



Implementación de un sistema de rotación de electrodo de disco rotatorio para evaluar condiciones hidrodinámicas de fluidos en régimen de flujo laminar.

Diego Alejandro Nieves Castro.
Gustavo Hernando Pinzón Obiedo.

Universidad Antonio Nariño
Línea de Ingeniería en Control y Automatización Industrial
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia
2021

Implementación de un sistema de rotación de electrodo de disco rotatorio para evaluar condiciones hidrodinámicas de fluidos en régimen de flujo laminar.

Diego Alejandro Nieves Castro.
Gustavo Hernando Pinzón Obiedo.

Trabajo de grado, para optar el título de Ingenieros de Automatización y Control Industrial

Director
Ingeniero MSc. Carlos Arturo García Gómez,
Codirector
Ingeniero PhD. John Ríos

Universidad Antonio Nariño
Línea de Ingeniería en Control y Automatización Industrial
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia
2021

Nota de aceptación

El trabajo de grado titulado Implementación de un sistema de rotación de electrodo de disco rotatorio para evaluar condiciones hidrodinámicas de fluidos en régimen de flujo laminar,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de Ingenieros de Automatización y Control Industrial.

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C., noviembre 30, 2021.

Agradecimientos

Agradecemos a todas aquellas personas que estuvieron pendientes en nuestro trascender académico, especialmente a los ingenieros Carlos García y Jhon Ríos que nos asesoraron en el proceso de elaboración de nuestro proyecto investigativo.

También agradecemos a nuestros familiares, que nos alentaron y brindaron apoyo económico y emocional.

Resumen

Este proyecto permite conocer cuál es el comportamiento del electrodo de disco giratorio en condiciones hidrodinámicas, obteniendo así los resultados de su comportamiento. A lo largo de este trabajo se llevó a cabo el desarrollo de un prototipo funcional de un sistema de electrodos de disco rotatorio, a través del control de velocidad y manejo de corriente del orden de los nanoamperios para evaluar coeficientes de transferencia de masa por electro-disco rotatorio a través de condiciones de sobre potencial. Para lograr esto, este proyecto se realiza con un tipo de investigación descriptiva, con estudio exploratorio, porque pretende desarrollar un prototipo funcional de un sistema de electrodos de disco rotatorio, manejando microcontroladores, ruido eléctrico, por lo tanto, se trata de diseñar o replicar un fenómeno cuyas variables son manipuladas en condiciones controladas. El prototipo a estudio es realizado a través de grupos de estudio y control, de acuerdo con los lineamientos del método científico; con el cual se logra conseguir resultados, que serán reflejados mediante gráficas, señalando el desarrollo, la construcción, la elaboración y demás aspectos de cada proceso realizado para alcanzar la elaboración del prototipo.

Palabras claves: Electroquímica, Microcontroladores, Ruido eléctrico, Electrodo de disco giratorio.

Abstract

This project allows knowing what is the behavior of the rotating disk electrode under hydrodynamic conditions, thus obtaining the results of its behavior. Throughout this work, the development of a functional prototype of a system of rotating disk electrodes was carried out, through speed control and current handling of the order of nano amperes to evaluate mass transfer coefficients by electro- rotating disk through over potential conditions. To achieve this, this project is carried out with a type of descriptive research, with exploratory study, because it aims to develop a functional prototype of a rotating disk electrode system, handling microcontrollers, electrical noise, therefore, it is about designing or replicating a phenomenon whose variables are manipulated under controlled conditions. The prototype understudy is carried out through study and control groups, in accordance with the guidelines of the scientific method; With which results are achieved, which will be reflected through graphics, indicating the development, construction, preparation, and other aspects of each process carried out to achieve the development of the prototype.

Keywords: Electrochemistry, Microcontrollers, Electrical noise, Rotating disk electrode.

Contenido

Resumen.....	5
Abstract.....	6
1 Introducción.....	11
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
2 Marco Teórico.....	18
2.1 Sistema de electrodo de discos rotatorios.....	18
2.1.1 Principio de funcionamiento.....	18
2.1.2 Electrodo de referencia.....	19
2.1.3 Caracterización de materiales a partir del RDE.....	20
2.1.4 La Ecuación De Levich.....	20
2.1.5 Mecanismo de funcionamiento de un RDE.....	21
2.1.6 Vibración mecánica (estructura de soporte del motor).....	22
2.1.7 Reducción del ruido eléctrico producido por la rotación de motores.....	23
2.1.8 Mercurio como elemento conductor.....	25
2.1.9 Motores Eléctricos.....	26
2.2 Comunicación del sistema RDE con el PC.....	27
2.2.1 Microcontrolador.....	27
2.2.2 Señales de voltaje y corriente.....	28
2.2.3 Frecuencia de muestreo.....	30
3 Desarrollo metodológico del proyecto.....	32
3.1 Fase 1 Análisis del sistema de electrodos de disco rotatorio.....	32

3.1.1	Diseño del sistema basado en bibliografía consultada.....	32
3.1.2	Análisis de costos en la elaboración del sistema	33
3.2	Fase 2 Planeación y prototipado del sistema de electrodos de disco rotatorio	33
3.2.1	Materiales a utilizar basado en el diseño establecido.	34
3.3	Implementación del sistema de electrodos de disco rotatorio.....	38
3.3.1	Programación de los dispositivos Rasperry y Arduino.....	38
3.4	Validación de resultados con el prototipo propuesto.....	40
3.5	Código de programación del voltaje estático.....	47
3.6	Código de programación del voltaje automático	48
3.6.1	Desarrollo de las pruebas.....	50
4	Análisis de resultados	52
5	Conclusiones.....	59
6	Bibliografía	61
7	Anexos	63

Lista de Figuras

Figura 1 Composición de un equipo de electrodos rotatorios.....	19
Figura 2 Electrodo de referencia, trabajo y auxiliar.....	21
Figura 3 Muestras de reducción del ruido.....	24
Figura 4 Mercurio	25
Figura 5 Motores brushless vs motores brushed.....	26
Figura 6 sistema de comunicación.....	28
Figura 7 Señales.....	30
Figura 8 Movimientos armónicos	29
Figura 9 Mercotac 110.....	38
Figura 10 Conexión del variador de velocidad.....	42
Figura 11 Conexiones del encoder y Arduino	45
Figura 12 Conexión del sistema para salida de voltajes	46
Figura 13 Vista superior del prototipo	49
Figura 14 Vista frontal del prototipo	49
Figura 15 Curva de polarización del ramal catódico	56
Figura 16 Linealidad de la ecuación de Levich	58

Listado de Tablas

Tabla 1 Valor de las frecuencias y ciclos para programar en Matlab	39
Tabla 2 Valores medidos a 100 RPM	52
Tabla 3 Valores medidos a 150 RPM	53
Tabla 4 Valores medidos a 200 RPM	54
Tabla 5 Valores medidos a 263 RPM	54
Tabla 6 Valores medidos a 315 RPM	55
Tabla 7 Tabla de resultados por RPM.....	56

Listado de Anexos

Anexo 1 Código de programación del encoder	63
Anexo 2 Manual de uso	66

1 Introducción

La degradación y la corrosión del material afectan en gran medida la vida útil de los componentes. Para mejorar la durabilidad de estos componentes y optimizar su ciclo de vida, se necesitan soluciones para aminorar y proteger de la corrosión. Cuando diversos materiales se corroen bajo diferentes procesos industriales y/o fisicoquímicos, una empresa sufre afectaciones económicas y productivas perturbando diferentes tipos de procesos, y ocasionando reprocesos o pérdidas de productos o servicios [1].

La caracterización de sistemas electroquímicos es ampliamente utilizada en un gran número de aplicaciones, como las tecnologías DC (corriente continua) y AC (corriente alterna), que a su vez se utilizan en sistemas de acero-hormigón y en la investigación de motores actuadores de tres capas, entre otras [1].

La Universidad Antonio Nariño cuenta con varios laboratorios, como los de Mecánica, Química, Neumática, Electrónica y Corrosión, estos laboratorios cuentan con diversos equipos prácticos, aunque se enfocará únicamente en el laboratorio de corrosión. El Laboratorio de Corrosión de la Universidad Antonio Nariño posee un equipo dedicado a recolectar datos sobre la corrosión de materiales. Uno de los dispositivos utilizados para este propósito se llama Autolab/PGSTAT302N el cual es un potencióstato/galvanostato modular de alta potencia con una corriente máxima de 2 A y una tensión de trabajo de 30 V (basado en la necesidad existente en el laboratorio de corrosión de la Universidad Antonio Nariño, sede sur, Bogotá) [2].

Bajo las diferentes metodologías, las sondas duales, se utilizan para fines generales, como medición y viscosidad; adicional a esto proporciona una alta impedancia acústica, lo que lo convierte en el acoplamiento preferido para superficies rugosas, y para otro tipo de mediciones. Sin embargo, estas mediciones se quedan cortas para determinar todos los factores que se deben contemplar a nivel industrial [3].

Para expresar la influencia y el cambio del material en las condiciones dinámicas de fluidos, se requiere un accesorio especial, llamado RDE(Electrodo de Disco Rotatorio por sus siglas en ingles Rotatory Disk Electrode), que en palabras más claras, se trata de un electrodo de disco giratorio, utilizado para la medición y que permiten realizar mediciones dinámicas de fluido, que requieren alta velocidad y bajo nivel de ruido, permitiendo que su velocidad se pueda cambiar continuamente entre 100 y 10,000 rpm con una resolución de 1 rpm, lo que permite que las condiciones del fluido roten [4].

Hoy en día, con la ayuda de estos equipos, se pueden determinar algunas características de los materiales, entre ellas cambios de corriente que es determinado a partir de la curva de potencial, escaneando el potencial de los electrodos positivo y negativo; la ecuación de Levich se utilizará para derivar la variación de los procesos de cátodo y ánodo dependiendo de la convención de I_Q bajo la corriente límite $|I_L|$ [1].

A partir de las necesidades del grupo de investigación REM (Research Energy and Materials), se realizó la cotización del equipo como el AUTOLAB.RDE, para analizar la posible adquisición del equipo, sin embargo, se obtuvo que solo incluyendo variadores de velocidad y ejes y clavijas y excluyendo soportes, varillas y electrodos, es aproximadamente de US \$ 9,914 antes de IVA. Esto permitió obtener el diseño y la elaboración de un dispositivo con características similares pero que no conduzca un sobrecosto para la universidad, y que además permita al laboratorio de corrosión realizar caracterización de materiales en condiciones de dinámicas de fluido [5].

El prototipo propuesto ayudará al aprovechamiento de recursos locales, siendo de fácil adquisición monetaria, y de óptimo desarrollo para su estructuración física, además, permitirá que otros proyectos de la universidad Antonio Nariño realicen prácticas o mejoras respecto a su funcionamiento [4].

1.1 Planteamiento del problema

En la universidad Antonio Nariño de la sede sur el laboratorio de corrosión cuenta con un equipo para la evaluación del comportamiento de materiales mediante técnicas electroquímicas, sin embargo, no se dispone de un dispositivo para evaluar el comportamiento en condiciones electrodinámicas [2].

Se busca obtener una alternativa asequible y aplicada a las mediciones de corrosión en diferentes tipos de materiales, para garantizar su debida aplicación y mejorar los procesos de enseñanza, los cuales podrían tener un proceso de mejora continua a través de trabajos de grado futuros, y a su vez, mejorando el desarrollo de actividades en el laboratorio de corrosión de la Universidad Antonio Nariño para este tipo de mediciones [2].

El proyecto se basa en la implementación y conectividad de un sistema de rotación de electrodo de disco rotatorio para evaluar condiciones hidrodinámicas de fluidos en régimen de flujo laminar adaptado a un equipo del laboratorio de corrosión llamado AUTOLAB y buscando la interconexión de estos dos sistemas [2].

El desarrollo de este tipo de prototipos es poco recurrente ya que se tiende a pensar que puede llegar a tener un valor bastante alto, por lo cual se desestima la idea; es por eso que mediante la necesidad del laboratorio de corrosión de la universidad Antonio Nariño, sede sur; adicionando que este sistema de rotación de electrodo de disco rotatorio para evaluar condiciones hidrodinámicas de fluidos en régimen de flujo laminar, permitirá realizar diferentes tipos de pruebas mediante la rotación del electrodo en un sistema de fluidos [5].

Es por tal razón que surge el planteamiento del problema a través de la siguiente pregunta:

¿Es posible desarrollar un prototipo funcional que permita emular el comportamiento de un electrodo de disco rotatorio y que a su vez sea de bajo costo?

El estudio de la elaboración de este proyecto pretende desde una planeación e investigación abordar esta problemática, llevándola a la creación de un prototipo, que cumpla las mediciones que se pretenden, claro está de una forma limitada, puesto que la implementación de esta llegara a tener diferentes tipos de limitantes por la creación básica, dando como oportunidad de mejora para futuras investigaciones, la calibración del equipo asegurando la precisión en la mediciones, y a su vez dejándola como un proyecto abierto a la mejora continua por cada uno de los futuros grupos investigadores o alumnado de la Universidad Antonio Nariño [2].

1.2 Justificación

La realización del proyecto es razonable en la solución de una herramienta que permite al laboratorio de corrosión de la sede sur de Antonio Nariño en Bogotá medir materiales en condiciones dinámicas de fluido, pues el laboratorio ya cuenta con equipos de medición en condiciones estáticas, se produjo un prototipo que demostró la operación del electrodo rotatorio, el costo es menor que el equipo comercial, y se utilizó el laboratorio de corrosión para ajustar de acuerdo a las necesidades de la comunidad científica de la UAN, el costo de implementación es bajo, debido a que el costo de un equipo para realizar esta actividad es alto, por lo tanto, el menor costo de implementación tiene un gran impacto monetario en sus funciones [2].

Permitiendo al laboratorio y el equipo de investigación REM realizar investigación entorno a condiciones de materiales entorno a condiciones dinámicas de fluidos.

En la actualidad, el laboratorio de corrosión es utilizado por facultades y grupos de investigación (cuales facultades y cuales grupos de investigación - referenciarlos), por lo que este proyecto es adecuado para resolver problemas multidisciplinarios que tienen un mayor impacto en la comunidad investigadora [2].

Pese a que el dispositivo de fabricación propia, no contará con la calibración apropiada para realizar tareas de investigación, donde la precisión sea significativa, se considera que el resultado del prototipo, permitirá que otros estudiantes y miembros del grupo de investigación REM puedan mejorar el producto y alcanzar un equipo funcional y calibrado con estándares internacionales y bajo normativa y guía técnicas aplicadas a este tipo de elementos de laboratorio [1].

Uno de los principales retos del proyecto, corresponde a lograr un contacto eléctrico entre el eje del motor y el electrodo de medición, dado que las corrientes a medir son muy bajas (Micro amperica), y además, como se sabe, los motores producen ruido eléctrico, lo que

ocasiona errores en las medidas, por tal razón, se propone un mecanismo de contacto eléctrico basado en mercurio “Mercotac” [6], también se seleccionan los microcontroladores como los son el Arduino [7] y la Raspberry [8], donde se pueden configurar, las velocidades de los motores, diferentes tipos de corrientes, entre otros.

También es importante señalar que la implementación de este proyecto permitirá realizar otros proyectos enfocados a la evaluación de materiales utilizando el prototipo desarrollado, permitiendo evaluar el proceso de control de calidad de transmisión y determinar los coeficientes de difusión de especies relacionadas, y procesos de docencia para una mayor explicación al alumnado por parte del cuerpo docente [2].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo funcional de un sistema de electrodos de disco rotatorio, a través del control de velocidad y manejo de corriente del orden de los nanoamperes para evaluar coeficientes de transferencia de masa por electro-disco rotatorio a través de condiciones de sobre potencial.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar la consulta de los diversos métodos de contacto eléctrico para un motor DC, más específicamente del uso de mercurio como elemento conductor en el eje, que harán parte del sistema de contactos eléctricos de los electrodos y disminuirán el ruido eléctrico generado en la rotación.
- Desarrollar la estructura física, eléctrica y de comunicación del sistema de disco rotatorio con un PC, que permita la disminución de la vibración, el ruido eléctrico y el error de posicionamiento de los electrodos con el sistema.
- Diseñar y construir un mecanismo eléctrico/mecánico, que incluya un sistema de control de velocidad para un motor DC de bajo ruido y una estructura física robusta, la cual permita estabilizar la variación del eje de rotación con los electrodos.
- Evaluar la construcción y las condiciones mecánicas y eléctricas que debe cumplir el prototipo de sistema de disco rotatorio construido.

2 Marco Teórico

2.1 Sistema de electrodo de discos rotatorios

2.1.1 Principio de funcionamiento

La transmisión o convertidor de frecuencia es un sistema ubicado entre la fuente de alimentación y el motor eléctrico. Se utilizan para regular la velocidad de los motores de corriente alterna (CA) [9].

Con sus abreviaturas en inglés, se suele llamar al convertidor de frecuencia VFD, que significa unidad de frecuencia variable, que literalmente significa "unidad / regulador de frecuencia variable". Sin embargo, existen otros significados en el mercado, como VSD (Variable Speed Drive o Regulador de Velocidad Variable) o ASD (Variable Speed Drive, llamado "Variable Speed Drive" en español) [9].

El inversor ajusta la frecuencia de la energía eléctrica que recibe el motor, y le proporciona la energía requerida en la mayor medida posible, evitando así pérdidas de energía y optimizando el consumo [9].

La función del convertidor de frecuencia es ajustar la velocidad del motor, cambiando así el flujo de aire, la presión y la energía eléctrica. Debido a la llamada "ley de proporcionalidad", al cambiar los rpm (revoluciones por minuto) del motor, se cambia el caudal: lo más interesante es que al reducir esta velocidad en un 20%, el caudal será reducido en otro 20%, pero el consumo de energía se reducirá. Reducir hasta en un 50% [9].

2.1.2 Electrodo de referencia

La técnica de Electrodo de disco anillo rotatorio es un sistema de dos electrodos, muy utilizado en diversas reacciones en las que el producto de reacción es electro-activo, como es el caso de la reacción de reducción de oxígeno. El dispositivo, en general, consiste de un disco de material conductor y un anillo concéntrico a este, hecho también de un material conductor, separados entre sí por un material aislante [1].

Este tipo de electrodo consta de una disposición concéntrica de tres partes: un electrodo central en forma de disco, un segundo electrodo en forma de anillo metálico inerte y un material aislante entre los dos. El anillo y el disco están en el mismo plano y son eléctricamente independientes [10].

Contando solo con un disco, no es posible detectar productos de reacción, ya que dichos productos son eliminados continuamente de la superficie de reacción debido al flujo convectivo que se crea al rotar el electrodo. En estas condiciones, si la velocidad de rotación es suficientemente grande comparada con la velocidad de barrido de la voltamperometría, se obtiene solo la contribución correspondiente al proceso que sufre el reactivo en unas condiciones en las que el proceso de transporte de masa está controlado por la difusión [10].

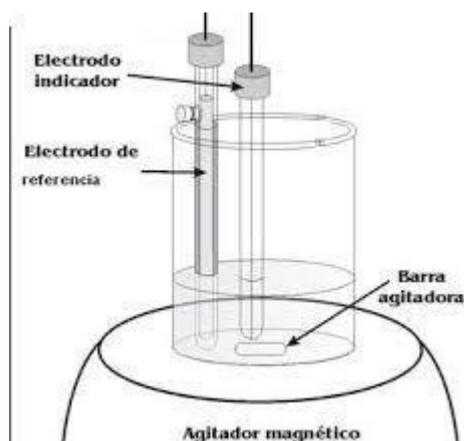


Figura 1 Composición de un equipo de electrodos rotatorios.
Fuente: [9]

2.1.3 Caracterización de materiales a partir del RDE.

El RDE es una herramienta importante para caracterizar los tipos básicos del electrocatalisis utilizado en las pilas de combustible. Por ejemplo, en una celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM), la reducción de oxígeno molecular en el cátodo generalmente se mejora mediante un electrocatalizador que contiene nanopartículas de platino. Cuando se usa un electrocatalizador para reducir el oxígeno, se produce un subproducto no deseado y nocivo de peróxido de hidrógeno [11].

El "conjunto experimental" RRDE ha sido utilizado para la exploración de electrocatalizadores y generar peróxidos. En este contexto, el disco se recubre con una capa delgada que lleva un electrocatalizador y el electrodo de disco se ajusta al potencial de reducción de oxígeno [11].

2.1.4 La Ecuación De Levich

La famosa ecuación de Levich se refiere a la expresión de la densidad de corriente límite en RDE en función de la velocidad del electrodo y la concentración de reactivo. Para obtenerlo se propuso la segunda ley de Fick, la cual proporciona una ecuación de concentración de reactivo variable en el tiempo para la difusión y la convección en estado estable. Esta corriente estará limitada por la transferencia de masa y responderá a la siguiente ecuación [12]:

$$i_D = 0.627nFD^{1/2}m^{2/3}t^{1/6}C_0$$

i_D = Corrientes límite de difusión

n = número de electrones que la especie electrolizada intercambia en la reacción

F = constante de Faraday 96500 C/eq

D = coeficiente de difusión de la especie electrolizada

M = velocidad de caída de la gota de mercurio en mg/s

t = periodo de caída de la gota en s

C_0 = concentración analítica de la especie electrolizada [12]

2.1.5 Mecanismo de funcionamiento de un RDE

En electroquímica, un electrodo de disco giratorio es un electrodo de trabajo específico que gira (a una velocidad constante) en relación con el método electro analítico. El electrodo de disco giratorio adopta un sistema de tres electrodos (que incluye: electrodo de trabajo, electrodo de referencia y electrodo auxiliar). El electrodo de disco giratorio consta de un disco conductor del primer tipo (generalmente de metal o carbono), que está recubierto con un material polimérico (como el teflón). Este tipo de disco se hace girar mediante un motor y su velocidad de rotación se controla con especial precisión. Se utiliza para estudiar la cinética electroquímica en estado estacionario. Al cambiar la velocidad de rotación del disco, puede cambiar la velocidad a la que el reactivo se entrega al electrodo de trabajo y la velocidad a la que el producto se aleja del electrodo de trabajo [5].

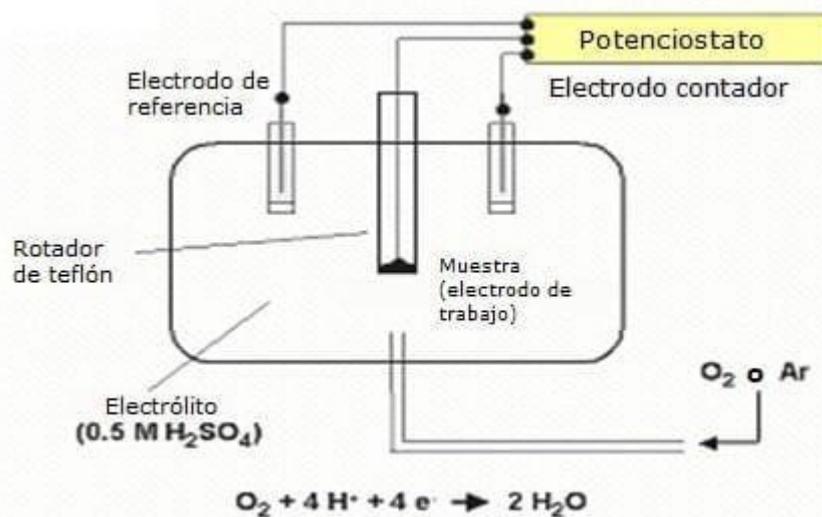


Figura 2 Electrodo de referencia, trabajo y auxiliar

Fuente: [9]

2.1.6 Vibración mecánica (estructura de soporte del motor)

La vibración puede ser causada por varias condiciones, y estas condiciones pueden actuar solas o en combinación. Tenga en cuenta que los problemas relacionados con la vibración pueden ser causados por equipos auxiliares, no solo por equipos básicos [5].

Desequilibrio: cuando el peso desequilibrado gira alrededor del eje de la máquina y genera fuerza centrífuga, y como resultado vibrarán las partes giratorias. El desequilibrio puede deberse a defectos de fabricación o a problemas de mantenimiento. A medida que aumenta la velocidad de la máquina, el impacto del desequilibrio aumenta. El desequilibrio acortará en gran medida la vida útil del rodamiento y provocará una vibración excesiva en la máquina [5].

La desalineación del eje y la vibración de descentramiento ocurren cuando el eje está descentrado. Cuando (por ejemplo) los ejes del motor y la bomba no están paralelos, puede ocurrir una alineación angular incorrecta. Cuando los ejes son paralelos, pero no coincidentes, por ello se dice que la alineación paralela es incorrecta. Debido a la expansión térmica, el desplazamiento de los componentes o el ensamblaje incorrecto después del mantenimiento, esta dislocación puede ocurrir durante el proceso de ensamblaje o desarrollarse con el tiempo. La vibración resultante puede ser radial o axial (consistente con el eje de la máquina) o ambas [5].

Desgaste: pueden producirse vibraciones debido al desgaste de componentes como rodamientos de bolas o de rodillos, cadenas de transmisión giratorias o engranajes. Por ejemplo, cuando se daña el anillo de un rodamiento de rodillos, el rodillo vibra cada vez que pasa por el área dañada. Los dientes de los engranajes abollados o desgastados o las correas giratorias rotas también pueden causar vibraciones [5].

Holgura: si el cojinete del componente vibratorio está suelto o la conexión a su alojamiento está suelta, la vibración que de otro modo se pasaría por alto puede volverse perceptible y destructiva. La vibración subyacente puede o no ser la causa de esta relajación.

Independientemente de la causa, el juego puede causar daños por cualquier tipo de vibración, como un mayor desgaste de los rodamientos o el desgaste de los soportes del equipo y otros componentes [5].

2.1.7 Reducción del ruido eléctrico producido por la rotación de motores.

Tradicionalmente, la transmisión de vibraciones se ha reducido aplicando uno de los siguientes métodos: acoplamiento elástico, amortiguadores de amortiguación y ajuste ("amortiguadores sintonizados") [13].

El acoplamiento elástico se basa en la introducción de elementos de baja rigidez que dan como resultado el desacoplamiento de los grados de libertad entre diferentes componentes. El objetivo es obtener un sistema cuya frecuencia natural sea mucho menor que la frecuencia de la fuerza de excitación dinámica. De esta forma se puede conseguir una reducción muy significativa de la fuerza dinámica transmitida. Los elementos elásticos generalmente están hechos de materiales similares al caucho para aumentar la amortiguación al mismo tiempo (su función se discutirá en el siguiente punto). La principal limitación de utilizar elementos elásticos como filtros es que cuando cae la frecuencia de excitación (por ejemplo, durante el arranque) el sistema se vuelve muy inestable, y para obtener una frecuencia natural muy baja, la rigidez debe reducirse excesivamente, lo que pone en peligro la estabilidad del sistema (por ejemplo, para evitar vuelcos o impactos), por lo que su uso suele limitarse al rango de frecuencias medias (por encima de 10 Hz) [13], Este método incluye "silent blocks" para la instalación de motores, compresores, etc.

El sistema de amortiguación se basa en reducir la magnitud de la respuesta dinámica del sistema introduciendo una disipación viscosa entre los componentes a aislar, usualmente utilizando fluido para pasar por el orificio. Son particularmente útiles en el rango de muy baja frecuencia (<3 Hz) porque entra en conflicto con otros requisitos funcionales, por lo que no es

factible desacoplar piezas introduciendo únicamente elementos elásticos. Un ejemplo de aplicación típico es la suspensión de vehículos, que se basa en este tipo de componente de reducción de vibraciones, un compromiso entre estabilidad y comodidad, o se usa en lavadoras, donde hay varias frecuencias de excitación, y se usan acoplamientos flexibles en combinación. Amortiguadores intermedios y de baja frecuencia. Este tipo de elemento tendrá problemas operativos a velocidades muy bajas, el fluido casi no producirá resistencia o se volverá demasiado rígido a altas velocidades [13].

Finalmente, la amortiguación sintonizada ("amortiguador sintonizado") es una técnica basada en la adición de masa a un componente diseñado para reducir la vibración, que está conectado por elementos elásticos y amortiguadores (generalmente elastómeros), cuya frecuencia natural es consistente con la frecuencia. Emocionado. De esta manera, la energía de vibración fluye hacia este nuevo sistema, donde se puede disipar de manera más efectiva, reduciendo así la parte principal de la respuesta. Esta solución es muy eficaz en su frecuencia de diseño, pero completamente ineficaz en el resto del espectro. Un ejemplo de aplicación clásico es reducir la vibración al ralentí de la barra de dirección de un automóvil [13].

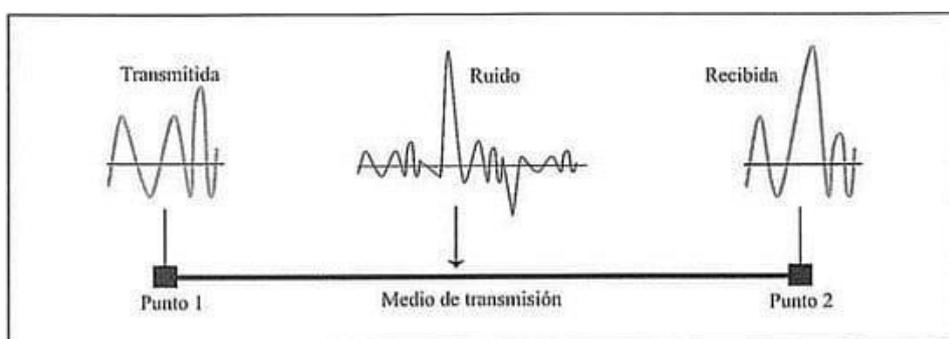


Figura 3 Muestras de reducción del ruido
Fuente: [14]

En la anterior figura se puede evidenciar como se transmite una señal de punto a punto, en donde la medición que se presenta ruido eléctrico, y cuando la señal es recibida, se puede

ver el pico del ruido, por lo tanto, utilizamos el Mercotac, elemento que ayuda a mitigar el ruido.

2.1.8 Mercurio como elemento conductor

El mercurio es un metal plateado brillante que puede disolverse y permanecer líquido a temperatura ambiente, como se muestra en la siguiente Figura (Figura 4) Es un mal conductor de calor, pero no es tan malo para la electricidad. Se alea con oro y plata [13].



Figura 4 Mercurio
Fuente: [15]

Tal y como se ve en la imagen, cuando se energiza el aluminio, se genera un campo magnético y el mercurio comienza a rotar, el cual se ve afectado por ser un metal conductor [16]. Aunque esta característica es peligrosa no solo por los contaminantes de mercurio sino también por el uso de corrientes de hasta 28 amperios, puede ser adecuada para el uso de mercurio en motores eléctricos [16].

2.1.9 Motores Eléctricos

Un motor es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica rotatoria mediante la acción del campo magnético generado en su bobina. Estos motores se dividen en motores de CC (Corriente Continua) y motores de CA (Corriente Alterna) según el tipo de corriente que trabajan, como se muestra en la Figura (Figura 5). Se confiará en los motores de CC para el trabajo actual [3,10].

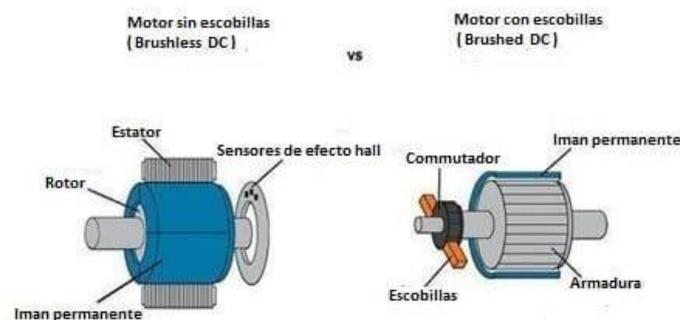


Figura 5 Motores brushless vs motores brushed
Fuente: [18]

Los motores que se usaran son motores sin escobillas (Figura 5). La razón por la que se decide utilizar este tipo de motores es que es un motor que no posee en su interior pastillas de grafito en su interior, que permite generar un campo magnético en la bobina para poder generar el movimiento del motor [19].

Estos motores con escobillas tienen una gran demanda en la industria, por lo que son más baratos que los motores sin escobillas. Una de las desventajas de estos motores es que tienen altas pérdidas de calor, son más ruidosos y las pastillas de grafito se desgastan muy rápidamente y, por lo tanto, requieren más mantenimiento [19].

En lo que a ellos respecta, los motores brushless son motores más silenciosos por su mecanismo sin escobillas, son un equipo con muy buenas características porque son más

pequeños que los motores con escobillas y tienen un rendimiento muy optimizado a velocidad constante [19].

Las diferencias entre estos motores son pocas, pero muy concisas, lo que indica que necesita un motor bushel por las siguientes razones:

- **Tienen un bajo mantenimiento y una larga vida útil** Debido al desgaste mecánico interno, la vida útil del motor cepillado no es larga y requiere un mantenimiento frecuente. Los motores de bushel, debido a que no tienen escobillas, no desgastan las partes del motor y, por lo tanto, tienen una larga vida útil [19].
- **Eficiencia del motor** Los motores cepillados producirán más fricción mecánica, lo que producirá más pérdidas por fricción. En lo que a ellos respecta, los motores sin escobillas no tienen resistencia mecánica y, por lo tanto, son más eficientes [19].
 - **Rango de velocidades.** El rango de velocidad manejado por motores con escobillas y sin escobillas es bastante amplio, pero la velocidad manejada por motores sin escobillas es propicia para nuestro prototipo, y se puede controlar con el microcontrolador de utilizado [19].

2.2 Comunicación del sistema RDE con el PC

2.2.1 Microcontrolador

La función de estos microcontroladores permitirá realizar las diferentes conexiones del sistema para así poder tener una comunicación del motor con el pc el cual ayudará con la variación de las velocidades del motor e igualmente se podrá observar los valores que se necesitaran para el desarrollo del proyecto [19].

Estos microcontroladores son los siguientes la raspberry y el Arduino uno el cual estarán ayudando en el proceso de la comunicación.

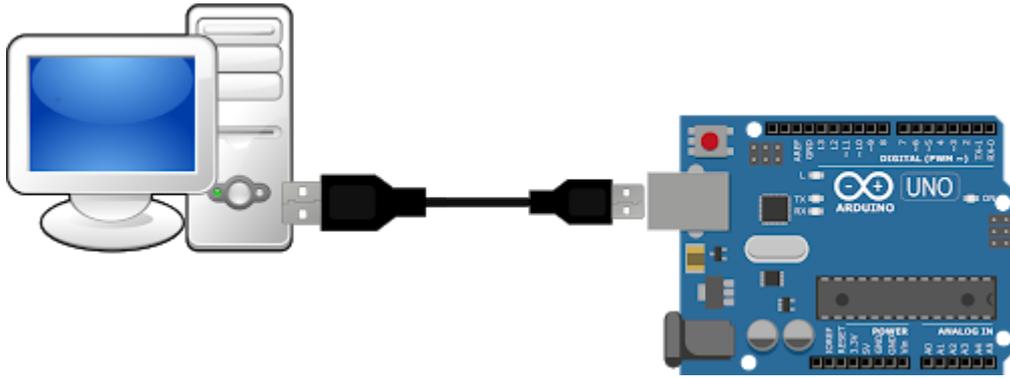


Figura 6 sistema de comunicación
Fuente: [12]

2.2.2 Señales de voltaje y corriente

Con la ayuda de un analizador de redes, como un osciloscopio, se pueden medir los principales parámetros del motor, como el valor de entrada de voltaje y corriente [10].

Un analizador de redes eléctricas [10], también denominados registradores de red, en una herramienta indispensable como soporte los siguientes análisis:

Estudios de carga – permite verificar la capacidad de la red eléctrica antes de agregar nuevas cargas, o bien, para ajustar la potencia de su suministro. Posibilita también conocer el factor de utilización de un equipo o subsistema [10].

valuaciones de energía – posibilita conocer el consumo de energía antes y después de realizar mejoras en su instalación, para medir y verificar el ahorro de energía obtenido.

Mediciones de armónicas – permite descubrir problemas con las armónicas que pueden causar daños o perturbar a equipos críticos [10].

Captura de sucesos de voltaje – monitorice la existencia de huecos de voltaje y sobretensiones que causan restablecimientos espurios o activación inexplicada de disyuntores [10].

El equipo tiene una potencia base de 15 kW conectado a la red trifásica (3 x 400V). Se observa un pico de carga entre las 10:00 y las 10:40 que alcanza el doble de potencia.

Adicionalmente, se registran incrementos de aproximadamente 5 kW en pequeños ciclos simétricos que duran entre tres a cuatro minutos [10].

A tenor del gráfico, la carga analizada es no lineal, por su repetitividad cíclica, lo cual presupone que tendrá una distorsión en la calidad de la señal eléctrica.

El consumo energético total fue de 55 kW, lo cual supuso un coste de 2€/h según la tarifa de acceso del suministro [10].

Por otro lado, las medidas del factor de potencia en el tiempo indican que el equipo contribuye directamente a la penalización en la factura eléctrica por este concepto al situarse por debajo de 0,95 [10].

En conclusión, la fase 1 se encuentra algo menos sobrecargada, mientras que la fase 2 presenta un valor de voltaje un 4% superior. El perfil de la curva de tensión para las fases 2 y 3 es muy similar, en cambio, la fase 1 es diferente [10].

El análisis de los armónicos permitirá valorar el impacto de la calidad en el rendimiento de los equipos.

La intensidad en la fase 2 es la que mayor distorsión armónica presenta, cuyo gráfico es el que se acompaña:

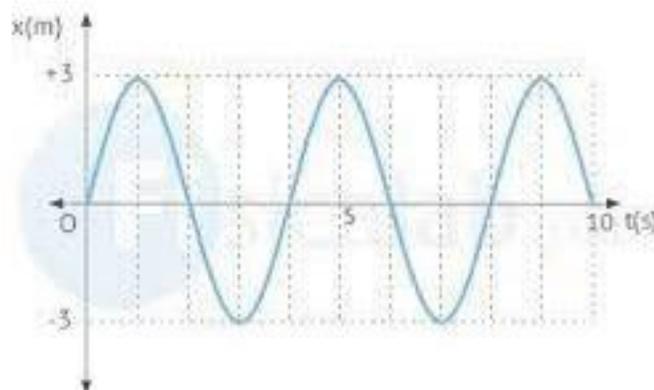


Figura 7 movimiento armónicos
Fuente: [20]

La gráfica anterior indica la presencia de un quinto y séptimo armónico en la intensidad de la fase 2.

2.2.3 Frecuencia de muestreo

La tasa o frecuencia de muestreo es el número de muestras tomadas de una señal continua por unidad de tiempo (generalmente segundos) en el proceso requerido para convertir una señal continua de analógica a digital para producir una señal discreta. Como todas las frecuencias, generalmente se expresa en hercios (Hz, ciclos por segundo) o múltiplos de los mismos, como kilohercios (kHz), pero también se pueden usar otras cantidades. [20], Estas son algunas señales que se pueden observar.

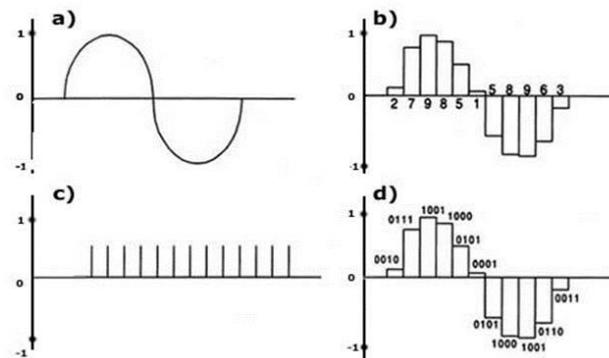


Figura 8 Señales
Fuente: [21]

- Señal digital,
- Señal digitalizada
- Reloj de muestreo
- Señal binaria cuantizada

El desarrollo constante del procesamiento de señales requiere altas tasas de muestreo que deben soportar los dispositivos de muestreo de datos. El desarrollo de sistemas de alta velocidad para la adquisición de datos utiliza un muestreo paralelo de convertidor analógico – digital, incorpora varios núcleos para garantizar una velocidad de muestreo adecuada en tiempo real. Para que la captura de las señales sea eficiente el dispositivo está diseñado para controlar el almacenamiento de datos. El acopio de datos es esencial para la adquisición de datos con señales de alta velocidad. La técnica de muestreo en paralelo interpolado en el tiempo es una opción aceptable para muestrear señales transitorias de alta velocidad [21].

3 Desarrollo metodológico del proyecto

Para la realización de este proyecto se dividió en fases, para una mejor interpretación y desarrollo del mismo, estas fases se describen a continuación.

3.1 Fase 1 Análisis del sistema de electrodos de disco rotatorio.

En esta fase, se realizó la recopilación de información y análisis de diferentes materiales y técnicas que se podrían utilizar para la fabricación del sistema de electrodos de disco rotatorio, también se consulto acerca de la construcción del mecanismo eléctrico y mecánico para conseguir la mejor manera de eliminar el ruido eléctrico y mecánico en el motor, ya que el equipo RDE a través de los electrodos, mide una corriente del orden de los nanoampers, y cualquier perturbación debe ser considerada y tratada.

3.1.1 Diseño del sistema basado en bibliografía consultada.

Este diseño se elaboró en los siguientes parámetros:

- a. Material de construcción de la estructura mecánica: Es necesario eliminar el ruido y la vibración producida para generar un flujo laminar, considerando un rango de velocidad de rotación del electrodo entre 100 y 315 RPM variables del motor DC.
- b. Contacto eléctrico entre el eje del motor y el electrodo: No es posible utilizar escobillas, ya que el ruido eléctrico provocado por la fricción de las escobillas puede ser muy alto y por lo tanto, se consideró el uso del mercurio debido a su conducción eléctrica y que es un metal líquido a temperatura ambiente, el cual es empleado en dispositivos comerciales de RDE, no va a generar ruido eléctrico entre los contactos.

- c. Dimensionamiento del motor: Se tuvo en cuenta las características del motor las cuales son las dimensiones de tamaño, velocidad y bajo ruido eléctrico.
- d. Sistema Variador de Velocidad: Al igual que el motor, es necesario escoger un variador que trabaje a una frecuencia lo suficientemente alta para no afectar eléctricamente el montaje, de igual manera es muy importante el tema de filtrado y acondicionamiento de la señal para el motor en el momento de la implementación

3.1.2 Análisis de costos en la elaboración del sistema

Como se evidencia en la siguiente tabla Fuente de financiación, se describe los valores y costos para la implementación del prototipo es necesario, puesto que de esta forma se evidencia su bajo costo, más la estimación de los elementos requeridos

Fuente de Financiación	
Recurso	Estudiante
Motor DC 1400KV	\$ 650.000
Estructura	\$ 450.000
Regulador de velocidad	\$ 500.000
Cableado y materiales	\$ 200.000
Herramientas	\$ 100.000
Raspberry pi	\$ 190.000
Arduino uno	\$ 50.000
Valor Total	\$ 2.140.000

Como se demuestra en la tabla anterior los costos son apropiados acorde a la generación del prototipo.

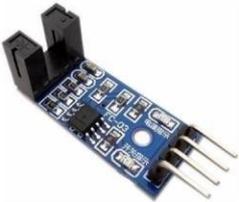
3.2 Fase 2 Planeación y prototipado del sistema de electrodos de disco rotatorio

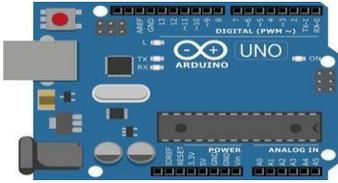
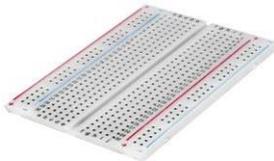
Para esta fase, es necesario la creación de un prototipo base de la estructura mecánica y eléctrica del sistema de electrodos de disco rotatorio. con el objetivo de realizar pruebas de comunicación, calibración.

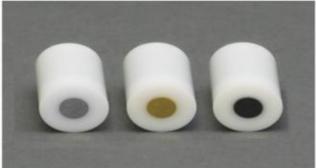
3.2.1 Materiales a utilizar basado en el diseño establecido.

En este punto se utilizaron los diversos equipos para el correcto funcionamiento del proyecto los cuales son los que permitieron que la razón por la cual fue seleccionado cada uno de los elementos para la implementación del dispositivo.

A continuación, se dará a conocer en una tabla que permite visualizar los equipos y porqué se escogió ese dispositivo:

Nombre del equipo	Visualización del equipo	Justificación del porque se escogió
<p>Motor A2212/T10 1400KV</p>		<p>Se realizó el estudio de qué tipo de motor sirve para el sistema, llegando a la conclusión de que un motor DC para drones serviría a la perfección por lo que estos motores en data chip presentaba buenas velocidades y su bajo ruido que estos tienen.</p>
<p>Variador de velocidad ESC 30A y batería lipo</p>		<p>Para estos equipos se hizo una investigación con base en el motor que ya se tenía, de esta manera se compraron, lo cual permitirá controlar la cantidad de voltaje que se le suministra al motor para su velocidad.</p>
<p>Sensor Óptico LM393</p>		<p>Por medio de este sensor se programó con Arduino para censar las RPM del motor.</p>

Nombre del equipo	Visualización del equipo	Justificación del porque se escogió
Raspberry		<p>Con este mini ordenador se puede guardar información detallada de la programación, sin dificultad de alguna interrupción por el espacio de almacenamiento por lo que esta cuenta con una capacidad de almacenamiento de 1Gb de RAM.</p>
Arduino UNO		<p>Con este microcontrolador se realizará el cableado y las conexiones del equipo el cual ayudará para la programación del mismo.</p>
Protoboard		<p>Por medio de esta placa se realizará las conexiones correspondientes que permitirá la comunicación con los componentes</p>
Jumper		<p>Con estos elementos permiten realizar las conexiones correspondientes para las comunicaciones con el prototipo.</p>
Soporte Universal De Laboratorio Y Pinza		<p>Este elemento permitirá ayudar con el anclaje del proyecto el cual lo dejará fijo y permitirá tener una estabilidad horizontal que es lo que busca.</p>

Nombre del equipo	Visualización del equipo	Justificación del porque se escogió
Amplificador de instrumentación AD620AN		<p>Se utilizará de forma inversora para transformar voltajes de negativos a positivos.</p>
Potenciómetro 10k OHM		<p>Se utilizará para recibir la señal de voltaje del Arduino one y regular.</p>
Potenciómetro de precisión 10K OHM		<p>Con esto se regulará la fuente de voltaje (valores negativos) a la hora de antes de ingresar al amplificador de instrumentación</p>
Multímetro		<p>Este equipo electrónico permitirá ver y medir los voltajes y amperajes presentes en el prototipo.</p>
Resistencia		<p>Estas permiten la conductividad entre las conexiones realizadas en nuestro sistema</p>
Pulsador		<p>Este componente permitirá desviar la corriente o dejar pasarla para el funcionamiento del mismo.</p>
Electrodo de referencia		<p>Estos elementos son los permiten ayudar a tomar las mediciones correspondientes para el funcionamiento del prototipo.</p>

Nombre del equipo	Visualización del equipo	Justificación del porque se escogió
Fuente de voltaje dual		Este equipo dará el voltaje que falta para el correcto funcionamiento del prototipo.
Batería LiPo 183052		Este equipo se escogió porque permitirá almacenar una gran cantidad energía que ayudará para el funcionamiento de los componentes
Cargador de batería		Con este dispositivo permitirá suministrar la carga de la batería.

Fuente: Elaborada por el Autor

3.2.1.1 Mercotac 110

Se realizó el estudio del paso de voltaje por medio del eje del motor con un bajo ruido eléctrico,

- La mayoría de motores de inducción funcionan por medio de escobillas, la cual fue la primera opción estudiada, a la hora de analizar los armónicos, se observó que el ruido generado causa interferencia, distorsionando las lecturas del sistema, por lo cual se descartó este método.
- La segunda idea que se contempló, fue el desarrollo de un sector donde se almacenaría mercurio, el cual estaría en contacto con el eje y este serviría de conductor eléctrico, en este caso se observó que tocaba hacer una zona donde no existiera fuga del mercurio por el eje.

- Tras analizar diferentes opciones, se encontró un dispositivo que permite el paso de corriente por el eje sin generar armónicos que interfieran en las lecturas del sistema, ventaja por la cual se pide este elemento.



Figura 9 Mercotac 110
Fuente: Propia

3.3 Implementación del sistema de electrodos de disco rotatorio

Una vez realizado y verificado el funcionamiento del prototipo, se procede a la fabricación de la versión final del sistema, con la implementación estructural y electromecánica y parámetros validados a través del prototipo, además se integrará el control de velocidad del motor.

3.3.1 Programación de los dispositivos Raspberry y Arduino.

Para la programación de la tarjeta se utilizó el software Matlab y el siguiente código:

Código de programación de la Raspberry

- `mypi = raspi('192.168.0.10','pi','raspberrypi');` %% comunicación del matlab a la tarjeta por medio de wifi
- `configurePin(mypi, 12, 'PWM');` %% configuración del puerto de la tarjeta raspberry como pwm

- `writePWMDutyCycle(mypi, 12, 0.5); %% ciclo de pulsos`
- `writePWMDutyCycle(mypi, 12, 50); %% frecuencia del pulsos`
- `writePWMDutyCycle(mypi, 12, 0.1); %% ciclo de pulsos`
- `writePWMVoltage(mypi, 12, 0.2); % voltage del pwm`

Al momento de ejecutar la programación se presentaron una serie de dificultades una de ellas la tarjeta Raspberry como está conectada a internet está cambiando de numero de IP cada vez que la tarjeta se apague, por lo que se debe estar cambiando el número de IP en la programación.

Para dar inicio al variador de velocidad se tiene que cargar primero un pulso este valor está entre 0,1 y 0,99, posteriormente se carga la frecuencia y posteriormente se carga el pulso correspondiente a la frecuencia.

Para determinar que pulso corresponde a cada frecuencia se pruebas hasta sacar la siguiente tabla:

Tabla 1 Valor de las frecuencias y ciclos para programar en Matlab

En esta tabla se representan los ciclos de pulsos mínimo y máximo para cada una de las frecuencias de programación en Matlab del variador de velocidad.

Frecuencia	Ciclo mínimo	Ciclo máximo
50	0,1	
80	0,1	0,17
100	0,12	0,22
160	0,19	0,34
200	0,24	0,43
250	0,3	0,53
320	0,38	0,69
400	0,47	0,86
500	0,59	0,99
800	0,95	0,99

Fuente: propia

3.4 Validación de resultados con el prototipo propuesto.

Se inició con el diseño del sistema, la primera idea era realizar la implementación de un sistema de rotación de electrodo de disco rotatorio para evaluar condiciones hidrodinámicas de fluidos en régimen de flujo laminar adaptado a un equipo del laboratorio de corrosión llamado AUTOLAB con el fin de crear una interfaz de comunicación entre el equipo de construcción y el AUTOLAB.

Se da paso al estudio de los problemas encontrados, iniciando con el paso de corriente a censar por el eje del motor sin generar ruido eléctrico para esto se analizaron en una serie de soluciones de las cuales se verificó la idea de instalar escobillas en el eje del motor pero realizando investigaciones se observó que al haber fricción por las escobillas se generaría un ruido eléctrico considerable, el segundo inconveniente encontrado fue al realizar un compartimento donde se alojaría el mercurio, este iría fijo en el eje del motor el problema que se encontró en esta idea fue el sello hermético que se tenía que realizar; tras indagar en diversos artículos e incluso en la red, se encontró un producto llamado mercotac, el cual se podría adaptarlo en el eje del motor sin generar ruido eléctrico donde se podría inducir una corriente eléctrica.

La compra del motor se realizó teniendo en cuenta especificaciones precisas, la principal de ellas es que debía ser un motor brushless (sin escobillas), la segunda las RPM generadas por el motor y la última que su tamaño fuera pequeño, después de esto se encontró una serie de motores para dron los cuales cumplían con los datos requeridos y se procedió a adquirir un motor A2212/T10 1400KV.

Luego de la compra del motor, se dio paso a la adquisición del variador de velocidad, el cual fue fácil seleccionarlo debido a que los motores de dron tienen por defecto una serie de variadores de velocidad designados, para comprarlo ya vienen compatibles, debido a esto el

variador de velocidad se seleccionó dependiendo de la referencia del motor, por esta razón se decide comprar un ESC30A.

Los drones tienen un sistema de alimentación por batería por lo cual se adquirió una batería para la alimentación del ESC30A, debido a la referencia del variador de velocidad se compró la batería LiPo 183052, la batería trae su propio adaptador de carga.

Para el proyecto se había comprado un integrado L298N para la regulación del voltaje, pero ya que la pandemia se extendió y la situación fue empeorando las universidades dejaron de tener clases presenciales debido a esta contingencia cerraron los laboratorios, lo cual modificó el proyecto y desertar de la idea de realizar la adaptación con el AUTOLAB ya que el equipo es de uso único dentro de la universidad entonces el integrado se compró, pero no se tenía contemplado usarlo en el sistema.

- Se compró el encoder para realizar la medición de las RPM del motor véase
- Se compró la Protoboard para hacer las debidas conexiones en el sistema
- Se realizó el estudio para la compra de la tarjeta de programación para eso utilizaron 2, una RASPBERRY PI 3B y una ARDUINO UNO.
- Para la estructura se estudió una serie de trípodes y soportes llegando a la decisión de comprar un soporte universal de laboratorio y una pinza para este soporte.

En este punto se inició a conectar el motor, el variador de velocidad, la batería y la tarjeta Raspberry pi 3, para iniciar con la programación del control de velocidad, las conexiones se realizan de la siguiente manera:

- El pin GND tiene que ir conectado al pin de color café del ESC30A
- El pin 5V tiene que ir conectado al pin de color rojo del ESC30A
- El pin 12 tiene que ir conectado al pin de color naranja del ESC30A

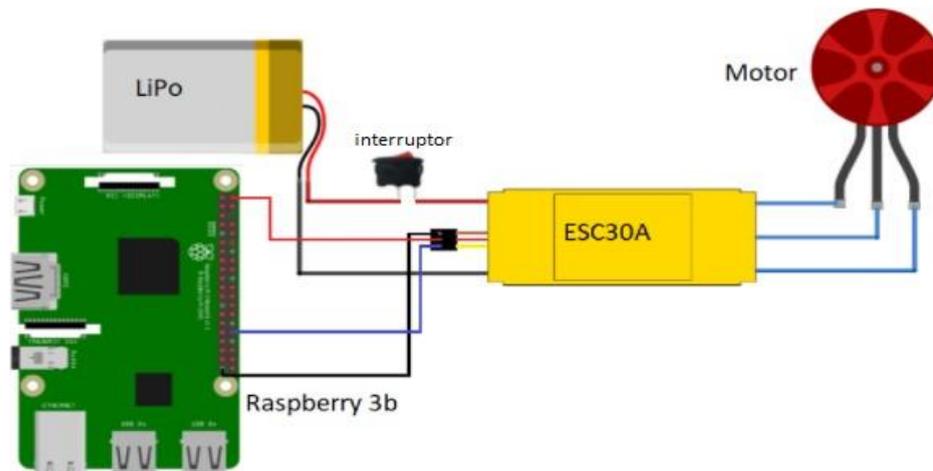


Figura 10 Conexión del variador de velocidad
Fuente: propia

ADVERTENCIA: no utilizar la máxima frecuencia (800) o los valores de ciclo máximo si el equipo no se encuentra horizontalmente posicionado, de hacerlo el equipo no va a arrojar buenos datos de lectura debido a la turbulencia que se genera o puede llegar a salpicar líquido en el motor y este generará un corto.

Se realizó la adquisición del encoder opto interruptor para censar las RPM del motor, también se compró el amplificador de instrumentación AD62DN para amplificar el voltaje de la señal Arduino.

Tras la programación del variador de velocidad se procede a elaborar el electrodo de referencia, el cual tiene las siguientes características:

El eje central es de acero inoxidable y la capa exterior es de nylon, se torneo primero la barra de nylon de $\frac{1}{2}$ " de diámetro hasta 10 milímetros O.D. y 40 milímetros de longitud, para posteriormente realizarle un orificio en el centro de extremo a extremo con una broca de $\frac{5}{32}$ ", después se desbastó un varilla de acero inoxidable hasta que llegara a un diámetro de 4,1 milímetros O.D. y una longitud de 40 milímetros, a esta se le realizó una perforación en una de sus puntas con una broca de $\frac{1}{16}$ de pulgada, se insertó, a presión, la pieza de acero inoxidable

en la de nylon, la cual en el primer intento se dobló, por esta razón se realizó una segunda pieza de nylon con las mismas medidas (10mm O.D, 40mm Longitud 5/32" I.D.).

Hay que resaltar, que en el mismo lugar donde se solicitó la fabricación del electrodo, se ordenó maquinar una rosca al acople que traía el mercotac, teniendo en cuenta que debía enroscar en el acople que traía el motor.

En las siguientes ilustraciones se evidencia el paso a paso de la elaboración del acople del mercotac al motor.

Visualización de los componentes	Descripción del componente
	Acople del mercotac con su rosca interna
	Acople del motor
	Unión del acople del mercotac y el mercotac
	Unión del acople del motor y la rueda del encoder

Visualización de los componentes	Descripción del componente
	<p>Uniones del motor y del electrodo</p>
	<p>Unión del acople del mercotac con el mercotac y la unión del acople del motor y la rueda del encoder</p>
	<p>Unión del motor con el electrodo y la unión del acople del mercotac con el mercotac en la unión del acople del motor con la rueda del encoder.</p>

Fuente: Elaborada por el Autor

Después de tener la estructura del motor completada, se realizó la adaptación en el soporte universal e inicia con la programación del encoder para iniciar a censar los rpm.

Para la instalación del encoder se realizó las siguientes conexiones (Figura 4-5),

- El pin VCC del encoder se alimenta con 3.3 voltios de la tarjeta Arduino.
- El pin GND del encoder se conecta a GND de la tarjeta Arduino.
- El pin DO de encoder se conecta a una salida digital (2) de la tarjeta Arduino.



Figura 11 Conexiones del encoder y Arduino
Fuente: propia

La programación se realizó en Arduino con el encoder, donde se tuvo una serie de dificultades en el momento de la lectura de los pulsos digitales que genera el encoder, este lee más pulsos de los que generalmente son, se analizó la condición presentada encontrando que el regulador de tensión del propio Arduino puede introducir corrientes parásitas en el sensor y de esta manera dar una medida incorrecta; para llegar a esta conclusión, se tuvo en cuenta que las medidas tomadas eran erróneas e ilógicas, para solucionar esto se realizó una programación, que se podrá verificarse en Anexo 1.

Después de desarrollar este código, se dio inicio con el estudio de la salida del voltaje que iría al eje del motor para la lectura de amperaje y voltaje.

Se analiza la manera de adquirir el amperaje y el voltaje por medio de programación, pero, en la búsqueda de los equipos de medición disponibles en el mercado, no se encontró uno con la escala y la precisión adecuada para los valores de corriente y tensión generados (Las escalas son muy grandes para medir los valores requeridos), por tanto se decidió comprar un amperímetro y un multímetro digitales para tomar los datos de forma manual y tabularlos para generar las gráficas y obtener el estudio de los resultados.

En la siguiente figura (11), se muestra el esquema de conexiones requeridas para que el sistema funcione correctamente, diseñando un sistema donde las salidas de voltaje solo fueran positivas pero a medida de que se iba desarrollando e investigando sobre la evaluación de sustancias en fluidos se evidencio que el sistema requiere valores negativos de voltaje para

realizar las mediciones, por este motivo se adquirió una fuente dual de voltaje para que dicha fuente la cual ayudará con la salida del voltaje negativo y con los potenciómetros variar los voltajes.

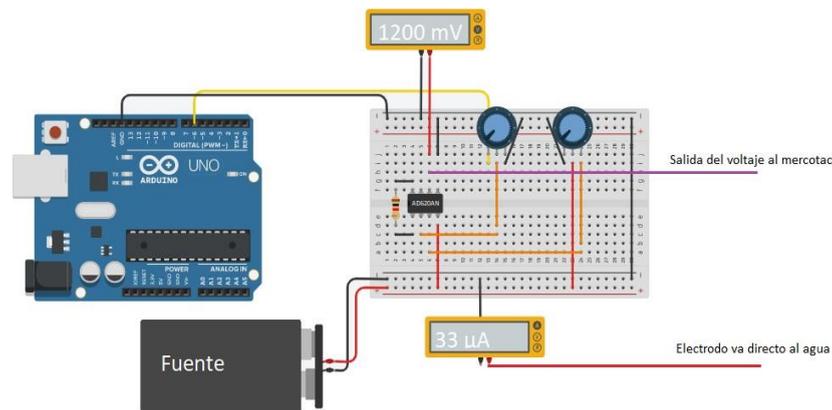


Figura 12 Conexión del sistema para salida de voltajes
Fuente: propia

Para la salida de voltaje al inicio se diseñó un solo programa el cual consistía en modificar los valores de los pulsos de forma manual y sin ningún tiempo de espera, con este método se tomaron las primera mediciones, las cuales no eran muy acordes, porque en algunas medidas el tiempo de estabilización no era el requerido por el sistema por este motivo se diseñó un segundo programa sin dejar este de lado ya que este programa lo utilizo para calibrar los rangos de voltaje a la salida del amplificador de instrumentación ya que las mediciones se pueden realizar en el área de los valores solo positivos, solo negativos y en valores tanto positivos y negativos a la vez, esto se puede modificar si se cambiara el valor de la ganancia del amplificador de instrumentación cambiando la resistencia.

A continuación, se evidencia el código del primer programa.

3.5 Código de programación del voltaje estático

```
int Salida = 6; //pin de coneccion de la salida

float Voltaje = 0; // valor del voltaje

float Pulso = 5; // pulso del voltaje

void setup() {

Serial.begin(9600);

}

void loop() {

analogWrite(Salida,Pulso);

Voltaje=((Pulso/255)*5); //salida de voltaje

Serial.println(Voltaje); // visualizar el valor de voltje

delay(1000);

}
```

Posteriormente se diseñó el segundo programa el cual lo que hace es generar pulsos de voltaje, ya que la tarjeta Arduino sus salidas se representa por un código binario, donde 0 corresponde a 0 voltios y 255 corresponde a 5 voltios. Teniendo en cuenta esto se diseñó un ciclo de aumento de voltaje cada determinado tiempo aumenta el pulso para de esta manera aumentar los voltajes, en el tiempo de espera de aumento de voltaje lo que se espera es la estabilización del voltaje en el voltímetro y el amperaje en el amperímetro después de este se toma los datos manualmente y espero a que aumente el pulso para tomar la nueva medida, a continuación, muestra el código del segundo código.

3.6 Código de programación del voltaje automático

```

int Salida = 6; // pin de salida

float Voltaje = 0; // valor de voltaje

float Pulso = 255; // pulsos

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  for (int i = 67; i <= 251; i+=2) { //condicional de cantidad de pulsos en crecimiento
    analogWrite(Salida, i);
    delay(20000);
    Voltaje=((Pulso/255)*5); // voltaje de salida
    Serial.println(i); // visualizer de pulsos
    delay(20000); // pausa
  }
  for (int i = 255; i >= 5; i-=10) { // condicional de cantidad de pulsos decrecimiento
    analogWrite(Salida, i);
    delay(20000);
    Voltaje=((Pulso/255)*5); // voltaje de salida
    Serial.println(i); // visualización de pulsos
    delay(20000);
  }
}

```

Lo último que se realizó es la unión y configuración de todos de todas y cada uno de los equipos para comenzar a realizar pruebas



Figura 13 Vista superior del prototipo
Fuente: propia

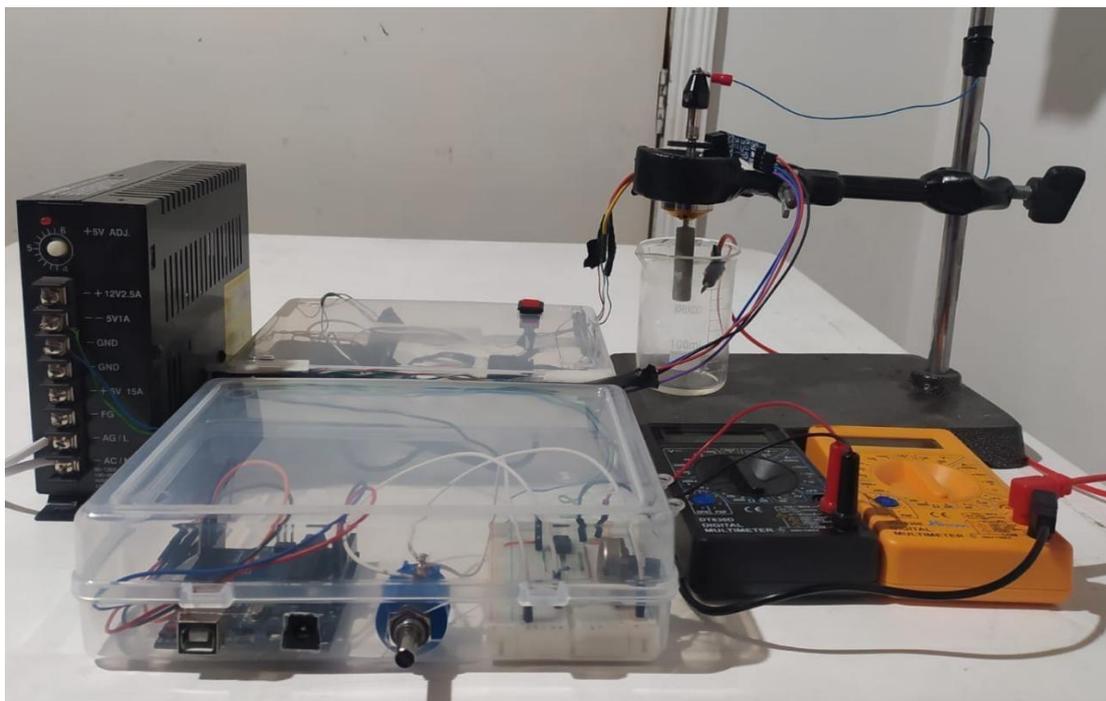


Figura 14 Vista frontal del prototipo
Fuente: propia

3.6.1 Desarrollo de las pruebas.

El siguiente paso a paso dará inicio a las pruebas:

- Abrir el programa Matlab y cargar el código de programación a la tarjeta Raspberry para iniciar el variador de velocidad de esta manera se enciende el motor.
- Abrir el programa Arduino y cargar el código de programación del encoder a la tarjeta Arduino para iniciar a sensar las RPM del motor.
- Realizaciones variaciones de los valores de frecuencia y de ciclos en el programa Matlab (Tabla 1 Valor de las frecuencias y ciclos para programar en Matlab) Valor de las frecuencias y ciclos para programar en Matlab, ajustar los valores a la necesidad de las lecturas de datos a realizar, en Arduino se puede visualizar las RPM.
- Ajustar el valor del voltaje de salida del amplificador de instrumentación, para esto:
 - Primero desconectar el amperímetro para sensar el voltaje sin agregar la resistencia de la sustancia ni la de todo el eje del motor.
 - Segundo abrir el programa Arduino cargar el código de programación voltaje estático y se modifica 0 para arrojar 0 voltios y 255 para arrojar 5 voltios desde la Arduino.
 - Tercero calcular la ganancia del amplificador de instrumentación calculando la resistencia a cambiar con la ecuación de ganancia.

$$G = \frac{49,4K\Omega}{Rg} + 1$$

- Se abre el programa Arduino y se carga el código de programación del voltaje automático.
- Se toman los datos de forma manual, tabular los valores en una hoja de cálculo donde se podrá graficar.

4 Análisis de resultados

Al disponer del montaje y el RDE en funcionamiento, medidas experimentales fueron llevadas a cabo usando los elementos y equipos disponibles en nuestro caso. En este caso, mediciones de corriente fueron realizadas de manera potenciostática en un rango de voltaje de 0,1 V a 2,0 V en relación con el potencial de equilibrio, llevando a cabo la toma de 25 datos en el rango de voltaje y usando un intervalo de tiempo 30 segundos por cada medida.

Los valores de voltaje y corriente obtenidos empleando el RDE mediante el montaje presentado arriba (ver Figura 15) a 5 velocidades de rotación en el rango entre 100 rpm y 315 rpm se presentan a continuación en las Tablas 2 a 6.

En la siguiente tabla, se observan los resultados de las pruebas realizadas:

Tabla 2 Valores medidos a 100 RPM

100 RPM		
Pulso	Voltaje (mV)	Corriente (microA)
255	-46	2
245	-97	1
235	-153	1
225	-212	0
215	-273	0
205	-338	0
195	-405	0
185	-472	-1
175	-543	-2
165	-618	-4
155	-695	-5
145	-773	-6
135	-851	-7
125	-932	-9
115	-1016	-10
105	-1110	-12
95	-1185	-14
85	-1265	-17
75	-1348	-19
65	-1425	-23

100 RPM		
55	-1498	-26
45	-1569	-30
35	-1638	-34
25	-1705	-39
15	-1768	-43
5	-1815	-46

Fuente: propia

Tabla 3 Valores medidos a 150 RPM

150 RPM		
Pulso	Voltaje (mV)	Corriente (microA)
255	-42	2
245	-93	1
235	-148	0
225	-208	0
215	-270	0
205	-334	0
195	-401	-1
185	-471	-1
175	-542	-2
165	-616	-4
155	-691	-5
145	-771	-6
135	-848	-7
125	-929	-9
115	-1011	-11
105	-1095	-13
95	-1183	-15
85	-1261	-18
75	-1343	-20
65	-1417	-24
55	-1491	-27
45	-1562	-31
35	-1632	-35
25	-1699	-40
15	-1765	-44
5	-1803	-48

Fuente: propia

Tabla 4 Valores medidos a 200 RPM

200 RPM		
Pulso	Voltaje (mV)	Corriente (microA)
255	-39	2
245	-92	1
235	-146	0
225	-207	0
215	-269	0
205	-333	0
195	-400	-1
185	-469	-2
175	-541	-3
165	-614	-4
155	-690	-6
145	-767	-8
135	-844	-10
125	-924	-12
115	-1004	-14
105	-1094	-16
95	-1182	-19
85	-1260	-21
75	-1338	-24
65	-1416	-27
55	-1487	-29
45	-1559	-33
35	-1629	-38
25	-1691	-42
15	-1762	-46
5	-1798	-50

Fuente: propia

Tabla 5 Valores medidos a 263 RPM

263 RPM		
Pulso	Voltaje (mV)	Corriente (microA)
255	-36	1
245	-80	0
235	-144	0
225	-205	0
215	-268	0
205	-331	-1
195	-398	-2
185	-467	-3
175	-538	-4

165	-610	-5
155	-687	-7
145	-764	-9
135	-841	-11
125	-921	-13
115	-1001	-15
105	-1091	-18
95	-1179	-22
85	-1257	-25
75	-1334	-28
65	-1412	-31
55	-1485	-34
45	-1558	-37
35	-1627	-40
25	-1687	-44
15	-1759	-49
5	-1795	-52

Fuente: propia

Tabla 6 Valores medidos a 315 RPM

315 RPM		
pulso	Voltaje (mV)	Corriente (microA)
255	-32	1
245	-77	0
235	-141	0
225	-204	0
215	-267	-1
205	-329	-1
195	-397	-2
185	-465	-4
175	-534	-5
165	-605	-7
155	-683	-9
145	-762	-10
135	-839	-12
125	-918	-14
115	-997	-17
105	-1087	-19
95	-1175	-24
85	-1254	-27
75	-1330	-30
65	-1409	-33
55	-1481	-35
45	-1555	-39
35	-1623	-42
25	-1683	-47
15	-1754	-51
5	-1790	-54

Fuente: propia

En la Figura 14 se presentan las curvas de polarización catódica obtenidas para el RDE de acero inoxidable a las velocidades de rotación de 100, 150, 200, 263 y 315 rpm, donde se observa un aumento en la densidad de corriente con el aumento de la velocidad de rotación, principalmente a valores de voltajes inferiores a aprox. 1000 mV.

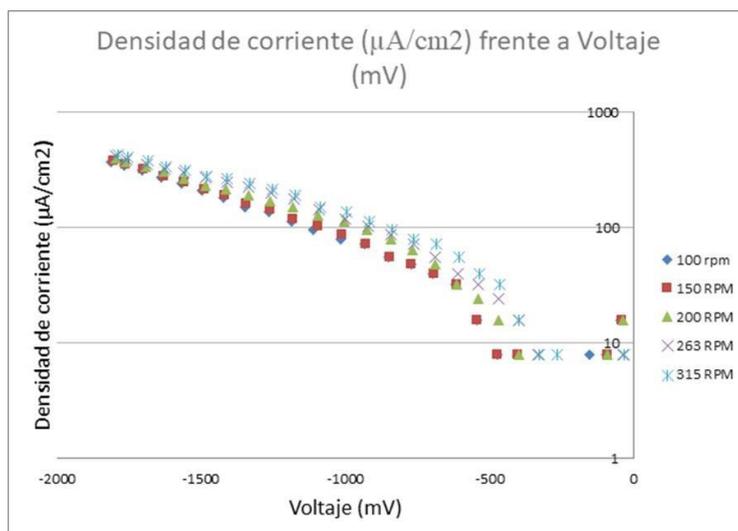


Figura 15 Curva de polarización del ramal catódico
Fuente: propia

Tabla 7 Tabla de resultados por RPM

Material Electrodo	Velocidad de rotación (RPM)	Velocidad de rotación (rad. s-1)	log (Velocidad de rotación) (rad. s-1)	($\approx -1,01$ V)	($\approx -1,09$ V)	($\approx -1,18$ V)	($\approx -1,26$ V)	($\approx -1,33$ V)
Acero inoxidable	100	10,47197551	1,020028618	7,958E-05	9,549E-05	1,114E-04	1,353E-04	1,512E-04
Acero inoxidable	150	15,70796327	1,196119877	8,754E-05	1,035E-04	1,194E-04	1,432E-04	1,592E-04
Acero inoxidable	200	20,94395102	1,321058614	1,114E-04	1,273E-04	1,512E-04	1,671E-04	1,910E-04
Acero inoxidable	263	27,5412956	1,439984366	1,194E-04	1,432E-04	1,751E-04	1,989E-04	2,228E-04
Acero inoxidable	315	32,98672286	1,518339172	1,353E-04	1,512E-04	1,910E-04	2,149E-04	2,387E-04

Fuente: propia

De acuerdo a lo observado en la curva de polarización potencioestática en el ramal catódico (ver Figura 14), se listan en la Tabla 7 los valores de la densidad de corriente a 5

valores de voltaje, correspondientes a $\approx -1,01$ V, $\approx -1,09$ V, $\approx -1,18$ V, $\approx -1,26$ V y $\approx -1,33$ V, donde se evidencia el aumento en la magnitud de la variable con la velocidad de rotación. Luego de ello, se revisa la proporcionalidad de los datos de las variables densidad de corriente y velocidad de rotación del RDE mediante la ecuación de Levich, donde se obtiene la figura presentada en la Figura 15. Los resultados se consideran adecuados, aunque el registro de datos fue llevado a cabo con los equipos disponibles, los cuales no presentan la sensibilidad requerida para medir valores de corriente inferiores a 1 microampere, lo cual a que los datos no sean los más exactos.

Se lleva a cabo un experimento, el cual consiste en hacer un barrido voltaje desde mínimo -2 voltios y un rango máximo de 0 voltios, basado en un intervalo de tiempo 30 segundos por cada medida, se realiza la toma de 25 datos en un rango de voltaje de 196 mili voltios cada intervalo de acuerdo a ese análisis de estos resultados se procede a realizar una gráfica de densidad de corriente versus voltaje para las siguientes revoluciones 100 RPM, 150 RPM, 200 RPM, 263 RPM y 315 RPM, obteniendo Figura 14 Curva de polarización del ramal catódico, con base en este análisis lo que se procede es a caracterizar los puntos en los cuales existen mayor desviación en la medida de tal manera que puede caracterizar los datos que los datos más representativos se encuentran en $\approx -1,01$ V, $\approx -1,09$ V, $\approx -1,18$ V, $\approx -1,26$ V y $\approx -1,33$ V, una vez se han evidenciado estos datos se procede a compararlos con la ecuación de Levich obteniendo una gráfica, debido al método con el cual se toma datos y a los equipos que se tienen para la medición de datos los valores no son los más exactos ya que, el amperímetro no maneja un rango más pequeño de amperajes, debido a esto, las gráficas no son las más exactas.

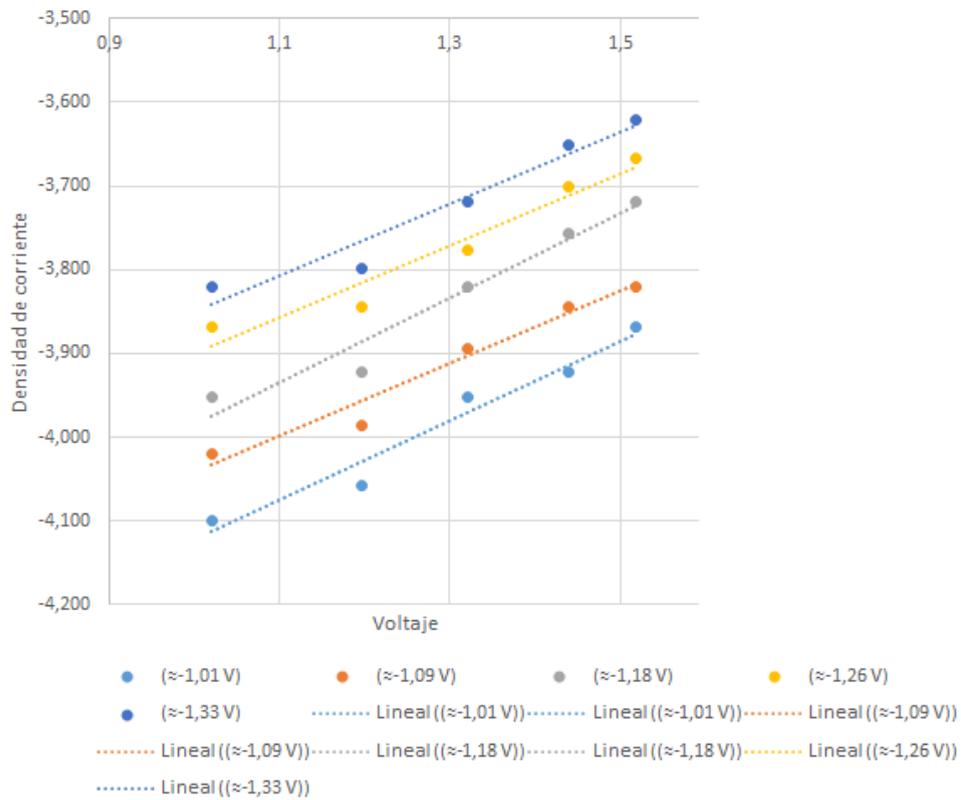


Figura 16 Linealidad de la ecuación de Levich
Fuente: propia

Para el correcto uso del prototipo se diseñó un manual de Uso, el cual explica paso a paso cuales el debido proceso para el manejo del mismo, considerando algunas variaciones que se pueden llegar a presentar en el uso de este (Ver anexo 1).

5 Conclusiones.

Se estudió uno de los principales problemas del prototipo, el ruido eléctrico que se genera en el contacto del eje del motor, ya que por este va a pasar la corriente que se va acensar posteriormente. Para esto se requiere un contacto eléctrico donde el ruido eléctrico fuera bajo para que no alterará las mediciones de tensión, ya que el sistema de escobillas tiene un alto ruido eléctrico, se realizó una exhaustiva búsqueda de otros tipos de contactos realizando un estudio del mercurio propuesto en el marco teórico, como contacto eléctrico hallando un pequeño dispositivo adaptable don su principal conductividad es por mercurio llamado mercotac, la función de él es adaptarse al eje, este teniendo una parte , estática , giratoria y el contacto es a base de mercurio permitiendo el paso de corriente desde amplificador de instrumentación (AD620AN) pasando por el mercotac y llegando al eje del motor con un bajo ruido eléctrico.

Se realizó un estudio para el sistema mecánico del prototipo en base a la estabilidad de vibración, según los puntos de apoyo se requieren una horizontalidad muy precisa. Para mantener el eje del motor lo más vertical posible para evitar el bote y mejorar la estabilidad mecánica.

Se utilizó las raspberry específicamente para controlar el variador de velocidad, este se puede programar desde matlab en un rango del 50 rpm hasta 600 rpm observando que la del prototipo se ve afectada después del 320 rpm.

Se utilizó el Arduino para la toma de datos del sensor opto interruptor fc-03, también se utilizó para la salida del voltaje hacia el amplificador.

Por estos motivos se decidió utilizar dos microcontroladores para que ninguna de las dos tarjetas estuviera saturada y utilizar programas de programación vistos en las clases, para

que se hiciera más fácil para el próximo estudiante que quiera adaptar nuestro prototipo al autolad.

Obtener una estructura eléctrica mecánica que visualmente no está muy organizada ya que es un prototipo que está abierto a cambios, modificaciones por lo que se realizaron diferentes pruebas para muestra de mediciones.

El prototipo no está para trabajo en laboratorio porque la idea principal del proyecto era realizar una interfaz mecánica y automatizada entre el proyecto y el autolad existente en el laboratorio de corrosión ya que por pandemia no se pudo acceder al laboratorio tocó limitar el proyecto a un prototipo, para que en un futuro proyectos de grado de otros estudiantes puedan realizar esta interfaz.

Bibliografía

- [1 Montoya, Vargas y Calderon, *EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD PROTECTORA DE RECUBRIMIENTOS Ni-SiC y Ni-Co-W DEPOSITADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA*, Medellín: Universidad de Antioquia, 2008.
- [2 Universidad Antonio Nariño, *Trabajo de campo*, Bogotá: Universidad Antonio Nariño, 2021.
- [3 Olympus, «www.olympus-ims.com,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.olympus-ims.com/es/applications/corrosion-gaging-dual-element-transducers/>. [Último acceso: 25 10 2021].
- [4 B. system, «Instruction manual - rotating disk electrode,» Kent Avenue, Indiana, 2000.
- [5 sibar0, «<https://steemit.com/>,» 2017. [En línea]. Available: <https://steemit.com/electroquimica/@sirbar0/electrodos-de-disco-anillo-rotatorio/>.
- [6 ROTATING ELECTRICAL CONNECTORS, *MERCOTAC*, California: mercotac Inc, S.F..
- [7 ARDUINO, *ARDUINO UNO*, ARDUINO UNO, S.F..
- [8 NEWARK, *RASPBERRY PI 3 MODEL B*, NEWARK, S.F..
- [9 unam, «<http://depa.fquim.unam.mx/>,» S. F.. [En línea]. Available: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/ELECTRODOSDEMEDIDAYDEREFERENCIA_22645.pdf.
- [1 Kinmore, «<https://kinmoremotor.com/>,» 19 12 2019. [En línea]. Available: <https://kinmoremotor.com/article/motor-basics/brushless-dc-and-brushed-dc-motors/>.
- [1 Fundación Universitaria Católica del norte, «<https://www.ucn.edu.co/>,» 12 04 2010. [En línea]. Available: <https://www.ucn.edu.co/Biblioteca%20Institucional%20Cemav/Taller-audio/BitrateMuestreo.html#:~:text=La%20tasa%20o%20frecuencia%20de,convertirla%20de%20anal%C3%B3gica%20en%20digital..>

- [1 G. Circelli, «<http://panamahitek.com/>,» 9 01 2016. [En línea]. Available: 2] <http://panamahitek.com/serial-arduino-introduccion/>.
- [1 D. P, «<https://steemit.com/>,» 03 2011. [En línea]. Available: 3] <https://steemit.com/electroquimica/@sirbar0/electrodos-de-disco-anillo-rotatorio/>.
- [1 «YouTube,» EL RAY MAKER CNC & MECATRÓNICA, 26 Junio 2020. [En línea]. 4] Available: https://www.youtube.com/watch?v=0jXcvSX8vqE&ab_channel=ELRAYMAKERCNC%26MECATR%C3%93NICA. [Último acceso: 15 Ag. 2021].
- [1 123rf, «<https://es.123rf.com/>,» S.F.. [En línea]. Available: <https://es.123rf.com/imagenes-de-archivo/mercurio.html?sti=m41frz4ltg14gp4d70>]. 5]
- [1 B. ESPADA, «<https://okdiario.com/>,» 06 05 2021. [En línea]. Available: 6] <https://okdiario.com/curiosidades/caracteristicas-del-mercurio-767423/fotos/mercurio-propiedades-metal>.
- [1 pinterest, «<https://co.pinterest.com/>,» S. F.. [En línea]. Available: 7] <https://co.pinterest.com/pin/676947387725250486/>.
- [1 G. TV, «<www.youtube.com/>,» 11 09 2015. [En línea]. Available: 8] <https://www.youtube.com/watch?v=Y7nQI2xM2as>.
- [1 A. J. P. Vega, Comparativa entre motores Brushed y Brushless, Tesis Maestría en 9] Ingeniería de Telecomunicaciones, Cataluña: Universidad Oberta de Cataluña, 2019.
- [2 E. Escobar, «<https://www.ucn.edu.co/>,» S.F.. [En línea]. Available: 0] <https://www.ucn.edu.co/Biblioteca%20Institucional%20Cemav/Taller-audio/BitrateMuestreo.html>.
- [2 Salgado, «<https://sites.google.com/site/electronicaanalogicasalgado/>,» S. F.. [En línea]. 1] Available: <https://sites.google.com/site/electronicaanalogicasalgado/2/3-1-introduccion-a-los-convertidores/3-1-1-concepto-basico-de-senales-analogicas-y-digitales>.

7

Anexos

Anexo 1 Código de programación del encoder

```

int encoder_pin = 2;      //Pin 2, donde se conecta el encoder

unsigned int rpm = 0;     // Revoluciones por minuto calculadas.

float velocidad = 0;     //Velocidad en [Km/h]

volatile byte pulses = 0; // Número de pulsos leídos por el Arduino en un segundo

unsigned long timeold = 0; // Tiempo

unsigned int pulsesperturn = 10; // Número de muescas que tiene el disco del encoder.

const int wheel_diameter = 27; // Diámetro de la rueda pequeña[mm]

static volatile unsigned long debounce = 0; // Tiempo del rebote.

//// Configuración del Arduino //////////////////////////////////////

void setup(){

  Serial.begin(9600); // Configuración del puerto serie

  pinMode(encoder_pin, INPUT); // Configuración del pin nº2

  attachInterrupt (0, counter, RISING); // Configuración de la interrupción 0, donde está
conectado.

  pulses = 0;

  rpm = 0;

  timeold = 0;

  Serial.print("Segundos");

  Serial.print("RPM");

  Serial.print("pulsos ");

  Serial.println("Velocidad[Km/h]");}

```

```

//// Programa principal //////////////////////////////////////
void loop(){
  if (millis() - timeold >= 1000){ // Se actualiza cada segundo
    noInterrupts(); // Desconectamos la interrupción para que no actúe en esta parte del
programa.

    rpm = (60 * 1000 / pulsesperturn) / (millis() - timeold) * pulses; // Calculamos las
revoluciones por minuto

    velocidad = rpm * 3.1416 * wheel_diameter * 60 / 1000000; // Cálculo de la velocidad en
[Km/h]

    timeold = millis(); // Almacenamos el tiempo actual.

    Serial.print(millis()/1000); Serial.print(" "); // Se envía al puerto serie el valor de tiempo,
de las rpm y los pulsos.

    Serial.print(pulses,DEC); Serial.print(" ");

    Serial.print(rpm,DEC); Serial.print(" ");

    Serial.println(velocidad,2);

    pulses = 0; // Inicializamos los pulsos.

    interrupts(); // Reiniciamos la interrupción
  }
}

////////////////////////////////////Función que cuenta los pulsos buenos //////////////////////////////////////
void counter(){
  if( digitalRead (encoder_pin) && (micros()-debounce > 500) && digitalRead (encoder_pin)
){
  // Vuelve a comprobar que el encoder envía una señal buena y luego comprueba que el tiempo
es superior a 1000 microsegundos y vuelve a comprobar que la señal es correcta.

```

```
debounce = micros(); // Almacena el tiempo para comprobar que no contamos el rebote  
que hay en la señal.
```

```
pulses++;} // Suma el pulso bueno que entra.
```

```
else ; }
```

Anexo 2 Manual de uso

Manual de uso del prototipo implementación de un sistema de rotación de electrodo de disco rotatorio para evaluar condiciones hidrodinámicas de fluidos en régimen de flujo laminar.

Diego Alejandro Nieves Castro, Cód. 11291715281, dnieves20@uan.edu.co

Gustavo Hernando Pinzón Obiedo, Cód. 11291713588, gpinzon80@uan.edu.co

Director

Ingeniero MSc. Carlos Arturo García Gómez,

Codirector

Ingeniero PhD. John Ríos

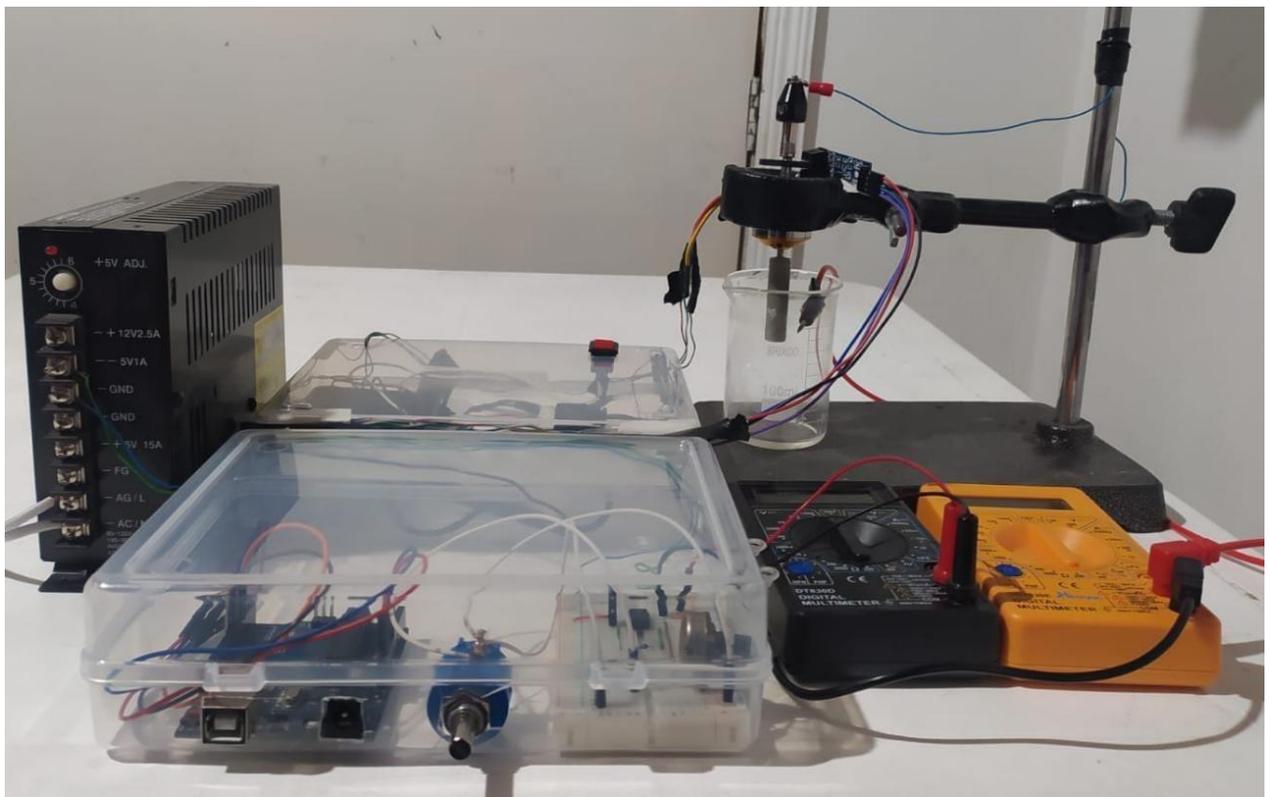
Línea de Ingeniería en Control y Automatización Industrial



Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y
Biomédica Bogotá, Colombia

2021



Manual de uso del prototipo electrodo rotatorio

Encoder

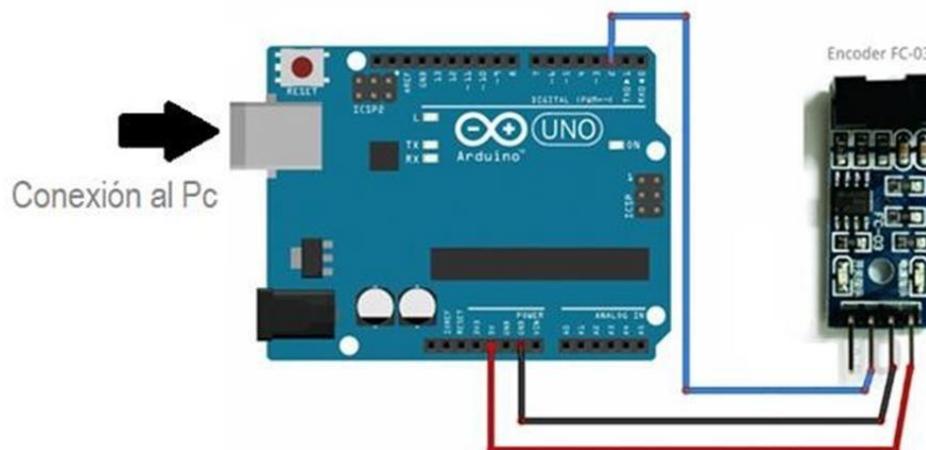
Para la manipulación del encoder lo único que se requiere es:

1. Primero debemos instalar Arduino.
 - En nuestro buscador de internet descargamos Arduino
 - Ejecutamos Arduino
2. Conexión de la tarjeta Arduino y el encoder FC-03:
 - El pin VCC del encoder lo alimentamos con 3.3 voltios de la tarjeta Arduino.
 - El pin GND del encoder lo conectamos a GND de la tarjeta Arduino.
 - El pin DO de encoder lo conectamos a una salida digital (2) de la tarjeta Arduino.

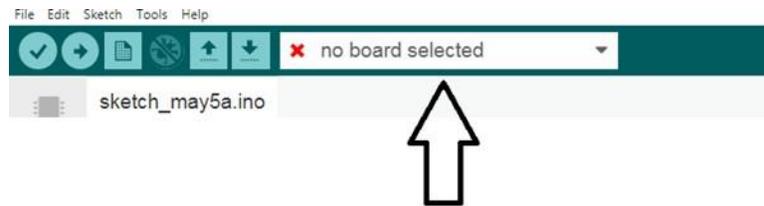
Encoder FC-03 Vista posterior



Arduino UNO y el encoder FC-03



3. Conectar el computador a la tarjeta Arduino por medio del cable USB-Blug.
4. Abrir el programa ARDUINO.
5. Configurar el programa para que lea la tarjeta que estamos utilizando.

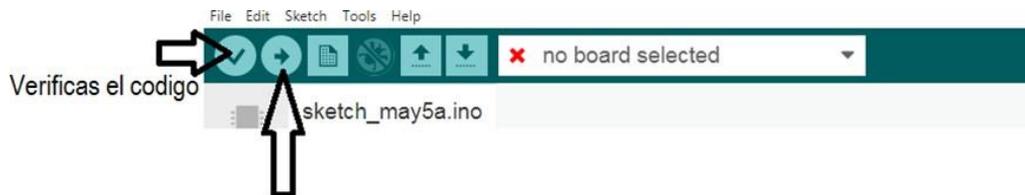


Seleccionar el tipo de tarjeta arduino

6. Observar cual es la salida que tenemos programada para poder cargar la programación en la tarjeta Arduino.



7. Verificar el código, cargar la programación.

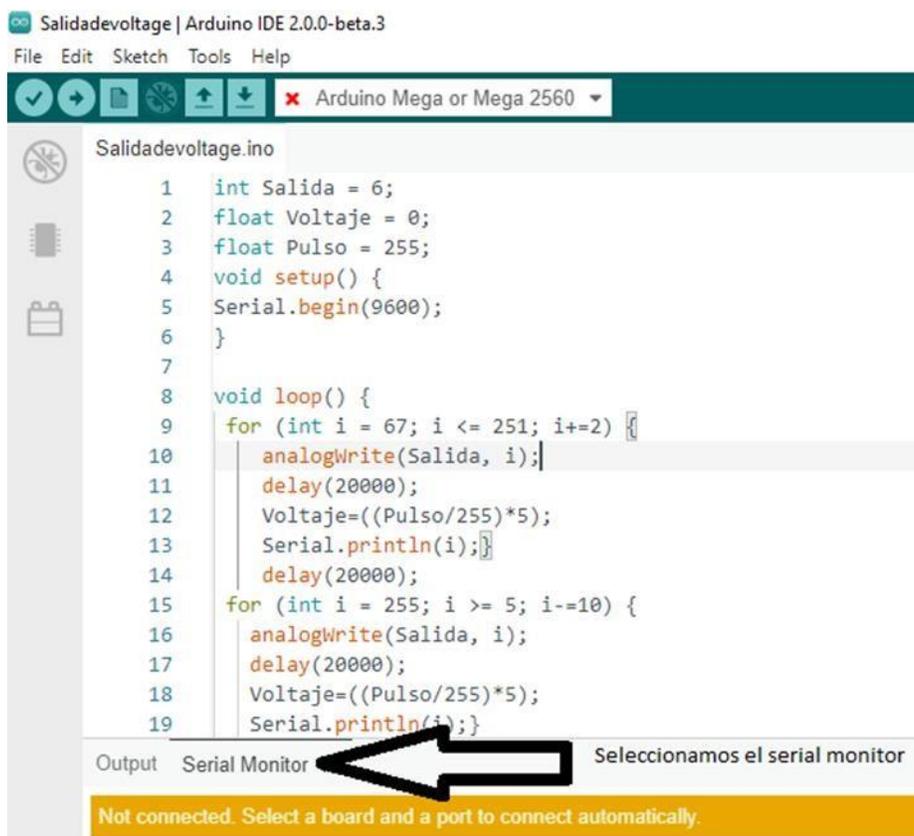


Cargas el codigo a la tarjeta arduino

8. Abrir el serial monitor para poder visualizar las RPM del sistema.



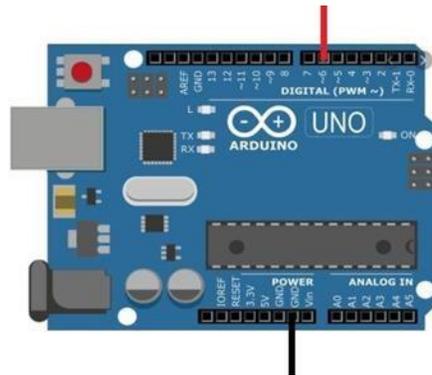
9. Seleccionamos el serial monitor para poder visualizar los datos



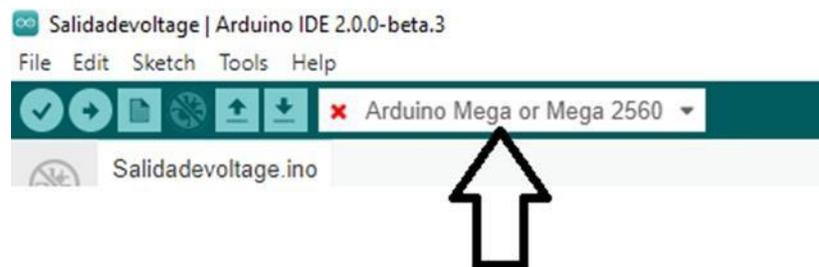
Salida del voltaje para lectura

Para la manipulación de la salida de voltaje para lectura se requiere es;

1. Primero debemos instalar Arduino “omitir si ya tenemos instalado Arduino”
 - En nuestro buscador de internet descargamos Arduino
 - Ejecutamos Arduino
2. Conectar el computador a la tarjeta Arduino por medio del cable USB-Blug.
3. Conexión de la tarjeta Arduino
 - El pin 6 de la Arduino lo conectamos al pin 1 del potenciómetro de 10k ohm
 - El pin GND de la Arduino lo conectamos a la tierra de la fuente, a las tierras de los 2 potenciómetros y a la tierra del amperímetro



4. Configurar el programa para que lea la tarjeta que estamos utilizando.



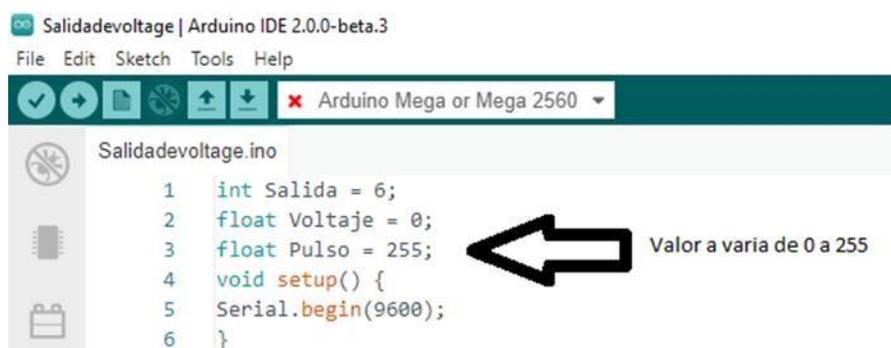
Seleccionar el tipo de arduino

5. Observar cual es la salida que tenemos programada para poder cargar la programación en la tarjeta Arduino.



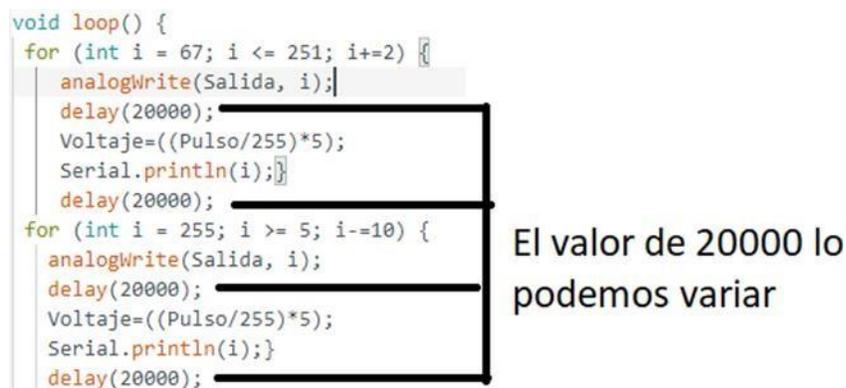
```
Salidadevoltage | Arduino IDE 2.0.0-beta.3
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Mega or Mega 2560
Salidadevoltage.ino
1 int Salida = 6;
```

6. Se programa la salida de voltaje dependiendo el voltaje necesario, teniendo en cuenta que la salida se representa por un código binario, donde 0 corresponde a 0 voltios y 255 corresponde a 5 voltios



```
Salidadevoltage | Arduino IDE 2.0.0-beta.3
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Mega or Mega 2560
Salidadevoltage.ino
1 int Salida = 6;
2 float Voltaje = 0;
3 float Pulso = 255;
4 void setup() {
5 Serial.begin(9600);
6 }
Valor a varia de 0 a 255
```

7. Para que se pueda estabilizar el voltaje y amperaje para una mejor adquisición de datos el programa se diseñó de tal manera que tenga un retraso a la hora de la salida del voltaje este se puede cambiar si modificamos el valor del número en el código delay (20000); este está representado que por cada segundo este valga 1000 en el código de programación.



```
void loop() {
for (int i = 67; i <= 251; i+=2) {
analogWrite(Salida, i);
delay(20000);
Voltaje=((Pulso/255)*5);
Serial.println(i);
delay(20000);
for (int i = 255; i >= 5; i-=10) {
analogWrite(Salida, i);
delay(20000);
Voltaje=((Pulso/255)*5);
Serial.println(i);
delay(20000);
}
}
```

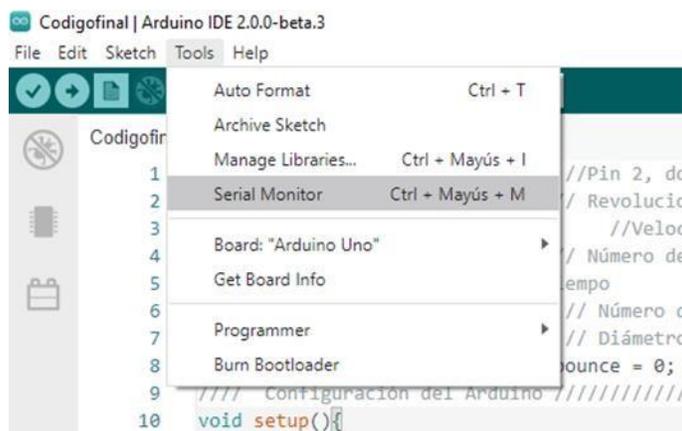
El valor de 20000 lo podemos variar

8. Verificar el código, cargar la programación.

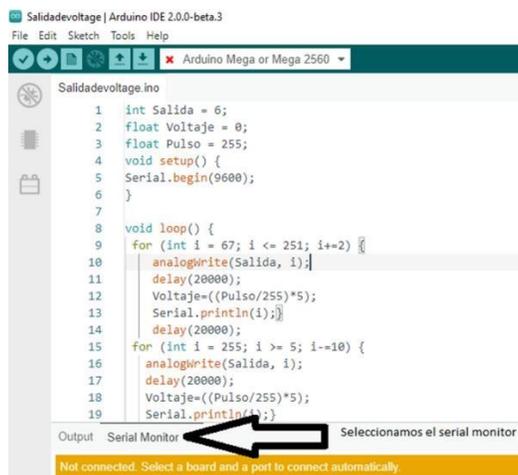
- cada vez que realizamos un cambio hay que cargar de nuevo el código para poderlo programar en la tarjeta Arduino.



9. Abrir el serial monitor para poder visualizar el voltaje



10. La programación está diseñada para visualizar la salida de voltaje de la Arduino, para esto lo único que debemos hacer es abrir el serial monitor.

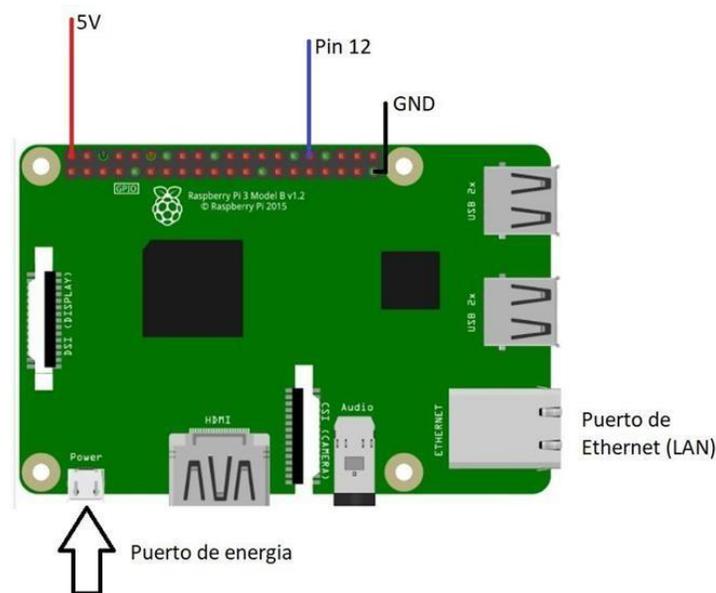


Variador de velocidad del motor

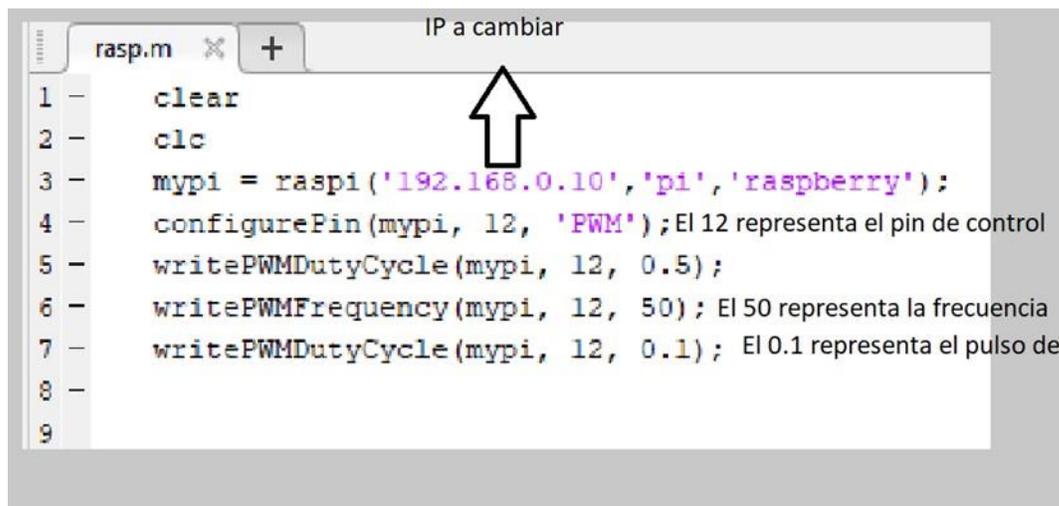
Para poder manipular la velocidad del motor debemos realizar las siguientes instrucciones

1. Para poder manipular la tarjeta raspberry
 - Primero se debe instalar Matlab en el computador.
 - En la tarjeta RASPBERRY se instala un sistema operativo el cual lo configuramos por medio de Matlab, a continuación presentamos un video tutorial (<https://la.mathworks.com/videos/using-a-raspberry-pi-with-matlab-online-1563858691449.html>)
 - Insertamos la micro SD en la ranura de la tarjeta RASPBERRY como lo muestran en el video.
 - Después de la instalación podemos programar la tarjeta desde Matlab.
 - **IMPORTANTE:** no podemos cambiar de computador después de que hayamos instalado el sistema operativo en la micro SD como lo muestran en el video anterior enseñado, ya que en esta programación se instalaron configuraciones específicas del equipo de programación.

2. Conectamos la tarjeta RASPBERRY de la siguiente manera:
 - El pin GND tiene que ir conectado al pin de color café del ESC30A
 - El pin 5V tiene que ir conectado al pin de color rojo del ESC30A
 - El pin 12 tiene que ir conectado al pin de color naranja del ESC30A



3. Del ESC30A salen 5 cables uno rojo 1 negro y 3 azules los cuales deben ir conectados de la siguiente manera:
 - Cable de color negro va a ir conectado al cable negro de la batería.
 - Cable de color rojo va a ir conectado a una terminal de un interruptor y de la otra terminal del interruptor va a ir al cable rojo de una batería.
 - Los otros 3 cables de color azul del ESC30A van a ir conectados a los tres cables del motor en cualquier orden, el orden de la conexión lo único que altera es el sentido de giro del motor.
4. La batería tiene su propia conexión para cargarse.
5. Con estas conexiones ya podemos iniciar a programar las velocidades del motor.
6. Abrimos MATLAB e iniciamos la programación de la siguiente manera, la imagenos muestra dónde hay que realizar las modificaciones.



```

1 - clear
2 - clc
3 - mypi = raspi('192.168.0.10', 'pi', 'raspberrypi');
4 - configurePin(mypi, 12, 'PWM'); El 12 representa el pin de control
5 - writePWMDutyCycle(mypi, 12, 0.5);
6 - writePWMFrequency(mypi, 12, 50); El 50 representa la frecuencia
7 - writePWMDutyCycle(mypi, 12, 0.1); El 0.1 representa el pulso del ciclo
8 -
9 -

```

- Observar cual es la salida (12) que tenemos programada para poder cargar la programación en la tarjeta raspberry, NO cambiar este número ya que esta es una salida PWM y está en la que requiere el ESC30A para poderla programar.
- El número ip (192.168.0.10) configurado en el código hay que cambiarlo cada vez que cambiemos de red, para esto recomiendo una APP (Fing) nos lee las ip conectadas en nuestra red y aparte nos muestra el logo de los equipos que están conectados a la red.
- En el código podemos modificar la frecuencia y el pulso del ciclo a la necesidad requerida teniendo en cuenta la siguiente tabla de valores, para que los valores de ciclo mínimo pueden fallar cuando la batería no está bien cargada dado caso que no funciones el mínimo escribir el número siguiente,

ADVERTENCIA: no utilizar la máxima frecuencia (800 Hz) o los valores de ciclo máximo si el equipo no se encuentra horizontalmente posicionado, de hacerlo el equipo no va a arrojar buenos datos de lectura debido a la turbulencia que se genera o puede llegar a salpicar líquido en el motor y este generará un corto.

Frecuencia Hz	Ciclo mínimo	Ciclo máximo
50	0,1	
80	0,1	0,17
100	0,12	0,22
160	0,19	0,34
200	0,24	0,43
250	0,3	0,53
320	0,38	0,69
400	0,47	0,86
500	0,59	0,99
800	0,95	0,99

7. Siguiendo las anteriores recomendaciones se pueden realizar las debidas pruebas.

Toma de datos de voltaje y Amperaje.

Voltaje

El voltímetro debe estar conectado en paralelo a la salida del amplificador AD620AN y graduado en la medida requerida, por lo general se graduó en la opción de 20V o en la 2000mV

Amperaje

El amperímetro debe estar conectado en serie teniendo en cuenta que la punta negra del amperímetro debe ir a la tierra del AD620AN y la punta roja debe estar sumergida en la sustancia cerca del electrodo del eje del motor y graduado en la medida requerida, por lo general se graduó en la opción de 20mA o en la 2000microA.

Nota: estas medidas las debemos tomar manualmente y posteriormente cargarlas en una hoja de cálculo para realizar las gráficas respectivas.