N° tesis: jcb

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

Presentado a

**LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

Para obtener el título de

**INGENIERO ELÉCTRÓNICO**

por

***Juan Francisco Hernández Cardona***

***SISTEMA DE NAVEGACIÓN ACUÁTICA PARA MICRO ROBOT LIMPIADOR***

Sustentado el 30 de junio de 2023 frente al jurado:

Composición del jurado

*-* *Asesor*: Dr. Johann F. Osma, Profesor Asociado, Universidad de Los Andes.

*-* *Jurados:* Diana Sotelo Briceño, Profesora Instructora, Universidad de Los Andes.

Contenido

[1 INTRODUCCIÓN 3](#_Toc138691420)

[2 OBJETIVOS 3](#_Toc138691421)

[2.1 Objetivo General 3](#_Toc138691422)

[2.2 Objetivos Específicos 3](#_Toc138691423)

[2.3 Alcance y productos finales 4](#_Toc138691424)

[3 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO 4](#_Toc138691425)

[4 MARCO CONCEPTUAL E HISTÓRICO 5](#_Toc138691426)

[4.1 Marco Conceptual 5](#_Toc138691427)

[4.2 Marco Histórico 6](#_Toc138691428)

[5 DEFINICION Y ESPECIFICACION DEL TRABAJO 6](#_Toc138691429)

[5.1 Definición 6](#_Toc138691430)

[5.2 Especificaciones 6](#_Toc138691431)

[6 TRABAJO REALIZADO 12](#_Toc138691432)

[6.1 Descripción del Resultado Final 13](#_Toc138691433)

[6.2 Trabajo computacional 15](#_Toc138691434)

[7 VALIDACIÓN DEL TRABAJO 15](#_Toc138691435)

[7.1 Metodología de prueba 15](#_Toc138691436)

[7.2 Validación de los resultados del trabajo 15](#_Toc138691437)

[8 CONCLUSIONES 16](#_Toc138691438)

[9 AGRADECIMIENTOS 17](#_Toc138691439)

[10 REFERENCIAS 17](#_Toc138691440)

[11 APENDICES 18](#_Toc138691441)

# INTRODUCCIÓN

En el documento actual se presentarán las especificaciones y la definición del proyecto, así como los métodos y resultados de las pruebas realizadas. En términos generales la iniciativa de este proyecto surge a partir de la necesidad de buscar una solución a la contaminación por metales pesados a cuerpos acuáticos debido al efecto negativo que está teniendo sobre la salud humana. Así entonces, para cumplir con el objetivo del proyecto se espera demostrar navegabilidad sobre una superficie acuática controlada.

El problema surge debido a la falta de dispositivos con la capacidad de navegar de forma autónoma, analizar la composición del cuerpo acuático y llegar a realizar un proceso de remoción de contaminantes sobre superficies acuáticas extensas. Por esto, el objetivo del proyecto es diseñar un sistema de navegación para un micro robot en el que, dentro de su sistema, se presenten funciones adicionales que impulsen la continuación del proyecto a futuro.

El proyecto planteado fue inspirado en el trabajo previo del Dr. Johann F. Osma en la universidad de California, en el que utilizó una plataforma de open source y seleccionó una variedad de sensores y componentes similares en función a los que se utilizaron en este proyecto. En contraste, existen algunas diferencias entre los componentes seleccionados para ambos proyectos. A pesar de estas diferencias, ambos proyectos comparten el uso de un biosensor de lacasa para la detección de un cambio en la composición del agua, así como el uso de motores para el movimiento del robot.

Este documento presenta doce secciones; **introducción**, en la que se presenta la contextualización del proyecto y la problemática asociada; **objetivos**, en la cual se exponen las finalidades generales y específicas del proyecto; **descripción de la problemática y justificación del trabajo**, donde se estudia a detalle tanto la problemática relacionada con la contaminación de cuerpos acuáticos y sus afecciones a la salud, como los motivos para la realización del proyecto; **marco conceptual e histórico**, en el cual se presentan los conceptos generales para el entendimiento de los proceso llevados a cabo en el trabajo y proyectos realizados anteriormente; **definición y especificación del trabajo**, donde se explican las limitaciones y restricciones del trabajo, pero también las funcionalidades y especificaciones del sistema; **trabajo realizado**, donde se presentan las metodologías usadas para llevar a cabo el proyecto, funcionamiento general del sistema, resultado final y trabajo computacional; **validación del trabajo**, donde se exhiben los análisis de los resultados obtenidos y posibles conclusiones a partir de estos; **conclusiones**, donde se expresa si efectivamente se cumplieron los objetivos planteados y los posibles arreglos o necesidades para un trabajo futuro; **agradecimientos**, en esta sección se expresan los agradecimientos relacionados al desarrollo del proyecto; **referencias**, donde se listan todas las referencias y bibliografías usadas en este proyecto; **apéndices**, donde se anexan los resultados obtenidos durante las pruebas y demostración final del sistema.

# OBJETIVOS

## Objetivo General

Diseñar un sistema de navegación para un micro robot limpiador que permita conocer su trayectoria, lo movilice de forma autónoma y permita el uso y lectura de biosensores.

## Objetivos Específicos

* Llevar a cabo la selección y caracterización tanto de motores como de sensores seleccionados para el desarrollo del proyecto. Dentro de este objetivo se espera realizar las pruebas que convengan para entender el funcionamiento de sensores y actuadores con el fin de obtener el mayor rendimiento sustentado en gráficas y tomas de datos que validen este funcionamiento.
* Realizar la implementación de código en la IDE seleccionada capaz de operar y realizar la lectura de los componentes inmersos en el sistema para concretar un funcionamiento autónomo del mismo. Esta implementación se realizará por medio de Arduino IDE, que cuenta con múltiples librerías que permiten la correcta aplicación de los componentes.
* Implementar la conexión entre el robot y un dispositivo móvil con el fin de darle seguimiento a los datos leídos. Se espera utilizar conexión por medio de wifi que permita enviar un archivo HTML a un servidor local, al cual el usuario se conectará y mediante este podrá observar trayectoria, ángulo actual con respecto al norte, ángulo deseado, potencia de motores y lectura de biosensores.

## Alcance y productos finales

En la propuesta planteada para este proyecto se partió del objetivo principal de demostrar navegabilidad y conexión mediante wifi para adquirir los datos relacionados al sistema, así como controlar el robot mediante un dispositivo móvil; sin embargo, en el producto final se obtuvo un sistema ligeramente diferente. El sistema final demuestra navegabilidad sobre un entorno acuático controlado, conexión mediante wifi con lectura de datos y además control total sobre los biosensores para selección de parámetros y toma de datos. A pesar de esta actualización, no se logró implementar un control remoto del robot; debido a esto, el usuario tiene acceso a un robot totalmente independiente con la capacidad de brindar toda la información requerida para identificar los procesos que está llevando a cabo el sistema.

# DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

El problema central por el cual se planteó este proyecto está ligado a la contaminación de cuerpos hídricos, siguiendo el título, se partió de la inquietud que generaba la contaminación por metales pesados en estos cuerpos. Esta problemática se evidencia en la publicación del artículo de contaminación por metales pesados de la revista “Ingeniería Investigación y Desarrollo”; según esta, la contaminación ambiental es uno de los problemas más importantes del siglo XXI, la tasa de contaminación se estima en 2000 millones de metros cúbicos al día, lo cual hace evidente la crisis. En adición, se reporta la presencia de metales pesados y metaloides como el mercurio, arsénico, plomo, cadmio, zinc, níquel y cromo en hortalizas provenientes de las fuentes hídricas usadas para el riego y en alimentos de consumo frecuente de la población como peces, carnes y leche. Pero ¿Cómo nos afecta esta contaminación? Pues bien, en casos específicos como el cadmio, se observa que este presenta un tiempo de vida media en el riñón de hasta 30 años; esto, al igual que el sinnúmero de metales que contaminan el sistema del ser humano, puede generar daños irreversibles. [1]

Existen múltiples métodos de análisis de compuestos para llegar a identificar la presencia de estos metales o contaminantes en el agua. Por ejemplo, es posible denotar la espectrometría de absorción atómica, espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo, entre otros [2]. Además de los mencionados se presentan métodos de electroquímica, como el desarrollado por Crhistian Segura, en el cual diseñó un dispositivo conocido popularmente como potenciostato, que permite el uso de biosensores para el fin mencionado e identificar o analizar compuestos por medio de electroquímica. [3]

Con esto en mente, se esperaría eliminar esta contaminación por medio de múltiples métodos, como: filtración por membrana, electrodiálisis, osmosis inversa o nanofiltración, que solo podrían llegar a ser usados por medio de canales o tuberías. Aunque, estos métodos son los más conocidos, se ven limitados por la necesidad de tanques, contenedores o tuberías por donde circule el agua para su funcionamiento. Ahora bien, métodos como la precipitación química o por hidróxidos facilitan la limpieza de superficies acuáticas más extensas pues no se ven limitados por el almacenamiento de agua. [2]

No obstante, no existen mecanismos que posibiliten el acceso a cuerpos acuáticos de mayor tamaño, por lo tanto, no es posible aplicar los métodos factibles para las zonas acuáticas mencionadas. Así entonces, se presentó la idea de crear un robot como mecanismo de transporte con la capacidad de movilizarse a través de estos cuerpos de manera autónoma y llegar a cumplir el objetivo de eliminar la contaminación por metales pesados, es decir, es necesario diseñar un sistema de navegación que permita actualizar la trayectoria del mecanismo para movilizarlo a las zonas deseadas. Como se denota en la sección marco histórico, no existen proyectos de igual propósito en cuanto a limpieza de cuerpos acuáticos, por lo cual este proyecto se presenta como un precedente que permite impulsar proyectos de limpieza para mejorar la calidad del agua.

# MARCO CONCEPTUAL E HISTÓRICO

## Marco Conceptual

Para el desarrollo del trabajo presente fue necesario el uso de distintos protocolos de comunicación serial al estar trabajando con una plataforma de open source, en este caso, la tarjeta ESP8266 programada a través del IDE de Arduino lo cual significaría la necesidad de uso de puertos seriales [4]. Los protocolos se clasifican en dos ramas mayores.

**Sincrónicos:**

En este caso es indispensable tener pines de envío de datos y uno de reloj debido a que tanto el puerto transmisor, identificado como la fuente de la señal, como el puerto receptor, encargado de recibir y leer datos, deben sincronizarse para lograr interpretar correctamente la señal enviada, teniendo en cuenta que se trata de una señal digital. Esto quiere decir que al tener cambios de estado dentro de la señal sea posible identificarlos a partir de la separación de tiempos dada por la señal clock.

El protocolo sincrónico usado en este proyecto fue el I2C. En términos generales, este protocolo utiliza dos pines, un SDA que se reconoce como el pin de envío y recepción de datos y un SCL que se reconoce como el pin del reloj para la sincronización. Este protocolo se usa específicamente en la comunicación con el magnetómetro. [5]

**Asincrónicos:**

La principal diferencia entre los protocolos sincrónicos y asincrónicos se evidencia en el uso del pin reloj; en este tipo de protocolos es necesario establecer un baudaje o tasa de baudios, que es simplemente un indicador de unidades de señal por unidad de tiempo, tanto en el puerto de envío como en el puerto de recepción pues no se presenta una señal adicional que identifique los cambios de estado de la señal enviada, siendo sincronizados manualmente. Lo anterior, hace que no sea posible utilizar tasas altas de envío de datos pero se trata de un protocolo sin un alto procesamiento al tener que leer una única señal proveniente del pin de envío de datos y no dos como se da en los protocolos sincrónicos. Para propósitos de este proyecto se utilizó el protocolo asincrónico UART [6], que únicamente requiere un pin Rx para recepción de datos y otro Tx para envío de datos. Este protocolo se usó para la comunicación con el potenciostato desarrollado por Crhistian Segura. [3]

Por otro lado, fue necesario el uso de pines PWM, que generan señales con su mismo nombre (PWM) a través de un microcontrolador que permite variar el “*duty cicle”*  de una señal digital; esto quiere decir que se varía el porcentaje de periodo en el cual la señal se encuentra en alto y en bajo. En concreto, se utilizó este tipo de señal para el control de los motores DC, siendo esta señal interpretada por un puente H para definir o limitar la corriente de los motores y así aumentar o disminuir su velocidad. [7]

Por último, el análisis por electroquímica, fundamental para analizar e identificar contaminantes en cuerpos acuáticos, se basa en un potenciostato, dispositivo que aplica un voltaje a una celda electroquímica (biosensor) mientras realiza la lectura de la corriente en la misma celda. El potenciostato es capaz de realizar distintas técnicas para toma de datos, en este caso se llevó a cabo la técnica de voltamperometría cíclica (CV), donde se varía cíclicamente el voltaje aplicado a la celda electroquímica, con el fin de identificar puntos de oxidación y reducción en la corriente del compuesto o solución a analizar. [8]

## Marco Histórico

El proyecto planteado para el desarrollo de este informe fue inspirado en el trabajo previo del Dr. Johann F. Osma en la universidad de California. En su proyecto, el Dr. Osma utilizó una plataforma de open source diferente y seleccionó una variedad de sensores y componentes similares en función a los que se utilizaron en este proyecto. Adicionalmente, ambos proyectos comparten el uso de un biosensor de lacasa para la detección de un cambio en la composición del agua, así como el uso de motores para el movimiento del robot. Además de este proyecto, no se encontraron trabajos de igual propósito a nivel de limpieza de cuerpos acuáticos.

# DEFINICION Y ESPECIFICACION DEL TRABAJO

## Definición

Este proyecto está realizado para lograr una remoción por contaminación de agua a nivel químico, realizado estrictamente para la movilización del sistema completo y la correcta lectura de las soluciones a analizar para eliminar las propiedades nocivas en ellas. Es debido a esto que este proyecto se basa netamente en funcionamiento de motores, en cuanto a la movilización sobre el agua, posicionamiento en el espacio, con respecto a la lectura del magnetómetro y el sistema de control a diseñar para variar la trayectoria del robot, y lectura de datos por medio del potenciostato y biosensores para ser incluidos como factores de decisión del sistema.

Este proyecto permite a futuros interesados implementar el método de descontaminación o remoción necesario para el objetivo deseado sin llegarse a preocupar por factores de movilidad o compatibilidad con el microcontrolador escogido; esta facilidad se traduce en un aumento en la factibilidad del proyecto, y un gran avance en la creación de ideas y mejoras para alcanzar un proceso de descontaminación a mayor escala, como la miniaturización del sistema o su aplicación sobre cuerpos acuáticos donde se presenten factores externos no controlados.

## Especificaciones

El proyecto se realizó con la restricción de funcionar en un entorno acuático controlado, en otras palabras, todas las pruebas realizadas no tienen en cuenta posibles fuerzas externas dentro del entorno, como las corrientes generadas en el mar o producidas por agentes móviles como barcos, lanchas, entre otros. Además, se hizo énfasis en la capacidad de llegar a la trayectoria deseada realizando pruebas sobre superficies relativamente cortas y variando su punto de partida inicial, dándose sobre recorridos de 1.20 metros como máximo.

Así entonces, las funciones del sistema serán identificar su posición en el espacio, al realizar un proceso de tolerancia entre el ángulo medido y el ángulo deseado, para llegar a controlar su trayectoria a través de la variación de potencia de los motores, juntando las características necesarias para definir una navegación autónoma: posicionamiento y movilización, dándole sentido así al título del proyecto “*Sistema de navegación acuática para micro robot limpiador*”.

Por último, se incluyó la implementación de la librería del potenciostato y biosensores, creada inicialmente para Arduino, en un microcontrolador ESP8266 a nivel de lectura de datos y se comprobó exclusivamente el correcto funcionamiento del potenciostato para este microcontrolador. Esta decisión se limitó debido a que ampliar la investigación podía llegar a extender los tiempos del proyecto ante la necesidad de implementar la identificación y análisis de compuestos correctamente, debido a que sería necesario realizar pruebas de error, tolerancia y caracterización sobre compuestos para concretar el funcionamiento. Sin embargo, se dejó implementado el uso básico del potenciostato sobre el microcontrolador escogido para que en próximos proyectos se pueda utilizar sin dificultad alguna.

A partir de las especificaciones se utilizaron los siguientes componentes y materiales:

**Microcontrolador**

Esta herramienta es necesaria para procesar datos de manera autónoma, sin tener que estar conectado a un ordenador, y al mismo tiempo ser capaz de realizar tareas de control para gestionar los sensores, actuadores y otros elementos. Esta funcionalidad es fundamental para acceder al Internet de las cosas (IoT) y garantizar una mayor eficiencia en la ejecución de tareas permitiendo añadir más sensores o aplicaciones sin sufrir latencias en el funcionamiento final. [9]

Para este caso se buscaba un microcontrolador que contara con acceso a internet integrado debido a que al tener esta capacidad se aseguraba la optimización de este para nuestro sistema. Así entonces, quedó descartada la posibilidad de utilizar una placa Arduino (https://www.arduino.cc/) pues, aunque cuenta con la capacidad de pines para el desarrollo del proyecto no viene en presentaciones de bajo consumo con Wifi integrado, por ende, se optó por la gama de placas ESP que cuenta con Wifi integrado.

Al momento de escoger un microcontrolador la cantidad de pines y funcionalidades debe ser precisa con las necesidades del sistema, pues dentro de los planteamientos generales se espera gastar la menor cantidad de energía teniendo en cuenta que el robot se alimentará a través de una fuente no finita, dos baterías de 3.7 V conectadas en serie. Con esto en mente, se optó por la placa ESP8266, específicamente la placa desarrollada por la empresa LoLin: NodeMcu V3, que no presenta diferencias sustanciales con el NodeMcu convencional más allá de una reorganización de pines (se tomaron 2 pines reservados y se cambiaron por un acceso a GND y un pin de voltaje de entrada que además soporta una tensión mayor), más memoria flash y una aparente mejora en los procesos de envío y recepción de datos tanto en comunicación serial como en comunicación por medio de Wifi. [10]

Una pantalla de un video juego

Descripción generada automáticamente con confianza media

Ilustración 1. Placa NodeMcu V3 en posición vertical, conector USB en la parte inferior. [11]

Como se puede observar en las especificaciones de los pines, esta placa permite comunicación serial en protocolos I2C y UART, los cuales serán utilizados para la lectura del magnetómetro y los biosensores respectivamente, se dará mayor claridad respecto a estos protocolos en el momento en el que se traten las lecturas de los sensores mencionados. Además, es importante resaltar que se decidió utilizar Arduino IDE (https://www.arduino.cc/en/software) para la programación de la tarjeta debido a su versatilidad para manejar componentes con envío y recepción de datos, teniendo la posibilidad de manejar herramientas como plotter serial y monitor serial, al igual que el uso de distintas librerías compatibles con el NodeMcu V3; se comentará un poco más la importancia de este IDE en la subsección de trabajo computacional.

**Magnetómetro**

En el proceso de búsqueda de este sensor se presentaban múltiples modelos y proveedores que contaban con características muy similares entre sí; por esta razón se tomó la decisión de apuntar por el modelo más usado en el mercado: QMC5883L. Este modelo se escogió debido a la versatilidad y manejo de librerías con el que cuenta, teniendo como mayor atractivo su alto uso en proyectos de carácter ubicacional y su gran variedad de modelos de tarjetas que cuentan con todos los componentes necesarios para facilitar la conexión y comunicación con el sistema (GY-271). Se debía cumplir con las especificaciones de conexión que se presenta en el datasheet del módulo QMC5883 y que se observa a continuación.

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

Ilustración 2: esquema de conexiones móduloQMC5883.

Como se evidencia en la figura, el sensor se comunica a través del protocolo I2C, un protocolo de comunicación serial sincrónico, por lo cual es necesario incluir un pin adicional (SCL), además del pin de datos (SDA), para el manejo del reloj de ambos dispositivos, y sincronizar la transmisión y recepción de datos. Para este caso se tiene en cuenta la figura 1, en la que se pueden notar los usos comunes de los pines; se logra evidenciar el uso de los pines D1 y D2 como SCL y SDA respectivamente. Se evidenció la necesidad de buscar una librería para Arduino IDE que permitiera el uso del protocolo I2C a través de la placa NodeMcu V3. No fue un proceso laborioso, al contrario, encontrar una librería que permitiera esta conexión fue exitoso debido a que la librería que se usa típicamente en la comunicación de una placa Arduino es compatible con la placa NodeMcu y está optimizada para el protocolo I2C; esta fue Wire.h, y es posible encontrarla en el repositorio [12].

Ahora, mediante la búsqueda de la librería para el control del magnetómetro QMC5883L, fue posible identificar la observada en el repositorio [13], donde además se añaden ejemplos, y especificaciones del uso general y especifico del sensor asociadas a ella. Esta librería permite configurar una serie de parámetros consecuentes con las metodologías de prueba planteadas para el sensor, lo cual es un factor importante para su selección. Para caracterizar este sensor fue necesario realizar distintas pruebas con las configuraciones que se muestran en las tablas 1, 2, 3 y 4.

Tabla

Descripción generada automáticamente

Tabla 1. Modos de operación

Tabla

Descripción generada automáticamente

Tabla 2. Configuración Output Data Rate

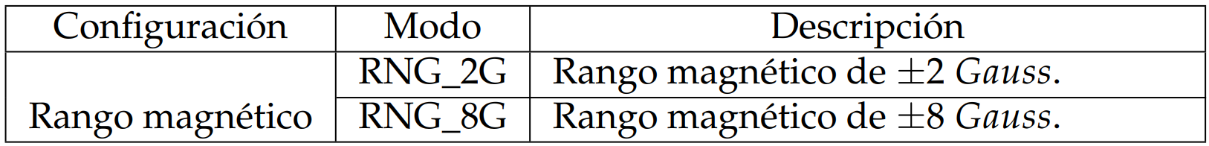


Tabla 3. Configuración de rango magnético

Tabla

Descripción generada automáticamente

Tabla 4. Relación con la tasa de salida del sensor

Una vez identificadas las configuraciones es necesario definir cada uno de los modos en los que se va a trabajar. Para empezar, es posible definir 2 de las configuraciones estipuladas a partir de las condiciones del trabajo; la primera configuración es “Operación”, en la cual se esperaría utilizar el modo continuo debido a que se requiere realizar lecturas constantemente de la posición del robot. Sin embargo, es posible que en un futuro se aplique la operación *parar la lectura* para disminuir el consumo de energía a través de la función en modo “Standby”.

La segunda configuración es “Rango magnético”, en la que se deben analizar los niveles de campo magnético que se van a medir, y escoger el más bajo posible para aumentar la precisión teniendo en cuenta que en este proyecto se va a medir netamente el campo magnético de la tierra, que según [14], tiene una magnitud de 30.000 nT en el Ecuador y 60.000nT en los polos, lo cual se representa como 0.3 G y 0.6 G respectivamente. En conclusión, se observa que las magnitudes se encuentran por debajo de ambos rangos de medición del sensor, por ende se escoge el rango más pequeño (RNG\_2G) para eliminar posibles ruidos o mediciones de mayor potencia que las que genera el campo magnético de la tierra.

Por último, la selección de las configuraciones que se observan en las tablas 2 y 4 se llevarán a cabo y analizarán en la sección validación del trabajo, donde además se especificarán las pruebas realizadas para este fin.

**Potenciostato**

Para el uso de este dispositivo se utilizó la librería desarrollada por Crhistian Segura y se aplicó al microcontrolador NodeMcu. Este dispositivo cuenta con una interfaz UART para la comunicación con el microcontrolador, debido a esto fue necesario usar la librería de UART para ESP8266 expuesta en el repositorio [15]. Para este caso se asignaron los puertos D7 y D8 como Rx y Tx respectivamente dentro del microcontrolador, y para la implementación en el NodeMcu se asignaron las siguientes funciones internas que permiten el uso y manejo de parámetros de lectura de datos del potenciostato.

|  |  |
| --- | --- |
| Nombre | Funcionamiento |
| setStartPoint() | Establece el punto central de los ciclos (0 por default). |
| setFirstVertex() | Establece el vértice superior del ciclo o valor máximo de voltaje por recorrido. |
| setSecondVertex() | Establece el vértice inferior del ciclo o valor mínimo de voltaje por recorrido. |
| setZeroCrossing() | Establece la cantidad de ciclos que se presentan por toma de datos; en otras palabras la cantidad de veces que se cruza por el “Zero”. |
| setSpeed() | Establece la velocidad en la que se cambia el voltaje a través de la toma de datos; entre más pequeño sea este valor mayor cantidad de datos se tendrán. |
| startMeasurement() | Inicia la toma de datos. |
| stopMeasurement() | Finaliza la toma de datos. |

Tabla 5. Funciones dentro de NodeMcu para potenciostato.

Este dispositivo se alimenta a través de una fuente de 3.3 V por lo cual puede ser alimentado directamente por el microcontrolador.

**Motores**

Los motores se controlaron definiendo los puertos D2 y D5 como motores derecho e izquierdo respectivamente, utilizando motores genéricos de 5 V alimentados a través del microcontrolador y un puente H que permitía el control de los motores a través de una señal PWM, por lo cual se asignaron los puertos mencionados anteriormente como salidas análogas en el código del IDE seleccionado. El puente H utilizado fue el MX1508, pues tenía corrientes que permitían el uso correcto de los motores y un tamaño menor al que los puente H del mercado más comunes, razón congruente con la necesidad de ocupar el menor espacio posible en el montaje final.

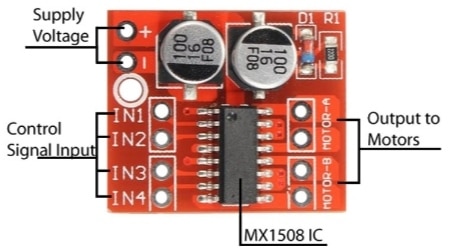


Ilustración 3. Esquema puente H MX1508. [16]

Para este caso no se necesitaron los cuatro pines de control que se observan en el esquema (IN1, IN2, IN3 & IN4) debido a que según las especificaciones del proyecto solo se requería avanzar en una misma dirección, por ende se conectaron las entradas IN2 & IN4 directamente al puerto GND del microcontrolador, presentándose como una asignación de potencia en 0% desde el microcontrolador sin ocupar pines adicionales de este.

# TRABAJO REALIZADO

.Diagrama

Descripción generada automáticamente

En el diagrama mostrado es posible notar el proceso que se llevó a cabo para realizar el trabajo, estableciendo restricciones y funciones del sistema que limitan todos los procesos dentro del trabajo para así ser implementados en el microcontrolador y realizar las respectivas pruebas para llegar a un producto final que contuviera todos los códigos y correcciones realizadas.

## Descripción del Resultado Final

El producto final se presenta como un robot, representado en el esquema de la ilustración 4, el cual consta de un magnetómetro, un potenciostato, dos biosensores, un relay de estado sólido, dos baterías en serie, un regulador de voltaje a 5 V, un puente H y dos motores de 5 V.

En lo que respecta al objetivo planteado *demostrar navegabilidad*, el robot es capaz de controlar la trayectoria al comparar el ángulo medido respecto al norte, por el magnetómetro, con el ángulo deseado respecto al norte establecido en el “arranque” o “boot” del sistema. A partir de la diferencia entre ambos se varía la potencia de los motores; primero, si se presenta el caso en el que el ángulo medido es mayor al ángulo deseado, el sistema de control decide que es necesario girar a la izquierda, cambiando la potencia del motor izquierdo a 0% y disminuyendo en un pequeño porcentaje la potencia del motor derecho notando un cambio en la trayectoria del robot; segundo, cuando se presenta el caso en el que el ángulo medido es menor al ángulo deseado, el sistema decide que se debe girar a la derecha, cambiando la potencia del motor derecho a 0% y disminuyendo en un pequeño porcentaje la potencia del motor izquierdo notando un cambio en la trayectoria del robot; por último, si no se presenta ninguno de estos casos el sistema de control está dispuesto para mantener los motores a un mismo porcentaje de potencia para continuar con la trayectoria actual.

Además, en un caso ideal, el robot debería variar igualmente su dirección a partir de las mediciones realizadas por biosensores y la diferencia entre ambos de igual forma como se comentó para el ángulo deseado y el medido; para propósitos de este proyecto se simuló el uso del potenciostato debido a falta de caracterización y evaluación de tolerancia entre ambos biosensores, pero se implementó el código necesario para llevarse a cabo las pruebas acordes para su uso en un futuro.

Imagen que contiene interior, tabla, pastel, pequeño

Descripción generada automáticamente

Ilustración 4: Montaje final del micro robot.

El funcionamiento del robot se presenta en el siguiente diagrama de flujo:

Diagrama

Descripción generada automáticamente

## Trabajo computacional

Se utilizó el IDE de Arduino para el desarrollo de código y programación del microcontrolador NodeMcu debido a la facilidad de uso de librerías en el IDE, sobre todo para tarjetas basadas en ESP8266. Para el desarrollo de gráficas se utilizó la herramienta Matlab debido a la practicidad y versatilidad que presentan sus herramientas para manejo de datos y diagramas, de tal forma que cumplan con los estándares establecidos para un proyecto de este carácter.

Ahora bien, dentro de los códigos relacionados se utilizaron distintas librerías que permitieron llevar a cabo el proyecto, por ejemplo, la utilizada para la comunicación entre el potenciostato y el microcontrolador por medio del protocolo UART; para ello se utilizó el repositorio [15]. Además, se utilizó el repositorio [13], que permitió el control del magnetómetro como se mencionó anteriormente.

Por último, fue necesario añadir el tipo de placa al IDE, que para la NodeMcu se trata de la placa "*NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module)*". Para llevar a cabo este proceso se instaló el paquete *json* que se muestra en [17] para seleccionar la placa mencionada, en la herramienta gestor de placas, para compilar de manera adecuada el código en desarrollo. Adicionalmente, el paquete instalado cuenta con funciones internas para el uso especializado de la tarjeta, como el manejo del módulo wifi incluido; esta función fue de gran ayuda a la hora de añadir la comunicación con el usuario o dispositivo móvil por wifi, al producto final.

# VALIDACIÓN DEL TRABAJO

## Metodología de prueba

Las metodologías usadas para las pruebas se pueden observar en la sección 6 Trabajo realizado.

En lo que respecta a la prueba realizada para la caracterización del magnetómetro y selección de parámetros, se optó por mantener estático el sensor mientras se realizaban tomas de datos durante 10 segundos. En primera instancia, se escogió este método debido a que se pretendía entender el comportamiento del sensor al medir una dirección en concreto constantemente y realizar el proceso en el sistema de manera efectiva; segundo, teniendo presente la carencia de un punto de referencia para encontrar un error en las mediciones, una prueba con el sensor estático facilitaba encontrar la desviación estándar, y así determinar el error en unidades directamente del sensor, grados (°) en este caso.

En el caso del potenciostato, la metodología de prueba estuvo orientada a obtener datos sin ruido y suavizados ante una gráfica, puesto que no se deseaba hacer énfasis en el error ni en la correcta identificación del compuesto, se utilizó agua para realizar tomas de datos sin comparación con los valores verdaderos de oxidación y reducción.

Por último, en las pruebas realizadas para el funcionamiento del programa o producto final se presentaron dificultades al momento de caracterizar los motores, pues las revoluciones por minuto eran demasiado altas. De modo que, se tomó la decisión de realizar pruebas netamente experimentales para llegar a los valores de PWM que mejor convinieran para el proyecto; así entonces, una vez realizado el control a través de la lectura del magnetómetro, por cada prueba se variaron los valores del PWM de cada motor hasta obtener una potencia relativamente equilibrada entre ambos motores.

## Validación de los resultados del trabajo

En el desarrollo de las pruebas realizadas para el magnetómetro se obtuvieron las figuras 5 y 15-29 que se observan en la sección presente y en la sección 11 Apéndices.

Mediante las pruebas, se deseaba encontrar la combinación de parámetros en la cual se obtuviera el error más bajo posible. Así entonces, se utilizó la desviación estándar, identificada como la raíz cuadrada de la varianza, como el indicador de error al mostrar la separación por unidad entre un dato y otro.

A partir de las pruebas, se logró identificar que los parámetros que se ajustaban a las especificaciones planteadas para la medición del magnetómetro fueron ODR\_200Hz y OSR\_512, sin tener en cuenta aquellos que se definieron de forma analítica, pues se evidenció mediante esta configuración el menor error posible, como se observa en la figura 5, se obtuvo un error de 0.42°.

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

Ilustración 5. ODR\_200Hz;OSR\_512

Las fuentes de error dentro de las mediciones de un magnetómetro se pueden relacionar con posibles campos magnéticos externos o inclinaciones indeseadas a la hora de tomar datos; sin embargo, en este caso no se presentaron como errores relevantes los ya mencionados al tener en cuenta que la tolerancia al cambio de dirección en el sistema planteado fue de 5°.

En el trabajo desarrollado para el potenciostato se llevaron a cabo múltiples pruebas, dentro de las cuales se seleccionaron 5 gráficas en las que se podía observar un avance más evidente entre cada ajuste realizado al código base, creado para la lectura de datos en un NodeMcu.

Para entrar en detalle, es posible observar las figuras 6-10 relacionadas a pruebas de potenciostato y biosensores; en la figura 6 es posible observar un patrón de ruido que se repetía en los mismos periodos de tiempo; debido a esto, se llevó a cabo la corrección dentro del código en la cual se desestimaban los valores que estuvieran alejados más de 0.2 unidades del inmediatamente anterior, con ello, se esperaba eliminar este patrón de error que se mostraba como mínimo 0.3 unidades alejado del valor inmediatamente anterior.

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Ilustración 6. CV prueba 1

De este modo, se obtuvo la prueba dos que se observa en la figura 7; el ruido desapareció pero aún era necesario eliminar los primeros ciclos que se encontraban en estado transitorio. Por ello, una vez realizado este ajuste fue posible observar lo denotado en la prueba 3 de la figura 8, donde se notan únicamente datos dentro del estado estacionario y sin ruido. Sin embargo, aún se deseaba suavizar las gráficas para obtener datos más precisos.

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Ilustración 7. CV prueba 2

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Ilustración 8. CV prueba 3

Por ende, se tomó la decisión de utilizar un filtro de ventana media obteniendo los resultados de las pruebas 4 y 5 en las figuras 9 y 10 respectivamente. Primero, en la prueba 4 se utilizó una muestra de agua con café, razón por la cual se observa efectivamente la aparición de un punto de reducción y de oxidación; para este caso, se disminuyó la velocidad hasta un valor de 0.002, por lo cual, se nota una gráfica sin ruido pero con un comportamiento “cuadrado” en exceso. Segundo, en la prueba 5 se utilizó de nuevo una muestra de agua sin ningún elemento adicional y una velocidad de 0.05, igual a la utilizada en las tres primeras pruebas; se notó un gráfico más suavizado y sin ningún tipo de ruido, obteniendo satisfactoriamente el resultado planteado desde un principio.

Gráfico

Descripción generada automáticamente

Ilustración 9. CV prueba 4

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Ilustración 10. CV prueba 5

En suma, es posible identificar como una fuente de error el estado físico de las celdas de los biosensores, debido a su alto uso en el laboratorio; esta fuente de error puede ser la culpable del patrón de ruido observado en el primer ajuste realizado a partir de las pruebas mencionadas. Adicionalmente, el filtro de ventana móvil permitió concluir con los ajustes al presentar un gráfico sin cambios drásticos entre cada dato, completando las especificaciones dadas para el correcto funcionamiento del potenciostato.

Adicionalmente, durante las pruebas de la fase final, como se observa en las figuras -, fue necesario apartar lo más lejos posible el magnetómetro de las baterías debido a una interferencia que se estaba generando en las mediciones de este sensor y por ende en el funcionamiento total del sistema; esta interferencia se evidenció durante el proceso de reconocimiento de fallas, debido a que no se estaba obteniendo el resultado esperado por parte del sistema. Así, se cambiaron las conexiones del magnetómetro, al observar que era allí donde se notaba un malfuncionamiento, notando que al alejar el magnetómetro de las baterías se eliminaba el error y concluyendo que la interferencia se daba al tener el magnetómetro suficientemente cercano a las baterías.

Por último, fue posible llevar a cabo las pruebas finales del sistema combinando el funcionamiento del robot con la transmisión de datos por wifi; las pruebas propuestas se realizaron sobre un contenedor (piscina inflable) de 1.2 metros, limitando así el funcionamiento del sistema a gran escala pero observando una corrección de trayectoria adecuada como se observa en las figuras -. Además, se observa la interfaz creada para observar los datos a través del dispositivo móvil o computador del usuario en la figura 11; en ella se nota el ángulo deseado, ángulo medido, medición de biosensor derecho e izquierdo, potencia de motores (PWM) y trayectoria actual del robot.



Ilustración 11: posición inicial de prueba final.

Imagen que contiene pequeño, naranja, foto, oscuro

Descripción generada automáticamente

Ilustración 12: control de trayectoria de prueba final.

Imagen que contiene naranja, foto, oscuro, colorido

Descripción generada automáticamente

Ilustración 13: llegada a posición objetivo de prueba final.

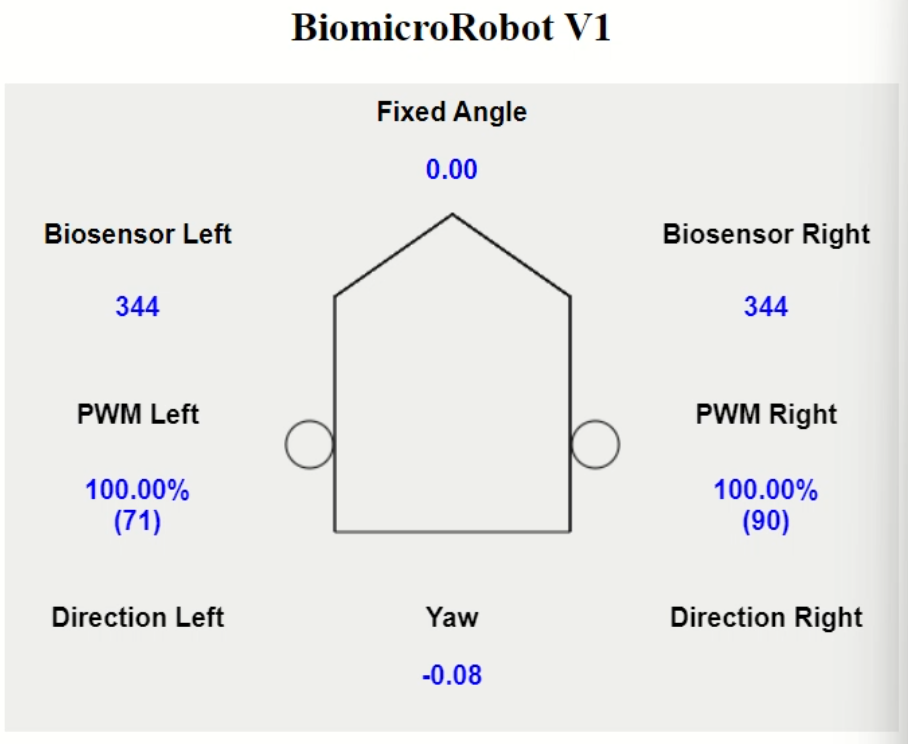


Ilustración 14: Interfaz HTML para transmisión por wifi.

Todos los anexos al trabajo, como tomas de datos, gráficas, códigos, páginas web con especificaciones y demás, se observan en el repositorio “Proyecto-de-grado---pregrado” del link: <https://github.com/JuanFHcardona/Proyecto-de-grado---pregrado>.

# CONCLUSIONES

En conclusión, es posible precipitarse a afirmar que se completaron satisfactoriamente los objetivos planteados en el trabajo, pues se logró diseñar un sistema de navegación para un micro robot limpiador que permitiera conocer su trayectoria, lo movilizara de manera independiente y permitiera el uso y lectura del potenciostato. A medida que se avanzó en el proyecto, se modificaron las metodologías y pruebas escogidas para los sensores, resultando adecuadas para el desarrollo del sistema final y obtener una solución congruente con lo esperado en el desarrollo del trabajo, sustentado en las secciones validación del trabajo y resultado final.

En términos generales, no se presentaron dificultades mayores para realizar el montaje final. Sin embargo, se presentó un problema, no planteado previamente, relacionado con la interferencia generada por las baterías hacia el magnetómetro y sus mediciones. Por lo anterior, fue necesario posicionar el magnetómetro lo más apartado posible de las baterías dentro del montaje y llevar a cabo un aislamiento ad hoc para que no se vieran afectadas las mediciones y el funcionamiento completo del robot. A modo de recomendación, para futuros interesados en el proyecto, se aconseja adelantar un estudio de blindaje magnético pues se espera reducir el tamaño del robot significativamente, de lo contrario, se presentarán fallas imprevistas en las mediciones del magnetómetro.

En definitiva, el trabajo realizado permitió utilizar los conceptos aprendidos durante el pregrado e incentivar la solución de problemas ante la falta de insumos relacionados al sistema propuesto, en este caso, el reto planteado se proyectó como pionero, logro evidente ante la imposibilidad de encontrar referencias sobre la limpieza de cuerpos extensos de agua independientes de un almacenamiento de soluciones contaminadas. Sin duda, el proceso de apropiación, planteamiento y desarrollo del proyecto rindió frutos en su fase final, pues logró demostrar un funcionamiento satisfactorio ante distintas condiciones y adversidades. Con todo, se espera que los arreglos y ajustes realizados durante las pruebas, así como las funcionalidades adicionales, sean de gran utilidad para próximos proyectos e iniciativas que permitan salvaguardar y mejorar la calidad del agua.

# AGRADECIMIENTOS

El trabajo realizado se lo agradezco a todas las personas que tuvieron impacto durante el proceso, ya sea emocional, conceptual o práctico. Se lo agradezco a mis papás, por estar siempre dispuestos a dar lo necesario para que no me faltara nada. Se lo agradezco a mi pareja, por estar presente ante todas mis dificultades emocionales y ser mi acompañante ante cualquier adversidad presentada durante este pregrado. Se lo agradezco a mi asesor por la confianza depositada, pues no dudó sobre mis capacidades para lograr el objetivo del trabajo, y a todas las personas con las que llegó a conectarme para que este proyecto fuera real. Se lo agradezco a todos los compañeros y amigos que estuvieron presentes para brindar ese apoyo necesario para poder triunfar y seguir adelante. Pero sobre todo, le doy gracias a mí mismo por trabajar para ser esa persona que siempre ha querido ser, que permitió que hoy sea posible dar un paso más en este proceso de crecimiento individual. Guardo con mucho cariño a todas las personas que hicieron parte de esta etapa, gracias…

# REFERENCIAS

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | *Y. C. Reyes, I. Vergara, O. E. Torres, M. Díaz-Lagos, and E. E. González, "Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria," Rev. Ingeniería Investigación y Desarrollo, vol. 16, no. 2, pp. 66-77, 2016.* |
| [2] | *S. E. Pabón, R. Benítez, R. A. Sarria y J. A. Gallo, "Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión," Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 14, no. 27, pp. 9-18, Mar. 2021. Disponible en: https://doi.org/10.31908/19098367.0001.* |
| [3] | *C. Segura Gómez, "A low-cost multi-technique portable electrochemical device for remote Biosensors," tesis de grado, Universidad de los Andes, 66 páginas, 2022.* |
| [4] | *Arduino IDE. (2022). Arduino Software (IDE). Disponible en: https://www.arduino.cc/en/software. (Fecha de acceso: 20 de junio 2023)* |
| [5] | *J. Mankar, C. Darode, K. Trivedi, M. Kanoje y P. Shahare, "Review of I2C protocol," International Journal of Research in Advent Technology, vol. 2, no. 1, 2014.* |
| [6] | *E. Peña y M. G. Legaspi, "UART: A hardware communication protocol understanding universal asynchronous receiver/transmitter," Visit Analog, vol. 54, no. 4, 2020.* |
| [7] | *P. Livinti y M. Ghandour, "PWM Control of a DC Motor Used to Drive a Conveyor Belt," Procedia Engineering, vol. 100, pp. 299-304, 2015. ISSN 1877-7058. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.371. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815003987.* |
| [8] | *L. Gallego García, "Miniaturization of a potentiostat," Universidad de los Andes, 2022.* |
| [9] | *P. Spasov, Microcontroller technology: the 68HC11. United States: Pretince-Hall, Inc., 1993, ISBN: 978-0-13-583568-5.* |
| [10] | *N. Dani, “COMPARACIÓN DE LAS PLACAS NodeMCU,” agosto de 2016. dirección: https://www.esploradores.com/comparacion-de-placas-nodemcu\_/ (Fecha de acceso: 31-03-2023).* |
| [11] | *“NodeMCU V3 ESP8266 Pinout and Configuration,” enero de 2020. dirección: https://cyberblogspot.com/nodemcu-v3-esp8266-pinout-and-configuration/ (Fecha de acceso: 31-03-2023).* |
| [12] | *I. Grokhotkov, “ESP8266 Arduino Core: Librerías,” 2017. dirección: https://esp8266- arduino-spanish.readthedocs.io/es/latest/libraries.html# (Fecha de acceso: 31-03-2023).* |
| [13] | *Y. Hong, Mechasolution QMC5883L Library, https://github.com/keepworking/ Mecha\_QMC5883L, 2018.* |
| [14] | *S. de Geomagnetismo, “El campo magnético terrestre (CMT)," dirección: https://armada.defensa.gob.es (Fecha de acceso: 31-03-2023).* |
| [15] | *P. Lérup, "espsoftwareserial," GitHub. [Online]. Disponible en: https://github.com/plerup/espsoftwareserial/. (Fecha de acceso: 23-06-2023).* |
| [16] | *WatElectronics, "MX1508 DC Motor Driver: Pin Configuration & Its Applications," WatElectronics.com. [En línea]. Disponible en: https://www.watelectronics.com/mx1508-dc-motor-driver/. (Fecha de acceso: 23-06-2023).* |
| [17] | *M. Gonzalez, "INSTALANDO LA PLACA NODEMCU EN EL SOFTWARE DE ARDUINO," Autodesk Instructables, 28-Jun-2023. [Online]. Available: https://www.instructables.com/INSTALANDO-LA-PLACA-NODEMCU-EN-EL-SOFTWARE-DE-ARDU/. (Fecha de acceso: 28-06-2023).* |

# APENDICES

Gráfico

Descripción generada automáticamente

Ilustración 15. ODR\_10Hz;OSR\_64

Gráfico

Descripción generada automáticamente

Ilustración 16. ODR\_10Hz;OSR\_128

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

Ilustración 17. ODR\_10Hz;OSR\_256

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente con confianza media

Ilustración 18. ODR\_10Hz;OSR\_512

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

Ilustración 19. ODR\_50Hz;OSR\_64

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

Ilustración 20. ODR\_50Hz;OSR\_128

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Ilustración 21. ODR\_50Hz;OSR\_256

Gráfico, Gráfico de barras

Descripción generada automáticamente

Ilustración 22. ODR\_50Hz;OSR\_512

Gráfico, Gráfico de barras, Histograma

Descripción generada automáticamente

Ilustración 23. ODR\_100Hz;OSR\_64

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

Ilustración 24. ODR\_100Hz;OSR\_128

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

Ilustración 25. ODR\_100Hz;OSR\_256

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

Ilustración 26. ODR\_100Hz;OSR\_512

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

Ilustración 27. ODR\_200Hz;OSR\_64

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

Ilustración 28. ODR\_200Hz;OSR\_128

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

Ilustración 29. ODR\_200Hz;OSR\_256