

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Diseño de un sistema diagnóstico y pronóstico de fallos en un motor  
BLDC”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Mecatrónica**

Presentado por:

Jose Daniel Sacoto Peralta

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico a mi familia por ser los motores de mi vida. Mis amigos, quienes me acompañaron por esta etapa de vida, son la familia que escogí. A aquellos profesores que me brindaron sus conocimientos profesionales y de vida, de manera desinteresada.

**José Daniel Sacoto Peralta**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a Dios, por haberme permitido llegar a este punto de mi formación profesional.

Agradezco a mis padres, Gloria Peralta y Antonio Sacoto, quienes me han acompañado por este transcurso de vida con su esfuerzo, consejos y ejemplo de vida.

A mis hermanos, en especial a Mónica, quien me enseñó a apreciar los pequeños detalles de la vida, y Cristian, quien me proporcionó su ayuda de manera incondicional.

A Vicenç Puig quien me permitió realizar este proyecto y confió en mí.

A Efraín Terán quien ha sido profesor y amigo, mis amigos Charly González, Alvaro Soriano, Eduardo Ceballos, Moisés Bajaña.

A quienes me acompañaron en este camino, familia y amigos. Esto no lo realicé sólo, hubo quienes me acompañaron, gracias por creer en mí.

**José Daniel Sacoto Peralta**

## DECLARACIÓN EXPRESA

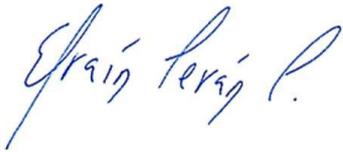
“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *José Daniel Sacoto Peralta* doy mi consentimiento para que la ESPOLE realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

José Daniel Sacoto Peralta

## EVALUADORES



**Terán Calle Efraín, M.Sc.**

PROFESOR DE LA MATERIA



**Agila Gálvez Wilton, Ph.D.**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Una creciente necesidad de los motores eléctricos aparece a medida que la automatización se hace más necesaria en la industria. La importancia de éstos es tal que se concluye que, entre mayor automatización tiene un sistema de producción, se debe utilizar un mayor número de motores eléctricos. Es tanta la importancia de los motores eléctricos y sus sistemas que estamos prontos a alcanzar el 50% del consumo eléctrico mundial. La dependencia de éstos hace que sea necesaria una herramienta que permita supervisarlos, debido a que si no se encuentran funcionando correctamente pueden presentar bajas en la calidad de la producción y gastos por mantenimiento innecesario. El uso de los motores sin escobillas de corriente directa evidencia un fuerte crecimiento en los últimos años y pretende reemplazar gran parte de su competencia debido a las ventajas que presenta. Las empresas prestan sus servicios en diagnóstico de fallos y presentado el informe de operación se llevan su instrumentación, por lo cual el sistema propuesto presenta el equipo de adquisición de datos junto con los sensores que evaluarán los datos permitiendo la continua evaluación del motor sin escobillas de corriente directa. Éste contiene un sistema de diagnóstico con metodología basada en modelo que utiliza residuos para detección de fallos. Diagnostica las variables que fallan en el sistema y en base a esto pueden dar el mantenimiento correctivo. La prognosis utiliza un filtrado de datos en las señales de residuos y aproxima a fallos mediante derivadas. La obtención de los datos de los sensores fueron mediante la herramienta de Matlab en el cual se utilizó un motor BLDC 80140510 por la empresa Crouzet Motors.

**Palabras Clave:** Diagnosis, Prognosis, motor BLDC.

## **ABSTRACT**

*A growing need for electric motors appears as automation becomes more necessary in industry. The importance of these is such that it is concluded that, the more automation a production system has, the more electric motors must be used. The importance of electric motors and their systems is so important that we are about to reach 50% of the world's electricity consumption. The dependence on these makes it necessary to have a tool that allows them to be supervised, because if they are not working correctly, they can present drops in the quality of production and unnecessary maintenance costs. The use of direct current brushless motors has shown strong growth in recent years and aims to replace a large part of its competition due to the advantages it presents. The companies provide their services in fault diagnosis and presented the operation report, they take their instrumentation, for which the proposed system presents the data acquisition equipment along with the sensors that will evaluate the data allowing the continuous evaluation of the brushless motor of direct current. It contains a diagnostic system with model-based methodology that uses residuals for fault detection. It diagnoses the variables that fail in the system and based on this they can give corrective maintenance. The prognosis uses data filtering on residual signals and approximates faults using derivatives. Obtaining the data from the sensors was using the Matlab tool in which a Brushless DC 80140510 motor was used by the company Crouzet Motors.*

**Keywords:** *Diagnosis, Prognosis, Brushless DC motor.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Justificación del problema .....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General .....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Motores eléctricos <i>Brushless</i> .....	4
1.4.2 Tipos de Motores <i>Brushless</i> .....	5
1.4.3 El motor BLDC .....	6
1.4.4 Funcionamiento .....	8
1.4.5 Control de velocidad .....	8
1.4.6 Aplicaciones con motores <i>brushless</i> .....	9
1.4.7 Fallos presentes en los motores .....	10
1.4.8 Detección de fallos.....	11
1.4.9 Sensores.....	15

1.4.10	Tarjeta de adquisición de datos .....	17
1.4.11	Base de datos y SQL .....	18
1.4.12	MySQL .....	18
CAPÍTULO 2 .....		19
2.	Metodología .....	19
2.1	Procedimiento de diseño .....	19
2.2	Requerimientos de diseño .....	21
2.2.1	Funcionalidad.....	21
2.2.2	Características técnicas de los equipos .....	22
2.2.3	Restricciones .....	22
2.2.4	Alternativas de solución .....	22
2.2.5	Diseño simplificado .....	24
2.3	Etapa de generación de fallos .....	25
2.3.1	Detección de fallos.....	25
2.3.2	Diagnóstico de fallos .....	27
2.3.3	Prognosis de fallos.....	27
2.3.4	Descripción del modelo del motor BLDC .....	28
2.3.5	Base de datos .....	33
2.4	Diseño de sistema de alarma .....	35
CAPÍTULO 3 .....		36
3.	Resultados y ANÁLISIS .....	36
3.1	Selección de motor y componentes electrónicos.....	36
3.1.1	Motor BLDC .....	36
3.1.2	Sensores.....	37
3.2	Arquitectura de Hardware.....	38
3.2.1	Comunicación serial.....	38

3.2.2	Controlador Arduino Uno R3.....	38
3.2.3	Conexiones del arduino con componentes .....	39
3.2.4	Simulación de entradas.....	41
3.3	Simulación de motor BL DC .....	42
3.4	Diseño de carcasa.....	42
3.5	Aplicación Software .....	43
3.5.1	Lenguaje Python .....	43
3.5.2	Resultados de programa GUI .....	44
3.6	Fallos presentes en el motor .....	51
3.7	Análisis de costos.....	53
CAPÍTULO 4 .....		54
4.	Conclusiones y recomendaciones .....	54
4.1	Conclusiones .....	54
4.2	Recomendaciones.....	55

## BIBLIOGRAFÍA

## APÉNDICES

## ABREVIATURAS

BLDC	Brushless Direct Current
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FSM	Fault Signature Matrix
DB	Data Base
DAQ	Data Acquisition
IOT	Internet Of Things
SQL	Structured Query Language
DC	Direct Current
AC	Altern Current
Fem	Fuerza electromotriz

## SIMBOLOGÍA

$C$	Capacitancia
$e_{abc}$	Fem inversa por fase inducida en el estator
$i$	Corriente del circuito simplificado
$i_{abc}$	Corriente del estator por fase
$k_e$	Coefficiente de fem posterior
$L$	Autoinductancia por fase
$L_{eq}$	Inductancia equivalente del circuito simplificado
$M$	Inductancia mutua
$n$	Punto neutro de la conexión en estrella
$p$	Par de polos
$R$	Resistencia por fase
$R_{eq}$	Resistencia equivalente del circuito simplificado
$S_1 \dots S_2$	Interruptores controlados basados en IGBT ( <i>Insulated Gate Bipolar Transistors</i> )
$v_{abc}$	Voltaje del estator por fase
$V_{dc}$	Voltaje DC
$\theta_r$	Ángulo del rotor
$\theta_e$	Ángulo eléctrico
$B_r$	Coefficiente de amortiguación o fricción viscosa del ambiente
$\lambda'_m$	Amplitud del enlace de flujo por los imanes permanentes
$\omega_r$	Velocidad del rotor
$v_{abc}$	Voltaje de fase en estator
$T_e$	Torque electromagnético
$T_L$	Torque de carga
$J$	Momento de inercia
$\frac{d}{dt}$	Operador diferencial
$n$	Número de muestras asociadas a media móvil

$N$	Newtons
$rad$	radianes
$s$	segundos
$v$	Voltios
$\Omega$	Ohmios

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de motores <i>brushless</i> .....	5
Figura 1.2 motor BLDC del catálogo de la empresa Allied Motion .....	6
Figura 1.3 Devanados del estator: <i>Star</i> (estrella) y <i>Delta</i> (triángulo) .....	7
Figura 1.4 Tipos de rotores en un motor BLDC .....	7
Figura 1.5 Curva característica de un motor brushless .....	8
Figura 1.6 Diagrama de bloques para controlar un motor BLDC .....	9
Figura 1.7 Manipulador KUKA <i>youBot</i> utilizado para investigación. Utiliza motores <i>brushless</i> para generar el movimiento. Compañía KUKA.....	9
Figura 1.8 Distribución de causas de fallos en motores .....	10
Figura 1.9 Distribución de fallos en motores BLDC .....	11
Figura 1.10 Esquema simplificado para un proceso de automatización .....	12
Figura 1.11 Comportamiento de fallo como función escalón .....	13
Figura 1.12 Comportamiento de fallo como función rampa .....	13
Figura 1.13 Comportamiento de fallo como función pulso.....	14
Figura 1.14 Mapa conceptual de métodos de diagnosis.....	14
Figura 1.15 Tacómetro óptico .....	16
Figura 1.16 Sensor de efecto hall .....	16
Figura 1.17 Módulo DC sensor de voltaje por división de tensión .....	17
Figura 1.18 Placa Arduino .....	17
Figura 1.19 Logo de MySQL .....	18
Figura 2.1 Flujograma para diseño de programa diagnóstico, pronóstico de fallos con circuito de alarma .....	20
Figura 2.2 Diseño de conexiones para monitoreo de señales en diagnóstico de fallos con circuito de alarma en caso de fallo .....	24
Figura 2.3 Esquema del sistema de sensado de datos .....	25
Figura 2.4 Esquema de detección de fallos basado en modelo .....	26
Figura 2.5 Gráfico de comportamiento de precios de acciones en empresa AESGENER, presenta su media móvil color gris de 50 sesiones y de color rojo con 25 sesiones .....	28
Figura 2.6 Circuito trifásico equivalente alimentado por un inversor de puente completo .....	29

Figura 2.7 (a) fem traseras trapezoidales por fase y corrientes por fase en los devanados del estator de 2 fases (cada $\pi / 3$ rad), y (b) circuito equivalente en el modo de conducción para cada devanado.....	29
Figura 2.8 Ejemplo de diagrama entidad relación.....	35
Figura 3.1 Circuito de alarma .....	40
Figura 3.2 Diagrama de conexiones para sensores .....	41
Figura 3.3 Conexiones de prueba para lectura de sensores y posterior almacenamiento de datos.....	41
Figura 3.4 Modelo del Case montado con elementos vista 1 .....	43
Figura 3.5 Modelo del Case montado con elementos vista 2 .....	43
Figura 3.6 Logo de Python .....	44
Figura 3.7 Pantalla principal .....	45
Figura 3.8 Lectura de datos de sensores, fallo tipo pulso de atascamiento .....	45
Figura 3.9 Gráfica de comportamiento de residuos, fallo tipo pulso de atascamiento ...	46
Figura 3.10 Detección de errores por residuos, fallo tipo pulso de atascamiento.....	47
Figura 3.11 Fallos presentes en el sistema, fallo tipo pulso de atascamiento .....	47
Figura 3.12 Gráfica de residuo uno lado izquierdo, lado derecho gráfica de residuo con filtro de media móvil, fallo tipo pulso de atascamiento.....	48
Figura 3.13 Acercamiento del comportamiento del fallo tipo pulso, fallo tipo pulso de atascamiento .....	48
Figura 3.14 Lectura de sensores, fallo tipo rampa en la corriente .....	49
Figura 3.15 Media móvil, fallo tipo rampa en corriente .....	49
Figura 3.16 Comparación de señal filtrada y sin filtrar de fallo en la corriente.....	50
Figura 3.17 Señal filtrada con media móvil 10 000, fallo tipo rampa de corriente.....	50
Figura 3.18 Demostración de la creación de la base de datos y los datos almacenados en MySQL.....	51
Figura 3.19 Reporte de la gráfica de fallo en atascamiento.....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Aspectos básicos sobre diagnosis de fallos.....	11
Tabla 1.2 Variables utilizadas para detectar fallos.....	15
Tabla 2.1 Tabla de requerimientos para funcionalidad .....	21
Tabla 2.2 Tabla de especificaciones técnicas para el equipo .....	22
Tabla 2.3 Matriz de decisión para selección de metodología en detección de fallos.....	24
Tabla 2.4 Ejemplo de tabla <i>FSM</i> .....	27
Tabla 2.5 Tabla de firma de fallos.....	33
Tabla 3.1 Motor seleccionado para pruebas.....	36
Tabla 3.2 Selección de sensores y las especificaciones que presentan .....	37
Tabla 3.3 Componentes empleados para el sensor de alarma .....	39
Tabla 3.4 Distribución de pines analógicos y digitales.....	40
Tabla 3.5 Parámetros referenciados para simulación.....	42
Tabla 3.6 Síntomas generales de fallos en motores.....	51
Tabla 3.7 Variaciones en la resistividad e inductancia en un motor .....	53
Tabla 3.8 Detalles de costos de prototipo.....	53

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desafíos para los directivos en la industria es el de alcanzar la mejor posición en el mercado frente a la competencia. Para esto se requiere de varias capacidades como ser más competitivos. Para lo cual, hay un punto muy importante que se debe de tener en cuenta y es “crear valor”, para obtener esta ventaja competitiva de manera genérica y sostenida [1]. Esto se obtiene al mejorar cada uno de los procesos que se manejen ya sean de enfoque al cliente o máxima sostenibilidad de los procesos industriales. Esto implica que la empresa debe de mejorar en cada área, una de estas áreas es su producción (tiempo más corto en el proceso o mantener una buena calidad del producto) y como beneficio propio. Esto permite obtener beneficios ya sean a corto, mediano o largo plazo. Si esto no se cumpliera, puede ser que exista algún fallo o desperfecto durante el proceso, lo cual puede ocasionar graves problemas, ya sean: daños de la maquinaria, paros imprevistos en alguna celda de manufactura, algún daño en la integridad del operario, que se traducen como pérdidas.

Respecto al consumo eléctrico a nivel mundial, el sector industrial representa a un 68%. Además, el consumo mundial eléctrico representa un 46% dirigido exclusivamente para el uso de manejo en sistemas de motores eléctricos. Esto demuestra el impacto que produce la necesidad del uso de motores. Lo que implica la necesidad de una buena eficiencia y fiabilidad de operación en estos motores eléctricos [2]. Los motores eléctricos son uno de los componentes indispensables en todo proceso de manufactura a nivel industrial, debido a que este es el que produce el movimiento a la maquinaria, ya sea para algún tipo de taladrado, cortado, mezcla, transporte, etc.

La necesidad de mejorar cada proceso, de hacerlo más eficiente, implica optimizar cada componente. Entre los componentes más utilizados están los motores eléctricos, siendo éstos con escobillas y sin escobillas. Los motores tradicionales *brushed* (con escobillas) realizan una conmutación mediante uso de escobillas, generando fricción y ruido, lo cual a la larga reduce el tiempo de vida del motor y su dificultad de control. Por esta necesidad se creó los motores *brushless*, los cuales

presentan muchas ventajas respecto a sus antecesores. Entre estas ventajas están su alta eficiencia, peso reducido, rango de velocidad, daños por fricción, con un correcto mantenimiento su tiempo de vida es muy extenso. Esto los hace especiales al requerir un continuo trabajo y aplicaciones de control de velocidad [3]. El interés de mantener estos motores funcionando de manera correcta, mejora la parte energética del consumo en la producción y reduce los costos de estos procesos.

### **1.1 Descripción del problema**

Los motores eléctricos son indispensables en un proceso industrial y si nos referimos a los motores que nos puedan prestar mayores beneficios, son los *brushless* debido a su alta tasa de crecimiento. Por lo cual en los procesos siempre debe de mantenerse funcionando en correctas condiciones. Dicho de otra forma, su fiabilidad debe ser alta. Si no se presenta un correcto mantenimiento sobre este, puede producir pérdidas económicas para la empresa. Un mal funcionamiento de éste puede ocasionar una reducción de calidad en el producto esperado o paros del proceso inesperados, incluso generar daños en la integridad de algún operario.

Los fallos que encontramos en los motores *brushless* son varios: fallas mecánicas, fallas en su armadura, falla en los imanes permanentes. Para prevenir o detectar algún posible desperfecto o fallo en el motor podemos medir el comportamiento de sus variables físicas durante el trabajo de un motor, ya sean éstas como: la velocidad angular del rotor, la corriente y voltaje que utiliza. Mediante un análisis de estas señales podríamos detectar si existe algún fallo presente, diagnosticar en dónde se encontraría el problema e incluso poder pronosticar cuando podría fallar y prevenir con un mantenimiento preventivo.

### **1.2 Justificación del problema**

Actualmente nos encontramos en una etapa auge para los motores *brushless*, esto es debido al creciente avance tecnológico y la dependencia de mayor precisión, mayor fiabilidad, repetibilidad en los procesos industriales, los cuales permiten estos motores *brushless* con gran eficacia respecto a su competencia. Por hoy presentan

un crecimiento muy alto en uso y compra. Además, de que se espera un mercado de \$72 millones para el 2026 desde alrededor \$35 millones en el 2018 que se presenta con una tasa de crecimiento anual de un 9.3% [4].

Un sistema detector de fallos que garantice el diagnóstico en los motores *brushless* nos permitirá reducir los costos de mantenimiento, evitar paros no deseados, mantener una buena calidad del proceso. El pronóstico de estos fallos nos facilita un mantenimiento correctivo eficiente sobre el motor.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Diseñar un sistema efectivo de diagnóstico de fallos presentes en motores BLDC mediante el análisis de unas variables físicas medibles para la correcta operación del proceso.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar el sistema de adquisición de datos mediante los sensores y la DAQ para el análisis de fallos.
- Definir un modelo para la base de datos en el cual puedan relacionarse los datos de manera organizada.
- Crear una base de datos para almacén de los datos de los sensores y los datos generados por el sistema.
- Diseñar una interfaz de usuario con base en lenguaje Python para que el usuario pueda utilizar el sistema de manera sencilla.
- Diagnosticar fallos para dar un mantenimiento preciso.
- Pronosticar fallos para cuando se presente uno y dar mantenimiento correctivo.
- Reportar los fallos para planificación de mantenimiento en el motor *BLDC*.
- Diseño de un circuito de alarma en caso de que el fallo esté presente que permita avisar al usuario.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Motores eléctricos *Brushless*

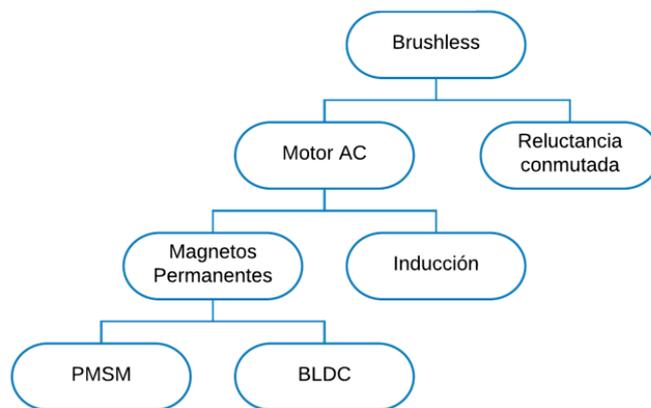
Los motores eléctricos también llamados máquinas eléctricas rotativas. Se los llama “máquinas eléctricas” debido a que pueden convertir algún tipo de energía recibida en eléctrica, así mismo transformar esta energía de manera inversa. Se nombra como “Rotativa” porque necesita o produce un movimiento mecánico. Estos motores eléctricos pueden realizar su función con mayor eficacia aprovechan a partir del 55% la energía suministrada. Los motores de combustión interna tan solo aprovechan hasta un máximo del 35% de la energía suministrada para realizar movimiento, además de ser mayores contaminantes [5].

#### Clasificación general de motores eléctricos

Los motores eléctricos pueden clasificarse en dos grandes grupos por su alimentación:

- Motores CD
  - Utiliza una fuente de alimentación lineal o llamada corriente directa. Fácil manipulación de la velocidad del rotor mediante su alimentación.
- Motores CA
  - Utiliza como alimentación corriente alterna, es útil a velocidades bajas por su buen torque. Suele requerir variadores de frecuencia para su control de velocidad.

Además, podemos indicar que los motores se subdividen en con escobillas y sin escobillas, estos se escogen dependiendo de la aplicación y si se desea ahorrar en costos. Procederemos a explicar unas características en cada tipo de motor *brushless* [6]. La Figura 1.1 detalla la clasificación de motores sin escobillas.



**Figura 1.1 Clasificación de motores *brushless***

## 1.4.2 Tipos de Motores *Brushless*

Se presenta una breve explicación de cada uno.

### 1.4.2.1 Motores de imanes permanentes

Los devanados en el rotor y la conmutación mecánica se logran omitir mediante el uso de estos imanes permanentes. A la vez, si se elimina la excitación del devanado en el rotor y se evitan las pérdidas por fricción, la eficiencia aumenta.

### 1.4.2.2 Motores *brushless AC*

También conocidos como PMAC (motores de AC de imán permanente), presenta similitud con el motor BLDC. Este no posee polos estatores como el BLDC. Por su parte, los devanados del estator se distribuyen alrededor de la carcasa del motor y estos imanes están formados para inducir una forma de onda FEM posterior sinusoidal en cada fase del motor a medida que gira el rotor, en forma de la onda trapezoidal que genera la BLDC.

### 1.4.2.3 Motores de reluctancia

Este contiene la configuración más antigua de los rotores en máquinas eléctricas. No utiliza electroimanes ni imanes permanentes en el rotor, todo está construido con un material magnético.

### 1.4.2.4 Motores BLDC (*Brushless direct current motor*)

Esta configuración permite que el motor tenga las características de velocidad y torque de un motor CD en derivación con escobilla. Al igual que los motores con escobillas, los imanes que pasan por los polos del estator crean una FEM en los

devanados del estator. Este motor podemos encontrarlo en su forma comercial con la caja reductora integrada (véase la Figura 1.2).



**Figura 1.2 motor BLDC del catálogo de la empresa Allied Motion [7]**

### **1.4.3 El motor BLDC**

Para comprender el funcionamiento de estos motores BLDC es necesario comprender su estructura.

#### **1.4.3.1 Estator**

Estator es la parte inmóvil que se presenta dentro del motor. Compuesto por láminas de acero superpuestas sobre las cuales se encuentran los devanados. Comúnmente suele utilizar tres fases principales. Aunque podemos encontrar múltiples construcciones de acuerdo con la cantidad de polos utilizados.

Al igual que los motores asíncronos, puede utilizar un arreglo en los devanados, los cuales pueden ser como indica la Figura 1.3. Cada arreglo tiene su beneficio de acuerdo con la aplicación. Por ejemplo, el de estrella nos permite una reducción en el voltaje de fase frente al triángulo. Su configuración más común es el de estrella.

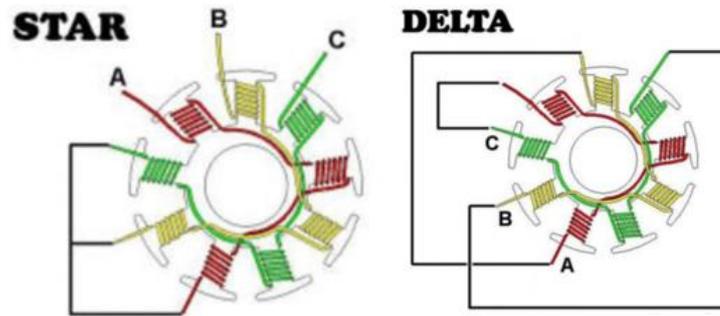


Figura 1.3 Devanados del estator: *Star* (estrella) y *Delta* (triángulo)

### 1.4.3.2 Rotor

El rotor es definido como la parte que gira dentro de una máquina electromagnética o turbina. Éste contiene el eje del motor y un arreglo serial de imanes permanentes. Existen dos configuraciones de rotores, los cuáles son con imanes dentro del estator (*Inrunner BLDC*) o fuera de este (*Outrunner BLDC*) (véase la Figura 1.4).

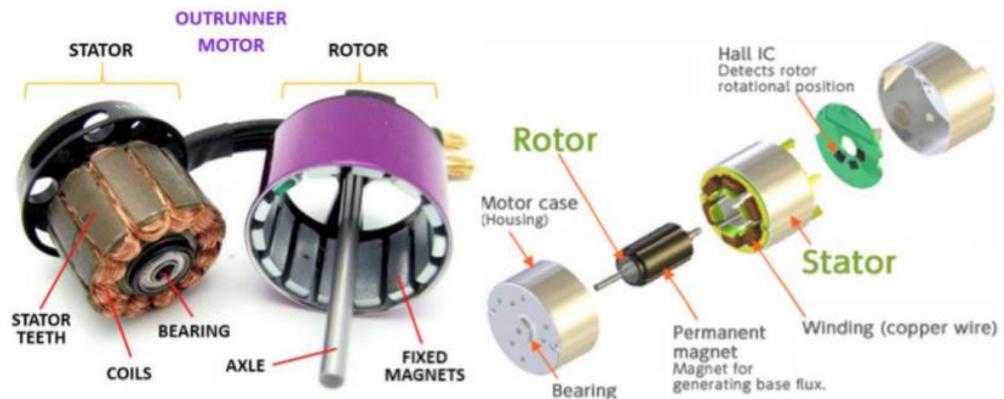
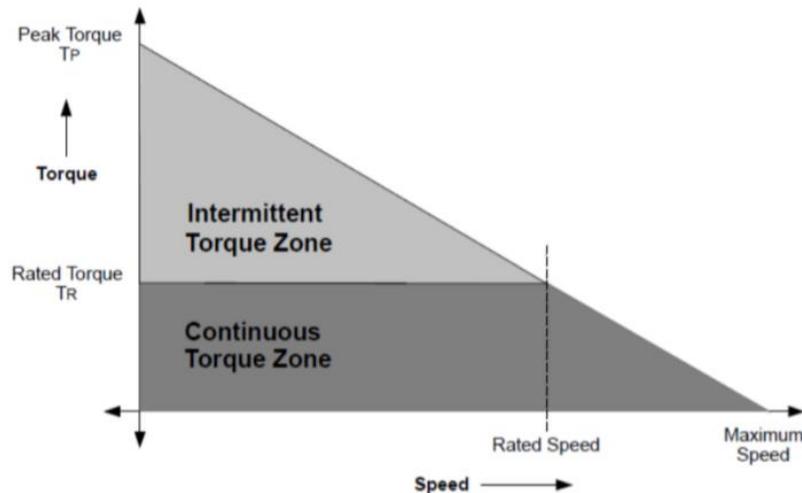


Figura 1.4 Tipos de rotores en un motor BLDC [8]

### 1.4.3.3 Curva característica

El motor brushless nos permite otorgar un par nominal (*Rated Torque*) de arranque que mantendrá hasta alcanzar su velocidad nominal (*Rated Speed*). Una característica importante de estos motores es que pueden alcanzar 1.5

veces la velocidad nominal al perder par, como indica la zona de par en la Figura 1.5.



**Figura 1.5 Curva característica de un motor brushless [8]**

#### **1.4.4 Funcionamiento**

Su principio de funcionamiento consta en generar campos magnéticos mediante la excitación de los bobinados del rotor. Los cuales interactúan con los imanes permanentes logrando una atracción produciendo un giro en el rotor. La alternancia de esta corriente que pasa por los bobinados para la producción del giro del motor es generado por un variador de frecuencia. Aquí la principal diferencia de un motor tradicional de escobillas y el brushless que necesita electrónica extra para el variador.

#### **1.4.5 Control de velocidad**

El control de velocidad para estos motores dependerá del requerimiento deseado. Puede utilizar corriente alterna o corriente directa, esto dependerá de la capacidad del variador de frecuencia, el variador de potencia generará las señales para el movimiento del motor de acuerdo con la posición en la que se encuentre el rotor. Esto puede determinarlo debido a que si trabaja con tres fases: dos generan el movimiento y la tercera fase mediante el efecto hall determina la posición del rotor.

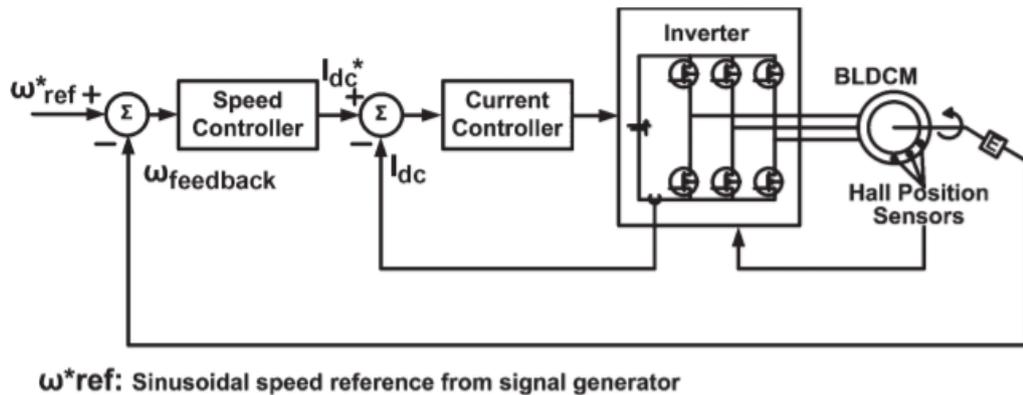


Figura 1.6 Diagrama de bloques para controlar un motor BLDC [9]

#### 1.4.6 Aplicaciones con motores *brushless*

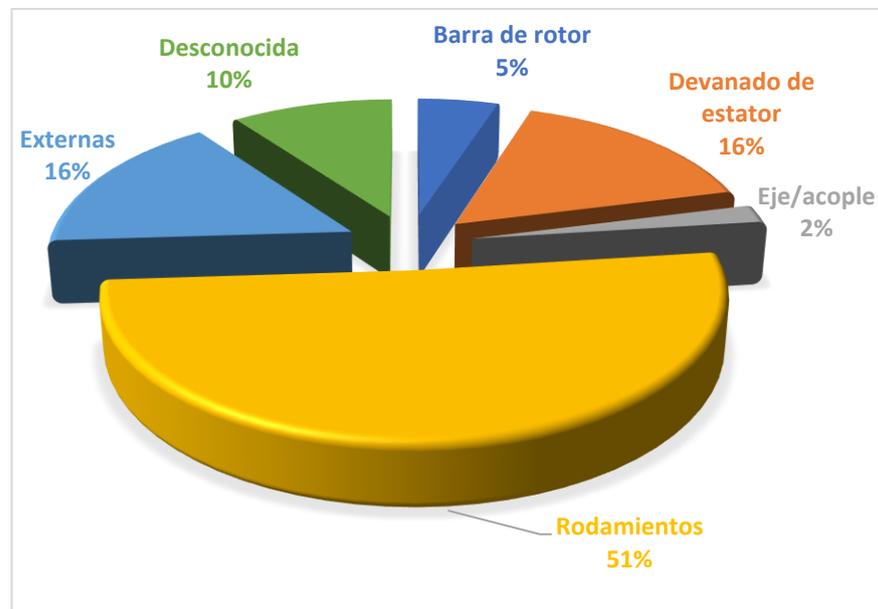
El uso de estos motores presentan varias aplicaciones tales pueden ser: defensa nacional, aeroespacial, robótica, control de procesos industriales, máquinas herramientas de precisión, electrónica automotriz, electrodomésticos, automatización de oficinas [10]. Desenvuelve un puesto importante en estas áreas, he aquí su valor para la investigación. Además de que estas industrias manejan grandes montos de la economía mundial (véase la Figura 1.7).



Figura 1.7 Manipulador KUKA *youBot* utilizado para investigación. Utiliza motores *brushless* para generar el movimiento. Compañía KUKA [11]

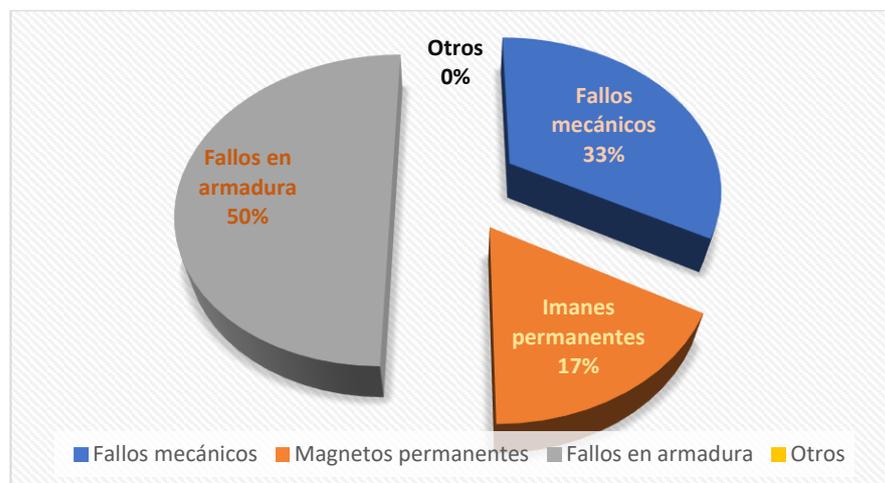
### 1.4.7 Fallos presentes en los motores

La mayoría de las fallas de los motores son causadas por la combinación de esfuerzos que actúan sobre el rotor, el devanado, rodamientos o eje. Si estos esfuerzos se mantienen por un prolongado tiempo y no se encuentran dentro de las capacidades del diseño, la vida del motor es drásticamente recortada produciendo fallos prematuros. Se observa en la Figura 1.8 los porcentajes de distribución de fallos en componentes de un motor eléctrico, estos pueden variar ligeramente entre la aplicación del motor y la configuración que posea [12].



**Figura 1.8 Distribución de causas de fallos en motores**

Una vez conocidos los principales componentes que fallan en un motor. La Figura 1.9 muestra los fallos más comunes documentados de los motores BLDC en revistas científicas como la IEEE [13]. El mayor número de fallos mecánicos se producen en los rodamientos, los fallos en los imanes permanentes se producen por pérdidas de magnetismo y fallos en armadura se generan por aumento de temperatura en los devanados. Con una visión más clara podemos comprender dónde debe darse con mayor frecuencia el mantenimiento.



**Figura 1.9 Distribución de fallos en motores BLDC**

## 1.4.8 Detección de fallos

### 1.4.8.1 Supervisión

Se debe de tener una supervisión en cada proceso técnico debido a que este enfoque nos muestra el estado presente, indicadores indeseados o algún estado no permitido, todo esto para tomar una acción que evite cualquier accidente o daño [14].

### 1.4.8.2 Diagnósis

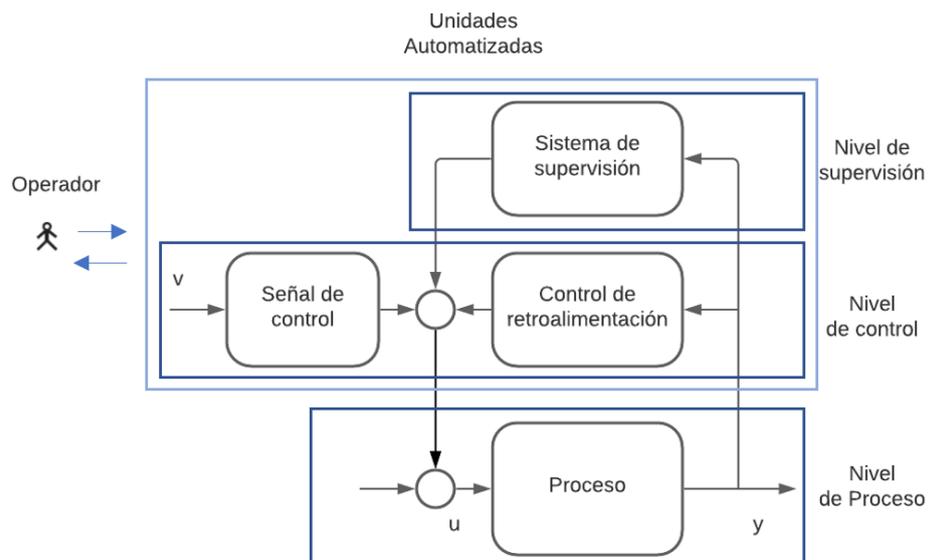
En la Tabla 1.1 se encuentran breves detalles sobre la importancia de este procedimiento, su definición y propósito.

**Tabla 1.1 Aspectos básicos sobre diagnóstico de fallos**

Aspecto básico sobre diagnóstico de fallas	Argumento	Referencia
Importancia	Promueve la seguridad, calidad del proceso y mantenimiento de productividad. Permite el uso de los componentes en los procesos con buenas condiciones. Aumenta la calidad, disminuye la cantidad de productos rechazados y complace con las normas estrictas de seguridad y regulaciones	[15]–[18]

	ambientales. Reducción de costos respecto al mantenimiento y reparaciones, mayor productividad.	
Definición	Es el proceso que precisa determinar el tipo de falla acontecido, para una posterior acción correctiva necesaria. Consta en la identificación de causa básica del problema y la naturaleza de éste, todo esto a partir de síntomas identificables mediante las variables medidas. Genera una hipótesis capaz de justificar un funcionamiento anómalo para la selección de acciones capaces de repararlo.	[19], [20]
Propósito del diagnóstico de fallas	Genera una búsqueda de identificación de la principal de causa de este mal funcionamiento en el sistema, basado en la observación externa.	[21]

La Figura 1.10 muestra un esquema de un proceso de automatización con varios niveles de procesos de información. El nivel más inferior refiere a una secuencia de control y continua retroalimentación del sistema de control. El siguiente nivel refiere a la supervisión del sistema. Toda esta información es mostrada para el operador que revisa el sistema para que funcione correctamente.



**Figura 1.10 Esquema simplificado para un proceso de automatización**

Una clasificación para los fallos con referencia a su comportamiento en el tiempo.

#### 1.4.8.2.1 Fallos abruptos

El fallo inicia de manera repentina y es constante en el tiempo. Puede ser considerado como un escalón. Véase la Figura 1.11.

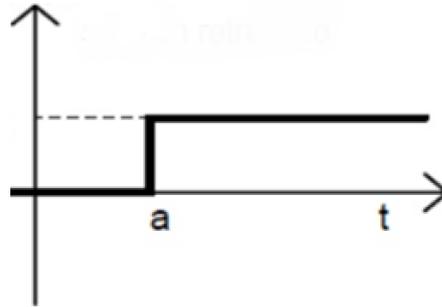


Figura 1.11 Comportamiento de fallo como función escalón

#### 1.4.8.2.2 Fallos incipientes

Aparecen en un momento determinado y su comportamiento es creciente en el tiempo. Puede ser considerado como una rampa. Véase la Figura 1.12.

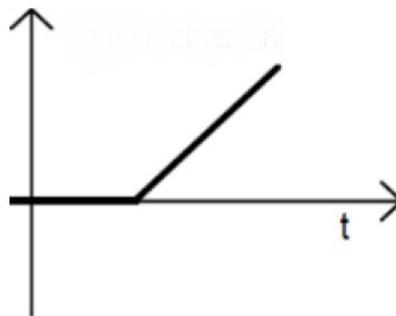
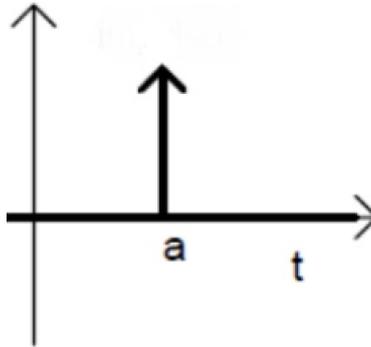


Figura 1.12 Comportamiento de fallo como función rampa

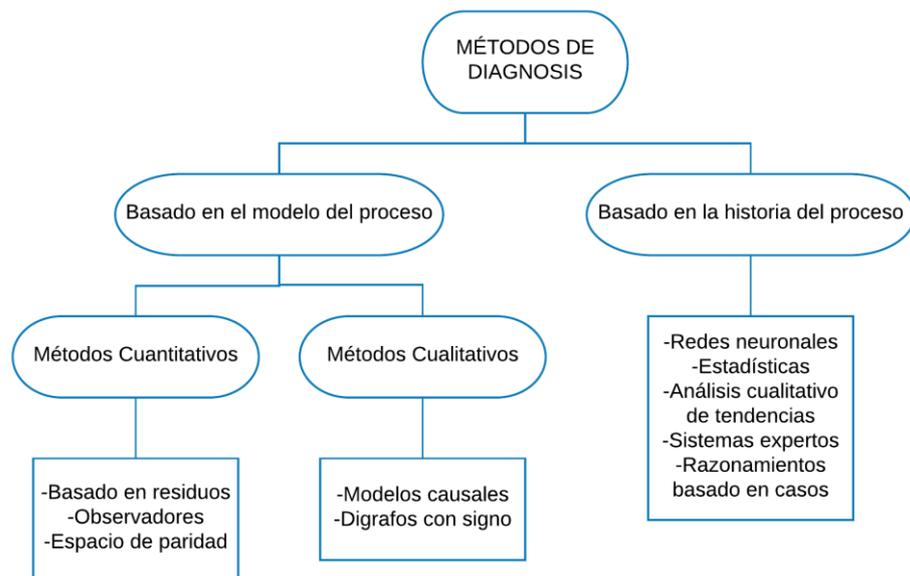
#### 1.4.8.2.3 Fallos intermitentes

Poseen un comportamiento periódico, debido a que no son permanentes. Puede ser considerado un tren de impulsos, su amplitud y anchura podría variar. Véase la Figura 1.13.



**Figura 1.13 Comportamiento de fallo como función pulso**

Las fallas en los procesos son muy concurrentes y las dificultades que presentan para su solución, son tales que se han desarrollado varios enfoques a través del computador. En la Figura 1.14 podemos observar una clasificación de los métodos de diagnóstico de fallos en sistemas. Se aclara que, para una mejor precisión en la diagnosis se pueden implementar una combinación de estos métodos.



**Figura 1.14 Mapa conceptual de métodos de diagnosis**

Existen varios parámetros que pueden ser utilizados para la detección de fallos en un motor BLDC. La Tabla 1.2 indica cuales son las variables que son tomadas en cuenta comúnmente para el diagnóstico de los fallos en los

motores: la mayoría de los casos se utiliza la corriente para los algoritmos de diagnóstico; el voltaje se utiliza a menudo; las vibraciones se miden mediante acelerómetros; el torque de salida es el más caro a pesar de que puede brindar mucha información. Para las mediciones estimadas (modelo) se pueden detectar los fallos cuando se los junta con las mediciones directas (sensores) [13].

**Tabla 1.2 Variables utilizadas para detectar fallos**

<b>Mediciones directas</b>	<b>Mediciones estimadas</b>
Corriente	Resistencia del devanado
Voltaje	Inductancia del devanado
Vibraciones	FCEM (fuerza contraelectromotriz)
Velocidad angular	Flujo magnético
Torque de salida	

#### **1.4.9 Sensores**

Suele haber ambigüedad en la definición de sensor y transductor, por lo cual suelen ser utilizados como sinónimos. La American National Standards Institute (ANSI) standard MC6.1 define al transductor como “un dispositivo el cual provee una salida utilizable como respuesta de una especificada medición”. Una salida es definida como una “cantidad eléctrica” y una medición es una “cantidad física, propiedad o condición medida”. ANSI standard estableció a “transductor” que refería a “sensor”. Aunque la mayoría de literatura científica no adoptó esta definición de ANSI. En este texto utilizaremos el término sensor [22].

##### **1.4.9.1 Tacómetro**

Para medir la velocidad del eje en el rotor se procederá a utilizar un tacómetro el cual es utilizado para elementos rotatorios. Éste calcula los números de giros ya sea por minuto o por segundo, según se haya configurado. Su unidad más generalizada es las revoluciones por minuto (RPM) (véase la Figura 1.15 Tacómetro óptico [23]).

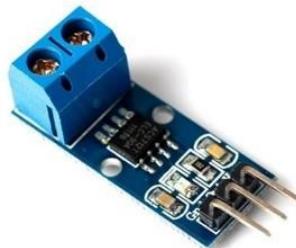


**Figura 1.15 Tacómetro óptico [23]**

#### **1.4.9.2 Sensor de corriente**

Uno de los medidores de corrientes más comunes son los amperímetros, pero debido a que este determina un valor promedio y se analizará los valores sensados más aproximados al real, no funcionaría este instrumento de manera correcta. Por lo cual se procede a utilizar uno de efecto hall [24].

El principio de funcionamiento para evaluar la corriente es que si creamos un campo magnético mediante una corriente que pasa por algún conductor o bobina, entonces es posible la medición del valor de corriente en el conductor o bobina. Véase la Figura 1.16.



**Figura 1.16 Sensor de corriente por efecto hall [24]**

#### **1.4.9.3 Sensor de voltaje**

Se utilizará para la medición de este un sensor con función de divisor de voltaje, el cual contiene unas resistencias para lo que supone que el módulo podrá medir de acuerdo con la variación de estas resistencias (véase la Figura 1.17).

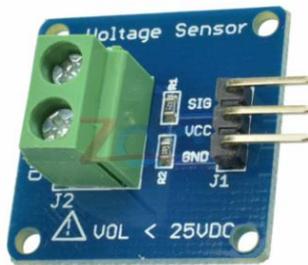


Figura 1.17 Módulo DC sensor de voltaje por división de tensión [25]

#### 1.4.10 Tarjeta de adquisición de datos

La adquisición de datos o adquisición de señales, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora o PAC. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) como muestra la Figura 1.18.



Figura 1.18 Placa Arduino [26]

### 1.4.11 Base de datos y SQL

Es un lenguaje destinado a programación, el cual tiene función de administrar y recuperar información en sistemas gestores de BD. Su principal característica es que con manejo de álgebra y cálculo relacional puede realizar una query (búsqueda) de algún dato específico en una tabla de BD o incluso agregar datos en esta.

### 1.4.12 MySQL

Su función es ser gestora de una base de datos, como indica su nombre, su fuente trabaja con lenguaje SQL. Este gestor de BD nos ofrece una licencia pública, la cual es la más conocida a nivel mundial. En caso de necesitar una BD más corporativo o que necesitemos mucho espacio de almacenamiento, existe la licencia corporativa que nos ofrece Oracle Corporation (véase la Figura 1.19).



Figura 1.19 Logo de MySQL [27]

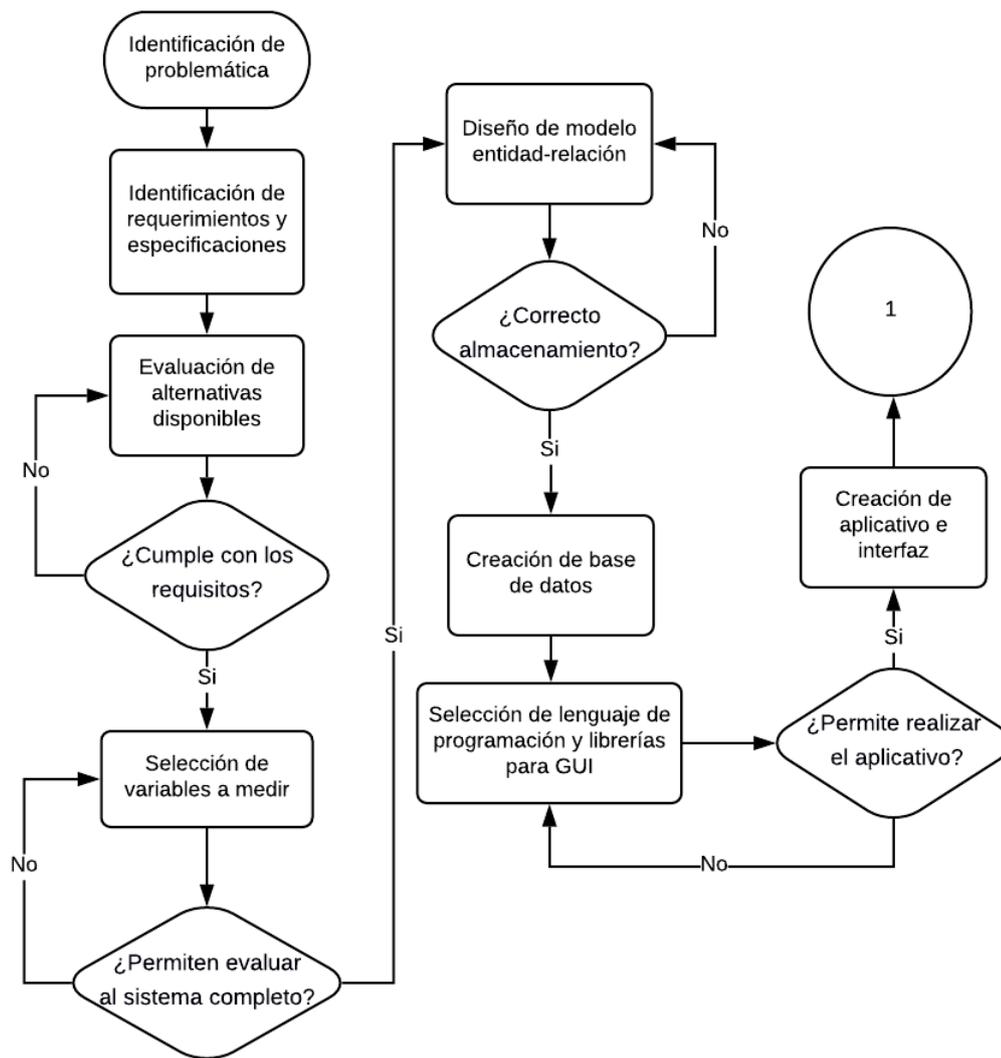
# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

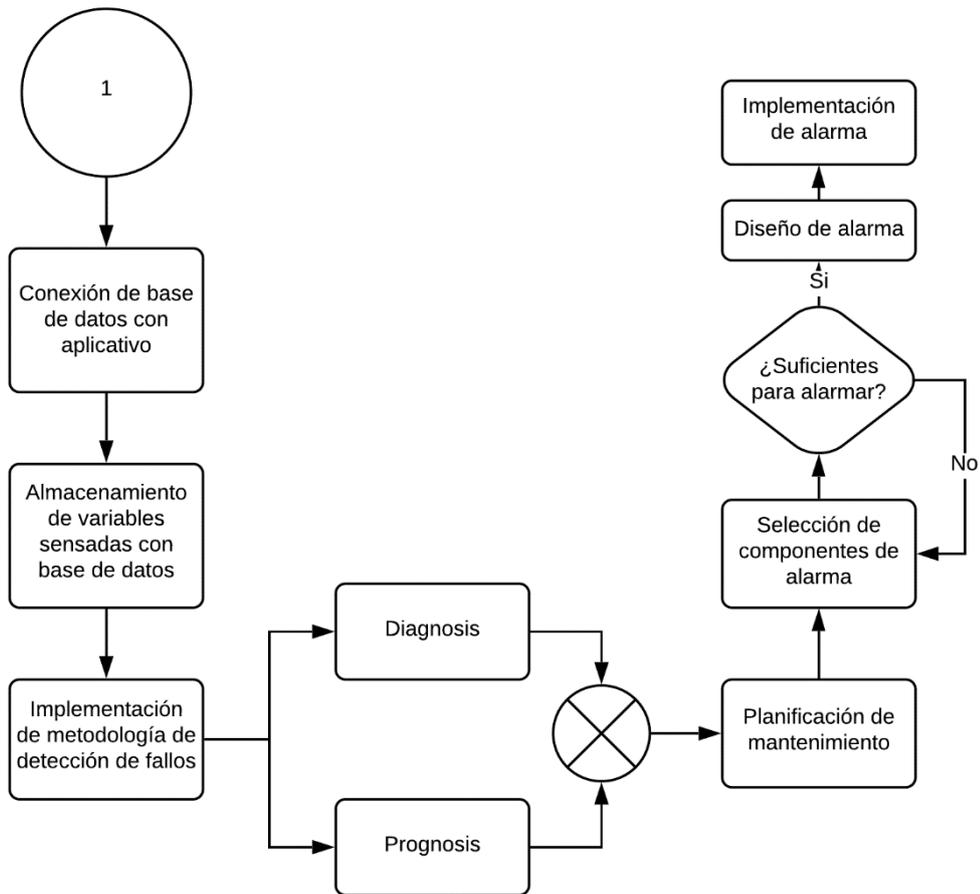
El presente capítulo detalla el proceso de búsqueda de solución a la problemática del sistema diagnóstico y pronóstico de fallos. Se utilizó una matriz de decisión para la selección de la metodología de diagnóstico de fallos. Se detalla cada criterio utilizado para el modelo de diagnóstico y pronóstico del sistema. Además, se procede a detallar las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema en el motor BLDC y el proceso de análisis en el comportamiento de las variables tomadas en cuenta para el análisis de señales.

### 2.1 Procedimiento de diseño

En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de flujo. Este es el procedimiento de la metodología empleada de manera secuencial, lo cual permite identificar el algoritmo empleado para la solución final del trabajo.



**Figura 2.1** Flujograma para diseño de programa diagnóstico, pronóstico de fallos con circuito de alarma



**Figura 2.1** Flujograma para diseño de programa diagnóstico, pronóstico de fallos con circuito de alarma (continuación)

## 2.2 Requerimientos de diseño

### 2.2.1 Funcionalidad

La Tabla 2.1, contiene los requerimientos considerados para el diseño.

**Tabla 2.1** Tabla de requerimientos para funcionalidad

<b>Criterio</b>	<b>Requerimiento</b>
Portabilidad	Aplicativo portátil y rápida ejecución
Modos de trabajo	Debe de tener un modo online y offline el sistema de diagnóstico
Control de variables	Debe de identificar las señales y producir un análisis de éstas
Compatibilidad física	Compatible con varias marcas de motores

Compatibilidad de software	Compatibilidad con Windows
Precio	Implementación de bajo costo (sensores y circuito alarma)
Respuesta de alarma	Una vez detecte algún fallo en la diagnosis, debe de encenderse
Tiempo de sensado	50 segundos

## 2.2.2 Características técnicas de los equipos

Se presenta en la Tabla 2.2 las especificaciones técnicas que debe de presentar la solución.

**Tabla 2.2 Tabla de especificaciones técnicas para el equipo**

Parámetros	Especificaciones
Placa de adquisición de datos	Debe de permitir la lectura de al menos 4 sensores análogos que midan: posición angular, velocidad angular, corriente y voltaje. Tarjea de adquisición de datos Arduino
Gestor de base de datos	MySQL
Lenguaje de programación para interfaz de usuario	Python
Lenguaje de programación para el manejo de la base de datos	SQL
Lectura y almacenamiento de datos modo offline	Formato de archivo .json
Lenguaje de programación para el circuito de alarma y adquisición de datos	Arduino
Actuador de alarma	Señal lumínica y de sonido

## 2.2.3 Restricciones

El sistema debe de funcionar exclusivamente con motores BLDC.

## 2.2.4 Alternativas de solución

Se procede a detallar las alternativas de los métodos de detección de fallos, los cuales han sido considerados para solución del sistema. Para lo cual se observa la Tabla 2.3, la cual consiste en detallar los criterios de selección.

Para las alternativas de detección, diagnóstico de fallos puede encontrar a los métodos: “Basado en modelo del proceso” y “Basado en la historia del proceso”. El primer método consiste en detección del modelo matemático del sistema, para esto se analiza cada variable física que involucra el sistema y se realiza un posterior análisis de las variables medidas para generar su diagnóstico. El segundo método utiliza un algoritmo de aprendizaje utilizando un *dataset* (base de datos con tablas generadas para aprendizaje en IA) y genera un modelo mediante IA. Luego, realiza el modelo un análisis de las variables medidas y diagnostica los fallos.

Se especificó que, para el criterio de mayor peso en la decisión de la solución, la precisión de la detección y diagnóstico de los fallos era primordial. Se analizó que la opción basada en modelo del proceso obtenía mayor precisión porque su modelo se acercaba más a la solución, en cambio el de basado en la historia del proceso necesita cada escenario posible, ya que si se encuentra en uno desconocido puede generar falsos positivos o falsos negativos. La necesidad del conocimiento sobre el área también es muy importante, ya que con esto puedo lograr aceptar si el sistema diagnóstico funciona correctamente.

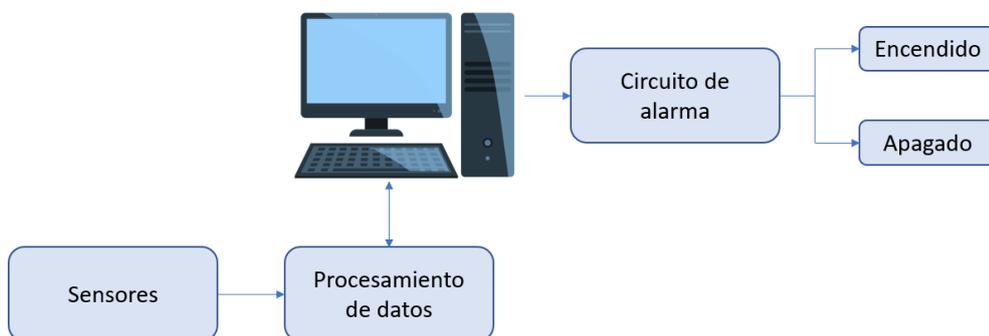
Otros criterios como necesidad de mejora continua, se utiliza porque los modelos necesitarán seguir aproximándose más al sistema real si fuese necesario. Tiempo de creación del modelo implica a la cantidad de tiempo empleado. Facilidad en creación del modelo refleja las herramientas necesarias para generar el modelo.

**Tabla 2.3 Matriz de decisión para selección de metodología en detección de fallos.**

	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4	CRITERIO 5	
<b>Descripción</b>	Precisión de diagnóstico	Requiere conocimientos sobre el área	Necesidad de mejora continua	Tiempo de creación del modelo	Facilidad en creación de modelo	<b>Total</b>
<b>Peso</b>	5	4	3	1.5	1	14.5
	34%	28%	21%	10%	7%	100%
<b>OPTIONS</b>	<b>Calificación</b>	<b>Calificación</b>	<b>Calificación</b>	<b>Calificación</b>	<b>Calificación</b>	
Basado en modelo del proceso	9	6	8	5	3	7.1
Basado en la historia del proceso	6	8	6	8	8	6.9

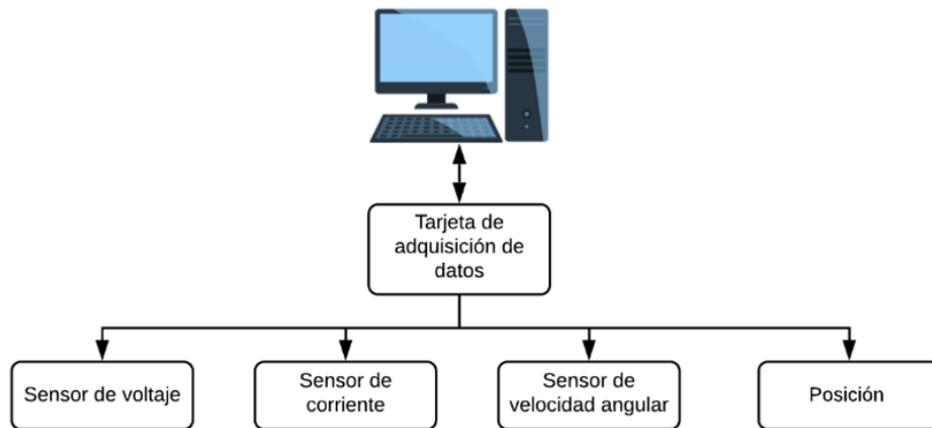
### 2.2.5 Diseño simplificado

El diseño inicial del sistema se observa en la Figura 2.2, el cual consiste en un ordenador, ya sea portátil o de escritorio. Este ordenador recibirá los datos tomados de sensores mediante una tarjeta de adquisición de datos. Estas señales recibidas hacia el ordenador son analizadas y si presentan algún tipo de fallo, habilitará el encendido de una señal de alarma.



**Figura 2.2 Diseño de conexiones para monitoreo de señales en diagnóstico de fallos con circuito de alarma en caso de fallo**

La comunicación es en primer lugar con la tarjeta de adquisición de datos, la cual permite un acondicionamiento de las señales mediante software, posterior a esto puede ser realizada la lectura de datos y almacenados. Se utilizan cuatro sensores los cuales medirán: voltaje de alimentación, corriente de alimentación, velocidad angular del rotor y par del motor. La Figura 2.3 nos muestra el diagrama de conexiones respecto a la adquisición de datos.



**Figura 2.3 Esquema del sistema de sensado de datos**

## **2.3 Etapa de generación de fallos**

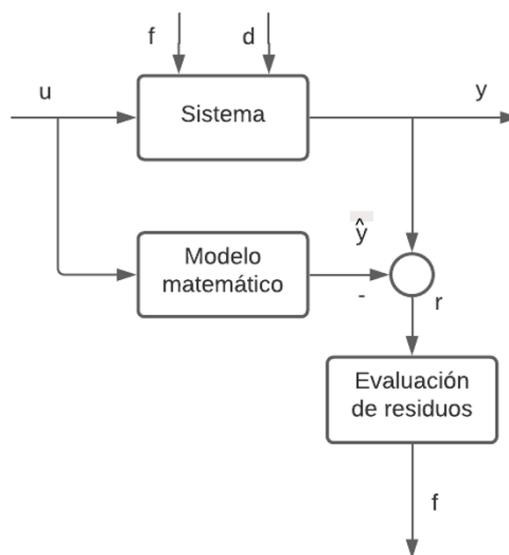
La etapa de generación de fallos está basada en la teoría de detección de fallos, diagnóstico y prognosis que dependen de la medición de ciertas variables durante la operación del motor BLDC. Éstas se determinan a partir de las ecuaciones que definen el sistema y permiten analizar su comportamiento de manera efectiva. Para ello se necesita tener un modelo aproximado del motor BLDC.

### **2.3.1 Detección de fallos**

Para la detección de fallos se deben de considerar dos puntos importantes tales como redundancia analítica y redundancia física. Un sensor puede medir variables físicas y en base al análisis de éste demostrar si presenta algún fallo la variable medida. Esto se cumple siempre y cuando el sensor funcione siempre correctamente. Pero, para asegurar el funcionamiento de la detección agregamos otro sensor (redundancia física) y comparando los dos sensores determinamos si existe el fallo. Pero que implica que haya una ambigüedad en la detección de

estos dos sensores, para esto se implementa un tercer sensor que validará la detección de un sensor. Si se desea determinar con manera precisa un fallo la redundancia física no es suficiente. Por lo cual la redundancia analítica es necesaria, ya que ésta se basa en modelos matemáticos para relacionar las variables medidas y minimizar la utilización de sensores (variables físicas). Con esto se reduce la duplicación de sensores midiendo una misma variable y permitiéndonos un grado de diagnóstico más amplio [28].

La detección del fallo en el modelo analítico se define como la inconsistencia entre la variable medida y la estimación del valor de ésta con los otros sensores y evaluar esta diferencia de valores. Por lo cual, esta discrepancia o inconsistencia entre la medida real y la estimación proporcionada se conoce como residuo. Si el sistema fuese ideal, este residuo sería cero [28]. Véase la Figura 2.4 donde el sistema tiene entradas de fallos o perturbaciones y el modelo genera la variable estimada, la diferencia de esto genera un residuo que se determina como fallo en caso de ser diferente de cero en un modelo ideal.



**Figura 2.4 Esquema de detección de fallos basado en modelo**

En el escenario real, el modelo puede presentar errores y las variables presentan perturbaciones o ruido en las mediciones, entonces el residuo nunca será equivalente a cero. Por esto, se debe de determinar unas condiciones en donde se encuentre el sistema con funcionamiento correcto, con esto generaremos un

umbral de trabajo  $\sigma_i$  con un umbral máximo para el valor absoluto mayor observado. En caso de sobrepasar el modelo real este umbral, se determina que existe un fallo como indica la ecuación 2.1.

$$\varphi_i(k) = \begin{cases} 0 & \text{si } |r_i| \leq \sigma_i \\ 1 & \text{si } |r_i| > \sigma_i \end{cases} \quad (2.1)$$

Es  $\varphi_i$  una señal binaria indicando si existe un fallo si es igual a 1 o no existe siendo este 0.

### 2.3.2 Diagnósis de fallos

Para la determinación de fallos es necesario utilizar un residuo. Mas, para la diagnósis de fallos es necesario varios residuos. Cada residuo debe de poseer su umbral asociado que se lo determina de manera experimental, se utiliza el valor con la mayor desviación en la lectura de los residuos trabajando el sistema en correctas condiciones. A lo cual se le aplica la ecuación 2.1 para detectar fallos y obtenemos un vector de firma de fallos  $\varphi$ , esta etapa es conocida como aislamiento.

Para determinar qué tipo de fallo se presenta en el sistema se determinará en pocas palabras, los residuos generados y se comparará con la tabla FSM (*Fault Signature Matrix* llamada en español firma de fallos). Por ejemplo, si el vector FSM tuviese un vector  $(0 \ 1 \ 1)^t$  al compararlo con la matriz FSM (véase la Tabla 2.4 Ejemplo de tabla *FSM*), se determina que posee el sistema un fallo  $\beta$  [14].

**Tabla 2.4 Ejemplo de tabla *FSM***

	<b>Fallo <math>\alpha</math></b>	<b>Fallo <math>\beta</math></b>	<b>Fallo <math>\gamma</math></b>
<b>Residuo 1</b>	1	0	0
<b>Residuo 2</b>	0	1	1
<b>Residuo 3</b>	1	1	0

### 2.3.3 Prognósis de fallos

La prognósis consiste en utilizar los valores de los residuos. Pero adicional a esto se utiliza la ecuación 2.2 que pertenece a la media móvil para la filtración de los

datos.  $n$  entre mayor sea permitirá una gráfica más acentuada. Mas, si  $n$  es menor, se permite una mayor filtración dinámica. Véase la Figura 2.5.

$$F_{(t+1)} = \sum_{j=1}^N \frac{A_{t-1+1}}{n} \quad (2.2)$$



**Figura 2.5 Gráfico de comportamiento de precios de acciones en empresa AESGENER, presenta su media móvil color gris de 50 sesiones y de color rojo con 25 sesiones**

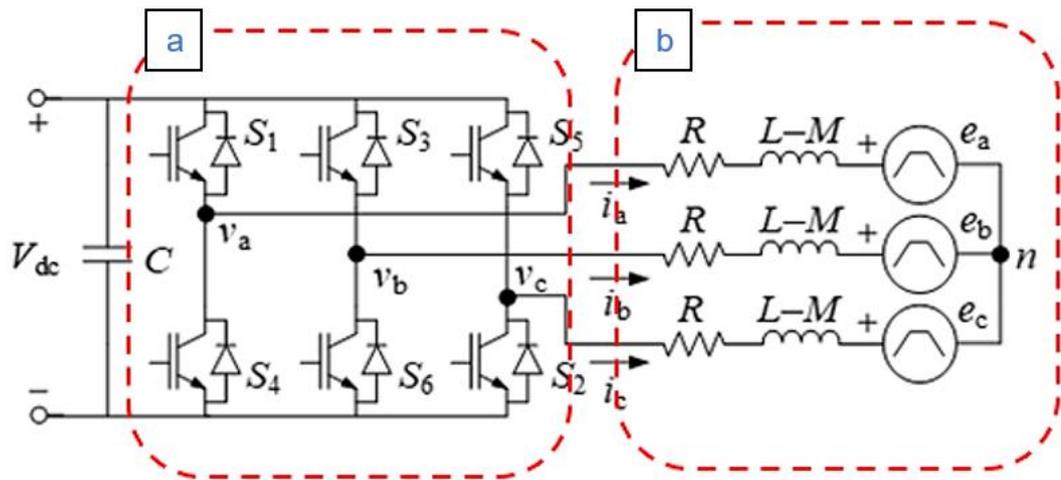
Una vez obtenidos los datos filtrados se aplica la deriva de estos valores que permitirán la aproximación de tiempos antes de que ocurra el fallo. La ecuación 2.3 es la que permitirá el análisis en su comportamiento es:

$$m = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (2.3)$$

Una vez determinada la deriva, se sustituye los valores en la ecuación de la recta para determinar el valor de  $x$  que es el tiempo,  $y$  que es el valor del umbral del residuo que ya se tiene.

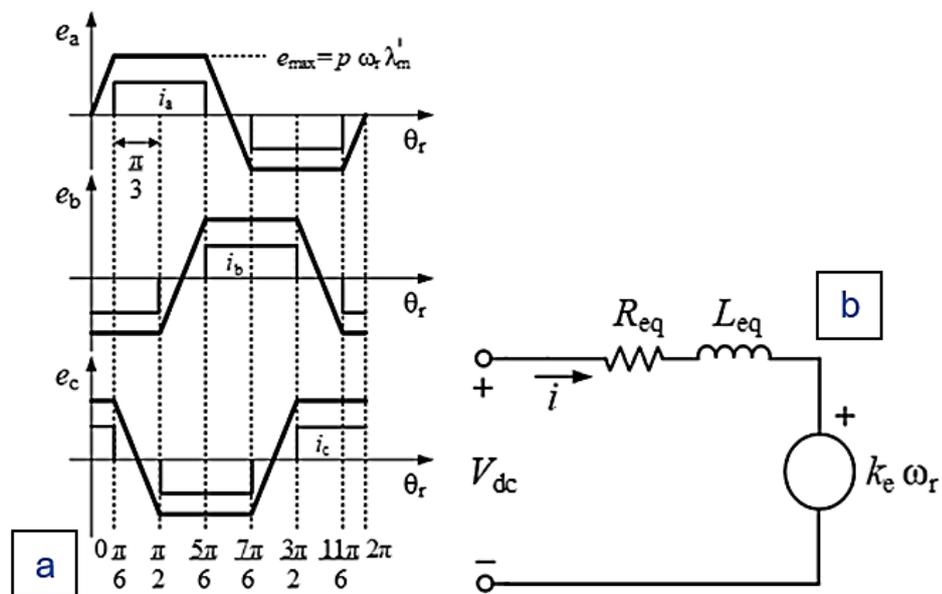
### 2.3.4 Descripción del modelo del motor BLDC

En la Figura 2.6 se encuentra el circuito equivalente del motor BLDC el cual contiene una configuración de devanado en el estator en estrella, por esto se utiliza un inversor de puente completo (a). Este inversor de puente completo se utiliza para el control de energización en el devanado del motor (b) [29].



**Figura 2.6 Circuito trifásico equivalente alimentado por un inversor de puente completo**

Se presenta en la Figura 2.7 (a) el comportamiento de las corrientes que pasan a través de cada devanado, al pasar la corriente de manera cuadrada generan unas fem de forma trapezoidal en cada devanado. En (b) encontramos el circuito simplificado del comportamiento eléctrico del motor.



**Figura 2.7 (a) fem traseras trapezoidales por fase y corrientes por fase en los devanados del estator de 2 fases (cada  $\pi / 3$  rad), y (b) circuito equivalente en el modo de conducción para cada devanado.**

### 2.3.4.1 Ecuaciones que rigen el sistema

La ecuación 2.4 relaciona los voltajes de cada fase. La selección para alimentación de cada devanado del motor dependerá del inversor de puente completo. Se utiliza una representación matricial para relacionar las variables enunciadas en la Figura 2.6 en una sola ecuación.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

La ecuación 2.5 relaciona el torque eléctrico sobre el rotor a partir de la FEM generada en el devanado del estator.

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_r \quad (2.5)$$

La ecuación 2.6 relaciona al torque electromagnético del motor con el torque mecánico. Esta ecuación permite la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica. La presente toma en cuenta el producto del momento de inercia y la variación del ángulo de rotación del eje sumado a la fricción viscosa con la velocidad del rotor.

$$T_e - T_L = J \frac{d\theta_r}{dt} + B_r \omega_r \quad (2.6)$$

El torque eléctrico del motor se relaciona de manera proporcional con la corriente del inducido y el flujo magnético. En cambio, el torque mecánico o torque de carga es proporcional al producto entre la fuerza y la distancia. La corriente en el motor aumenta en capacidad de la carga aplicada. Al encontrarse el sistema del motor en estado estable, la corriente en el motor es constante e igual en magnitud al torque mecánico, aunque en sentido contrario. Cuando un motor acelera es porque el torque electromagnético es mayor al torque mecánico. Por el contrario, en una desaceleración el torque mecánico es mayor al torque electromagnético [30].

La relación de velocidad angular con variación de la posición angular del rotor, nótese que es la derivada de la posición angular se ve en la ecuación 2.7.

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.7)$$

### 2.3.4.2 Ecuaciones de residuo del sistema

Las ecuaciones de residuo se generan a partir de la manipulación de cada ecuación que describe el comportamiento del sistema basado en el tiempo. A continuación, se presentan las ecuaciones [31]:

Se genera el primer residuo en la ecuación 2.8 como resultado de las variables eléctricas implicadas en el sistema.

$$r_1(s) = R_{eq}I(s) + L_{eq}sI(s) + k_e\omega_r(s) + V_{dc}(s) \quad (2.8)$$

Se genera el segundo residuo como la ecuación 2.9 que considera los aspectos mecánicos del sistema.

$$r_2(s) = \omega_r(s)(Js + B_r) - k_T I(s) + T_L(s) \quad (2.9)$$

El tercer residuo de la ecuación 2.10 es generado a partir de la relación entre la corriente y voltaje aplicado en el motor.  $\left(\frac{I(s)}{V(s)}\right)$

$$r_3(s) = I(s)(JL_{eq}s^2 + (R_{eq}J + BL_{eq})s + BR_{eq} + k_e k_T) - V_{dc}(s)(Js + B) - k_e T_L(s) \quad (2.10)$$

El cuarto residuo de la ecuación 2.11 considera la relación entre la velocidad angular y el voltaje aplicado en el motor.  $\left(\frac{\omega(s)}{V(s)}\right)$

$$r_4(s) = \omega_r(s)(JL_{eq}s^2 + (R_{eq}J + BL_{eq})s + BR_{eq} + k_e k_T) - V_{dc}(s)k_T + (L_{eq}s + R_{eq})T_L(s) \quad (2.11)$$

Los residuos se presentan en tiempo continuo. Mas, para poder analizar los datos en un ordenador se requiere que sean en tiempo discreto, con lo cual se debe de aplicar primero la transformada Z para llevarlo al dominio de la frecuencia con el método de *Euler Forward Rectangular Rule* con la ecuación 2.12.

$$s = \frac{z - 1}{T_s} \quad (2.12)$$

Se obtiene la ecuación en transformada Z para posteriormente llevarlo a tiempo discreto con la transformada inversa Z.

$$r_1(z) = R_{eq}I(z) + L_{eq}I(z) \frac{z - 1}{T_s} + k_e \omega_r(z) + V_{dc}(z) \quad (2.13)$$

Se obtiene la ecuación en tiempo discreto, la cual puede ser evaluada para el programa.

$$r_1(k) = I_m(k) - a_1^1 i(k - 1) - b_1^1 \omega_e(k - 1) - c_1^1 V_{dc}(k - 1) \quad (2.14)$$

$$a_1^1 = 1 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} T_s; \quad b_1^1 = -\frac{k_e}{L_{eq}} T_s; \quad c_1^1 = \frac{1}{L_{eq}} T_s$$

Lo realizado con el residuo 1 se procede a aplicar con los demás residuos.

$$r_2(k) = \Omega_m(k) - a_1^2 i_m(k - 1) - b_1^2 \Omega(k - 1) - d_1^2 t_{Lm}(k - 1) \quad (2.15)$$

$$a_1^2 = \frac{k_t}{J} T_s; \quad b_1^2 = 1 - \frac{B}{J} T_s; \quad d_1^2 = -\frac{1}{J} T_s$$

$$r_3(k) = i_m(k) - a_1^3 i_m(k - 1) - a_2^3 i_m(k - 2) - c_1^3 V_{dc}(k - 1) - c_1^3 V_{dc}(k - 2) - d_1^3 t_{Lm}(k - 2)$$

$$a_1^3 = 2 - \frac{(R_{eq}J + BL_{eq})}{JL_{eq}} T_s;$$

$$a_2^3 = \frac{1}{JL_{eq}} T_s \left( (R_{eq}J + BL_{eq}) - (R_{eq}B + k_e k_t) T_s \right); \quad (2.16)$$

$$c_1^3 = \frac{1}{L_{eq}} T_s; \quad c_2^3 = \frac{T_s}{L_{eq}} \left( \frac{B}{J} T_s - 1 \right); \quad d_1^3 = \frac{k_e}{JL_{eq}} T_s^2$$

$$\begin{aligned}
r_4(k) &= \Omega_m(k) - b_1^4 \Omega(k-1) - b_2^4 \Omega(k-2) - c_1^4 V_{dcm}(k-1) \\
&\quad - d_1^4 t_{Lm}(k-1) - d_2^4 t_{Lm}(k-2) \\
b_1^4 &= 2 - \frac{RJ + BL}{JL} T_s; \\
b_2^4 &= \frac{1}{JL_{eq}} T_s \left( (R_{eq}J + BL_{eq}) - (R_{eq}B + k_e k_t) T_s - 1 \right); \\
c_1^4 &= \frac{k_T}{JL_{eq}} T_s^2; \quad d_1^4 = \frac{1}{J} T_s; \quad d_2^4 = \frac{T_s}{J} \left( 1 - \frac{R}{L_{eq}} T_s \right)
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Una vez determinadas las ecuaciones para la generación de residuos podremos detectar los fallos presentes. Con la Tabla 2.5 que contiene la *FSM* podremos realizar la comparación de la detección de fallo para cada vector residuo y compararlos con la tabla y poder diagnosticar los fallos presentes en cada componente del sistema [29].

**Tabla 2.5 Tabla de firma de fallos**

	$f_R$	$f_L$	$f_{Vdc}$	$f_B$	$f_J$	$f_{Load}$	$f_\theta$	$f_i$
$r_1$	1	1	1	0	0	0	1	1
$r_2$	0	0	0	1	1	1	1	1
$r_3$	1	1	1	1	1	1	0	1
$r_4$	1	1	1	1	1	1	1	0

Los fallos que se presentan son:

Fallas aisladas por sensores(posición angular, corriente):  $f_\theta, f_i$

Fallas mecánicas(fricción, inercia, carga):  $f_B, f_J, f_{TLoad}$

Fallas eléctricas(resistencia, inductancia, voltaje):  $f_{Req}, f_{Leq}, f_{Vdc}$

### 2.3.5 Base de datos

El nombre de base datos nace de *Data Banks* (nombre inglés), la cual posteriormente tomaría el nombre de Data Base. Ésta fue la primera instancia de almacenamientos de datos en los cuales se requería que la información almacenada sea clasificada de manera ordenada sin redundancia.

Las bases de datos almacenan la información pertinente relacionada a un contexto, esta es ordenada de acuerdo con el sistema que prefiera el programador. Toda esta información almacenada podrá ser posteriormente utilizada para transmitirla, analizarla o recuperarla. Suelen ser sencillas desde una pequeña biblioteca hasta una compleja base de datos de una empresa de telecomunicaciones [32].

Para una mayor comprensión de como forman relación los datos ingresados en una BD se crea un modelo de base de datos. Este modelo permite identificar las relaciones y limitaciones de esta BD, así como su estructura lógica. La mayoría de estos modelos se pueden representar mediante un diagrama de BD acompañante.

Los modelos que encontramos son los siguientes:

- Modelo de BD jerárquico
- Modelo relacional
- Modelo de red
- Modelo de BD orientado a objetos
- Modelo entidad-relación
- Modelo de documentos
- Modelo entidad-atributo-valor
- Esquema de estrella
- Modelo relación de objetos

#### **2.3.5.1 Modelo entidad-relación**

Como indica su nombre recoge la relación de una entidad del mundo físico, tiene cierta similitud con el modelo de red, aunque ésta no está atada a una estructura física en la BD.

Un lugar, cosa o persona de quien se refiere una cantidad de atributos se lo designa como entidad, una cantidad grande de atributos en conjunto se denomina dominio (véase la Figura 2.8).

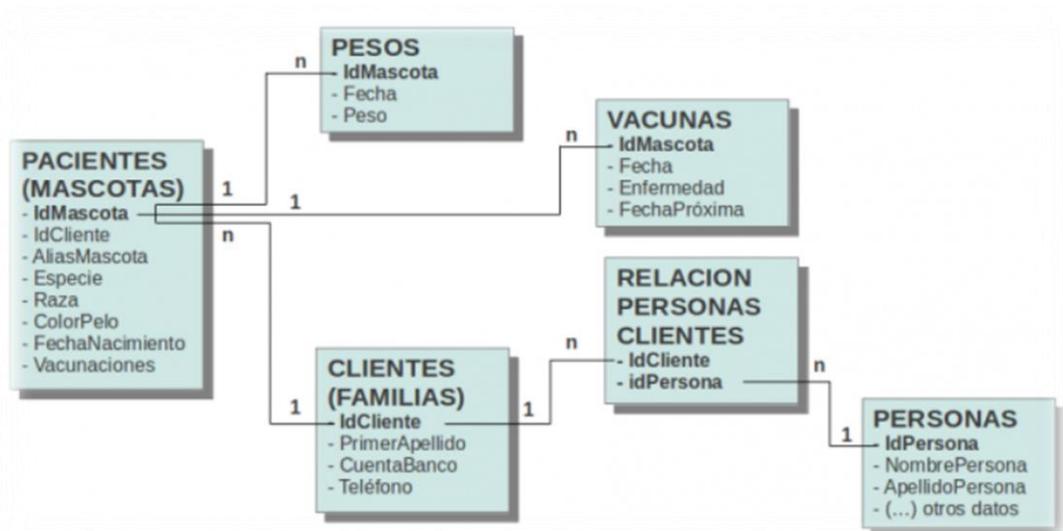


Figura 2.8 Ejemplo de diagrama entidad relación [28]

### 2.3.5.2 Generación de diagrama entidad-relación

Se consideraron las variables a analizar, los datos almacenados por parte de los sensores y la relación que persiste entre todos estos. Finalmente, se determinó el diagrama presentado en el Apéndice A.

## 2.4 Diseño de sistema de alarma

Para la determinación del sistema de alarma se determinaron en cuenta condiciones de trabajo del operador. Estas pueden ser a condiciones de sonido muy altas y alguna distracción del operario pueda presentarse durante el análisis que lo distraiga. Por lo que el este sistema debería de presentar una señal lumínica en el caso de presentarse sonidos muy altos durante el senso del sistema y uno de sonido en caso de distracción.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente capítulo da a detalle de la selección del motor de estudio, los sensores seleccionados, los circuitos de recolección de datos, actuadores de sonido y luz. Se presenta, además, los resultados a partir del programa “Faulty” que fue el programado para la interfaz de usuario.

### 3.1 Selección de motor y componentes electrónicos

Se utilizaron varios componentes para poder simular el sistema.

#### 3.1.1 Motor BLDC

En la tabla Tabla 3.1 se especifica las características del motor seleccionado, el cual pertenece a la compañía Crouzet Motors 80140510. Es un motor industrial con varias aplicaciones posibles, presenta un alto torque y una velocidad nominal promedio. Además, en el Apéndice B se presenta a mayor detalle las características de éste que fueron necesarias para la simulación de Matlab véase Apéndice D.

El presente motor utiliza el modelo presentado en el capítulo 2, para su simulación se ha procedido a reemplazar todos los valores de constantes con las características éste.

**Tabla 3.1 Motor seleccionado para pruebas**

Motor	Especificaciones
 	Modelo: 80140510
	Potencia de 45 Watts
	Alimentación de 24 V
	Velocidad nominal de 2000 rpm

### 3.1.2 Sensores

Se seleccionaron sensores que puedan enviar señales de 5v para la lectura del Arduino, los cuales deben de ser robustos. Entre los sensores escogidos están para medir las variables físicas de voltaje, corriente, posición y velocidad angular. En la tabla 3.2 se presentan las especificaciones de trabajo para cada sensor.

**Tabla 3.2 Selección de sensores y las especificaciones que presentan**

Sensores	Especificaciones
	<p>Modelo: ACS712</p> <p><b>Sensor</b> Corriente</p> <p><b>Capacidad de lectura de corriente:</b> +/-5Amp, +/-20Amp and +/-30Amp seleccionable.</p> <p><b>Voltaje de operación:</b> Regulated 5VDC, or 8 ~ 35VDC.</p> <p><b>Corriente de operación:</b> 20mA(max).</p>
	<p>Modelo: E9-WS6-EDR1115</p> <p><b>Sensor</b> Voltaje</p> <p><b>Fabricante</b> Westsell</p> <p><b>ASIN</b> B07G9DRGKD</p> <p><b>Señal de salida</b> 0-5 v 0-10v 4-20mA</p>
	<p>Modelo: RSB-3600</p> <p><b>Sensor</b> Posición angular</p> <p><b>Contacto / sin contacto:</b> sin contacto</p> <p>Tecnología de efecto hall</p> <p><b>Señal de salida</b> analógico, digital</p> <p><b>Otras características</b> incremental, IP67, IP65, IP69K</p>

	<p>Modelo: ORBIS</p> <p><b>Sensor</b> Velocidad angular</p> <p><b>Max. resolution</b> 14 bits</p> <p><b>Maximum speed</b> 12,000 rpm</p> <p><b>Supply voltage</b> 4.5 V to 5.5 V (at the connector)</p> <p><b>Current consumption</b> Typ. 65 mA (no output load)</p>
---	---

### 3.2 Arquitectura de Hardware

Se presenta por consiguiente el diseño para el sistema de alarma, el cual consiste en los componentes utilizados para esto.

#### 3.2.1 Comunicación serial

Utilización del protocolo muy común entre dispositivos, que como estándar se presenta en todos los ordenadores. Además, este protocolo suele permitir comunicación en dispositivos para instrumentación.

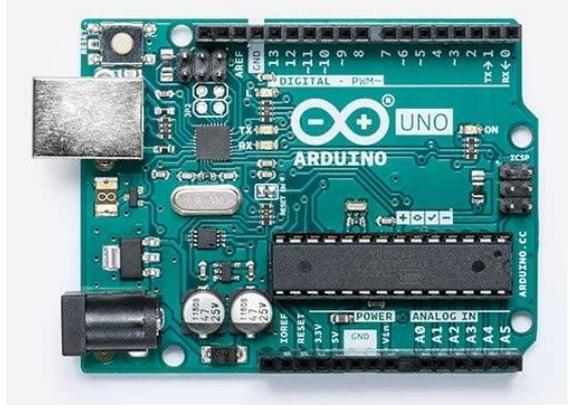
#### 3.2.2 Controlador Arduino Uno R3

La programación que se realiza en el arduino UNO R3 consistió en utilizar el mismo lenguaje Arduino para la comunicación entre el arduino y el programa, se utilizó la comunicación SERIAL.

### 3.2.3 Conexiones del arduino con componentes

En la Tabla 3.3 se evidencia los componentes utilizados para el sensor de alarma. Estos fueron previamente explicados para resolver situaciones como aviso por sonido y aviso por luz piloto.

**Tabla 3.3 Componentes empleados para el sensor de alarma**

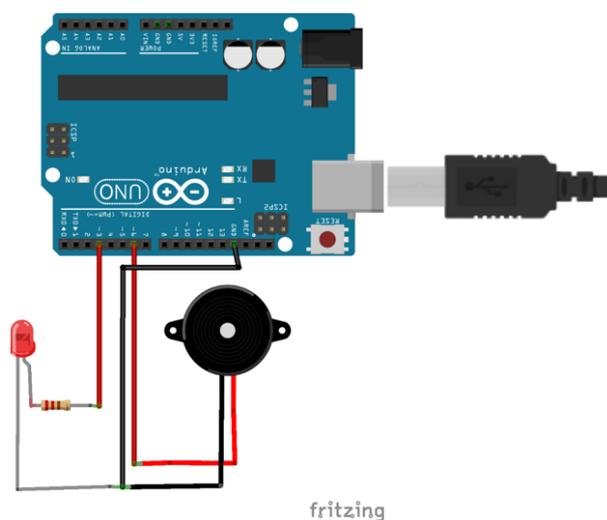
Componente	Descripción
	<p>Plataforma basada en el microcontrolador ATMEGA. Es el encargado de enviar las señales de encendido para la alarma de sonido y luz.</p>
	<p>Buzzer trabaja a 5v.</p>
	<p>Led Rojo que trabaja a 5v y encendido de 30 mA.</p>
 <p>220 ohm</p>	<p>Resistencia de 220 ohms para la disminución de corriente en el puerto digital arduino.</p>

Para la implementación de la lectura de los sensores se ha distribuido los pines como indica la Tabla 3.4. La lectura de los sensores aplica para las entradas analógicas y para el control de los actuadores de alarma son salidas digitales.

**Tabla 3.4 Distribución de pines analógicos y digitales**

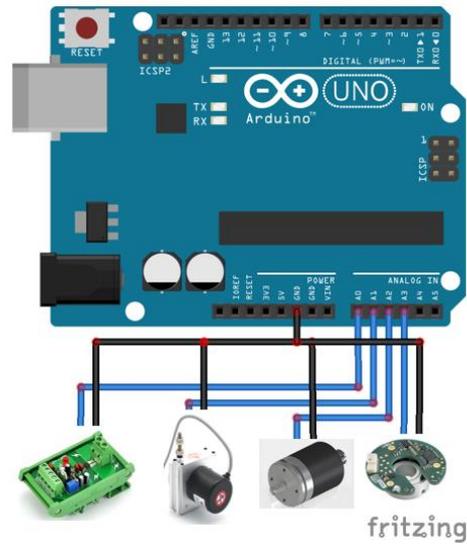
Pines I.O.	Detalle
A0	Lectura de voltaje
A1	Lectura de corriente
A2	Lectura de posición angular
A3	Lectura de velocidad angular
D.I.3	Salida a Led
D.I.5	Salida a Buzzer
Vcc	Alimentación de sensores de 5v
Tierra	Conexión común para sensores y componentes de alarma
USB tipo B	Envío de datos entre a arduino y ordenador

El diagrama de conexiones para la alarma se especifica en la Figura 3.1. En donde se demuestra que las salidas digitales 3 y 5 presentan conexiones con led y buzzer respectivamente.



**Figura 3.1 Circuito de alarma**

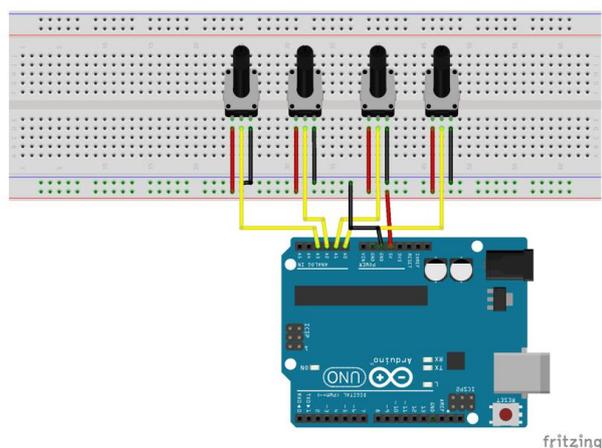
En la Figura 3.2 se encuentra el diagrama de conexiones de sensores para la toma de datos. Se presentan las entradas analógicas desde A0 hasta A3.



**Figura 3.2 Diagrama de conexiones para sensores**

### 3.2.4 Simulación de entradas

Las entradas se comprobaron mediante el uso del arduino y la variación de los potenciómetros. Se obtuvieron los valores mediante comunicación serial y luego fueron guardados en un archivo con formato Json, se observa las conexiones del arduino con los potenciómetros en el Apéndice C, esto fue necesario para las pruebas de programación. Se observa en la Figura 3.3 las conexiones realizadas planteadas para la lectura de los datos.



**Figura 3.3 Conexiones de prueba para lectura de sensores y posterior almacenamiento de datos**

### 3.3 Simulación de motor BL DC

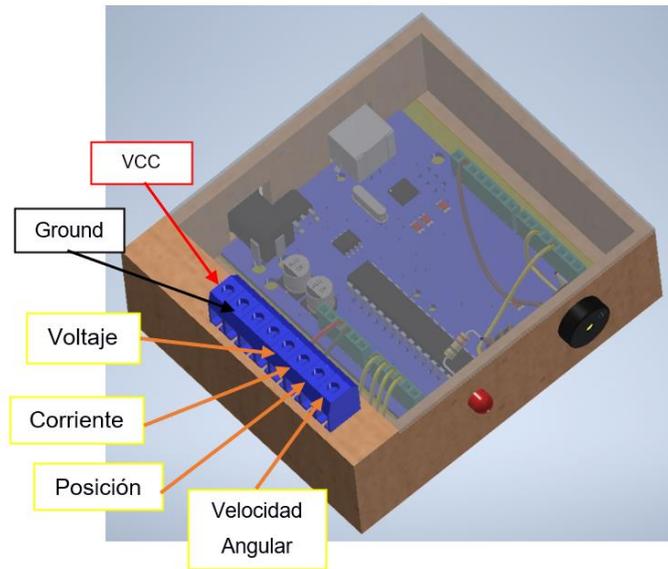
El Apéndice D presenta el modelo del comportamiento del motor BLDC en Matlab para su simulación. El apéndice E presenta el modelo del motor con las conexiones de alimentación y la lectura de sensores para la generación de datos.

**Tabla 3.5 Parámetros referenciados para simulación**

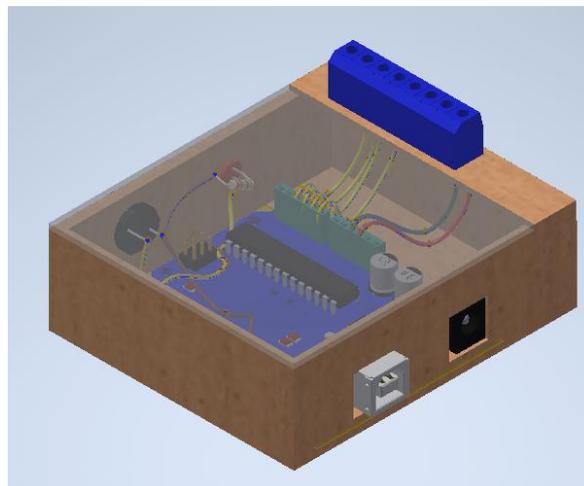
<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Inercia del rotor [gcm <sup>2</sup> ]	$J = 50 \times 10^{-7}$
Factor de torque/velocidad – Impedancia cero [mNm/(rad/s)]	$b = 3.2$
Constante eléctrica[V/(rad/s)]	$K_e = 0.0745$
Constante de torque	$K_t = 74.5 \times 10^{-3}$
Resistencia [Ohm]	$R = 1.72$
Inductancia	$L = 3.8 \times 10^{-3}$
Tiempo de muestreo	$t_m = 0.1 \text{ ms}$

### 3.4 Diseño de carcasa

Para el diseño del case protector del arduino y para asegurar las conexiones de los sensores con arduino. Se creó una caja con material madera MDF de 3mm de grosor. Se montó el buzzer y el led indicador de fallos en la carcasa. Además, se agregó una bornera para que los cables de datos de los sensores se mantengan fijos en todo momento. Véase la figura Figura 3.4 y Figura 3.5.



**Figura 3.4 Modelo del Case montado con elementos vista 1**



**Figura 3.5 Modelo del Case montado con elementos vista 2**

### 3.5 Aplicación Software

Aplicativo con interfaz de usuario.

#### 3.5.1 Lenguaje Python

El lenguaje de alto nivel más empleado para aprendizaje de programación es Python (véase la Figura 3.6). Además, es el más utilizado por investigadores respecto a ciencia de datos. Tiene muchas aplicaciones, ya sea en introducción

sobre programación hasta aplicaciones de inteligencia artificial (AI), Machine Learning (ML) o robótica, dicho de otra manera, es muy flexible. Es el lenguaje de programación con mayor tasa de crecimiento.

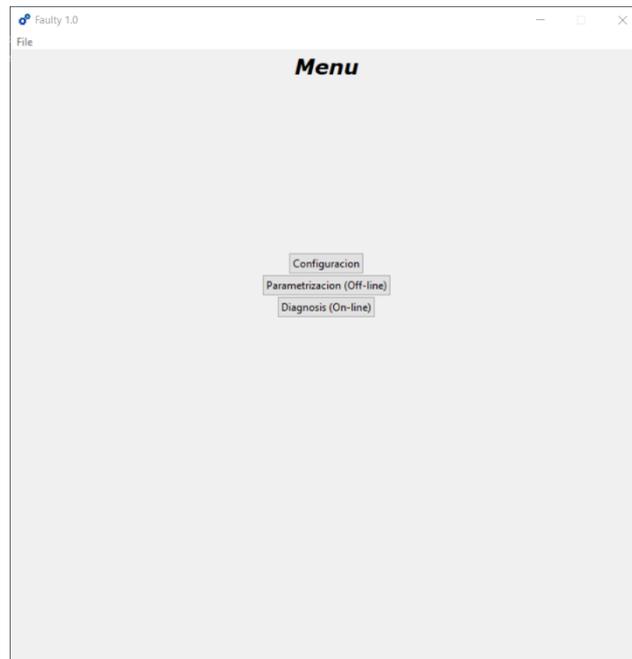


**Figura 3.6 Logo de Python [33]**

### **3.5.2 Resultados de programa GUI**

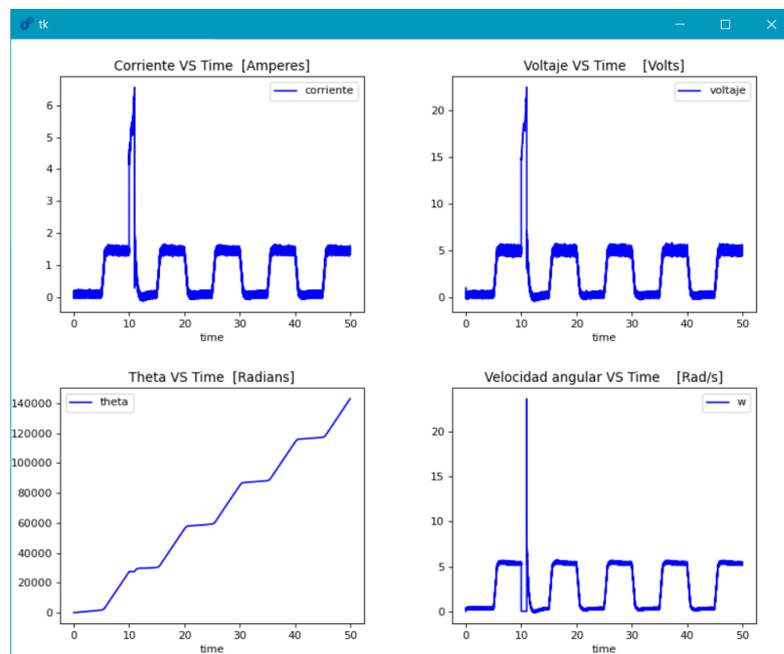
Para la generación de datos fue necesario utilizar el programa de Matlab que mediante la herramienta de Simulink se simuló con el sistema del motor BLDC (véase Apéndice D) y la toma de datos de los sensores (véase Apéndice E). Para la simulación y prueba del programa se creó un atascamiento tipo pulso del rotor en los 10 segundos, en las imágenes 7-12 presentan los análisis de este fallo. Además, se generó un fallo de corriente tipo rampa en las imágenes 13-16 se presentan sus características de fallo, ésta fue necesaria para la prognosis.

El programa presenta una pantalla principal como indica la Figura 3.7 el cual posee tres secciones. La primera permite la creación de base de datos, selección de base de datos anterior. Ingreso de nombres para sensores y umbrales. Adición de datos en tabla *FSM*. Y la pantalla de diagnosis permite observar las gráficas del comportamiento del sistema. Se pueden visualizar el resto de las pantallas del aplicativo en el apéndice F.



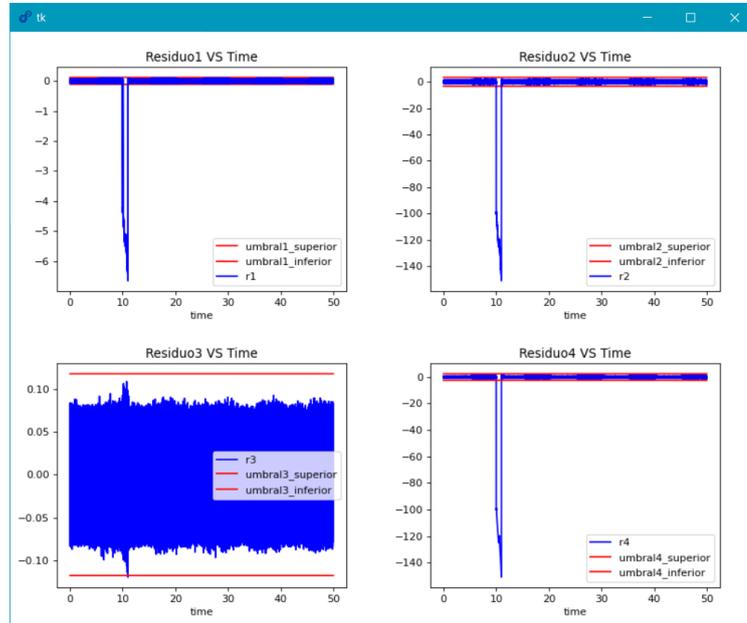
**Figura 3.7 Pantalla principal**

La gráfica de la lectura de sensores se presenta en la Figura 3.8. En la cual se visualiza los sensores de corriente, voltaje, posición y velocidad angular.



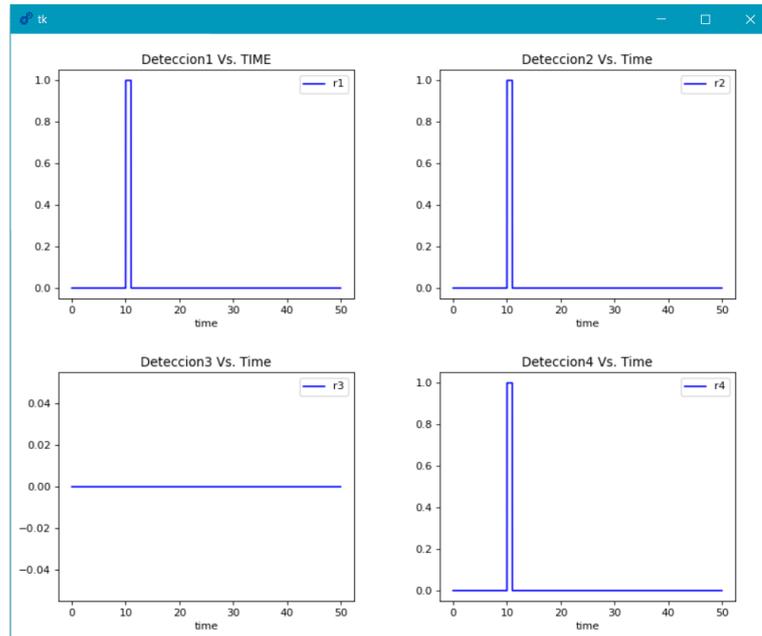
**Figura 3.8 Lectura de datos de sensores, fallo tipo pulso de atascamiento**

El comportamiento de residuos se presenta en la Figura 3.9. Estas gráficas muestran los residuos 1,2,4 que presentan un comportamiento anómalo, debido a que sobrepasan el umbral.



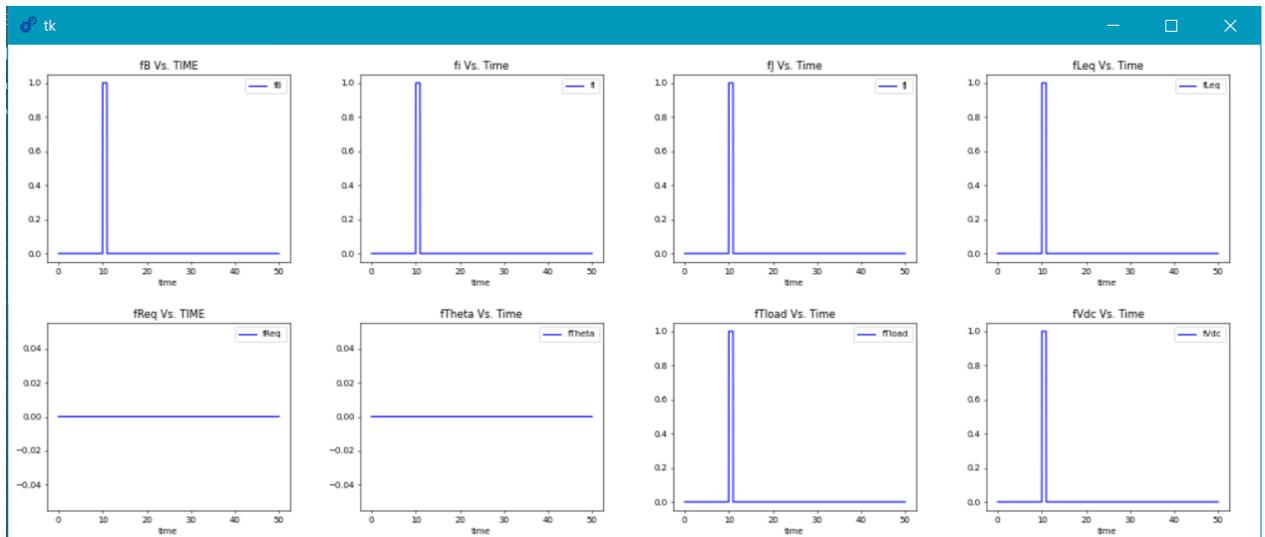
**Figura 3.9 Gráfica de comportamiento de residuos, fallo tipo pulso de atascamiento**

En la Figura 3.10 se observa mediante un gráfico escalón los residuos que presentan fallos. Como se indicó previamente los residuos 1,2,4. Además de que podemos determinar que los fallos son de comportamiento de pulso.



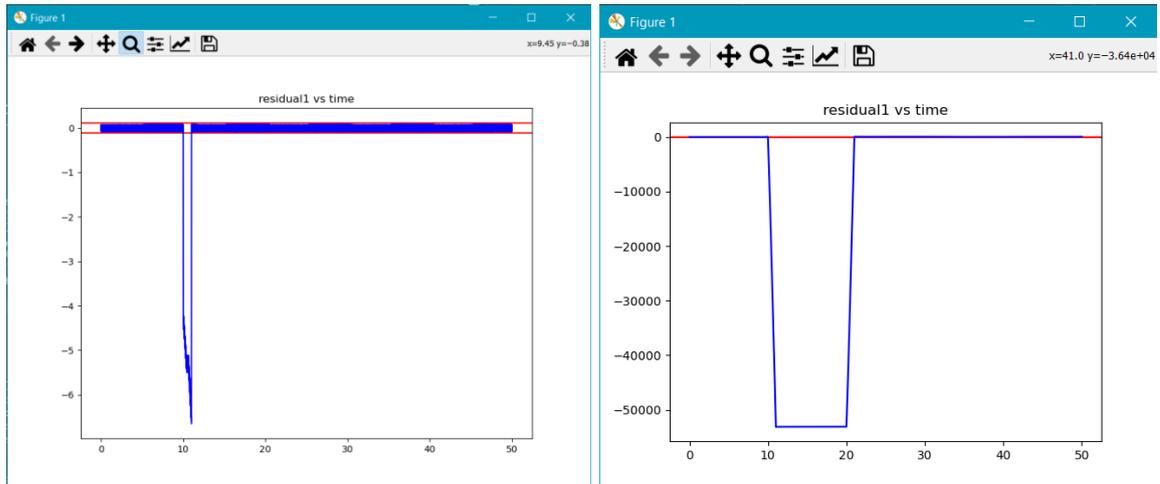
**Figura 3.10 Detección de errores por residuos, fallo tipo pulso de atascamiento**

Debido al pulso de fallo presentado se pudieron observar fallos en el devanado del estator, la corriente, la alimentación, la carga elevada.



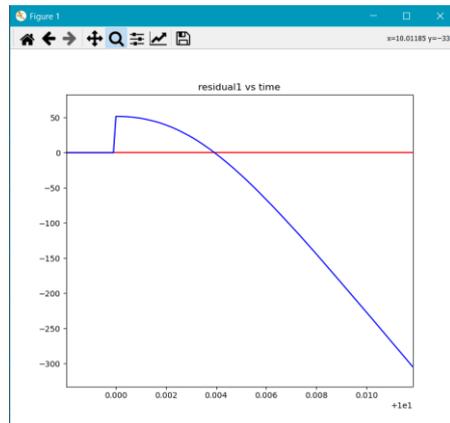
**Figura 3.11 Fallos presentes en el sistema, fallo tipo pulso de atascamiento**

La Figura 3.12 presenta el comportamiento de la media móvil, suavizado el comportamiento de las variables de residuo. Permite la prognosis mediante la deriva de los datos. En este caso ya presenta un fallo el sistema. No ha sido considerado.



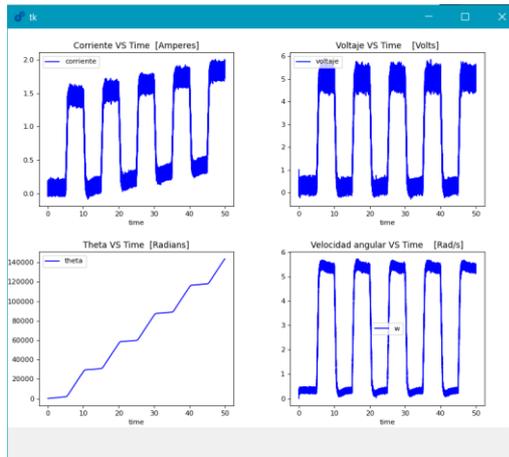
**Figura 3.12 Gráfica de residuo uno lado izquierdo, lado derecho gráfica de residuo con filtro de media móvil, fallo tipo pulso de atascamiento**

Mediante la evaluación de la deriva la prognosis aproxima en 0.00015 segundos que será ligeramente mayor al valor de muestreo. Con lo cual en un fallo de pulso no será el sistema tan eficiente (véase la Figura 3.13).

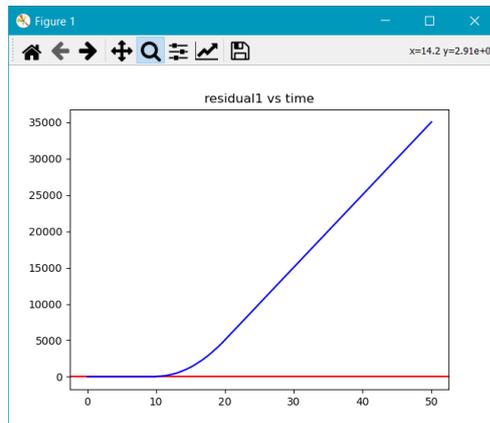


**Figura 3.13 Acercamiento del comportamiento del fallo tipo pulso, fallo tipo pulso de atascamiento**

Además, se generó un fallo tipo rampa para demostración de la prognosis con mayor eficiencia el filtrado de datos se utilizó  $n=100\ 000$  (véase la Figura 3.15). La lectura de los sensores se visualiza en la Figura 3.14.

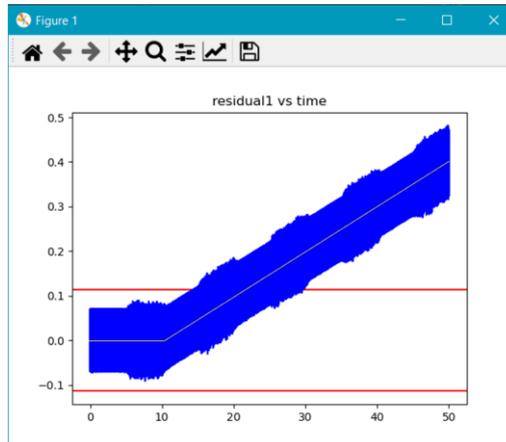


**Figura 3.14** Lectura de sensores, fallo tipo rampa en la corriente



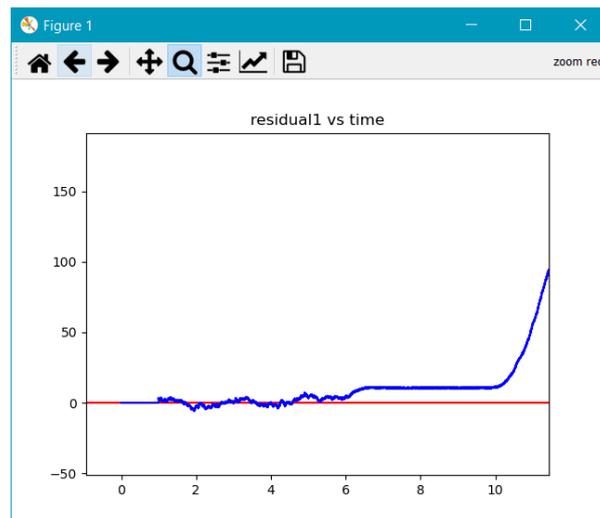
**Figura 3.15** Media móvil, fallo tipo rampa en corriente

Se compara la media móvil con el ruido de los valores de residuo. Se aproxima el tiempo de fallo después de 20 segundos de anticipación, frente a los 10 segundos que se presenta teóricamente como indica la Figura 3.16.



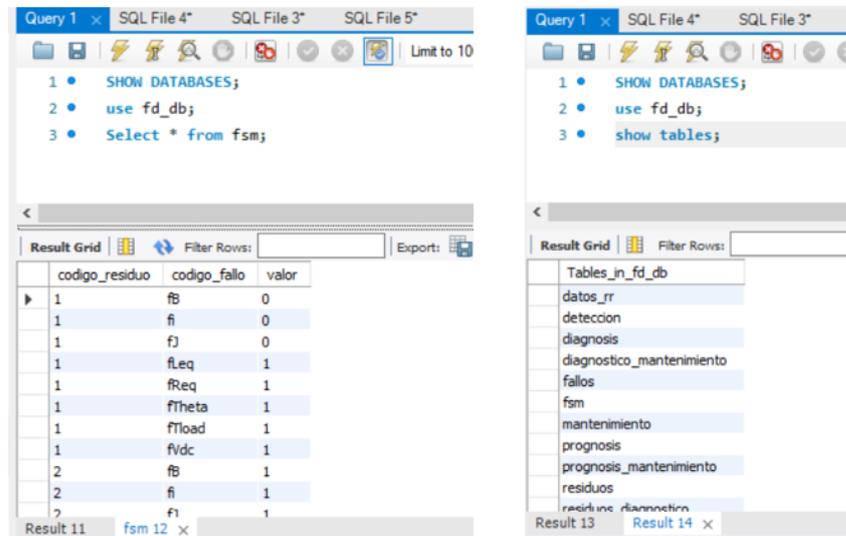
**Figura 3.16 Comparación de señal filtrada y sin filtrar de fallo en la corriente**

Señal filtrada con  $n = 10\ 000$ , se demuestra que presenta aún ruido. Por lo cual no se puede realizar una prognosis eficiente.



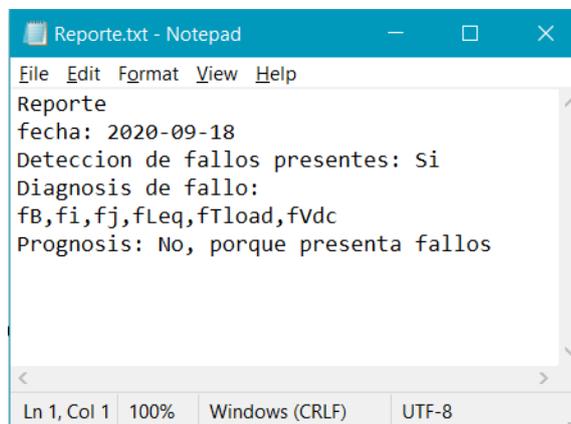
**Figura 3.17 Señal filtrada con media móvil 10 000, fallo tipo rampa de corriente**

La Figura 3.18 presenta pruebas del correcto funcionamiento de la base de datos respecto al guardado de datos.



**Figura 3.18 Demostración de la creación de la base de datos y los datos almacenados en MySQL**

El reporte es generado en un formato .txt con los resultados de los diferentes fallos presentes en el sistema, el resultado es generado por fallo de atascamiento. Véase la figura 3.19



**Figura 3.19 Reporte de la gráfica de fallo en atascamiento**

### 3.6 Fallos presentes en el motor

Se detalla en la Tabla 3.6 y Tabla 3.7 las causas generales que pueden producir problemas y como pueden solucionarse en un motor [34].

**Tabla 3.6 Síntomas generales de fallos en motores**

<b>Perturbación</b>	<b>Causa probable</b>	<b>Análisis</b>
Vibraciones mecánicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chumacera excéntrica</li> <li>• Devanado en corto</li> </ul>	<p>Corregir alineación. Verificar el aceite.</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bandas destempladas</li> <li>• Poleas desgastadas</li> <li>• Carece de alineamiento entre el rotor y estator</li> </ul>	Aliviar la grasa en caso de que el rodamiento se encuentre sobre engrasado.
Armónicos e interarmónicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se generan por trabajar con cargas no lineales.</li> </ul>	Revisar el sobrecalentamiento en los conductores. Revisar la degradación en los aislamientos.
Variaciones en alimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento o temporal del voltaje de alimentación durante desbalance de fases.</li> <li>• Arranque del motor con potencia alta.</li> <li>• El sistema no se encuentra bien aterrizado.</li> </ul>	Verificar la tensión de alimentación que se suministra. Carga en motor excesiva.
Aumento de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislamiento defectuoso en el devanado</li> <li>• Suciedad</li> <li>• Sobrecarga</li> <li>• Sistema de control desconfigurado</li> <li>• Operación inadecuada</li> </ul>	Verificar el aceite. Dar mantenimiento de limpieza al motor. Revisar el sistema de ventilación que no se encuentre tapado.

Algunas explicaciones sobre variaciones en los fallos de la resistencia e inductancia [35] se detalla en la Tabla 3.7 .

**Tabla 3.7 Variaciones en la resistividad e inductancia en un motor**

<b>Si falla</b>	<b>Probable</b>
La resistencia	Puede haber contaminación y humedad en el sistema de aislamiento
La inductancia	Problemas con rotor o eje torcido, fallo en el estator, puede haber excentricidad
Resistencia e inductancia	Problemas en el estator o en el circuito de potencia, quizá alguna conexión deteriorada.

### 3.7 Análisis de costos

Se tomaron en cuenta varios puntos para el análisis de los costos. Los honorarios son el tiempo tomado de 3 meses de trabajo. La selección de sensores robustos para la lectura de los datos. La placa de ADQ es el arduino de bajo costo. El costo de la madera MDF y el recorte en CNC para el Case. Se evidencia en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8 Detalles de costos de prototipo**

<b>Detalle</b>	<b>Valores</b>
Sensor corriente	\$60.00
Sensor voltaje	\$85.00
Sensor tacómetro	\$105.00
Sensor posición	\$85.00
Placa ADQ	\$12.00
Actuadores de sonido y luz en alarma	\$2.00
Case protector	\$15.00
Honorarios	\$2600
<b>Total</b>	<b>\$2964.00</b>

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Se utilizó una placa Arduino para la adquisición de datos, se utilizaron sus pines analógicos que poseen una resolución de 10 bits para lograr una medición precisa. Además, se seleccionaron los sensores de corriente, voltaje, posición y velocidad angular para las mediciones, debido a que estas variables permitían analizar el sistema con alta fidelidad.
- Para todo el manejo de los datos fue necesario crear un modelo entidad-relación que me permitiera guardar esta cantidad enorme de datos. Ésto es debido a que en 50 segundos de simulación se tomaban 500 mil datos por sensor y entre diferentes cálculos computacionales, la memoria dinámica del ordenador tendía a acabarse y volverlo muy lento.
- La creación de la base de datos se realizó con MySQL. La cual se conecta mediante el programa GUI que presenta programación en Python y comandos SQL para la creación y manejo de la base de datos.
- Se diseñó una interfaz amigable gracias a la librería Tkinter. Esta librería permitió la creación de pantallas de trabajo y se utilizó conocimientos de programación orientada a objetos para aislar cada objeto. Ésto produjo que el aplicativo no sea lineal, sino que pueda correrse varias veces si así lo deseaba el usuario.
- La diagnosis de fallos funcionó de manera correcta, debido a que me presentaba las áreas necesarias para su mantenimiento correctivo. Como el caso presentado de atascamiento, produjo una falla en la alimentación de corriente, devanado del estator, inercia, inductancia, carga y alimentación de voltaje.
- Gracias al informe provisto, se puede generar la planificación de los operadores para que realicen el respectivo mantenimiento correctivo.
- La prognosis es más efectiva en fallos tipo rampa como se evidenció en la gráfica de fallo en corriente. Con lo cual si existiese un fallo tipo pulso sería muy complicado de aproximar a menos que se aumente el tiempo de muestreo que también conlleva a un enorme gasto computacional.
- Al momento de generar la gráfica de la diagnosis, evaluaba los datos y si presentaba algún fallo, la placa Arduino generaba un pitido de 2 segundo y

mantenía encendido una luz piloto, lo que indica una presencia de fallo en el sistema.

## 4.2 Recomendaciones

- En caso de mejora para la interfaz de usuario pueda ver de manera más amigable el aplicativo, la programación en lenguaje C permite un mayor número de ventajas a lo que respecta.
- El proyecto puede poseer mejoras y facilitar gracias a la IOT la comunicación y almacenamiento de datos en la nube. Con un almacenamiento en la nube se puede poseer un mayor control sobre el mantenimiento que se está realizando sobre los motores, en caso de que el jefe encargado no se encuentre, éste puede revisar que los encargados deben de dar el respectivo mantenimiento.
- El aplicativo posee la programación para trabajar con un arduino UNO R3 pero la lectura que realiza es mediante comunicación serial. Por lo cual, si se desea cambiar el arduino, debe de cambiarse el puerto de comunicación 'COM', identificar el nuevo y agregarlo. Además, el arduino Due presenta una resolución de 12 bits, lo cual puede mejorar en la lectura de datos produciendo mayor precisión.
- El aplicativo presenta una serie de fallos posibles existentes debido a la inconsistencia en las variables de residuos, por lo cual se puede utilizar una metodología aislamiento de fallos, con lo que ésta puede ser una mejora del proyecto. El aislamiento del fallo puede detectar con mayor precisión qué clase de fallo se presenta exclusivamente.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Silvia Martelo Landrogez Directores and D. D. D<sup>a</sup> Carmen Barroso Castro Gabriel Cepeda Carrión, “TESIS DOCTORAL ANÁLISIS DE LA CREACIÓN DE VALOR. UN ENFOQUE DE CAPACIDADES,” 2011.
- [2] Howard Penrose, “Large Electric Motor Reliability: What Did the Studies Really Say? - CBM CONNECT®,” Sep. 13, 2018. <https://www.cbmconnect.com/large-electric-motor-reliability-what-did-the-studies-really-say-2/> (accessed Jun. 25, 2020).
- [3] Christian Cavallo, “Brushless Motors vs. Brushed Motors - What’s the Difference?” <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/brushless-motors-vs-brushed-motors/> (accessed Jul. 09, 2020).
- [4] O. S. Rohit Sawant & Priyanka Khandelwal, “Brushless DC Motor Market Size, Share and Growth | Forecast By 2026,” *Brushless DC Motor Market by Type (Inner Rotor Brushless DC Motors and Outer Rotor Brushless DC Motors) and End User (Industrial Machinery, Automotive, Healthcare, HVAC industry, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2019–2026*, Aug. 2019. <https://www.alliedmarketresearch.com/brushless-dc-motors-market> (accessed Jun. 25, 2020).
- [5] A. M. K. P. Taylor, “Science review of internal combustion engines,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4657–4667, 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.001.
- [6] S. Sidda, “A Study on Industrial Motor Drives Comparison and Applications of PMSM and BLDC Motor Drives,” no. August 2017, 2018, doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390224.
- [7] Allied Motion, “Choosing Between Brush and Brushless DC Motors Motion Solutions That Change the Game.” Accessed: Jul. 09, 2020. [Online]. Available: [www.alliedmotion.com](http://www.alliedmotion.com).
- [8] D. Suñén Angós, “Banco de ensayos para regulador de motor brushless,” 2016, [Online]. Available: <https://zagan.unizar.es/record/58020/files/TAZ-TFG-2016-4817.pdf>.
- [9] T. A. Faculty, S. Rajagopalan, and I. P. Fulfillment, “Detection of Rotor and Load

Faults in Brushless Dc Motors Operating Under Stationary and Non- Stationary Conditions Detection of Rotor and Load Faults in Brushless Dc Motors Operating Under Stationary and Non-," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. August, pp. 1464–1477, 2006.

- [10] J. Portos, K. Dean, B. Parker, and J. Cannon, "Most Common Mechanisms and Reasons for Electric Motor Failures in Industry," *2019 IEEE IAS Pulp, Pap. For. Ind. Conf. PPFIC 2019*, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1109/PPFIC43189.2019.9052384.
- [11] M. KUKA, "Pequeño gran robot con motores brushless en código abierto. | maxon group." <https://www.maxongroup.es/maxon/view/application/Pequeno-gran-robot-con-motores-brushless-en-codigo-abierto> (accessed Jul. 09, 2020).
- [12] A. J. Bazurto, E. C. Quispe, and R. C. Mendoza, "Causes and failures classification of industrial electric motor," *Proc. 2016 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2016*, pp. 10–13, 2017, doi: 10.1109/ANDESCON.2016.7836190.
- [13] V. M. Fico, A. L. R. Vázquez, M. Á. M. Prats, and F. Bernelli-Zazzera, "Failure detection by signal similarity measurement of brushless DC motors," *Energies*, vol. 12, no. 7, pp. 1–23, 2019, doi: 10.3390/en12071364.
- [14] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems*. 2006.
- [15] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. N. Kavuri, and K. Yin, "A review of process fault detection and diagnosis," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 3, pp. 327–346, 2003, doi: 10.1016/s0098-1354(02)00162-x.
- [16] S. Dash and V. Venkatasubramanian, "Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 24, no. 2–7, pp. 785–791, 2000, doi: 10.1016/S0098-1354(00)00374-4.
- [17] J. B. Lázaro, ... A. P.-M.-I., and undefined 2011, "Estudio comparativo de clasificadores empleados en el diagnóstico de fallos de sistemas industriales," *Scielo.Sld.Cu*, vol. 14, no. 2, p. . 87-98, 2011, [Online]. Available: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59442011000200001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442011000200001).
- [18] P. Urwin, *Fault detection and diagnosis in industrial systems*. 1994.

- [19] C. Peñafiel and R. Ing. Ávila, *Inteligencia Artificial*, vol. 2, no. 6. 2007.
- [20] L. Travé-Massuyès, “Bridging control and artificial intelligence theories for diagnosis: A survey,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 27, pp. 1–16, 2014, doi: 10.1016/j.engappai.2013.09.018.
- [21] A. Feldman, M. Kalech, and G. Provan, “Proceedings of DX-2013,” *24th Int. Work. Princ. Diagnosis DX-2013*, 2013.
- [22] NATIONAL MATERIALS ADVISORY BOARD, *Expanding the Vision of Sensor Materials*. National Academies Press, 1995.
- [23] “tachometer sensors | McMaster-Carr.” <https://www.mcmaster.com/tachometer-sensors/> (accessed Jul. 10, 2020).
- [24] Ecured, “Sensor\_hall.jpeg (137×137).” [https://www.ecured.cu/images/c/c9/Sensor\\_hall.jpeg](https://www.ecured.cu/images/c/c9/Sensor_hall.jpeg) (accessed Jun. 29, 2020).
- [25] ZQC, “DC Módulo sensor voltaje Detector de tensión divisor para Arduino DG | - AliExpress.” <https://es.aliexpress.com/i/32863438008.html> (accessed Jun. 29, 2020).
- [26] TechTeach, “TechTeach: National Instruments USB-6008.” <http://techteach.no/tekdok/usb6008/> (accessed Jun. 29, 2020).
- [27] MySQL, “MySQL.” <https://www.mysql.com/> (accessed Jun. 29, 2020).
- [28] P. Segovia, J. Blesa, E. Duviella, L. Rajaoarisoa, F. Nejjari, and V. Puig, “Sensor fault diagnosis in inland navigation networks based on a grey-box model,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 24, pp. 742–747, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.658.
- [29] J. Blesa, J. Quevedo, V. Puig, F. Nejjari, R. Zaragoza, and A. Rolán, “Fault Diagnosis and Prognosis of a Brushless DC motor using a Model-based Approach,” *Phme 2020*, pp. 1–8, 2020.
- [30] A. Hughes, *Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications*, 2006 Third. Oxford, UK: Austin Hughes.
- [31] T. F. I. D. E. Grau, “Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica SUPERVISIÓ I DIAGNOSI DE FALLADES DE MOTORS TIPUS ‘ BRUSHLESS

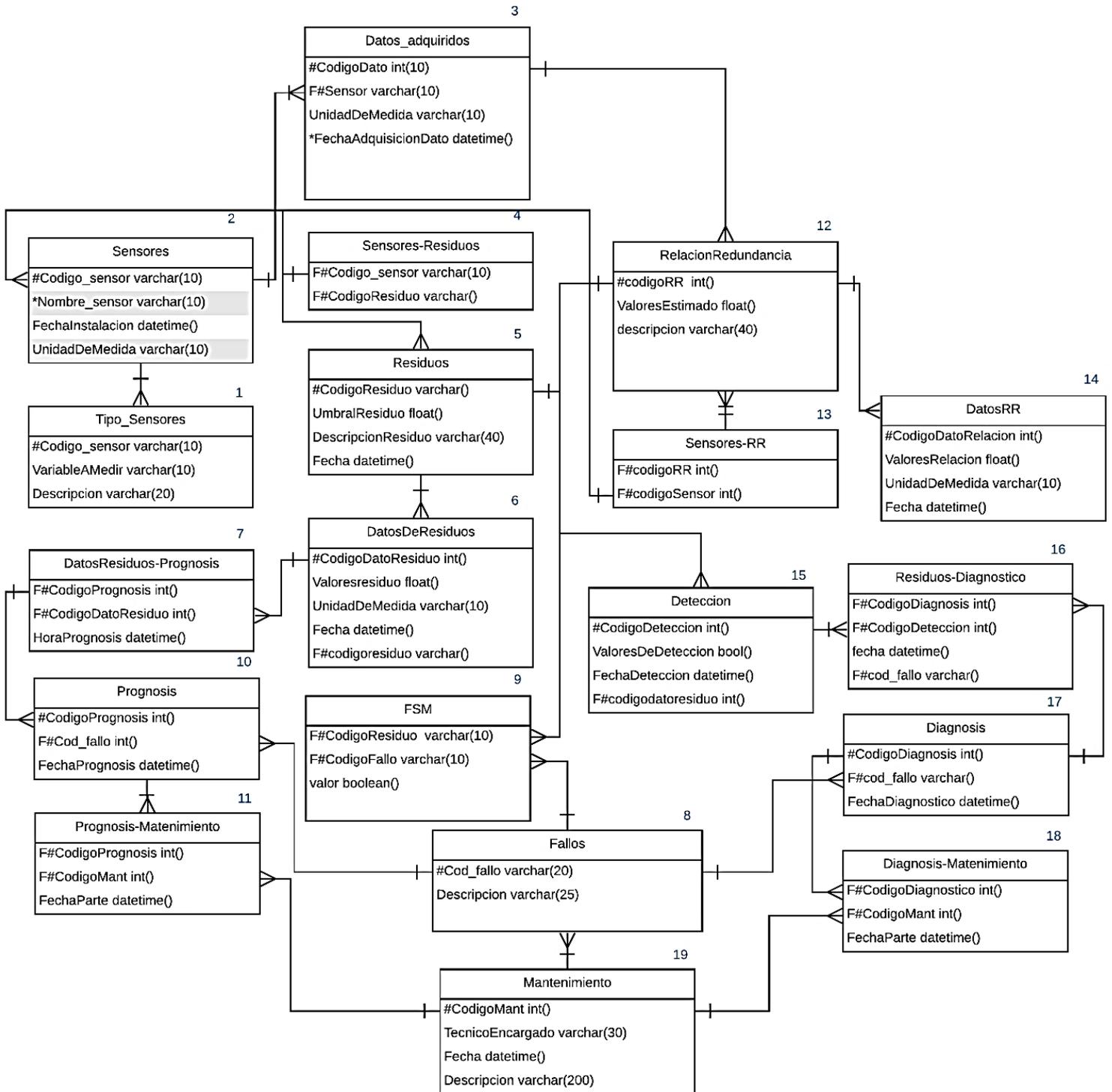
' Memòria i Annexos," 2020.

- [32] B. Maegraith, L. Casillas, and M. Gibert, *Software libre, Bases de datos*, 2005th ed., vol. 64, no. 12. 1968.
- [33] Python, "Welcome to Python.org." <https://www.python.org/> (accessed Jun. 30, 2020).
- [34] C. J. Verucchi and G. G. Acosta, "Técnicas de detección y diagnóstico de fallos en máquinas eléctricas de inducción," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 5, no. 1, pp. 41–49, Mar. 2007, doi: 10.1109/T-LA.2007.4444532.
- [35] M. Predictivo and I. E. López, "Análisis de Motores Eléctricos Introducción."

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

Diagrama entidad-relación de la BD



# APÉNDICE B

Características del motor BLDC (Información del catálogo presentada por parte de la empresa Crouzet Motors)



## 57 square - 225 mNm continuous with Hall effect sensors 45 W nominal at 24 V and 2000 rpm Part number 80140510



- High power motors (up to 95 W continuous at 24 VDC)
- Suitable for voltages between 6 and 75 VDC
- Ideal for applications where the control electronics have to be off centre due to the high ambient temperature
- Temperature probe built into the motor

### Part numbers

80140510

Type

References: 45 W nominal at 24 V and 2000 rpm 801405 Without option

### Specifications

### General characteristics

Max. speed (rpm)	10000
Torque peak in (mNm)	500*
Maximum continuous torque (mNm)	225**
Motor constant (mNm/W <sup>2</sup> )	57
Electrical time constant (ms)	2,2
Mechanical time constant (ms)	1,5
Energy losses at peak torque (W)	77
Torque/speed factor - zero impedance (mNm/ (rad/s) )	3,2
Rotor inertia (gcm <sup>2</sup> )	50
Thermal resistance (°C/W)	5,7
Max. coil temperature (°C)	120
Integrated temperature sensor	Yes***
Number of phases	3 (delta config)
Number of poles	4
Ambient operating temperature (°C)	-40 →70
Dielectric strength at 500V DC (kV)	1000
Service life (h)	20000
Output ball bearing	Yes
Weight (g)	900
Length (mm)	73
Protection index	IP54

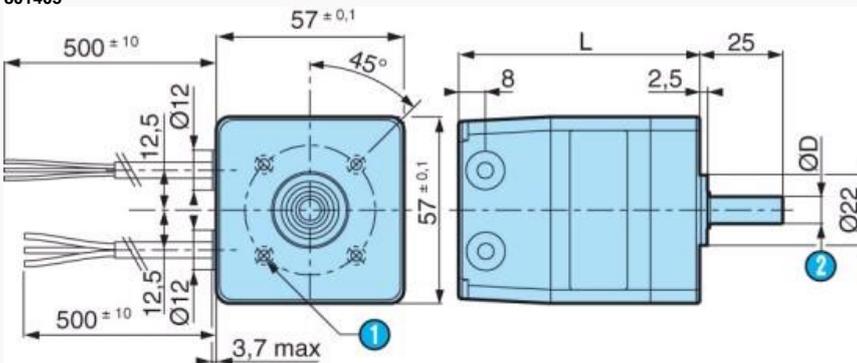
### Comments

#### Standard winding

Phase-to-phase resistance (Ω)	1,72 ±12,5 %
Voltage at peak torque (V)	11,5
Current at peak torque (A)	6,7
Torque constant (mNm/A)	74,5 ±10 %
Back EMF constant (V/ (rad/s) )	0,0745
Back EMF constant (V/Krpm)	7,8 ±10 %
Inductance (mH)	3,8 ±30 %

### Dimensions (mm)

801405

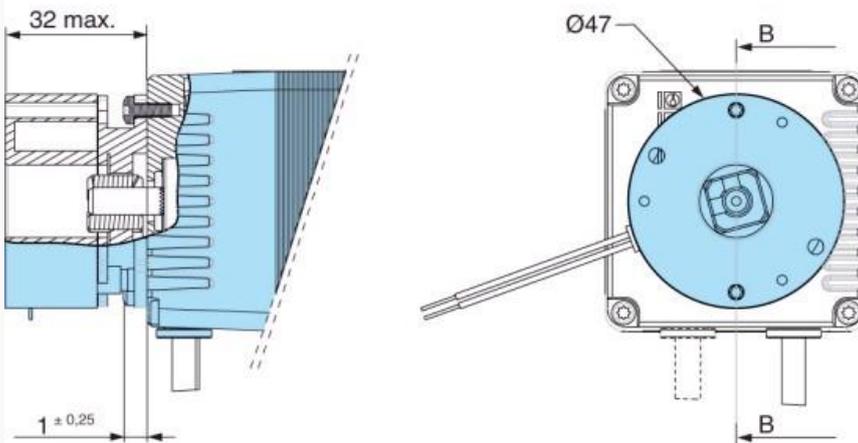


80140504 : with BDE30 connections

N°	Legend
1	4 holes M5 over Ø 40 mm- depth of thread : 4.5 mm- depth of hole 6.6 mm
2	D : Ø6- 0.010 - 0.020mm
	L : 73.2 mm max.

### Dimensions (mm)

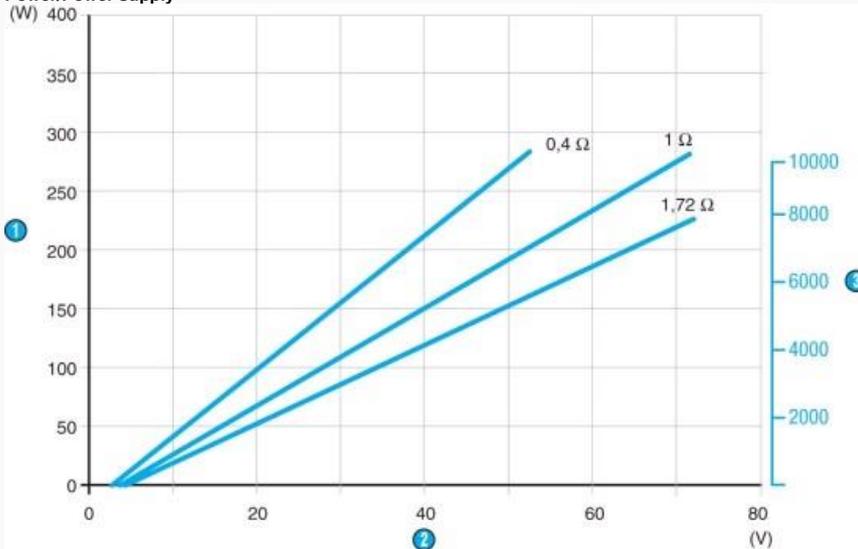
Holding brake - 80140518  
B-B



Holding brake :At power switch off - 0.5 Nm - 7 W - 24 V ± 10% Weight : 250 g- AWG26 leads - 400 mm

### Curves

Power/Power supply



N°	Legend
1	Nominal power
2	Supply voltage
3	Speeds (rpm)

### Connections

Forward

Hall			①		
1	2	3	1	2	3
1	0	0	0V	+V 	-
1	1	0	0V	-	+V 
0	1	0	-	0V	+V 
0	1	1	+V 	0V	-
0	0	1	+V 	-	0V
1	0	1	-	+V 	0V



Nº	Legend
①	Winding

Connections

Reverse

Hall			①		
1	2	3	1	2	3
1	0	0	+V 	0V	-
1	0	1	-	0V	+V 
0	0	1	0V	-	+V 
0	1	1	0V	+V 	-
0	1	0	-	+V 	0V
1	1	0	+V 	-	0V



Nº	Legend
①	Winding

Connections

Part number 801405

Wire colour	Connection name	Wire gauge (AWG)
Black	Winding 1	20
Brown	Winding 2	20
Red	Winding 3	20
Red	+ Hall power supply	24
Black	- Hall power supply (return)	24
Yellow	Sonde temp.	24
Orange	Hall 1	24
Brown	Hall 2	24
Green	Hall 3	24

Hall effect Voltage range : 2.5VDC Max. current : 20 mA Type of output : NPN open collector Not protected against connection errors

#### Other information

For other standard windings visit [www.crouzet.com](http://www.crouzet.com)

#### Precautions for use

Not protected against connection errors

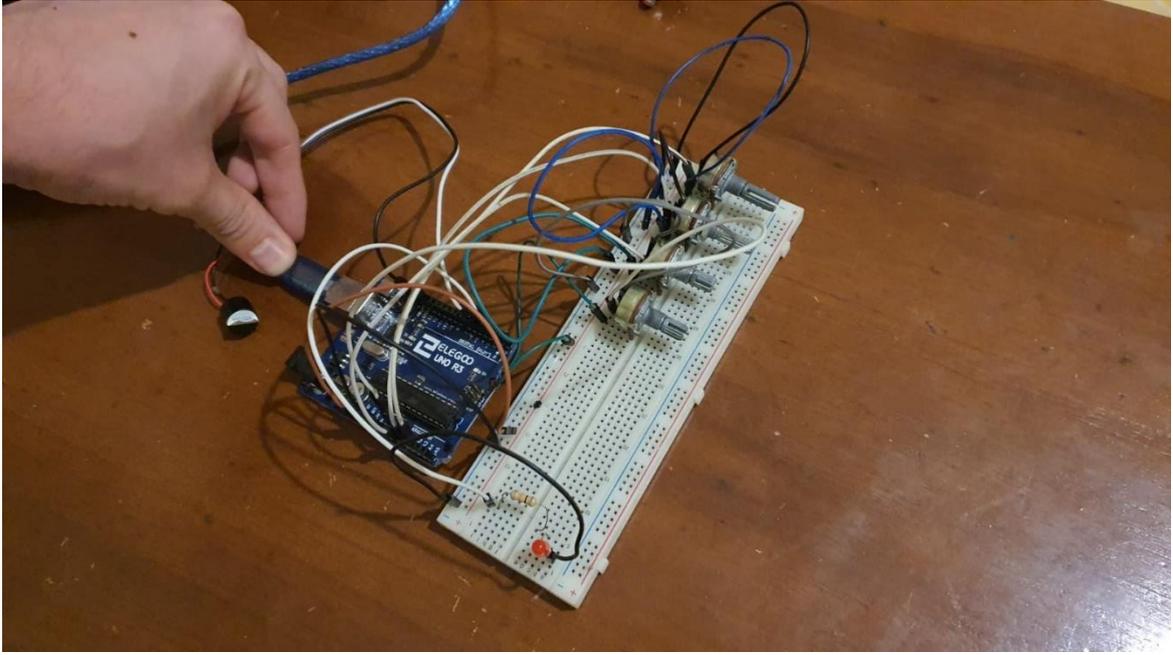
#### Product adaptations



- Special shafts
- Lead length
- A single cable instead of two
- C12 connector built in
- 200, 500, 1000 points/revolution encoder
- Shorter motor

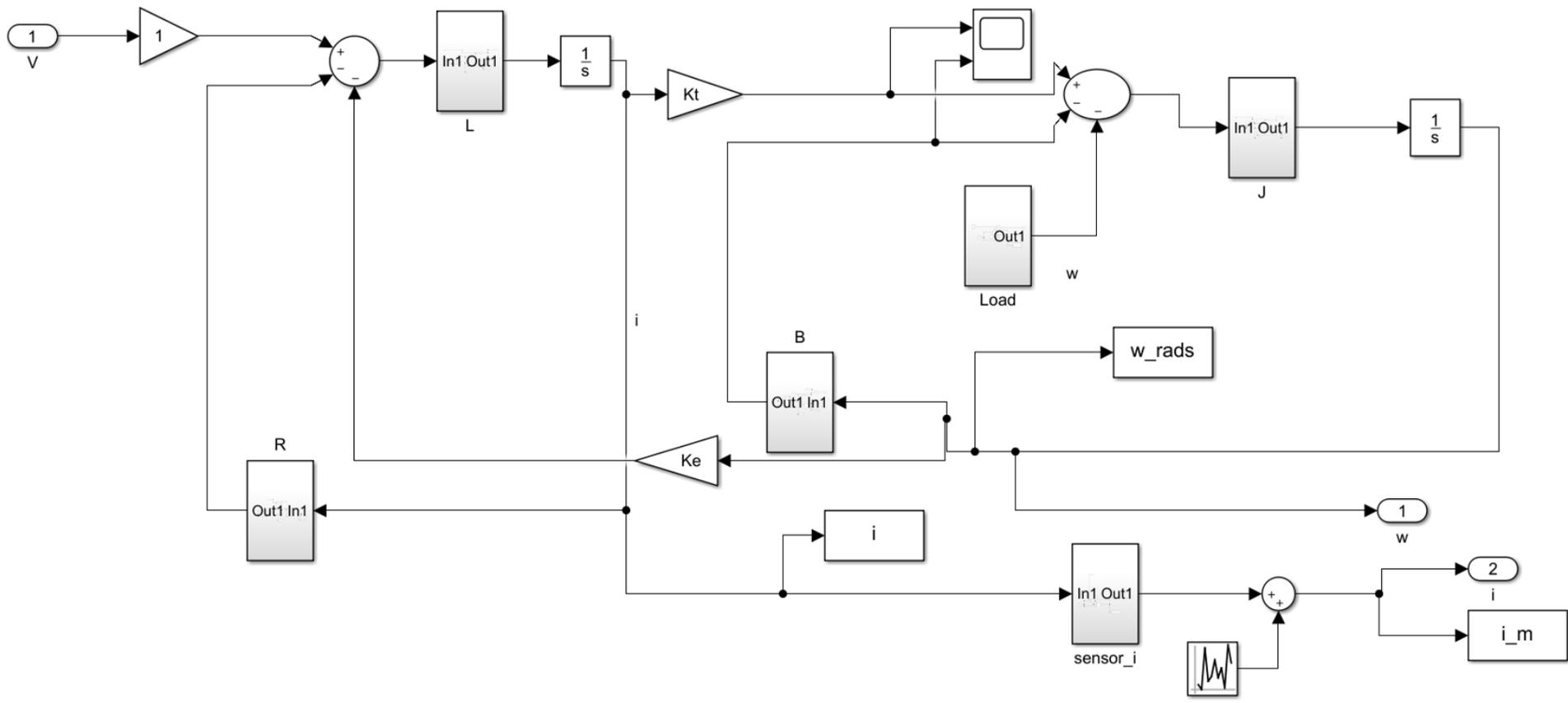
## APÉNDICE C

Conexiones de entradas analógicas para prueba de lectura de datos



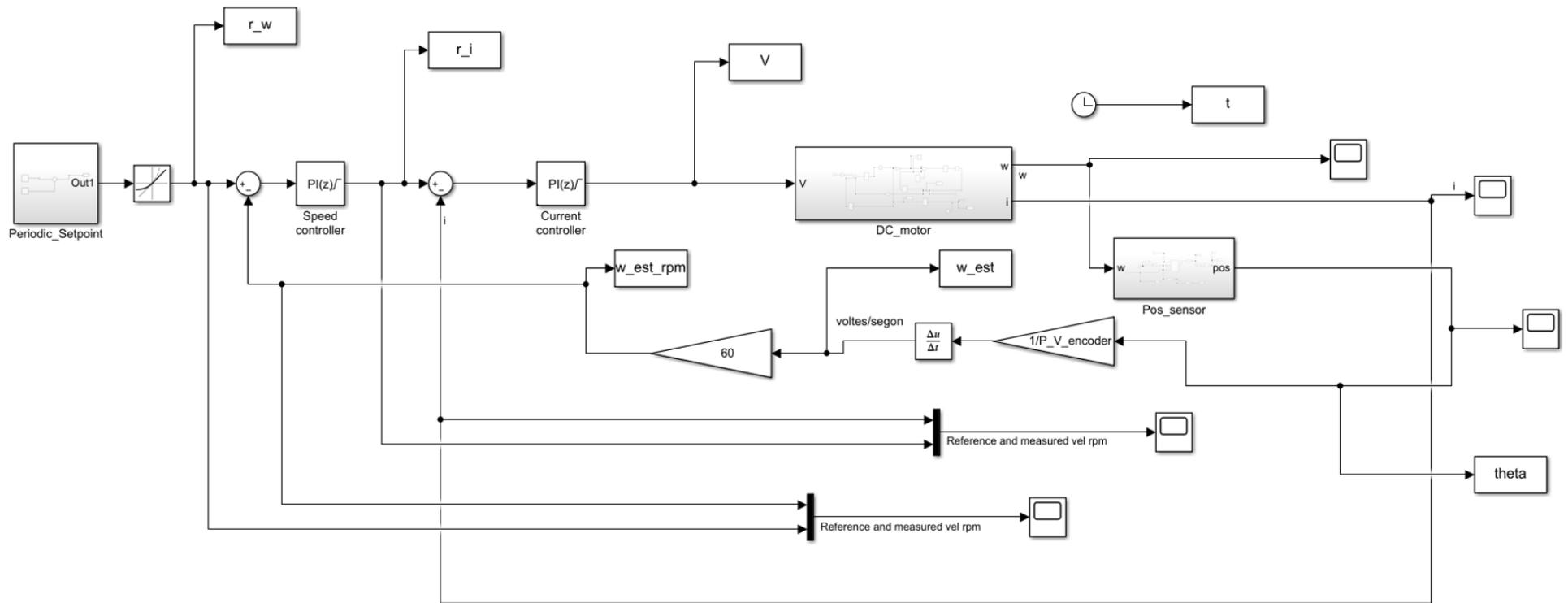
# APÉNDICE D

## Modelo de motor BLDC



# APÉNDICE E

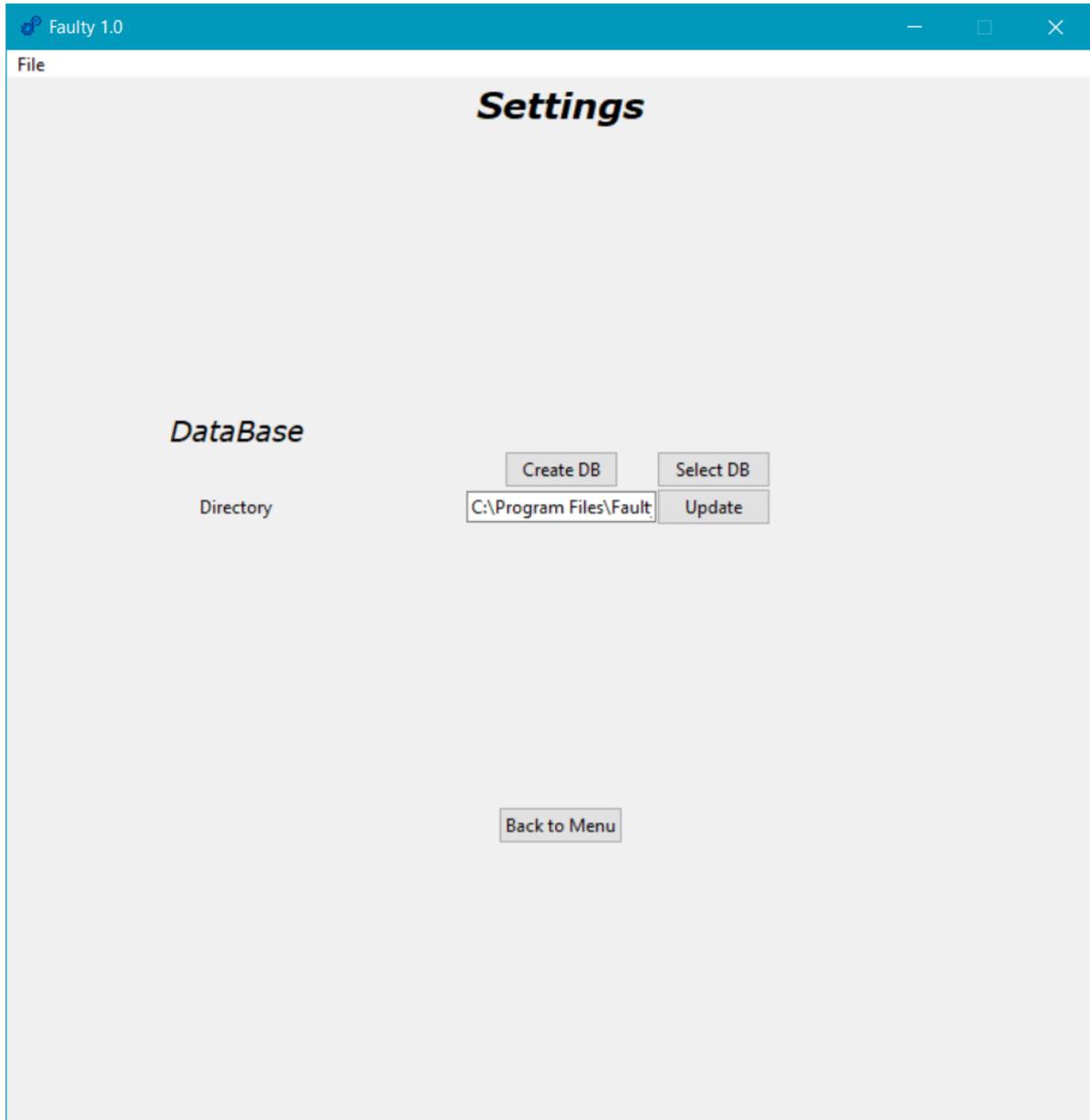
Modelo general del motor con alimentación y sensores



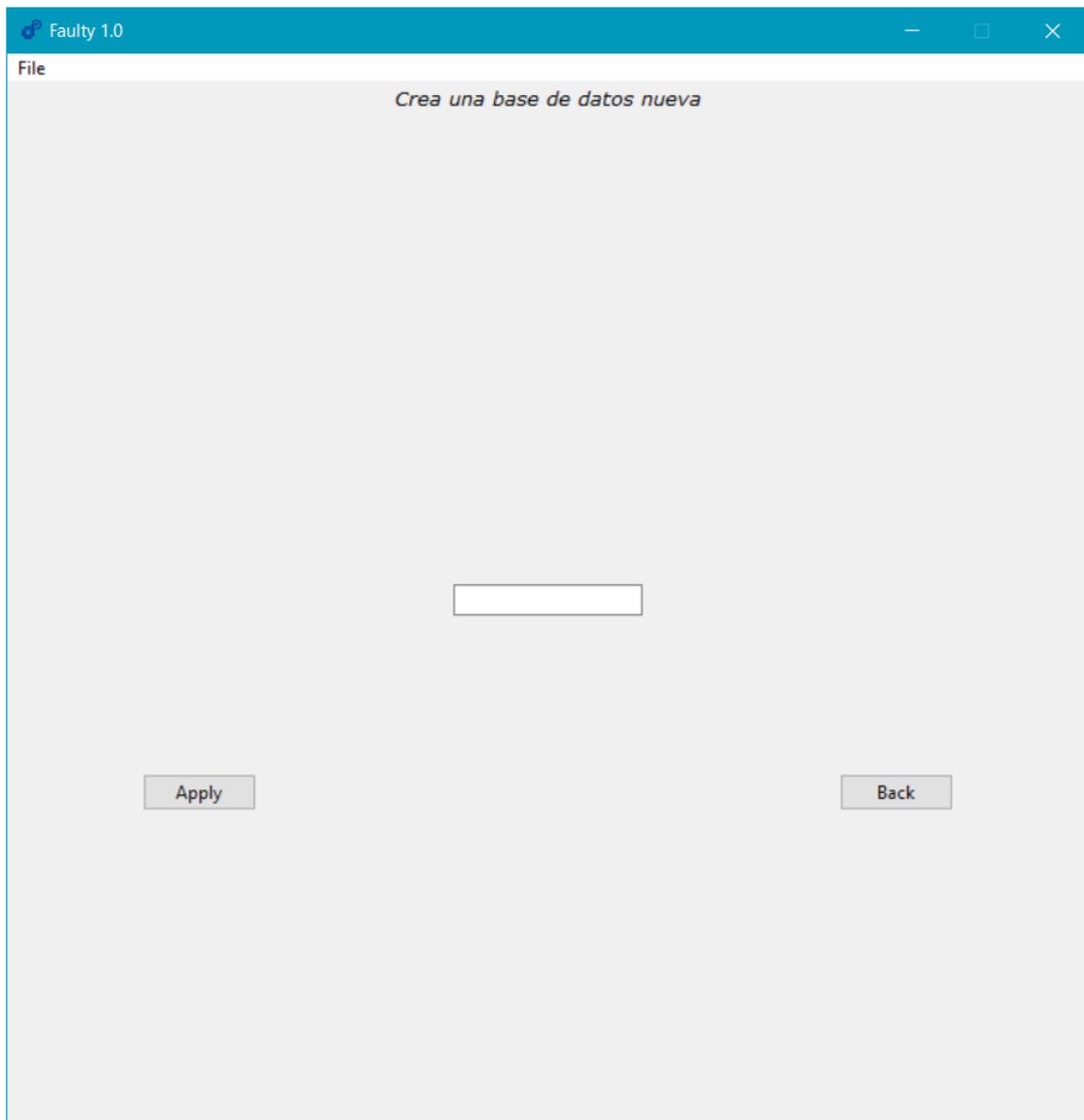
# APÉNDICE F

Aplicativo “Faulty”-Interfaz de usuario

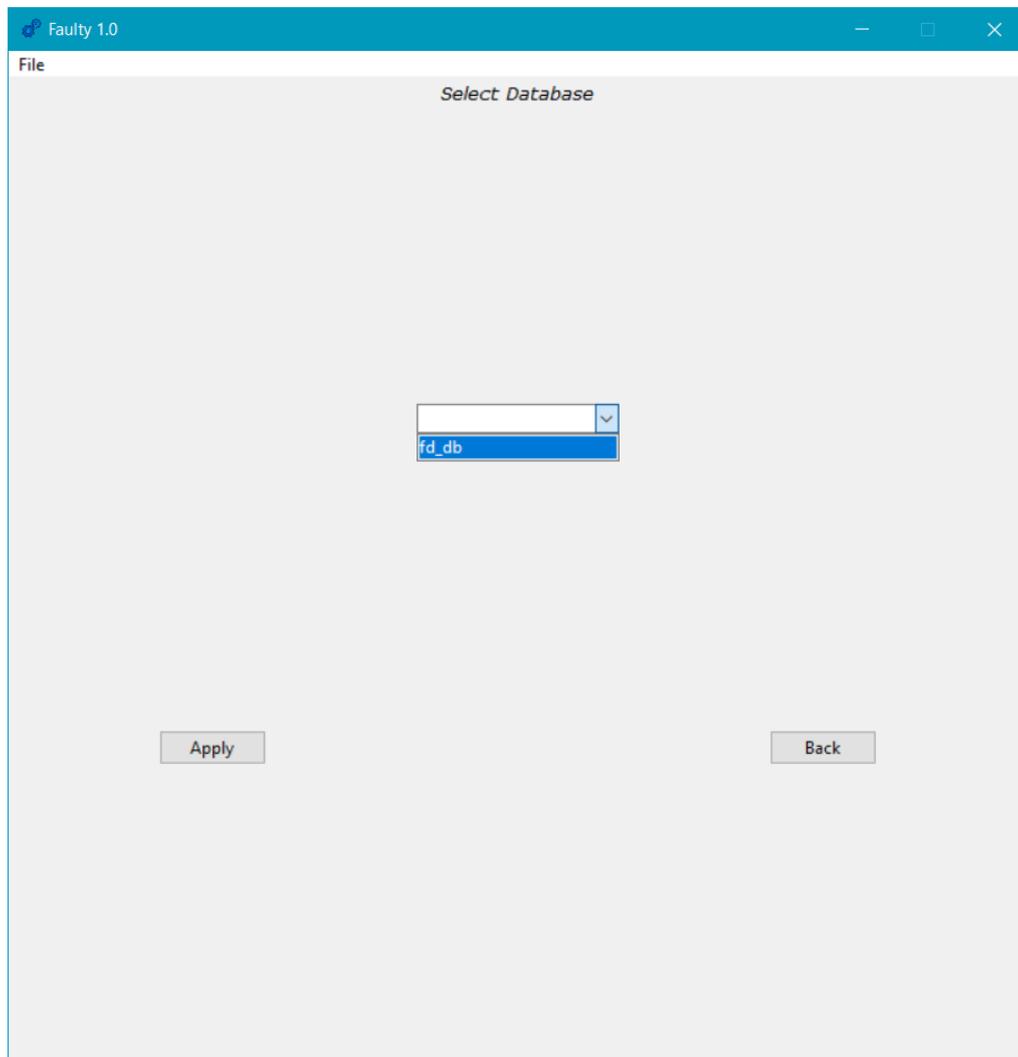
Apéndice F.1:Creación y selección de base de datos



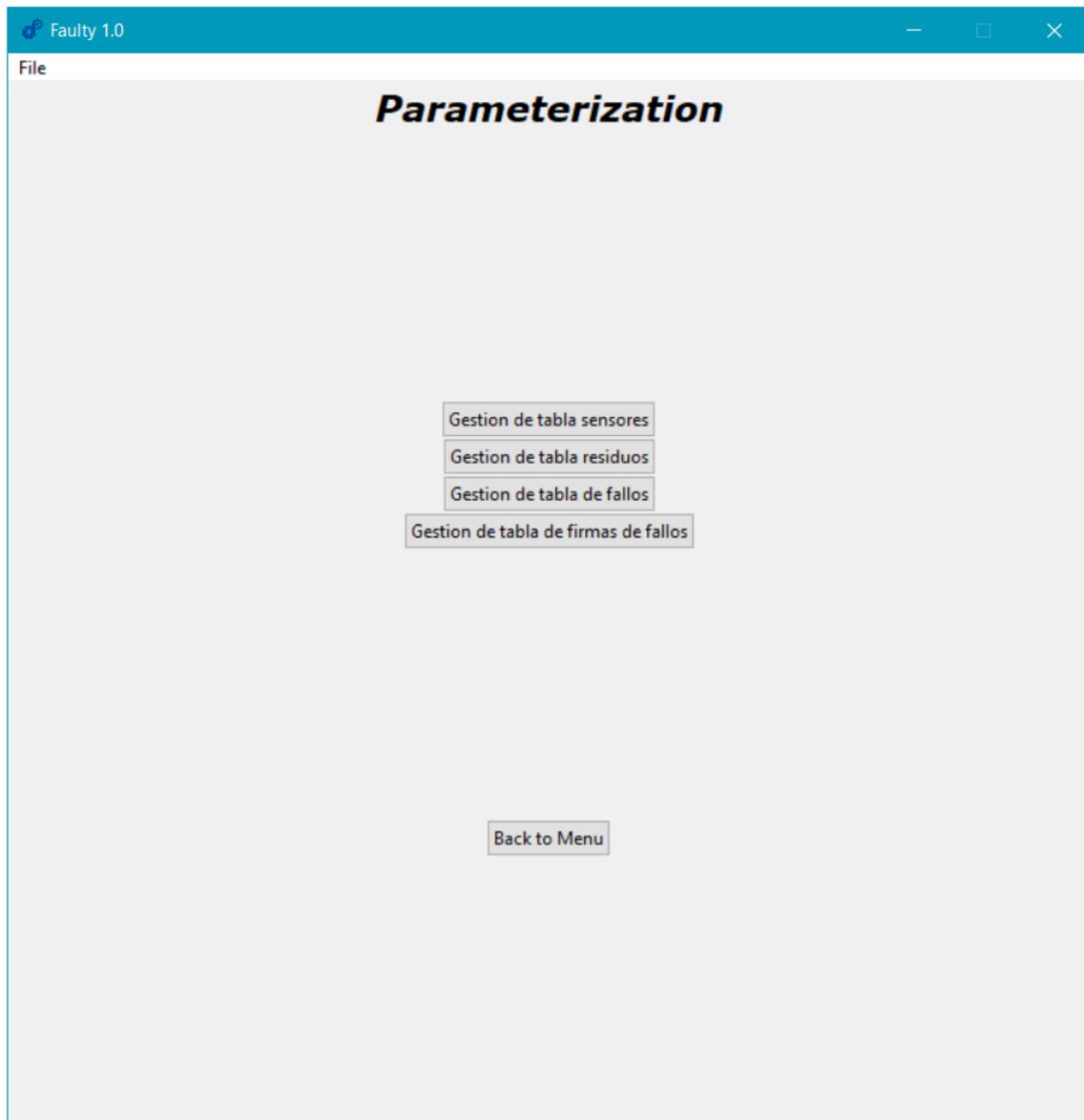
## Apéndice F.2: Pantalla de escritura de base de datos



### Apéndice F.3: Pantalla para selección de base de datos



## Apéndice F.4: Pantalla parametrización



## Apéndice F.5: Entrada de valores para sensores

Faulty 1.0

File

### Sensor Configuration

Sensor Code

Sensor Name

Unit

Installation date 9/14/20

Installation time (hour/minute)

Apply Cancel

Back

## Apéndice F.6: Entrada de datos para residuos

Faulty 1.0

File

### **Residuos**

Umbral (float)

Descripcion

Instalation date 9/14/20

Instalation time (hour/minute)

Apply Cancel

Back

## Apéndice F.7: Pantalla ingreso de fallos

**Tabla de fallos**

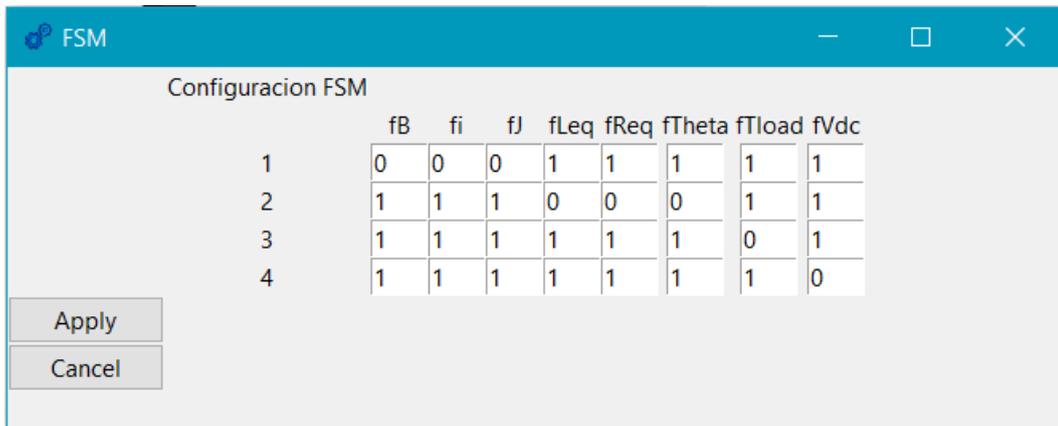
Codigo de Fallo

Descripcion

Apply Cancel

Back

### Apéndice F.8: Pantalla matriz FSM



### Apéndice F.9: Pantalla de diagnostis

