de LoRa

  enviarDatosLoRa(distancia);
```

```
delay(1000); // Esperar 1 segundo antes de la siguiente medición y envío
}

void enviarDatosLoRa(int data) {
    // Crear un paquete LoRa
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.print("Distancia: ");
    LoRa.print(data);
    LoRa.endPacket();

    Serial.println("Datos enviados por LoRa: Distancia - " + String(data) + " cm");
}
```

11.4 Algoritmo PHP (post-cli-data)

```
<?php

$servername = "localhost";
$username = "usuario";
$password = "contraseña";
$dbname = "saih";

// Crear la conexión
$conn = new mysqli($servername, $username, $password, $dbname);

// Verificar la conexión
if ($conn->connect_error) {
    die("Conexión fallida: " . $conn->connect_error);
}

// Obtener los datos enviados desde el sensor
$est = $_POST['est'];
$fecha = $_POST['fecha'];
$tirante = $_POST['tirante'];
$velocidad = $_POST['velocidad'];
$caudal = $_POST['caudal'];

// Preparar la consulta SQL para insertar los datos
$sql = "INSERT INTO datos (est, fecha, tirante, velocidad, caudal) VALUES ('$est', '$fecha', '$tirante', '$velocidad', '$caudal')";

// Ejecutar la consulta y verificar si fue exitosa
if ($conn->query($sql) === TRUE) {
    echo "Nuevo registro creado con éxito";
} else {
    echo "Error: " . $sql . "<br>" . $conn->error;
}
```

```
// Cerrar la conexión  
$conn->close();  
?>
```

11.5 Algoritmo WiFi

```
#include <WiFi.h> // Incluye la biblioteca WiFi para el ESP32

// Configuración de la red WiFi

const char* ssid = "TU_SSID";    // Reemplaza con el nombre de tu red WiFi

const char* password = "TU_PASSWORD"; // Reemplaza con la contraseña de tu red WiFi

// URL del servidor al que se enviarán los datos

const char* serverName = "http://departamento.hidraulica.umich.mx/tu_script.php";

// Variables para almacenar datos a enviar

int sensorData1 = 123; // Ejemplo de dato del sensor

float sensorData2 = 45.67; // Ejemplo de dato del sensor

void setup() {

    Serial.begin(115200); // Inicializa la comunicación serial

    connectToWiFi(); // Conecta el ESP32 a la red WiFi

}

void loop() {

    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) { // Verifica si está conectado a WiFi

        sendData(); // Envía los datos al servidor

    } else {

        Serial.println("No conectado a WiFi. Reintentando...");

        connectToWiFi(); // Intenta reconectar

    }

    delay(60000); // Espera 60 segundos antes de volver a enviar datos

}

void connectToWiFi() {

    WiFi.begin(ssid, password); // Inicia la conexión WiFi

    Serial.print("Conectando a ");

    Serial.print(ssid);

    int attempts = 0; // Contador de intentos de conexión
```

```

while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && attempts < 20) { // Intenta conectar
    delay(500);
    Serial.print(".");
    attempts++;
}
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    Serial.println("");
    Serial.println("Conectado a la red WiFi");
    Serial.print("Dirección IP: ");
    Serial.println(WiFi.localIP()); // Muestra la IP asignada
} else {
    Serial.println("");
    Serial.println("Fallo en la conexión WiFi");
}
}

void sendData() {
    WiFiClient client; // Crea un cliente WiFi
    if (client.connect(serverName, 80)) { // Conecta al servidor en el puerto 80
        String postData = "sensor1=" + String(sensorData1) + "&sensor2=" + String(sensorData2);
        // Envía la solicitud HTTP POST al servidor
        client.println("POST /tu_script.php HTTP/1.1");
        client.println("Host: departamento.hidraulica.umich.mx");
        client.println("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded");
        client.print("Content-Length: ");
        client.println(postData.length());
        client.println();
        client.println(postData);
        Serial.println("Datos enviados:");
    }
}

```

```
Serial.println(postData);  
  
// Espera la respuesta del servidor  
while (client.connected() || client.available()) {  
    if (client.available()) {  
        String response = client.readStringUntil('\r');  
        Serial.println(response);  
    }  
}  
  
client.stop(); // Cierra la conexión  
} else {  
    Serial.println("No se pudo conectar al servidor");  
}  
}
```

Oscar Antonio Cedeño Acosta Cedeño Acosta

SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA MEDICIÓN Y MONITOREO DE CAUDALES EN FLUJOS A SUPERFICIE LIBRE...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:522312275

Fecha de entrega

3 nov 2025, 11:27 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

3 nov 2025, 12:21 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA MEDICIÓN Y MONITOREO DE CAUDALES EN FLUJOS A SUPERFI....pdf

Tamaño del archivo

5.6 MB

126 páginas

21.193 palabras

120.048 caracteres

12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	
Título del trabajo	SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA MEDICIÓN Y MONITOREO DE CAUDALES EN FLUJOS A SUPERFICIE LIBRE BASADO EN SENSORES ELECTRÓNICOS DE BAJO COSTO	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	OSCAR ANTONIO CEDEÑO ACOSTA	oscar.cedeno@umich.mx
Director	CONSTANTINO DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ	dsanchez@umich.mx
Codirector	JOEL HERNÁNDEZ BEDOLLA	joel.hernandez@umich.mx
Coordinador del programa	SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE	quispe@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	no	
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	no	
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	OSCAR ANTONIO CEDEÑO ACOSTA
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 2 de noviembre de 2025