

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica

IE0499 – Proyecto Eléctrico

**Construcción de un sistema de carga variable para la
calibración de sensores de corriente utilizados en el
control de motores PMSM**

por

Jordy Cordero Montero

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Agosto de 2022

Construcción de un sistema de carga variable para la calibración de sensores de corriente utilizados en el control de motores PMSM

por

Jordy Cordero Montero

B72306

IE0499 – Proyecto Eléctrico

Aprobado por

Ing. Helber Meneses Navarro, Lic.

Profesor guía

Ing. Federico Ruiz Ugalde, PhD.

Profesor lector

Ing. Mauricio Espinoza Bolaños, PhD.

Profesor lector

Agosto de 2022

Resumen

Construcción de un sistema de carga variable para la calibración de sensores de corriente utilizados en el control de motores PMSM

por

Jordy Cordero Montero

Universidad de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Eléctrica

Profesor guía: Ing. Helber Meneses Navarro, Lic.

Agosto de 2022

En el ARCOS-Lab de la escuela de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Costa Rica se encuentra en proceso de desarrollo un robot humanoide asistente en actividades cotidianas, para el cual se desea crear un control por impedancia que permita detectar las fuerzas externas al robot y actuar adecuadamente a ellas. El prototipo de hardware y software en proceso para la implementación del control por impedancia se llama OpenCoRoCo y actualmente contiene únicamente el control del motor de accionamiento de la base móvil del robot (Motor PMSM). OpenCoRoCo sensa corrientes analógicas que utiliza en el control del motor de accionamiento, pero los sensores de corriente encargados de esta medición manifiestan un error constante en las mediciones, por consiguiente, este proyecto plantea un algoritmo de calibración de estos sensores mediante software y la implementación de un sistema de carga mecánica variable que permita poner a prueba el algoritmo para distintos valores de carga mecánica.

El sistema de carga mecánica variable es un sistema de bajo costo, practico y funcional que consiste en un motor DC de carga funcionando como generador conectado eléctricamente a un resistor variable y mecánicamente al motor de accionamiento.

Los resultados demuestran que el offset de corriente DC no varía con las cargas aplicadas al motor, sino que tiende a mantenerse constante aproximadamente y que el algoritmo calibra adecuadamente las mediciones de los sensores. Se valida mediante observación de la corriente entregada por la fuente de alimentación y análisis del par mecánico en el motor de carga, que el sistema de carga mecánica variable cumple con lo requerido.

Palabras claves: *Calibración de sensores, Carga mecánica, carga variable, control por impedancia, motor PMSM, OpenCoRoCo.*

Acerca de IE0499 – Proyecto Eléctrico

El Proyecto Eléctrico es un curso semestral bajo la modalidad de trabajo individual supervisado, con el propósito de aplicar estrategias de diseño y análisis a un problema de temática abierta de la ingeniería eléctrica. Es un requisito de graduación para el grado de bachiller en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica.

Abstract

Construcción de un sistema de carga variable para la calibración de sensores de corriente utilizados en el control de motores PMSM

Original in Spanish. Translated as: “Variable load system for calibration of current sensors used in PMSM motor control”

by

Jordy Cordero Montero

University of Costa Rica
Department of Electrical Engineering
Tutor: Ing. Helber Meneses Navarro, Lic.
August of 2022

In the ARCOS Lab of the Electric Engineering School of the University of Costa Rica, the development of an assistant humanoid robot for daily activities is in process for which it is desirable to create a impedance control that permits the detection of the forces that are external to the robot and acts appropriately to them. The hardware and software prototype in process for the implementation of the impedance control is called OpenCoRoCo and it currently contains only the control of the drive motor of the robot’s mobile base (PMSM motor). OpenCoRoCo senses analog currents which are utilized in the control of the drive motor, but the current sensors in charge of this measure manifest a constant error in the measures; therefore, this project poses a calibration algorithm for these sensors through the use of software and the implementation of a variable mechanical loading system that permits to test the algorithm for different mechanical load values.

The variable mechanical loading system is a low-cost, practical and functional system that consists of a charging DC motor operating as a generator connected electrically to a variable resistor and mechanically to the drive motor.

The results show that the offset of the DC current does not vary with the loads applied to the motor, but tends to remain approximately constant and that the algorithm calibrates properly the measures of the sensors. In addition, it is validated through the observation of the current provided by the power supply and analysis of the mechanical torque in the charging motor that the variable mechanical loading system complies with the requirements.

Keywords: *Sensor calibration, Mechanical load, variable load, impedance control, PMSM motor, OpenCoRoCo.*

About IE0499 – Proyecto Eléctrico (“Electrical Project”)

The “Electrical Project” is a course of supervised individual work of one semester, with the purpose of applying design and analysis strategies to a problem in an open topic in electrical engineering. It is a requisite of graduation for the Bachelor of Science in Electrical Engineering, granted by the University of Costa Rica.

Dedicado a mi familia y amigos.

Agradecimientos

Este trabajo esta dedicado a Dios por darme la oportunidad de llegar hasta aquí y poder concluir esta gran etapa de mi vida. A mi familia, amigos y compañeros porque sin su apoyo no hubiera sido capaz de mantenerme firme en mis objetivos y en especial a mis padres porque con su esfuerzo y dedicación me enseñaron que todo es posible cuando uno se lo propone, además de siempre creer en mí y en mis capacidades.

Agradezco a los profesores Federico Ruiz Ugalde, Mauricio Espinoza Bolaños y Oscar Nuñez Mata porque estuvieron presentes en el proceso de este proyecto brindando ideas, sugerencias y consejos, y un agradecimiento especial al profesor Helber Meneses Navarro por su gran apoyo en el proyecto, académico y social.

Índice general

Índice general	xi
Índice de figuras	xii
Índice de tablas	xiii
Nomenclatura	xv
1 Introducción	1
1.1. Alcances del proyecto	1
1.2. Justificación	2
1.3. Problema a resolver	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Metodología	4
2 Marco Teórico	7
2.1. Marco teórico conceptual	7
2.1.1. Control por impedancia	7
2.1.2. Motores sincrónicos de imanes permanentes (PMSM)	8
2.1.3. Emulador de carga mecánica	8
2.1.4. Inversor trifásico	8
2.2. Marco teórico referencial	9
2.3. Máquinas electromecánicas	11
2.3.1. Motor de accionamiento	12
2.3.2. Motor de carga	12
3 Diseño e implementación del prototipo mecánico	15
3.1. Selección del modelo mecánico a implementar	15
3.2. Características de los motores	16
3.2.1. Motor de accionamiento	16

3.2.2.	Motor de carga	17
3.3.	Acople de motores	18
3.3.1.	Acople en una sola pieza	18
3.3.2.	Acople mediante poleas	19
3.4.	Diseño y creación de la base para los motores	20
3.4.1.	Diseño de la base	20
3.4.2.	Impresión de la base	20
4	Puesta de carga variable al sistema y calibración de sensores	23
4.1.	Características y resultados del sistema base	23
4.1.1.	Sensores de corriente	24
4.1.2.	Sistema de control	25
4.1.3.	Resultados obtenidos con el sistema base	27
4.2.	Calibración de sensores	28
4.3.	Puesta de carga variable al sistema	31
4.3.1.	Prueba de circuito abierto	31
4.3.2.	Prueba de circuito cerrado	33
5	Resultados y análisis	35
5.1.	Resultados del offset	35
5.2.	Prueba de circuito abierto	38
5.3.	Prueba de circuito cerrado	39
6	Conclusiones y recomendaciones	43
6.1.	Conclusiones	43
6.2.	Recomendaciones	44
	Bibliografía	45

Índice de figuras

2.1.	Inversor trifásico a partir de 6 transistores IGBT [8]	9
2.2.	Unidad BLDC con control de velocidad con perturbaciones virtuales y variaciones de parámetros [7]	10
2.3.	Emulador de carga mecánica variable sin controlador de torque [12].	11
2.4.	Diagrama de bloques general del emulador de carga mecánica variable.	11

2.5. Circuito DC modelo para el motor DC.	12
3.1. Modelo mecánico para la implementación de un sistema de carga variable.	16
3.2. Motor de accionamiento del sistema.	17
3.3. Motor DC para emular carga mecánica	18
3.4. Forma de acople para motores con ejes alineados	19
3.5. Acople mediante poleas y correa	19
3.6. Diseño de la base para los motores en FreeCAD.	20
3.7. Impresión 3D finalizada con motores.	21
4.1. Diagrama de bloques del sistema base	23
4.2. Sensor de corriente empleado para la medición de corriente en OpenCoRoCo. [2]	24
4.3. Curva de proporcionalidad ideal para los sensores de corriente ACS70331. [2]	25
4.4. Diagrama de bloques del sistema de control FOC-SPWM-THI. [4]	26
4.5. Diagrama de flujo del código implementado. [4]	26
4.6. Diagrama de flujo de los controladores PI. [4]	27
4.7. Señales de corrientes trifásicas antes de corregir el offset.	28
4.8. Diagrama de flujo del algoritmo de calibración de sensores de corriente.	29
4.9. Circuito DC de prueba para la obtención de la constante de motor K_t	31
4.10. Maqueta de prueba para la obtención de la constante de motor K_t	32
4.11. Circuito DC de prueba para obtener resultados de carga variable.	33
4.12. Maqueta de prueba para obtener resultados de carga variable.	34
5.1. Offset a corregir obtenido en la calibración de sensores.	35
5.2. Gráfica de señales de corriente trifásicas en el motor BLAC en la prueba 1.	36
5.3. Gráfica de señales de corriente trifásicas en el motor BLAC en la prueba 4.	37
5.4. Gráfica de señales de corriente trifásicas en el motor BLAC en la prueba 8.	37
5.5. Gráfica de tensión en función de la velocidad para la obtención de la constante K_t del motor.	39
5.6. Comparación de corriente entregada por la fuente DC en las pruebas 1, 4 y 8.	40
5.7. Torque en función de la resistencia para el sistema de carga variable.	41

Índice de tablas

1.1. Cronograma de actividades.	4
3.1. Características del motor de accionamiento.	16

3.2.	Características de motor DC de carga	17
5.1.	Datos experimentales de la prueba de circuito abierto	38
5.2.	Datos experimentales de la prueba de circuito cerrado	40

Nomenclatura

ARCOS – Lab Laboratorio de investigación en robots autónomos y sistemas cognitivos (*Autonomous Robots and COgnitive Systems Laboratory*).

BLAC Motor sin escobillas de fuerza contraelectromotriz sinusoidal.

BLDC Motor sin escobillas de fuerza contraelectromotriz trapezoidal.

DM – LM Motor de accionamiento - motor de carga (*Drive Motor - Load Motor*).

OpenCoRoCo Sistema de control por impedancia en desarrollo en el ARCOS-Lab.

PMSM Motor síncrono de imanes permanentes (*Permanent Magnet Synchronous Motor*).

EIE Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica.

IEEE Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (del inglés *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.)

Introducción

La tecnología ha tomado un lugar protagónico en la vida cotidiana, satisfaciendo necesidades básicas de las personas que poco a poco tienden a dedicarse a labores en las que las máquinas aún no están capacitadas para hacer. Es ahí donde el reto de innovar en nuevas tecnologías toma gran importancia en la simplificación de trabajos.

Cuando se piensa en una máquina realizando tareas cotidianas es necesario tomar en cuenta algunos aspectos sociales en los que las características de esta, tiene gran relevancia. La estructura física y el diseño seguro para la interacción humana, son dos de esas características importantes para los cuales se trata de dar solución mediante creación de robots humanoides capaces de asimilar las acciones o decisiones que una persona puede tomar. Es necesario por lo tanto, dar cualidades humanas a las máquinas de manera que su interacción en el medio sea lo más armónica posible.

Una solución a este reto es hacer uso de un control por impedancia de manera que un robot humanoide sea similar a una persona en cuanto a colisiones en el medio e interacción con el tacto.

Por ello en el Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (ARCOS-Lab) de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica, se esta desarrollando un robot humanoide cuya función es trabajar de manera autónoma en ambientes cotidianos o poco controlados de manera que es necesario implementar un control por impedancia que permita una interacción segura entre su plataforma móvil y el medio o el ser humano.

1.1. Alcances del proyecto

Un buen control por impedancia garantiza la seguridad del robot humanoide y del entorno que lo rodea, es por ello que este proyecto busca validar el buen funcionamiento del sistema de control por impedancia llamado OpenCoRoCo, creado para la plataforma móvil del robot humanoide que se encuentra en proceso de creación en el ARCOS-Lab.

Para cumplir con este objetivo es necesario construir un sistema de carga variable para la calibración de sensores de corriente utilizados en la plataforma OpenCoRoCo que se encarga del control de motores PMSM.

Primeramente, se estudia la documentación y se pone en marcha OpenCoRoCo. Luego, mediante el frenado del eje del motor PMSM, se diseña el sistema de carga variable a implementar, se investiga

posibles formas de hacerlo y se ejecuta la más óptima según las condiciones dadas. Esto con el fin de que la calibración de sensores de corriente sea validada mediante pruebas con distintos valores de carga mecánica.

1.2. Justificación

La expansión de la tecnología ha traído innumerables facilidades que posibilitan una mejor calidad de vida que va en aumento gracias a la innovación.

Entre las nuevas tecnologías de innovación se encuentran los robots humanoides. Estos son creados para distintos fines, sin embargo gracias a su naturaleza física observable externamente, son usados para labores sociales, permitiendo una interacción humana más armónica .

Es por estas características que tienden a ser comunes en espacios poco controlados como hogares o espacios sociales donde la interacción humano-robot es mucho mayor.

Considerando el impacto social que tienen los robots humanoides es necesario un buen diseño de sus funciones y considerar ampliamente los escenarios posibles a los que este se pueda someter, para de esta manera evitar accidentes o eventualidades.

Es por ello que para el robot humanoide que se está construyendo en el ARCOS-Lab es necesario diseñar un sistema que permita que el robot tenga una capacidad de interacción adecuada con el medio y esto es posible lograrlo de distintas maneras, ya sea por medio de control por impedancia, sensores de proximidad, sensores de campo magnético o identificación por imagen, sin embargo el control por impedancia es el que ha demostrado adaptarse a más situaciones y brindar una respuesta más rápida a colisiones [11].

El control por impedancia es un sistema de control cuyo fin consiste en obtener el efecto que producen las fuerzas externas aplicadas a un robot y que este reaccione de manera segura a dicha fuerza [1].

La investigación hecha hasta el momento para el robot humanoide que se construye en el ARCOS-Lab ha fijado un camino de acciones generales a ejecutar, pero ahora hay que enfocarse en detalles más específicos como lo son la validación del sistema de control OpenCoRoCo. Con este fin se resalta la importancia en la calibración de las variables eléctricas que controlan la movilidad del robot humanoide.

Las variables eléctricas de control deben ser medidas con exactitud para que de esta manera la plataforma del robot reaccione rápido y adecuadamente a las condiciones del entorno en el que se encuentra, por consiguiente es necesario construir un sistema de carga variable para el motor PMSM que simule las condiciones del medio en el que el robot se encontrará y que posibilite la calibración de los sensores encargados del sensado de esas variables eléctricas.

1.3. Problema a resolver

En el mundo existen muchos tipos de robots que utilizan el control por impedancia para realizar las labores para la cual fueron creados, sin embargo estos robots representan un altísimo costo económico, debido a que por ser una tecnología nueva, hay un mayor enfoque en el buen funcionamiento y no tanto en el aspecto económico, por lo que en el ARCOS-Lab se pretende crear un robot humanoide de pro-

pósitos generales que implemente un control por impedancia económico, para que sea más fácilmente adquirido.

Para cumplir con las expectativas mencionadas, el robot utiliza motores PMSM del tipo BLAC que son motores que implican un menor grado de mantenimiento en comparación con motores DC. Además de que el controlador por impedancia utiliza componentes programables con software libre (C para el algoritmo de control y Python para la ejecución de pruebas) lo que permite una reducción de costos.

Además, se quiere que el control por impedancia sea utilizado no solo en la movilidad de la plataforma de soporte sino que también se utilice en el torso y los brazos lo que abarata costos y posibilita una estandarización conveniente.

Asimismo, el sistema de control por impedancia se debe probar con anterioridad, pues aunque se desee un robot de bajo costo, se quiere que el sistema sea robusto. Para ello, el sistema se debe someter a condiciones de carga similares a los que estará expuesto.

Cuando se somete un sistema de control a condiciones de carga, la medición de la variable de control es de suma importancia porque de esta depende el correcto accionamiento del robot.

El control por impedancia que se está diseñando en el ARCOS-Lab presenta errores en la medición de la variable de control que hace necesario un ajuste de los sensores encargados de dicha tarea.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Construir un sistema de carga mecánica variable para ajustar los sensores de corriente usados en el sistema de control OpenCoRoCo de motores PMSM exponiéndolo a diferentes condiciones de carga.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Estudiar la documentación actual del hardware y software de OpenCoRoCo.
2. Poner en marcha el sistema actual de OpenCoRoCo para el control de motores.
3. Investigar en la literatura si existe documentación relacionada con la creación virtual de cargas que puedan emular motores reales.
4. Hacer una o dos propuestas de diseño para la implementación de una carga variable para motores PMSM basado en los materiales disponibles indicando las ventajas y limitaciones de cada una.
5. Implementar una propuesta de diseño de carga variable.
6. Probar el funcionamiento de la carga variable en conjunto con el sistema de control de motores PMSM.
7. Calibrar por software los sensores de OpenCoRoCo en diferentes condiciones de carga si fuera necesario.

1.5. Metodología

Para la elaboración de este proyecto se estipulan una serie de pasos a seguir con el propósito de cumplir con los objetivos propuestos los cuales pretende ajustar parámetros del controlador por impedancia del robot humanoide.

Para satisfacer la finalidad de este proyecto es necesario primeramente estudiar la documentación de hardware y software existente para OpenCoRoCo, de esta manera se puede entender sus características y modificarlas en caso de ser necesario.

Luego para poner a prueba el sistema de control es necesario hacer la instalación de las dependencias respectivas desde un sistema operativo Linux que es el encargado de enviar las instrucciones al controlador.

Es importante mencionar que la variable que se desea controlar es la velocidad y la variable de control es la corriente, por lo que el proyecto requiere implementar un sistema de carga variable al eje del motor de accionamiento de manera que el par tienda a variar, manteniendo la velocidad constante y utilizando una resistencia de prueba variable en las terminales del generador que por consiguiente, ocasionaría un aumento de corriente. Este aumento de corriente podría facilitar la calibración de medidores de corriente presentes en OpenCoRoCo permitiendo solucionar errores de offset al graficar las corrientes trifásicas de entrada al motor.

Para el sistema de carga variable se debe investigar sobre posibles formas de hacerlo, para luego ejecutar una de ellas tomando en cuenta las condiciones más favorables para hacerlo.

Además se investigará sobre la existencia de cargas virtuales que puedan emular motores reales con el fin de tener un panorama más amplio de los estudios similares que se han realizado.

En la tabla 1.1 se muestra de manera más detallada el orden para el cumplimiento de los objetivos.

Tabla 1.1: Cronograma de actividades.

Semana	Actividades a realizar
1	Visita al laboratorio. Plantear los objetivos del proyecto. Investigar sobre como hacer una carga variable.
2	Visita al laboratorio. Estudio de la documentación de hardware y software de OpenCoRoCo. Instalación de dependencias respectivas para la puesta en marcha de OpenCoRoCo. Escogencia de un sistema de carga para el motor.
3	Visita al laboratorio. Avance preliminar. Diseño de la placa base para el sistema de frenado del eje del motor.
4	Anteproyecto 1 Visita al laboratorio. Desarrollo del capítulo 1 del proyecto. Revisión de bibliografía.

	Visita al laboratorio.
5	Investigación sobre emuladores de carga virtual. Creación de la placa base para el sistema de frenado del eje del motor.
	Visita al laboratorio.
6	Revisión de bibliografía. Realizar pruebas experimentales para determinar la potencia del motor de carga. Poner a prueba el sistema de carga variable.
	Visita al laboratorio.
7	Revisión de objetivos, alcances, metodología y cronograma. Investigación sobre resistencias de potencia para el motor de carga del sistema
	Visita al laboratorio.
8	Avance 1 (Capítulo 2) Escogencia de la resistencia de carga adecuada.
	Visita al laboratorio.
9	Resolución de eventualidades ocurridas en las pruebas del sistema de carga variable. Estudio de la documentación de software de OpenCoRoCo.
	Visita al laboratorio.
10	Poner a prueba el sistema de carga con la resistencia de carga. Estudio de la documentación de software de OpenCoRoCo.
	Visita al laboratorio.
11	Iniciar con la calibración de sensores de corriente. Segunda presentación preliminar
	Visita al laboratorio.
12	Estudio de la documentación de software de OpenCoRoCo. Calibración de sensores de corriente. Avance 2. Revisión del capítulo 1 y capítulo 2
13	Investigación y formulación del estado del arte.
14	Redacción de capítulos necesarios para la documentación del trabajo realizado. Analizar y redactar las conclusiones y recomendaciones obtenidas.
15	Terminar el borrador final. Tercera presentación preliminar.
16	Carta solicitud de presentación Realizar el material para presentar el proyecto eléctrico.
17	Presentar ante profesores el proyecto eléctrico. Realizar correcciones necesarias al borrador final.
18	Entregar el informe final corregido.

Marco Teórico

En el ARCOS-Lab de la Universidad de Costa Rica se está desarrollando un robot humanoide que será capaz de interactuar con las personas y el medio de manera segura. Para ello, se le implementará un control por impedancia que permitirá esa interacción.

Para desarrollar ese control por impedancia es necesario desmenuzar el proyecto en partes de manera que al hacer pequeños avances específicos se vaya completando un buen controlador.

Actualmente se cuenta con un sistema de control que posibilita la puesta en marcha del motor PMSM a través de una terminal Linux que envía instrucciones al controlador OpenCoRoCo. Este controlador tiene sensores que permiten hacer medición de la corriente como variable de control, sin embargo, hay un margen de error entre la variable medida y la corriente real, por tanto, se debe desarrollar un sistema de carga mecánica variable para hacer las corrientes medidas mayores en magnitud y calibrar por software los sensores más fácilmente o como método de prueba del algoritmo implementado.

Basado en las necesidades expuestas anteriormente, en esta sección se presentarán algunos conceptos importantes para comprender de manera más clara el proyecto, se hará una investigación acerca de trabajos relacionados con sistemas de carga variable y posteriormente se presentará teoría necesaria para la implementación y comprobación del funcionamiento del sistema.

2.1. Marco teórico conceptual

2.1.1. Control por impedancia

En un robot se requiere controlar los movimientos de manera que este se pueda movilizar por el espacio donde se encuentra, para ello este debe ser capaz de rastrear la trayectoria mediante control de posición pero también debe ser capaz de interactuar con el entorno y para ello es el control por impedancia.

Un control por impedancia se encarga de interactuar con el entorno de un robot midiendo las fuerzas de contacto existentes para regular y proteger el efector final y el entorno contra daños [9].

El control por impedancia surgió por la necesidad de darle cualidades humanas a los robots. El sistema neuromuscular humano tiene la capacidad de percibir la impedancia mecánica como información procedente del entorno que lo rodea, y basado en esta información puede actuar consiente o instintivamente para evitar daños ya sea propios o del entorno. Prestando atención a esta característica, los

controladores de robots que colaboran con humanos generalmente se diseñan centrándose en el diseño de impedancia [10]

2.1.2. Motores sincrónicos de imanes permanentes (PMSM)

El motor síncrono de imán permanente (PMSM) es un motor cuya excitación de campo proviene de imanes permanentes. Es un cruce entre un motor de inducción y un motor CC sin escobillas, tiene un rotor de imán permanente y bobinas en el estator. La estructura del estator con bobinas construidas para producir una densidad de flujo senoidal en el vacío de aire de la máquina, se parece a la de un motor de inducción. Su densidad de potencia es mayor que la de los motores de inducción en los mismos rangos, ya que no cuenta con potencia del estator dedicada a la producción de campos magnéticos [3].

Con los imanes permanentes, el PMSM puede generar par motor a velocidad cero y requiere un inversor controlado digitalmente para su funcionamiento. Los PMSM se utilizan generalmente para controladores de motor de alto rendimiento y alta eficiencia. El control de motores de alto rendimiento se caracteriza por una rotación uniforme en todo el rango de velocidad del motor, control total de par motor a velocidad cero y aceleración y desaceleración rápidas [3].

Para lograr tal control, los PMSM utilizan técnicas de control vectorial. Las técnicas de control vectorial también se conocen con frecuencia como control de campo orientado (FOC). La idea básica del algoritmo de control vectorial es descomponer la corriente del estator en una parte generadora de campo magnético y una parte generadora de par motor. Ambos componentes se pueden controlar de forma separada tras la descomposición. [3]

Los motores PMSM se subdividen en dos, los BLAC y los BLDC cuya diferencia radica en la forma de onda de la fuerza contraelectromotriz. Para los BLAC la fuerza contraelectromotriz tiene una forma de onda sinusoidal mientras que para los BLDC su forma de onda es trapezoidal [5].

2.1.3. Emulador de carga mecánica

Un emulador de carga mecánica es un dispositivo que se utiliza para emular una carga mecánica giratoria para motores eléctricos. Generalmente consiste en un generador de corriente continua que está conectado a una carga electrónica programable. Un emulador puede simular diferentes tipos de cargas como cargas de par constante, cargas de tracción, cargas de bombeo. Un emulador de carga mecánica se puede utilizar para pruebas de motores o con fines educativos [12].

2.1.4. Inversor trifásico

Un inversor es un sistemas que posibilita la conversión de las señales DC en señales AC, también es llamado convertidor DC-AC. Un inversor trifásico es por lo tanto un sistema capaz de generar tres señales monofásicas desfasadas 120 grados a partir de una señal DC [6].

Un inversor trifásico puede ser construido mediante el control de transistores. Cada par de transistores en serie es controlado mediante una señal PWM que permite el paso y no paso de corrientes por el transistor en el momento adecuado, de esta manera a la salida del convertidor lo que se genera es una señal que pasa conmutando entre el valor VDC y -VDC a una frecuencia adecuada para luego pasar un filtro que la convierte en una señal sinusoidal.

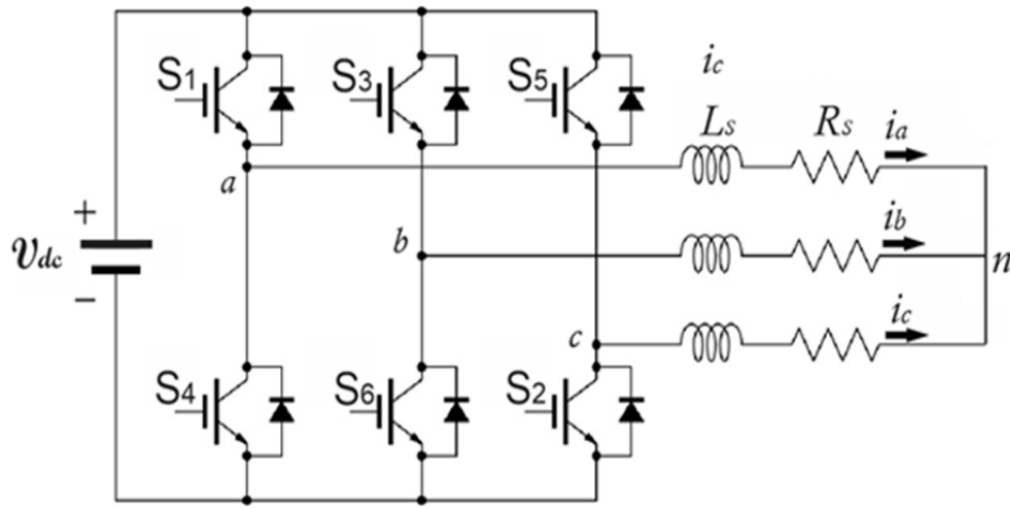


Figura 2.1: Inversor trifásico a partir de 6 transistores IGBT [8]

En la figura 2.1, se muestra un circuito de un inversor trifásico.

2.2. Marco teórico referencial

Este proyecto consiste en la creación de un sistema de carga mecánica variable para ajustar los sensores corriente usados en el algoritmo de control del motor PMSM que se usará como actuador en el control por impedancia. Además se quiere que el diseño del sistema de carga sea variable para analizar si se requiere una calibración de los sensores de corriente bajo diferentes condiciones de carga.

Considerando la necesidad de diseñar un emulador de carga mecánica se investigan algunas opciones para hacerlo. Es importante mencionar que el funcionamiento de los accionamientos eléctricos en las aplicaciones no siempre se puede probar en el sistema real. Para probar este componente crítico sin la necesidad de un prototipo, surge la denominada emulación de cargas mecánicas [14].

En [13] los autores realizaron un sistema de carga variable considerando un motor de inducción como motor de accionamiento y un motor BLDC como motor emulador de carga. En este artículo hay un sistema de control del lado del motor BLDC (lado de carga) pues se quiere controlar el par mecánico de manera que se pueda emular una carga real y así probar el correcto funcionamiento del motor de accionamiento.

De manera similar que en [13], en [14] se realiza un sistema de carga variable controlando el par del motor de carga mediante dos métodos. En el primero se utiliza un sistema de realimentación, que calcula la dinámica inversa del equipo de prueba compensando la dinámica no modelada y las variaciones de parámetros del mecanismo DM-LM, con el uso del controlador PI de retroalimentación. El segundo método esta basado en un estimador PI que utiliza el enfoque de control no lineal, lo que lo hace más robusto frente a los impactos de las variaciones de los parámetros y la dinámica no modelada [14].

Otra manera de realizar un sistema de carga se menciona en [7]. Este artículo formula un sistema de carga variable, pero sin ninguna parte mecánica complementaria al motor eléctrico del accionamiento estudiado y sin cambiar realmente ningún parámetro eléctrico o mecánico del mismo [7].

El sistema consiste en un control de perturbaciones donde se usa un procesador de señales digitales (DSP) que emula sus variaciones tal y como se muestra el diagrama de bloques de la figura 2.2. $G_c(s)$ es la función de transferencia del controlador, $w_n^v(s)$ es una señal que emula el ruido de medición, $w^v(s)$ es una señal que emula otras variaciones, w_{ref} es la velocidad de referencia, w es la velocidad actual del motor, U_e es el error en la velocidad, U_c es la tensión de salida del controlador, U_p es la entrada de tensión del controlador, T_L es el torque de carga, U_n es el ruido del actuador y w_n es el ruido de medición.

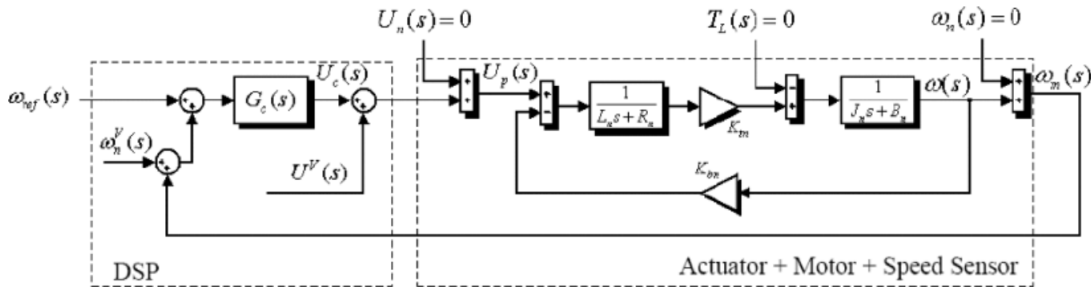


Figura 2.2: Unidad BLDC con control de velocidad con perturbaciones virtuales y variaciones de parámetros [7]

En el caso del sistema que se quiere diseñar en el ARCOS-Lab los elementos empleados son un motor de accionamiento BLAC que se controla por el sistema llamado OpenCoRoCo. En este caso se usará un sistema de acople de motores mediante dos poleas y una faja en los ejes de los motores, sin embargo en cuanto a sistema de control para este proyecto se refiere a OpenCoRoCo, que está del lado de la máquina de accionamiento, y no se creará un controlador de par del lado del motor de carga debido a que sugiere un mayor costo y no representa un mayor beneficio al objetivo final que es la calibración de sensores de OpenCoRoCo.

En [13], en [14] y [7] se realiza un sistema de control del lado del motor de carga que posibilita una mayor precisión en la carga mecánica que se le aplica al motor de accionamiento, sin embargo para este proyecto se quiere mantener un sistema, sencillo, práctico y funcional de bajo costo. Además las pruebas se piensan hacer cuando la máquina de accionamiento se encuentra trabajando en estado estacionario, por lo que la dinámica no lineal es de menor importancia.

En [12] se presenta un diseño similar al que se tiene pensado. En este artículo se crea un sistema de carga variable sin control de torque en la carga, tal y como se quiere realizar en este proyecto. El sistema consiste en un motor de accionamiento unido mecánicamente con un motor de corriente continua de carga. Del lado del motor de carga se le agrega un capacitor, un interruptor y una resistencia de carga. La variabilidad de la carga esta relacionada con el ciclo de trabajo del interruptor de manera que si el ciclo de trabajo es el 100 % el motor de carga en funcionamiento como generador va a sentir una carga máxima igual a la resistencia de carga, sin embargo si el ciclo de trabajo es menor, el motor generador

va a sentir una carga proporcional al ciclo de trabajo.

En la figura 2.3 se puede observar de manera más clara el diseño planeado en [12].

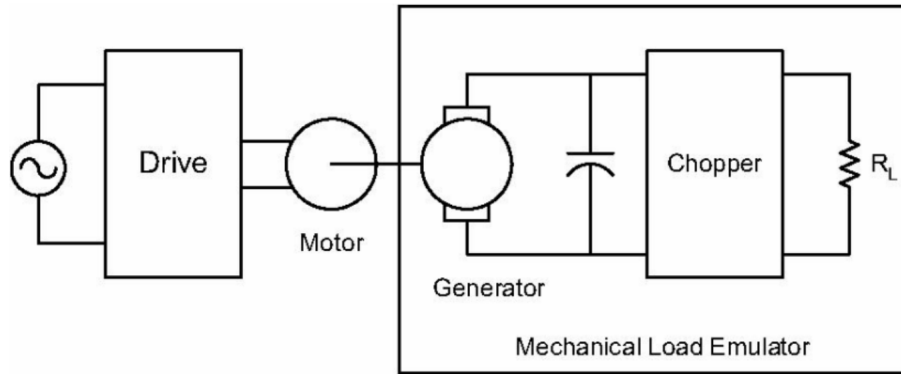


Figura 2.3: Emulador de carga mecánica variable sin controlador de torque [12].

Considerando los diseños observados en las referencias anteriores y los recursos existentes, se pretende diseñar un sistema de carga variable como se muestra en la figura 2.4.

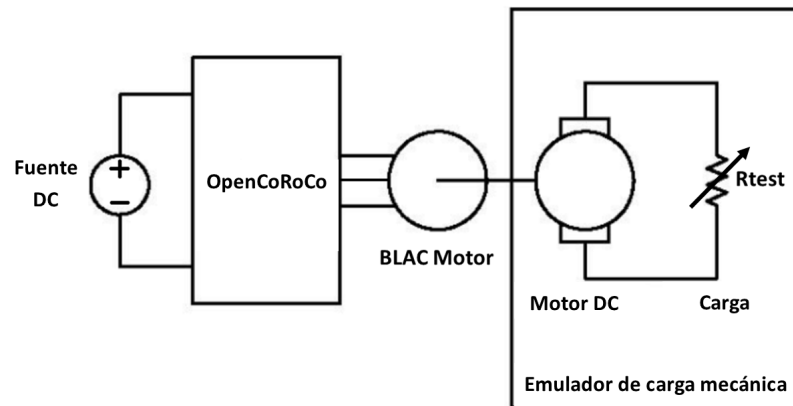


Figura 2.4: Diagrama de bloques general del emulador de carga mecánica variable.

Los detalles del diseño se presentará en el siguiente capítulo.

2.3. Máquinas electromecánicas

Los elementos electromecánicos usados en este sistema son:

2.3.1. Motor de accionamiento

Del lado del motor de accionamiento se utilizará un motor PMSM, BLAC que es el que será utilizado para la movilidad de la plataforma móvil del robot humanoide, por lo que a este se le conectará la carga variable.

Como se especifica en el marco conceptual un motor BLAC es un motor que se alimenta con una tensión trifásica sinusoidal cuyo promedio DC de las señales es 0V, sin embargo si su sistema de control se alimenta con una señal DC la corriente demandada será mayor que cero debida a que las señales trifásicas sinusoidales de alimentación, se generan a partir de un inversor trifásico.

2.3.2. Motor de carga

Considerando que el motor de carga que se utilizará en el sistema DM-LM es un motor DC de imanes permanentes, es necesario analizar un modelo que de base al prototipo experimental.

Modelado del motor DC

Un motor DC de imanes permanentes es un tipo de motor de excitación independiente cuya excitación de campo se origina de imanes permanentes que están colocados en el estator. Un circuito DC que representa al motor DC se observa en la figura 2.5.

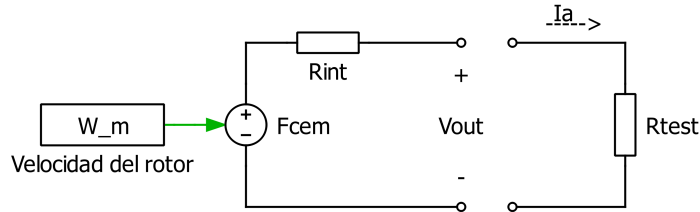


Figura 2.5: Circuito DC modelo para el motor DC.

Basado en el circuito de la figura 2.5, y considerando que es necesario relacionar las variables del motor, de [12] se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$V_{out} = F_{cem} - R_{int}I_a = \omega_m K_t - R_{int}I_a \approx K_t \omega_m, \quad (2.1)$$

$$\tau_m = K_t I_a \quad (2.2)$$

Donde V_{out} [V] representa las terminales del motor, F_{cem} [V] es la fuerza contra electromotriz o tensión interna del motor, R_{int} [Ω] es la resistencia interna de devanado del rotor, I_a [A] es la corriente que circula a través de las terminales al conectar una carga R_{test} [Ω], ω_m [rad/s] es la velocidad de giro del motor, K_t [Nm/A] es la constante de torque y τ_m [Nm] es el par en el motor.

De la ecuación 2.1 se obtiene una relación entre la tensión de salida en las terminales del motor y su proporcionalidad con la velocidad del rotor y en la ecuación 2.2 se establece la relación entre el par del motor y su proporcionalidad con la corriente del motor.

Diseño e implementación del prototipo mecánico

Para el diseño e implementación de la estructura mecánica del sistema de carga variable se consideraron distintas opiniones y opciones, sin embargo, dadas las condiciones y materiales presentes en el laboratorio, una de ellas se consideró más factible.

3.1. Selección del modelo mecánico a implementar

En la sección 2.2 se mencionan diversas formas de implementar un sistema de carga variable, sin embargo considerando un tiempo corto para la elaboración del proyecto y recursos limitados se optó por realizar un sistema sencillo que pudiera satisfacer las necesidades para las cuales fue pensado.

La idea general para el sistema de carga mecánica variable consiste en acoplar al eje del motor PMSM otro motor funcionando como generador de manera que cuando este último genere una tensión y una corriente se haga pasar por una resistencia de carga en serie y que consecuentemente, se genere un par mecánico inversamente proporcional a la resistencia de carga.

En [12] se observa un sistema de carga variable en el cual la variación de la carga es posible gracias a un interruptor que al variar su ciclo de trabajo, varía la resistencia vista por el motor de carga.

Considerando la idea general del sistema de carga variable y el sistema que se menciona en [12] se optó por implementar un diseño similar, pero omitiendo el interruptor, de manera que en este caso la diferencia en la carga mecánica se logre usando un resistor variable.

En la figura 3.1 se muestra el modelo del sistema de carga mecánica variable a implementar.

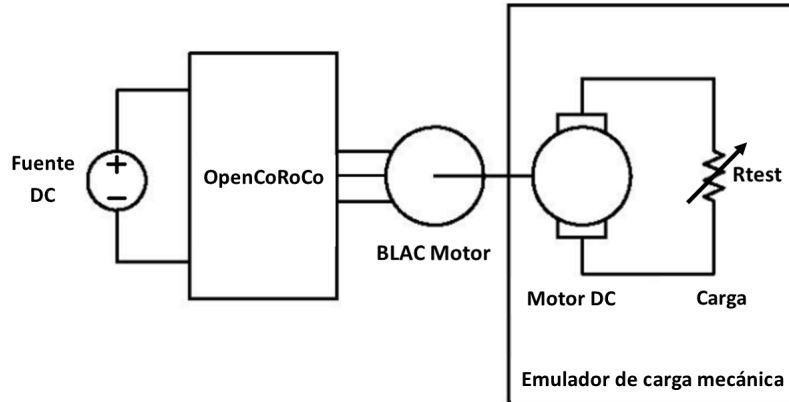


Figura 3.1: Modelo mecánico para la implementación de un sistema de carga variable.

3.2. Características de los motores

Para la implementación del modelo elegido, es necesario utilizar un motor de accionamiento que es al que se le va aplicar la carga y un motor de carga que funcionará como generador.

3.2.1. Motor de accionamiento

El motor de accionamiento es el que será usado en la plataforma móvil del robot humanoide y será controlado por el sistema de control OpenCoRoCo. El motor se muestra en la figura 3.2 y sus características se muestran en la tabla 3.1.

Servomotor Baldor, PMSM, BLAC	
SPEC	S1P04W11
Par de calado del convertidor	0.96 NM
Corriente de calado del convertidor	2.60 A RMS
Velocidad	6000 RPM
Tensión	200 V
Pico de corriente	10.4 A RMS

Tabla 3.1: Características del motor de accionamiento.

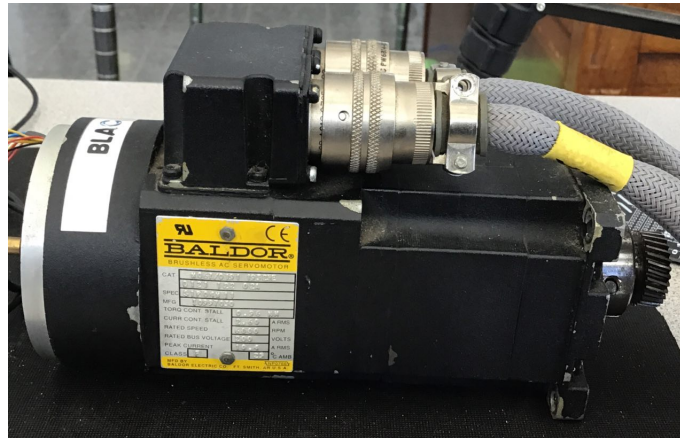


Figura 3.2: Motor de accionamiento del sistema.

3.2.2. Motor de carga

Para la selección del motor de carga principalmente se consideran dos aspectos, el primero que este se encontrara en el laboratorio o no tuviera que ser comprado por las limitaciones económicas y de tiempo.

El segundo aspecto que preferiblemente el motor fuera DC lo cual facilitaría la conexión de cargas.

Tomando en cuenta las condiciones anteriores se seleccionó el motor DC que se muestra en la figura 3.3 cuyas características se muestran en la tabla 3.2.

Motor GS Electric	
Modelo	LP101230
Escobillas	si
Excitación de campo	Imanes permanentes
Tensión	90 VDC
Velocidad	6000 RPM
Rotación	Sentido horario

Tabla 3.2: Características de motor DC de carga



Figura 3.3: Motor DC para emular carga mecánica

3.3. Acople de motores

Para emular una carga mecánica en el eje del motor PMSM es necesario de algún modo acoplar mecánicamente el eje del motor PMSM con el eje del motor DC de carga, es por ello que se consideran dos formas de hacerlo, una mediante una sola pieza mecánica que fija los dos ejes y el otro mediante el uso de dos poleas y una faja.

3.3.1. Acople en una sola pieza

En este el acople de los ejes de los motores se hace mediante una sola pieza mecánica como se observa en la figura 3.4. Este tipo de acople se descartó debido a que resulta complejo fijar los motores de manera que sus ejes queden correctamente alineados.

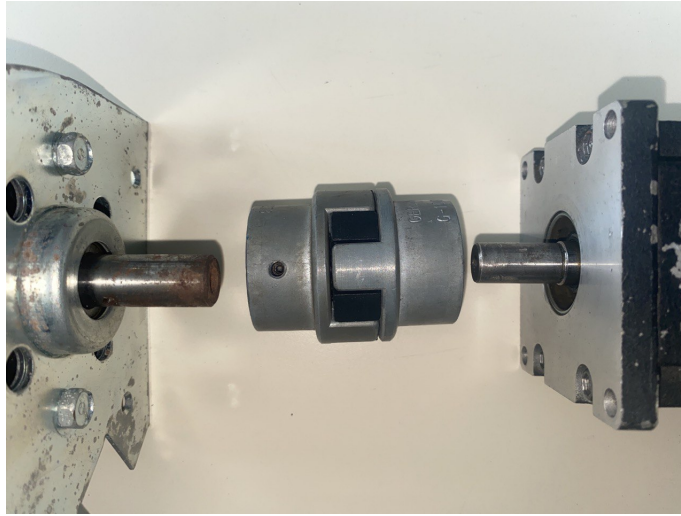


Figura 3.4: Forma de acople para motores con ejes alineados

3.3.2. Acople mediante poleas

Este acople consiste en dos poleas enlazadas mediante una correa no dentada como se observa en la figura 3.5. Este es el método escogido por su facilidad de implementación.



Figura 3.5: Acople mediante poleas y correa

Los elementos utilizados en este acople son dos poleas y una faja. Las poleas son de aluminio y tienen un hueco concéntrico a si misma del tamaño del diámetro del eje de cada uno de los motores, de manera que estos se ajusten con precisión a la polea, evitando fricción cinemática. Adicionalmente

cada una de las poleas posee dos tornillos prisioneros que permiten una mayor fijación de cada polea con el motor respectivo.

Es importante recalcar que las poleas son 1:1 es decir poseen el mismo radio, lo que posibilita que la velocidad de giro del eje del primer motor y el segundo se conserven.

En cuanto a la faja o banda se trata de una industrial no dentada estándar con sección transversal en forma de A y longitud 19 pulgadas (Banda lisa en V, A19).

3.4. Diseño y creación de la base para los motores

La construcción de la base para los motores consta de dos fases. La primera en la que se piensa el diseño de la base, en la cuál se realizan varios diseños en borrador para consultar y seleccionar cual es la mejor opción. En esta también se realiza el diseño mediante software. La segunda fase consiste en la estructuración física de la base.

3.4.1. Diseño de la base

Para el diseño de base de los motores se consideraron varios diseños iniciales, de los cuales fue seleccionado uno de ellos y es el que se realizó mediante software.

La herramienta utilizada para el diseño de la base fue FreeCAD que es un modelador 3D paramétrico de software libre.

En la figura 3.6 se muestra el diseño de la base en el software FreeCAD.

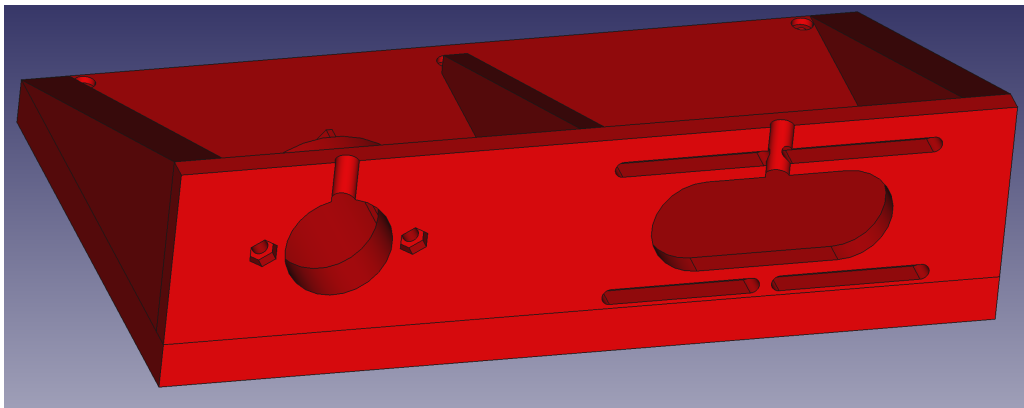


Figura 3.6: Diseño de la base para los motores en FreeCAD.

3.4.2. Impresión de la base

En cuanto a la estructuración física de la base para los motores se consideraron diversos materiales sin embargo por facilidad y presupuesto se decidió realizar el prototipo de la base mediante impresión 3D.

Para la impresión se utiliza filamento Monoprice PLA Premium rojo obtenido mediante DGtalic que es un proveedor costarricense que da soluciones de fabricación Aditiva e Impresión 3D.

La impresión del prototipo se realiza en el laboratorio de automática de la escuela de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Costa Rica.

En la figura 3.7 se muestra la impresión finalizada del diseño creado en FreeCAD y su correcto ajuste con los motores a utilizar.

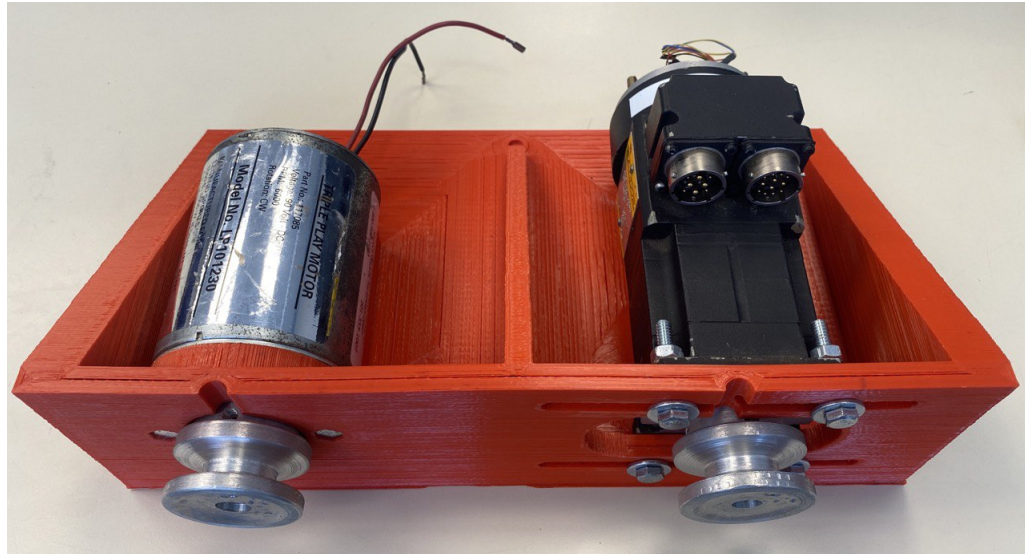


Figura 3.7: Impresión 3D finalizada con motores.

Puesta de carga variable al sistema y calibración de sensores

En este capítulo se expone primeramente el problema visible por medio de la graficación de las corrientes trifásicas de alimentación del motor de accionamiento, se presenta la solución al problema mediante la calibración por software de los sensores de corriente y por último, se plantean las pruebas que permiten la verificación de la funcionalidad del código creado.

4.1. Características y resultados del sistema base

En esta sección se muestra el sistema que se toma como punto de partida para este proyecto.¹

En la figura 4.1 se muestra un diagrama de bloques que representa el sistema inicial que se conforma por una fuente de alimentación de corriente directa a 48 V que alimenta un inversor trifásico que se encuentra en el sistema de control OpenCoRoCo, este convierte la señal DC de la fuente de alimentación a tres señales AC desfasadas 120 grados como se explica en la sección 2.1.

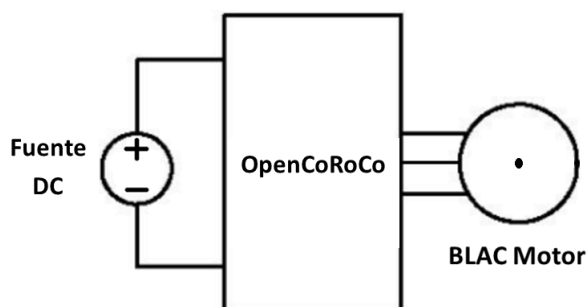


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema base

¹Se toma como referencia base el trabajo realizado en [4] debido a que este proyecto constituye a una continuación del que se presenta en [4].

OpenCoRoCo se conforma por hardware y software. El hardware esta constituido por un inversor trifásico que es la etapa de potencia encargada de la alimentación del motor BLAC, una segunda tarjeta que depende del motor para la lectura del resolver el cual permite obtener la posición del rotor, y el microcontrolador STM32F4-Discovery, que se encarga de controlar el inversor ejecutando el algoritmo de control y que además se encarga de la obtención de señales que envía por un puerto serial hacia una terminal linux.

El software se conforma por un algoritmo estructurado en lenguaje de programación C, que se ejecuta dentro del microcontrolador cuando se envían instrucciones desde una terminal linux. En la versión actual de OpenCoRoco la instrucción que se envía es una referencia de velocidad en lenguaje Python, a la cual debe girar el motor.²

4.1.1. Sensores de corriente

OpenCoRoCo tiene sensores de corriente que permiten hacer medición de esta variable física en la etapa de potencia para posteriormente ser utilizada en el control del motor.

Los sensores utilizados para la medición de las corrientes son los sensores magneto resistivos ACS70331EESATR-2P5B3 de Allegro Microsystems que poseen una sensibilidad de 0.4 V/A y que tienen un rango de medición de -2.5 A a 2.5 A. En la figura 4.2 se muestra un diagrama del circuito integrado del sensor de corriente en el cual la salida V_{IOUT} responde proporcionalmente a la corriente que pasa por las terminales I_P .

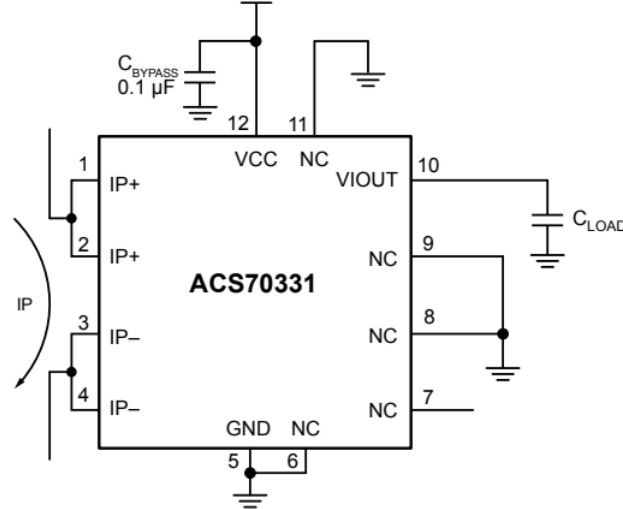


Figura 4.2: Sensor de corriente empleado para la medición de corriente en OpenCoRoCo. [2]

En la figura 4.3 se muestran gráficas de proporcionalidad entre la tensión de salida V_{IOUT} y la corriente medida I_P . Para el sensor utilizado la curva que se debe observar es la de color naranja.

²En [4] se hace una descripción más detallada del software de OpenCoRoCo utilizado como base y en este proyecto se mostraran las modificaciones adicionales a ese algoritmo.

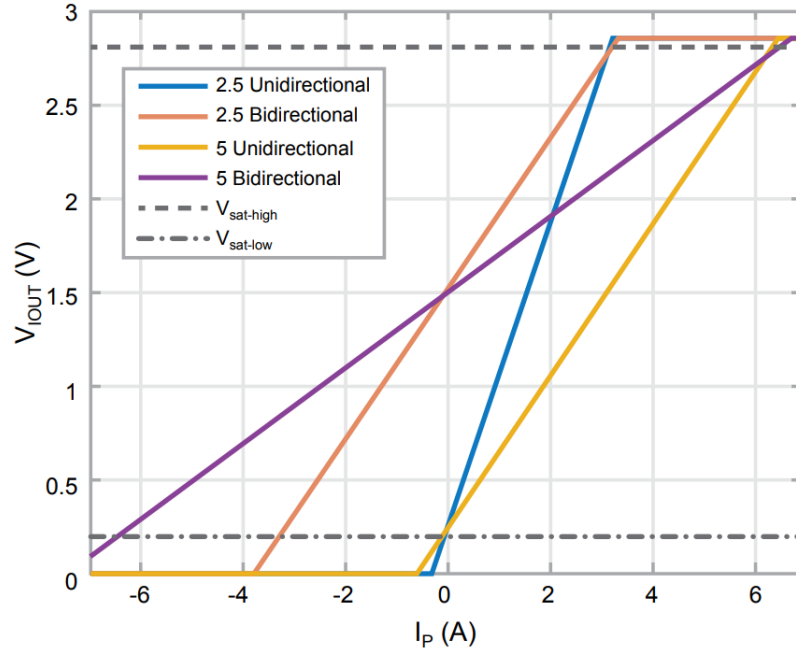


Figura 4.3: Curva de proporcionalidad ideal para los sensores de corriente ACS70331. [2]

Luego de hacer la medición de la corriente, la ecuación 4.1 permite obtener el valor físico de la variable medida, donde $V_{IOUT(Q)}$ es el voltaje de salida de corriente cero ($V_{IOUT(Q)} = 1,5V$ dado por el fabricante) y $Sens$ es la sensibilidad del sensor ($Sens = 0,4 V/A$)

$$I_P = \frac{V_{IOUT} - V_{IOUT(Q)}}{Sens} \quad (4.1)$$

4.1.2. Sistema de control

Antes de hacer una rutina para la calibración de los sensores de corriente, es necesario entender de manera general el sistema de control FOC con SPWM e inyección de tercer armónico (FOC-SPWM-THI) diseñado en [4]. En la figura 4.4 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control, en la figura 4.5 se muestra el diagrama de flujo de como es implementado ese sistema en OpenCoRoCo y en la figura 4.6 se muestra el diagrama de flujo de cada uno de los controladores proporcional integral (PI) en el algoritmo.

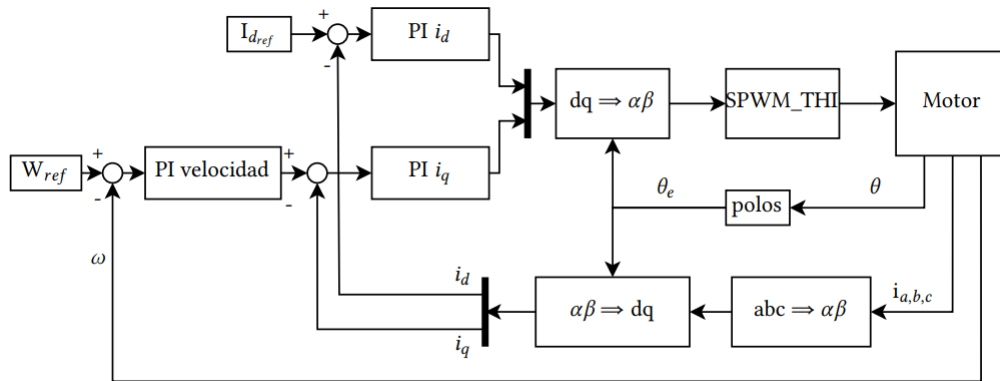


Figura 4.4: Diagrama de bloques del sistema de control FOC-SPWM-THI. [4]

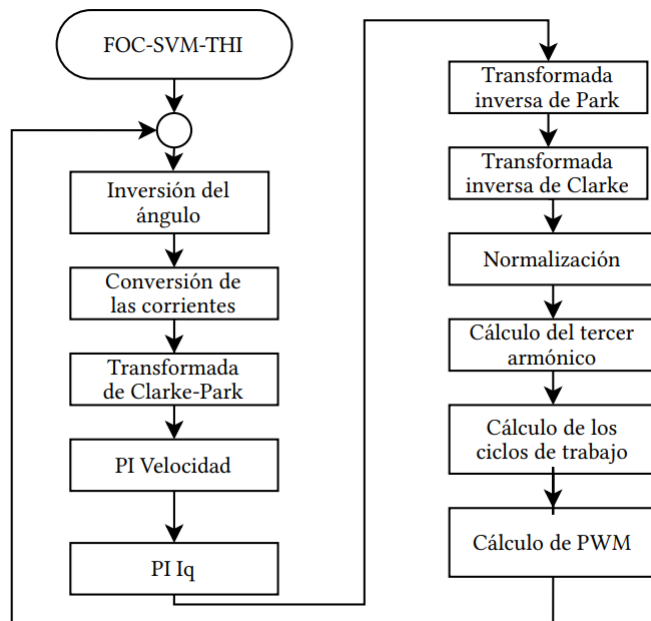


Figura 4.5: Diagrama de flujo del código implementado. [4]

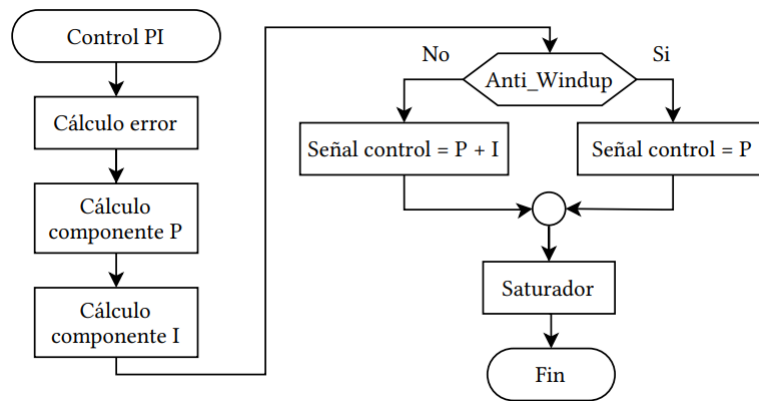


Figura 4.6: Diagrama de flujo de los controladores PI. [4]

4.1.3. Resultados obtenidos con el sistema base

Siguiendo las recomendaciones planteadas en [4], este proyecto pretende calibrar los sensores de corriente para lo cual es necesario mostrar las condiciones iniciales o resultados obtenidos de las mediciones de los sensores previo a la calibración.

En la figura 4.7 se muestra las señales de corrientes trifásicas medidas por los sensores cuando el motor se encuentra trabajando únicamente con la carga constante que genera las poleas, la faja y la inercia del los rotores, de donde se puede observar que las corrientes máximas y mínimas para cada una de las señales no son iguales en amplitud lo cual genera un control no adecuado del motor BLAC. También se puede observar que la corriente total entregada por la fuente da un numero negativo lo cual no tiene sentido pues la maquina BLAC trabaja como motor y no como generador.

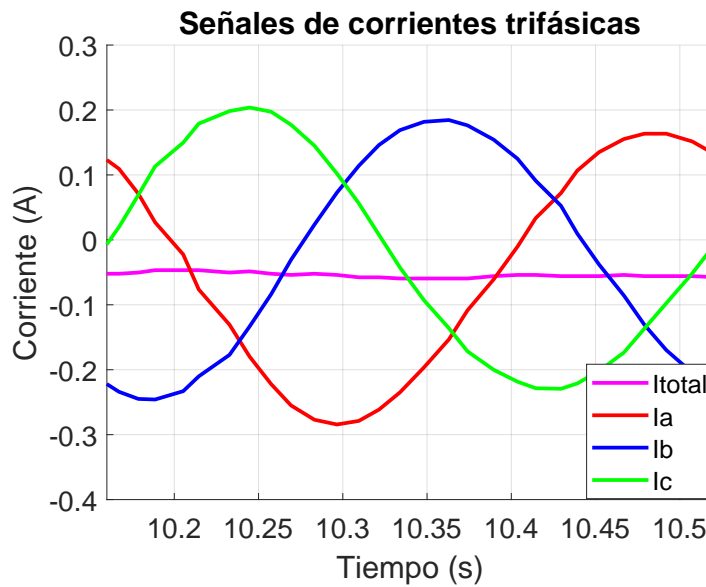


Figura 4.7: Señales de corrientes trifásicas antes de corregir el offset.

4.2. Calibración de sensores

Para la calibración de sensores de corriente se crea un algoritmo que toma una de las primeras mediciones de cada uno de los sensores de corriente mientras el motor se encuentra apagado, de esta manera el sensor debería medir 0 Amperes pero como es distinto de dicho valor se guarda en una variable para posteriormente restar ese valor DC a todas las mediciones que hace cada sensor.

En la figura 4.8 se muestra un diagrama de flujo que presenta de manera gráfica el algoritmo implementado para la calibración.

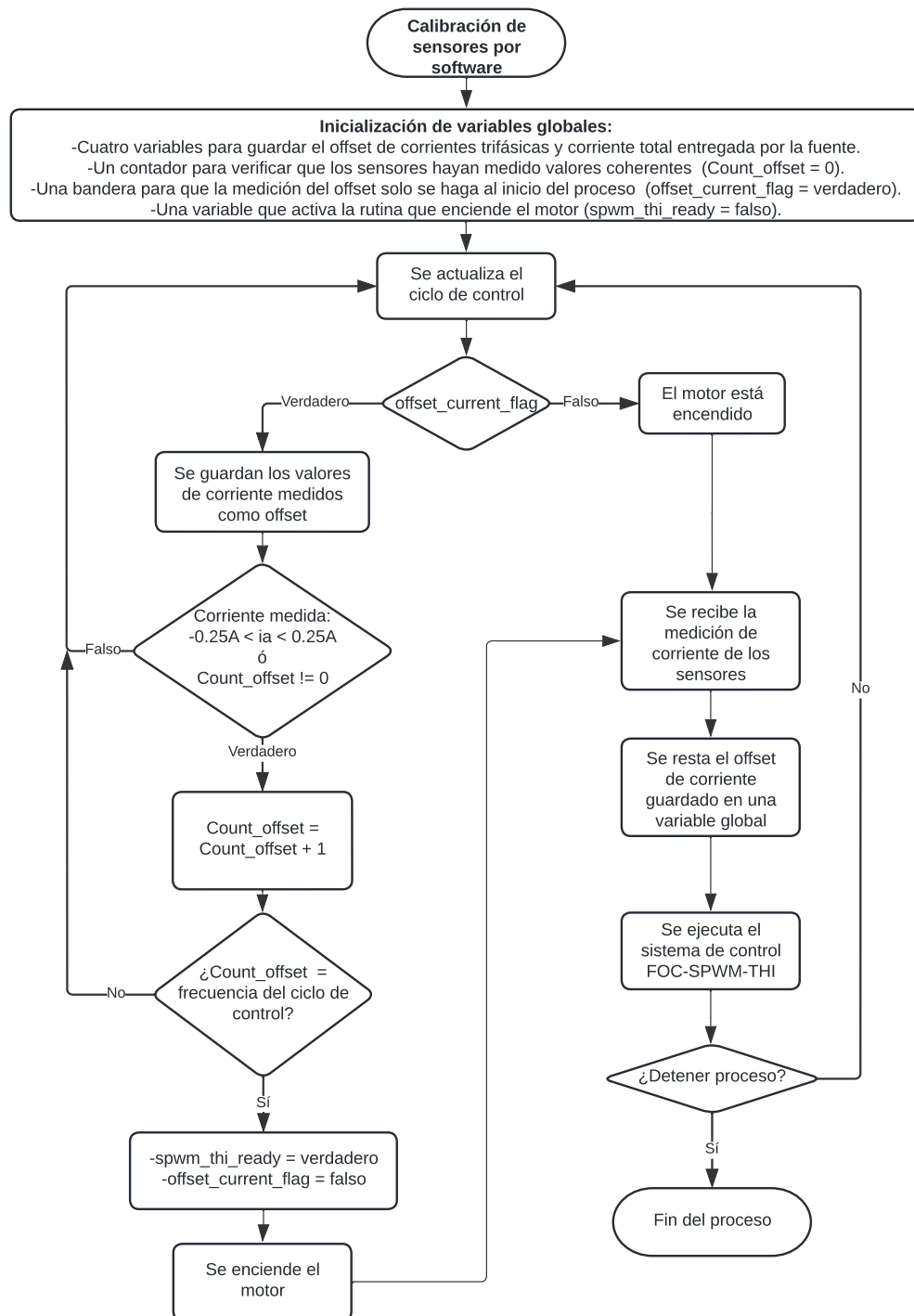


Figura 4.8: Diagrama de flujo del algoritmo de calibración de sensores de corriente.

Inicialmente el algoritmo requiere definir e inicializar 6 variables globales extra y utiliza otra previamente definida. Las variables usadas son:

- *it_amps_offset*: Es una variable del tipo entero (int) que almacena el offset de corriente del sensor que hace medición de la corriente DC de la fuente de alimentación. Se inicializa en 0.
- *ia_amps_offset*: Es una variable del tipo entero (int) que almacena el offset de corriente del sensor que hace medición de la señal de corriente trifásica I_a . Se inicializa en 0.
- *ib_amps_offset*: Es una variable del tipo entero (int) que almacena el offset de corriente del sensor que hace medición de la señal de corriente trifásica I_b . Se inicializa en 0.
- *ic_amps_offset*: Es una variable del tipo entero (int) que almacena el offset de corriente del sensor que hace medición de la señal de corriente trifásica I_c . Se inicializa en 0.
- *offset_current_flag*: Es una variable del tipo booleano (bool) que se usa para ingresar a un condicional *if*, que asigna los valores del offset de corriente a las variables destinadas a almacenarlos. Esta variable se inicializa en verdadero.
- *spwm_thi_ready*: Esta variable es de tipo booleano (bool) previamente definida y es la que permite encender el motor cuando se encuentra en verdadero. Esta variable se inicializa en falso.
- *count_offset*: Es una variable del tipo entero (int) que funciona como un contador que se inicializa en 0, que cuenta hasta la frecuencia del ciclo de control y que al llegar ahí posibilita cambiar de estado las variables *spwm_thi_ready* = *verdadero* y *offset_current_flag* = *falso*

Teniendo claro las funciones de cada una de las variables y observando el diagrama de flujo de la figura 4.8, es posible analizar más a fondo las características del algoritmo utilizado.

Primeramente se inicializan las variables globales como se explica anteriormente, luego cuando se da la instrucción de iniciar el proceso, se empiezan a ejecutar las instrucciones. Un condicional *if* evalúa el estado de *offset_current_flag*. Como al inicio es verdadera se guardan los datos de medición de los sensores en las variables *it_amps_offset*, *ia_amps_offset*, *ib_amps_offset* e *ic_amps_offset* según corresponde.

El segundo condicional *if* es verdadero si el valor de las señales trifásicas es pequeño para asegurar de que el motor aún se encuentra apagado o si la variable *count_offset* es diferente de cero para asegurar de que a este *if* se puedan entrar todas las veces después de la primera vez y antes de llegar al valor de la frecuencia del ciclo de control.

Seguidamente se aumenta el contador y si *count_offset* es diferente a la frecuencia del ciclo de control (para los primeros valores del contador) en el siguiente condicional (*count_offset* = *frecuencia del ciclo de control*?) la respuesta es no y se vuelve a actualizar el ciclo. Esto hasta que la última condición mencionada sea verdadera.

Cuando la respuesta a *count_offset* = *frecuencia del ciclo de control* es si, *spwm_thi_ready* = *verdadero* y *offset_current_flag* = *falso*, en consecuencia el motor se enciende y no se volverán a reescribir las variables de offset.

Seguidamente se reciben las mediciones de corriente de los sensores, a ese valor recibido se le resta el valor de offset y posteriormente se ejecuta el sistema de control FOC-SPWM-THI con las variables de corriente calibradas. El ciclo de recibir las mediciones, restarle el offset y ejecutar el sistema de control, se repite hasta que se quiera detener el proceso y se apague el motor, sin embargo la obtención del offset solo se ejecuta al inicio del proceso.

4.3. Puesta de carga variable al sistema

Para la puesta de carga mecánica variable al sistema se hacen dos pruebas, la primera tiene el objetivo de encontrar la constante de torque k_t del motor y que será utilizada en la segunda prueba para encontrar el torque variable que se le esta aplicando al sistema por medio del motor de carga. Es importante mencionar que la carga aplicada al motor de accionamiento equivale a la carga originada por el motor DC en conjunto con la resistencia de carga (carga mecánica variable), más la carga aplicada por el conjunto de poleas, faja e inercia de los rotores de ambos motores que se considera una carga constante.

4.3.1. Prueba de circuito abierto

Para la prueba de circuito abierto se monta un circuito de prueba como el de la figura 4.9 en el que se hace medición de la tensión en las terminales de salida del motor DC (V_{out}), al hacer girar el rotor del mismo a velocidad constante.

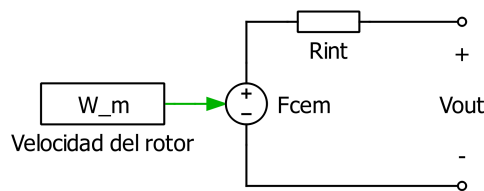


Figura 4.9: Circuito DC de prueba para la obtención de la constante de motor K_t .

En la figura 4.10 se muestra la maqueta de prueba para la toma de datos.

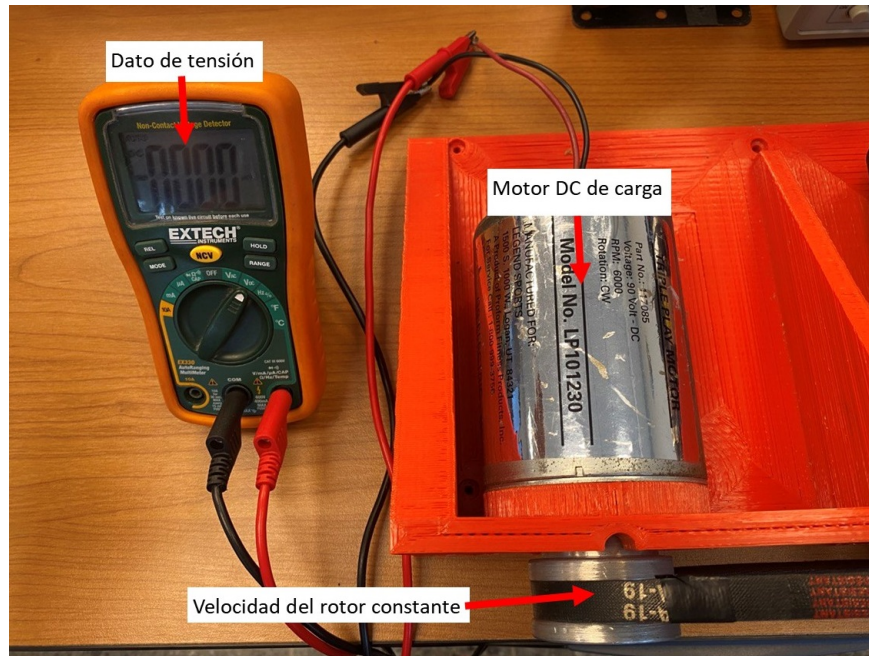


Figura 4.10: Maqueta de prueba para la obtención de la constante de motor K_t .

Esta prueba se realiza haciendo girar el rotor del motor DC. La velocidad de giro de este motor es igual a la velocidad de giro del motor de accionamiento debido a que las poleas empleadas para acoplar los ejes de los motores, tienen el mismo radio, por lo tanto la velocidad se conserva. Los datos de velocidad instantánea son tomados por OpenCoRoCo y exportados mediante un archivo .csv, sin embargo, para la obtención de la constante de torque el dato de velocidad tomado se calcula de la siguientes forma:

- Paso 1: Se envía una referencia de velocidad al sistema (Prueba 1).
- Paso 2: OpenCoRoCo guarda los datos de velocidad instantánea medida en un archivo .csv.
- Paso 3: Se obtiene un promedio de los datos de la velocidad de la prueba 1 (Promedio 1).
- Paso 4: Se envía la misma referencia de velocidad al sistema que en la prueba 1 (Prueba 2).
- Paso 5: OpenCoRoCo guarda los datos de velocidad instantánea medida en un archivo .csv.
- Paso 6: Se obtiene el promedio de los datos de la velocidad de la prueba 2 (Promedio 2).
- Paso 7: Se hace un promedio de velocidad entre Promedio 1 y Promedio 2.

Para la toma de datos de la tensión en las terminales del motor de carga, se toma el dato de tensión en cada una de las pruebas y se realiza un procedimiento similar al realizado para la velocidad con la única diferencia que este dato se toma por medio de un multímetro digital.

Por último, para obtener la constante de torque (k_t) se utiliza la ecuación 2.1 de manera que el calculo realizado es:

$$k_t = \frac{V_{out}}{\omega_m} = \frac{Tension_Promedio}{Velocidad_promedio_del_rotor} \left[\frac{Nm}{A} \right] \quad (4.2)$$

En la tabla 5.1 se pueden observar los datos tomados en las pruebas.

4.3.2. Prueba de circuito cerrado

Para la prueba de circuito cerrado se quiere demostrar que el sistema de carga variable es funcional por lo que en esta prueba se busca encontrar el torque al variar la resistencia de carga que se conecta en las terminales del motor DC.

En a figura 4.11 se muestra el circuito DC requerido para la prueba.

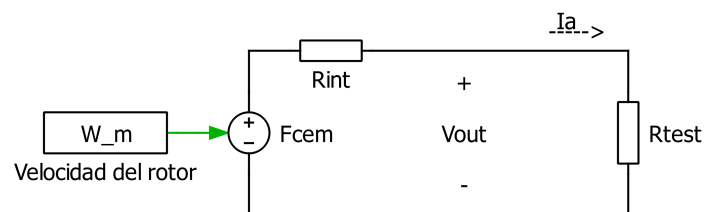


Figura 4.11: Circuito DC de prueba para obtener resultados de carga variable.

En la figura 4.12 se muestra la maqueta de prueba utilizada para la obtención de datos.

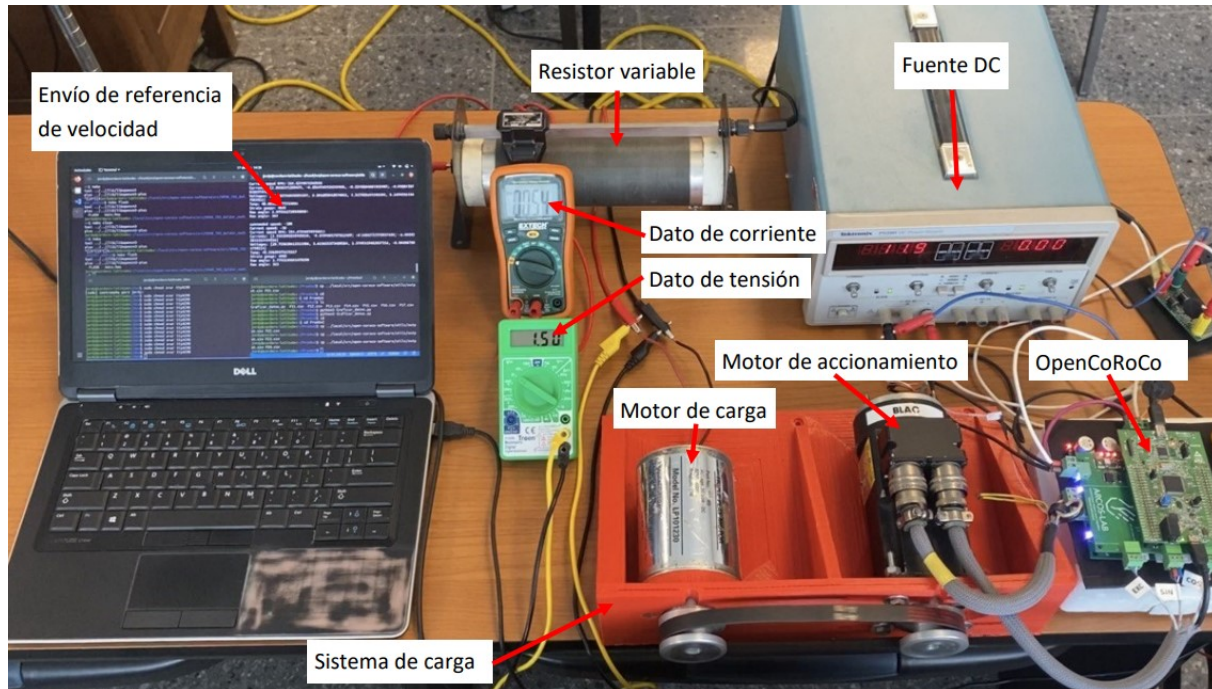


Figura 4.12: Maqueta de prueba para obtener resultados de carga variable.

La prueba se fundamenta en la ecuación 2.2 por lo que para obtener el torque en esta prueba es necesario haber obtenido la constante de torque de la prueba de circuito abierto previamente.

El procedimiento realizado consiste en enviar una sola referencia de velocidad de giro de los motores, mientras se varía la resistencia de carga en el motor DC. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 5.2.

Resultados y análisis

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en las pruebas experimentales y su análisis para comprobar la consistencia de los datos con lo esperado. Primeramente se muestran resultados y análisis relacionados con la calibración de sensores y luego de las pruebas de circuito abierto y circuito cerrado.

5.1. Resultados del offset

Después de haber hecho la calibración de sensores como se muestra en la sección 4.2, se exportan las señales de offset DC que se le restan a los datos. En la figura 5.1 se puede observar el valor medido por los sensores de corriente antes de que el motor BLAC se encienda, si estos valores tuvieran un valor de cero quiere decir que los sensores de corriente estarían haciendo una medición precisa, sin embargo esto no sucede y esta gráfica muestra en cuánto se altera la medición.

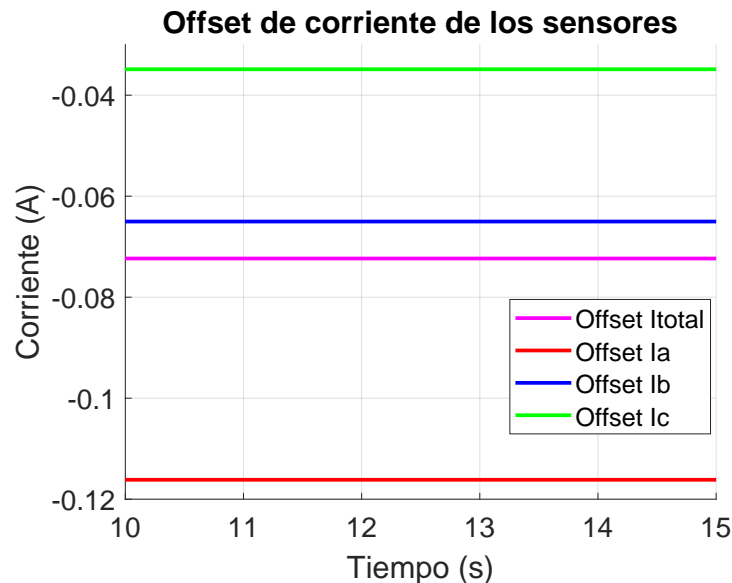


Figura 5.1: Offset a corregir obtenido en la calibración de sensores.

Una de las limitantes en la toma de datos de OpenCoRoCo a través del puerto serial, es que no se pueden enviar los datos de offset y a la vez enviar los datos de corriente medida, esto debido a que entre más datos se envíen, el sistema se vuelve más lento, lo que implica que se deba bajar la frecuencia del ciclo de control que no es lo ideal si se quiere controlar de una mejor manera el motor de accionamiento. Por esta razón la gráfica de offset de la figura 5.1 no muestra exactamente el offset corregido en alguna otra prueba que se muestre en este proyecto, pues en cada prueba se calcula un offset distinto, sin embargo las mediciones de offset DC no varían de manera considerable entre una prueba y otra.

A pesar de la aclaración anterior, las pruebas donde se tomaron los datos de la figura 4.7 y la figura 5.1 fueron similares y se puede notar que al restar el valor de offset DC a cada una de las señales trifásicas se obtiene una gráfica de señales trifásicas centradas en cero. Por otro lado al hacer lo mismo con la corriente total se obtiene un valor de corriente positivo que tiene sentido, pues la maquina BLAC trabaja como motor.

En las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran las señales de corrientes trifásicas medidas para distintos valores de carga, de mayor a menor carga mecánica. Las pruebas para verificar la carga se muestran en la sección 5.3.

En la figura 5.2 se muestra una gráfica de la prueba 1 y se observa como las señales de corriente trifásicas se aproximan a -0.6 A en el punto más bajo y a 0.6 A en el punto más alto lo que permite evidenciar una buena calibración de los sensores. Además, como es la prueba donde se aplicó mayor carga, la amplitud de las señales es mayor al compararla con las pruebas 4 y 8 de las figuras 5.3 y 5.4.

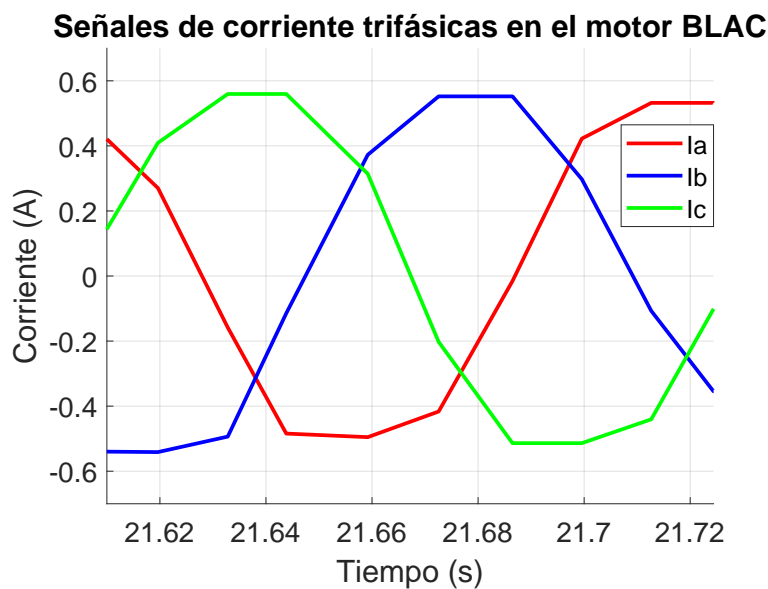


Figura 5.2: Gráfica de señales de corriente trifásicas en el motor BLAC en la prueba 1.

Similar a la prueba 1, en la prueba 4 (figura 5.3) se ve como el punto mínimo y máximo de las señales se aproxima a -0.5 A y 0.5 A respectivamente, con una amplitud menor al de la prueba 1 pero mayor al de la prueba 8.

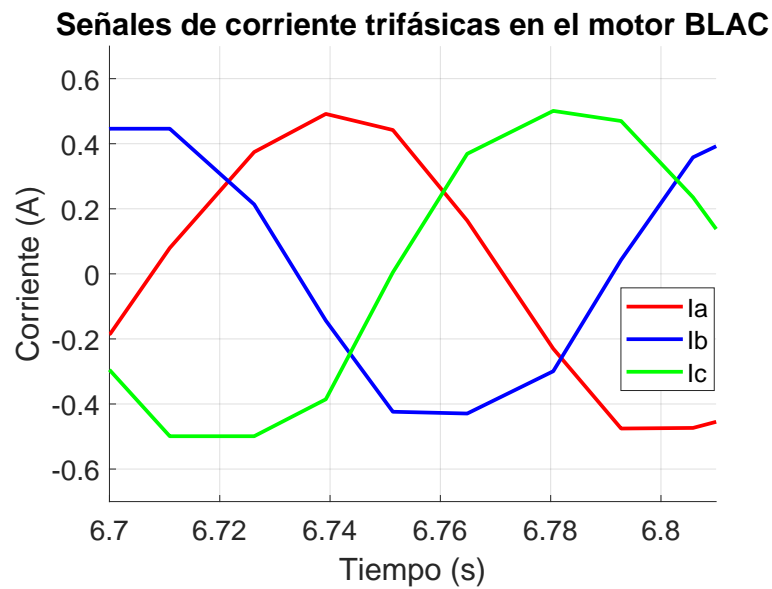


Figura 5.3: Gráfica de señales de corriente trifásicas en el motor BLAC en la prueba 4.

En la figura 5.4 se muestran las señales de corriente trifásica para la prueba 8 y se puede notar que están centradas en cero con un rango de medición que se aproxima a los -0.3 A y 0.3 A. Esta prueba es la prueba en la que se aplica menos carga al sistema.

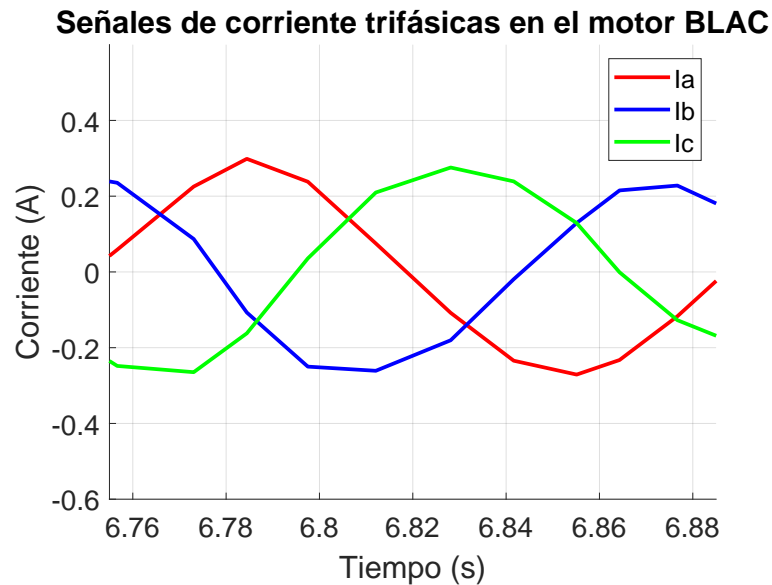


Figura 5.4: Gráfica de señales de corriente trifásicas en el motor BLAC en la prueba 8.

Observado de las gráficas de las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 es posible evidenciar que el offset de los sensores es un offset DC que no depende de la carga del sistema por lo que se valida el algoritmo de calibración mediante software de la sección 4.2.

5.2. Prueba de circuito abierto

Al realizar la prueba de circuito abierto como se describe en la sub-sección 4.3.1, se obtienen los datos de la tabla 5.1, donde las columnas 2, 3 y 4 son los datos medidos, las columnas 5 y 6 son los promedio de datos tomados en dos pruebas consecutivas con las mismas características y la columna 7 muestra el valor de la constante de torque calculado mediante la ecuación 4.2.

Prueba	Velocidad del rotor (RPM)	Velocidad del rotor (rad/s)	Tensión (V)	Velocidad promedio del rotor (rad/s)	Tensión promedio (V)	Constante del motor (K_t) (Nm/A)
1	95,623	10,014	1,309	10,010	1,318	0,132
2	95,547	10,006	1,326			
3	145,893	15,278	2,004	15,271	1,998	0,131
4	145,771	15,265	1,991			
5	194,887	20,408	2,687	20,400	2,682	0,131
6	194,719	20,391	2,677			
7	245,823	25,742	3,317	25,749	3,322	0,129
8	245,948	25,756	3,327			
9	295,586	30,954	3,980	30,944	3,985	0,129
10	295,410	30,935	3,990			

Tabla 5.1: Datos experimentales de la prueba de circuito abierto

Para obtener el valor de la constante de torque experimental se puede hacer de dos formas, una en la que se toma el promedio de los datos de la columna 7 en la tabla 5.1 de donde se obtiene:

$$k_t = \frac{\sum_{i=1}^5 \text{DatoTabla5,1}[i, 7]}{5} = 0,130 \quad \left[\frac{Nm}{A} \right] \quad (5.1)$$

La otra forma que es la que se utilizará, es usando la ecuación 2.1 y los datos de la tabla 5.1. Se grafica la tensión en las terminales del motor DC de carga en función de la velocidad de giro del rotor del motor DC como se muestra en la figura 5.5.

Como la ecuación 2.1 tiene la forma de una ecuación lineal para obtener la constante de torque se grafican los datos junto con la curva de mejor ajuste lineal y se toma la pendiente de la curva como K_t .

En la figura 5.5 se muestran los datos de tensión Vs velocidad obtenidos en la prueba de circuito abierto y además se muestra el mejor ajuste lineal obtenido mediante la herramienta “Curve Fitting Tool” de MatLab.

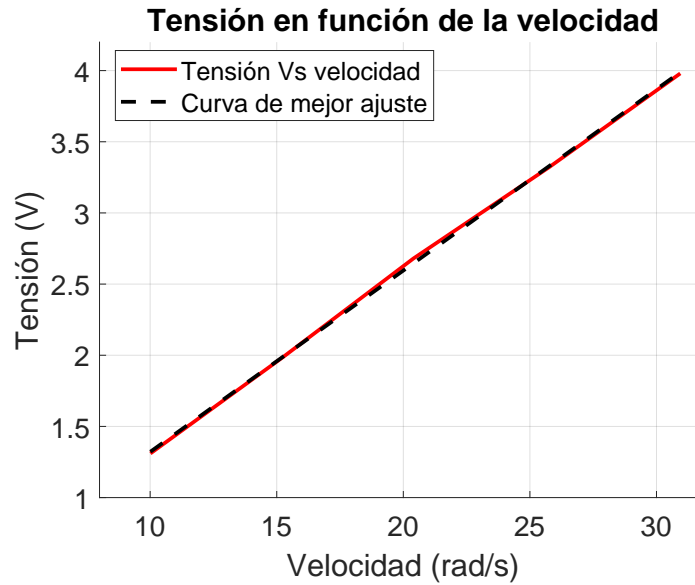


Figura 5.5: Gráfica de tensión en función de la velocidad para la obtención de la constante K_t del motor.

La ecuación 5.2 muestra la expresión matemática de la curva de mejor ajuste, donde la pendiente de la ecuación lineal representa la constante de torque ($k_t = 0,1274$ [Nm/A]).

$$f(x) = 0,1274x + 0,0471 \quad (5.2)$$

5.3. Prueba de circuito cerrado

Para la prueba de circuito cerrado es importante mencionar que la carga que siente el motor de accionamiento se debe a 4 componentes; la inercia del rotor del motor BLAC, la inercia del rotor del motor DC, el conjunto mecánico poleas - faja de acople y la carga generada por el motor DC funcionando como generador. De esas cuatro cargas las primeras tres son cargas fijas que no se tomarán en cuenta para el análisis debido a su naturaleza constante y la cuarta es la que da base a este informe por su variabilidad en función de la resistencia de carga conectada en serie al generador.

Otro dato importante es que todas las pruebas realizadas en circuito cerrado se hicieron para una velocidad constante de aproximadamente 300 RPM.

En la tabla 5.2 se muestran los datos tomados de la prueba de circuito cerrado descrita en la sección 4.3.2. Los datos de corriente total son tomados del promedio de datos de corriente total del archivo “.csv” que exporta OpenCoRoCo, la tensión y corriente en terminales del motor DC son tomadas por mediciones analógicas de multímetros, la resistencia conectada en las terminales del motor DC se calcula por ley de Ohm ($R_{test} = V_{DC}/I_{DC}$) y el torque que genera el motor DC de carga se calcula usando la ecuación 2.2 ($\tau_m = K_t I_a$), donde K_t es el valor calculado en la sección 5.2 e I_a es la corriente en terminales del motor DC cuando se conecta la resistencia R_{test} .

Prueba	Corriente entregada por la fuente DC (A)	Tensión en terminales del motor DC (V)	Corriente en terminales del motor DC (A)	R_{test} (Ω)	Torque (Nm)
1	2,804	0,584	0,807	0,724	0,103
2	2,397	1,594	0,521	3,058	0,066
3	2,278	2,139	0,386	5,545	0,049
4	2,238	2,444	0,299	8,188	0,038
5	2,138	3,043	0,179	17,035	0,023
6	1,800	3,150	0,151	20,913	0,019
7	1,585	3,207	0,133	24,137	0,017
8	1,498	3,291	0,118	27,941	0,015

Tabla 5.2: Datos experimentales de la prueba de circuito cerrado

De los datos de la tabla 5.2 se puede notar que conforme se aumenta la resistencia, la corriente total entregada por la fuente DC disminuye lo cual de manera indirecta valida la reducción de torque percibido por el motor BLAC.

En la figura 5.6 se muestra de manera gráfica la corriente DC entregada por la fuente en las pruebas 1, 4 y 8 que son hechas cuando la resistencia R_{test} es igual a $0,724 \Omega$, $8,188 \Omega$ y $27,941 \Omega$ respectivamente, de donde se puede evidenciar que efectivamente hay una disminución de la corriente total en función del aumento en la resistencia.

Corrientes entregadas por la fuente de alimentación DC

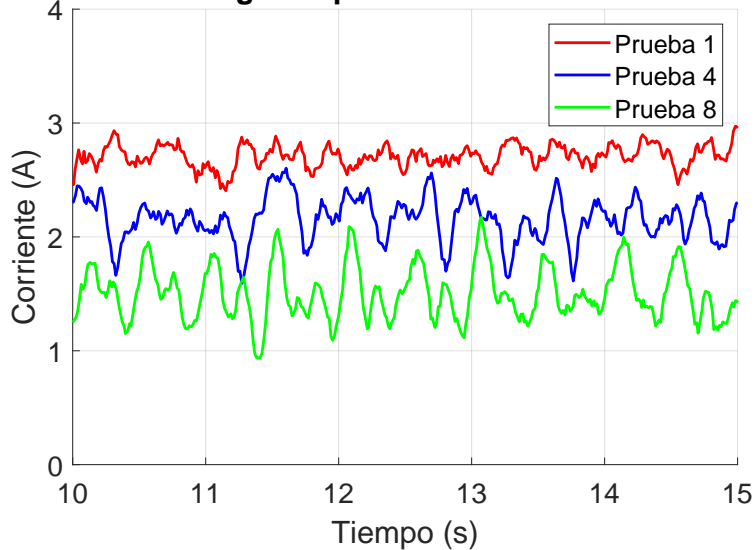


Figura 5.6: Comparación de corriente entregada por la fuente DC en las pruebas 1, 4 y 8.

De los datos de resistencia y torque de la tabla 5.2 se puede notar un comportamiento inverso porque

cuando se aumenta la resistencia disminuye el par. Ese comportamiento se debe a que la resistencia es inversamente proporcional a la corriente y la corriente es directamente proporcional al par, por lo tanto la resistencia tiene un comportamiento inverso con el par.

Dado que se analiza la variación del torque de carga en el motor DC en función de la resistencia conectada entre sus terminales, es conveniente graficar los datos como se muestra en la gráfica de la figura 5.7. Podemos notar que el comportamiento de la curva no es lineal y se debe a que la ecuación 2.2 muestra un relación lineal del par con la corriente, pero no así con la resistencia de manera directa.

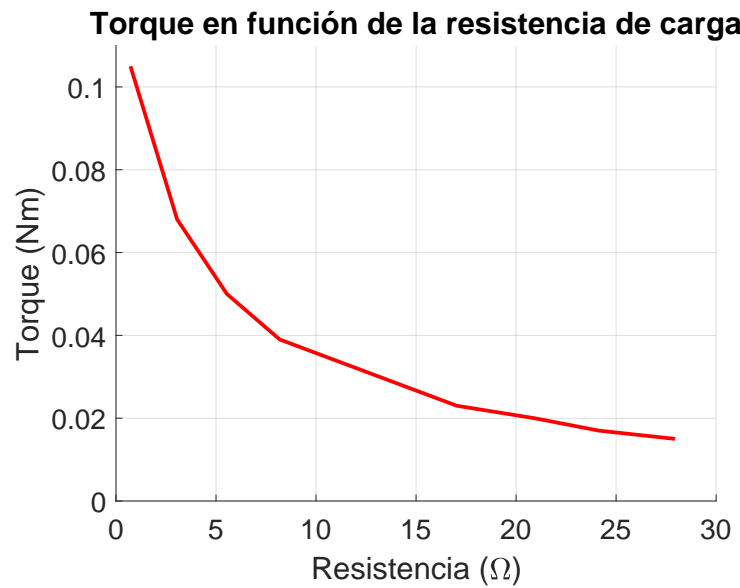


Figura 5.7: Torque en función de la resistencia para el sistema de carga variable.

Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se muestran las principales conclusiones obtenidas en este proyecto y las recomendaciones que se consideran más oportunas para un futuro seguimiento del trabajo realizado.

6.1. Conclusiones

Las principales conclusiones de este proyecto se puntúan a continuación:

- Para lograr un mejor control del motor BLAC de accionamiento, es conveniente que las señales que son controladas sean medidas con exactitud, es por ello que este proyecto hace una calibración de sensores de corriente mediante software que permita cumplir ese objetivo.
- Se realiza un algoritmo que permite la calibración de sensores cuando el motor se encuentra apagado. Este algoritmo es probado para distintos valores de carga mecánica que permiten verificar el funcionamiento del mismo, de esta manera se concluye que el error de medición no depende de la carga si no que es un offset DC en los medidores de corriente magneto-resistivos instalados en OpenCoRoCo.
- Inicialmente estudiando las referencias consultadas, se puede notar que en la mayoría de trabajos se diseñan sistemas más elaborados con sistemas de control que permiten agregar una carga específica a un motor considerando incluso la dinámica del sistema, sin embargo, esas mismas características hacen del sistema algo más complicado que implica más recursos, razón por la que se descartan estas opciones a desarrollar.
- De las referencias consultadas, el trabajo realizado en [12] es el que más se asimila a lo realizado en este proyecto, sin embargo, se debe recalcar que se quiso siempre mantener un sistema funcional, práctico y de bajo costo que pudiera ser implementado con los materiales presentes en el laboratorio y al comparar este trabajo con el de la referencia se considera que este es un sistema más práctico y que ha sido demostrada su funcionalidad.
- La forma de acople de los ejes y la base de los motores podría haber sido diseñada de distintas formas, sin embargo, se consideró que la empleada en este proyecto es la que proporcionaría mayor confiabilidad.

- La carga mecánica variable se origina solo por el conjunto motor DC - Resistencia de prueba R_{test} , sin embargo, la carga que siente el motor de accionamiento es la suma de carga mecánica variable, las inercias de rotores de ambos motores y el conjunto poleas - faja. Las cargas generadas por las últimas dos se consideran constantes y no se incluyen en el análisis de este proyecto.
- Se ha demostrado que el torque de carga generado en el motor DC puede ser controlado por la resistencia conectada en sus terminales.

6.2. Recomendaciones

Tomando en cuenta la experiencia en el proceso de elaboración del proyecto se plantean las siguientes recomendaciones:

- La variación del torque en el motor de carga se puede dar por dos factores, por la variación de la resistencia de carga que se analiza en este proyecto y por medio de variación de la velocidad de giro del motor, por lo que se recomienda hacer un análisis de como varía el torque del motor de carga en función de la velocidad de giro del rotor, de esta forma se puede hacer una curva par-resistencia para diferentes valores de velocidad
- Considerando el punto anterior se deduce que el controlador de velocidad influye directamente en el sistema de carga variable por lo que se recomienda optimizar el sistema de control del motor de accionamiento de manera que el controlador de velocidad siga mejor la referencia enviada.
- La faja utilizada para acoplar los motores mediante poleas es poco flexible por lo que se recomienda utilizar una faja más flexible para que la carga mecánica constante que genera la faja se disminuya y se pueda aumentar el rango de variabilidad de la carga mecánica generada por el motor DC de carga.

Bibliografía

- [1] Jimenez Huerta A, Felix Beltran O, Hernandez Sanchez J, and Reyes Cortés F. Algoritmos de control de impedancia para un rotradi. *Universidad Autónoma de Puebla*, 2013.
- [2] ALLEGRO Microsystems. *ACS70331*, 9 2021.
- [3] Farnell company. *Motores sincrónicos de imanes permanentes*. Disponible en: <https://es.farnell.com/motor-control-permanent-magnet-sync-motor-pmsm-technology>. Accesado el 24 de mayo de 2022.
- [4] Sancho Abarca E. Implementación de un sistema de control para un motor pmsm basado en control vectorial y plataforma opencoroco. *Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica*, 4 2022.
- [5] Andreas Echle, Yuancong Gong, Jonathan Terfurth, and Nejila Parspour. Fea-based comparison of bldc and blac modes for an axial flux motor with trapezoidal bemf. In *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 2694–2701, 2020.
- [6] Md Inzamamul Haq, Jerin Tasnim Humayra, Mahmuda Rahman, Shahria Tanzil, and Abdul Hadi Hanan. Control and simulation of a three-phase inverter. In *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, pages 1419–1424, 2021.
- [7] Alon Kuperman. Hil-based virtual disturbance and parameter variations of controlled electric drive. In *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 2165–2170, 2008.
- [8] Roberto Morales-Caporal, Montiel German, Allan Pérez López, K. Hernández Castañeda, and F. Vázquez-Tonix. Diseño de un inversor trifásico e implementación del control escalar para accionar una máquina de inducción con aplicaciones en vehículos eléctricos. *Academia Journals*, 11 2016.
- [9] Gholamreza Nazmara, Mohammad Mehdi Fateh, and Seyed Mohammad Ahmadi. A robust adaptive impedance control of robots. In *2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM)*, pages 40–45, 2018.
- [10] Sehoon Oh and Yoichi Hori. Fractional order impedance control by particle swarm optimization. In *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*, pages 1936–1941, 2008.

- [11] Daniel Ortuño and Federico Ruiz. Sensor de fuerza/torque para un control por impedancia de la base móvil de un robot. *ARCOS-Lab (Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos)*, Universidad de Costa Rica, 2019.
- [12] Michael Angelo A. Pedrasa and Vincent Louie S. Delfin. Low cost mechanical load emulator. In *TENCON 2006 - 2006 IEEE Region 10 Conference*, pages 1–3, 2006.
- [13] M. Rodic and K. Jezernik. An approach to the dynamic emulation of mechanical loads. In *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003*, volume 1, pages 489–494 Vol.1, 2003.
- [14] M. Rodic, K. Jezernik, and M. Trlep. Control design in mechatronic systems using dynamic emulation of mechanical loads. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005.*, volume 4, pages 1635–1640, 2005.