



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MÁQUINAS
ELÉCTRICAS ESPECIALES”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: PABLO ANDRÉS LÓPEZ BRITO

JORGE SALVADOR QUINDE SANTIAGO

TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE

Cuenca - Ecuador

2022


CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Pablo Andrés López Brito con documento de identificación N° 0106106453 y Jorge Salvador Quinde Santiago con documento de identificación N° 1400572655; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 20 de septiembre de 2022

Atentamente,



Pablo Andrés López Brito

0106106453



Jorge Salvador Quinde Santiago

1400572655

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Pablo Andrés López Brito con documento de identificación N° 0106106453 y Jorge Salvador Quinde Santiago con documento de identificación N° 1400572655, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico con enfoque investigativo: “Diseño y simulación de un banco de pruebas para máquinas eléctricas especiales”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de septiembre de 2022

Atentamente,



Pablo Andrés López Brito
0106106453



Jorge Salvador Quinde Santiago
1400572655

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N° 0102257482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MÁQUINAS ELÉCTRICAS ESPECIALES”, realizado por Pablo Andrés López Brito con documento de identificación N° 0106106453 y por Jorge Salvador Quinde Santiago con documento de identificación N° 1400572655, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico con enfoque investigativo que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de septiembre de 2022

Atentamente,



Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque

0102257482

DEDICATORIAS

En primer lugar, quiero dedicar mi proyecto de tesis a Dios por permitirme terminar una carrera profesional ya que siempre me ha brindado de sus bendiciones para poder continuar, en segundo lugar, dedicar este logro a mis padres Andrés y Fanny quienes siempre me han impartido que tengo que ser un hombre de bien y cumplir con mis propósitos de vida, agradecerles por hacer el esfuerzo de brindarme una buena educación y siempre apoyarme en todo lo que me propuesto, a pesar de mis errores como hijo.

Dedicar este proyecto a la memoria de una persona muy especial en mi vida que fue mi abuelo Enrique Brito quien siempre fue un guía a lo largo de mi vida, alguien que siempre me impartió de su conocimiento y sabiduría para que sea alguien en la vida y nunca abandoné mis sueños.

A mis hermanas Marcela y Michelle por brindarme de su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, ya que siempre me han ayudado a salir adelante y tener fuerzas para cada día ser mejor. A mis sobrinos Samantha, Luise y Ezequiel por quienes jamás me permití abandonar mi carrera a pesar de cualquier adversidad que se me presentó en el camino, y darles un poco de mi enseñanza de que todo en la vida se puede con esfuerzo y paciencia.

Finalmente quiero expresar mi eterno agradecimiento con todos mis familiares que me brindaron de su apoyo, y a todos mis amigos y primos que siempre han estado para mí y han sabido apoyarme ante cualquier adversidad.

Pablo Andrés López Brito

Dedico primeramente este proyecto a Dios, quien me brindó la fuerza y la sabiduría suficiente para poder culminar mis estudios. En segundo lugar, dedico este logro a la persona que me dio la vida, mi Madre Magdalena Santiago, quien es padre y madre a la vez y me ha inculcado los mejores valores para recibir este logro de la manera más humilde. Agradecerle porque a pesar de las adversidades que hemos pasado siempre me apoyó para no dejar mis estudios e inculcarme que llegue a la culminación de mis estudios.

Finalmente dedico este logro a mis familiares, amigos y personas cercanas que me apoyaron de manera incondicional y me brindaron su apoyo a lo largo de mi carrera.

Jorge Salvador Quinde Santiago

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer punto a Dios por la fortaleza que nos ha brindado, por guiarnos en el buen camino de la vida, ser el apoyo en momentos de debilidad y darnos fuerza para poder salir adelante ante cualquier adversidad.

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a nuestro director de tesis Ing. Flavio Quizhpi, quien con su ayuda y conocimiento ha sabido guiarnos a lo largo de este proyecto, también a todos los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica quienes nos guiaron en esta trayectoria profesional con las enseñanzas valiosas que nos impartieron día a día para seguir creciendo profesionalmente.

Agradecemos también a nuestros compañeros de aula, con quienes en cada ciclo hemos compartido buenos y malos momentos, son recuerdos que perduraran siempre con nosotros. Y agradecer a nuestra querida Universidad quien nos abrió las puertas para poder realizar nuestros estudios universitarios

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	17
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2.	ANTECEDENTES	17
1.3.	JUSTIFICACIÓN.....	18
1.4.	OBJETIVOS.....	19
1.4.1.	Objetivo General	19
1.4.2.	Objetivos Específicos	19
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	20
2.1.	MÁQUINAS ELECTRICAS ESPECIALES	20
2.1.1.	Motor de Inducción Lineal	20
2.1.2.	Motor De CC De Imán Permanente	23
2.1.3.	Motor De Reluctancia	27
2.1.4.	Motores Sin Escobillas máquinas brushless BLDC	30
2.1.5.	Motores Paso a Paso.....	35
2.1.6.	Motores De Histéresis	38
2.2.	BANCO DE PRUEBAS.....	40
2.2.1.	Definición De Banco De Pruebas.....	40
2.2.2.	Diseño De Banco De Pruebas.....	40
2.2.3.	Experimentos.....	41
2.2.4.	Ensayos De Investigación.....	41
2.2.5.	Características De Bancos De Pruebas.....	41
2.3.	NORMAS	42
2.3.1.	Seguridad y Salud de los Trabajadores y Mejoramiento del Medio Ambiente de Trabajo. 42	
2.3.2.	Regulaciones para Motores y Armario Eléctricos.....	43
2.4.	RIESGOS	44
2.4.1.	Riesgos Mecánicos	44
2.4.2.	Riesgos Eléctricos	44
2.4.3.	Riesgo Térmico	45
2.4.4.	Riesgo Producido por el Ruido.....	46
2.4.5.	Riesgos Producidos por las Vibraciones	46
2.5.	PROTECCIONES ELÉCTRICAS	46
2.6.	MODELOS DE BANCOS DE PRUEBAS.....	47

2.6.1.	EEM 3.3-3 Motor de Inducción Monofásico con Bobinado Inicial Bifilar de 300W – Lucas Nuelle.....	47
2.6.2.	Banco de Ensayos Modular BEM199 – AlecopGroup.....	48
2.6.3.	Sistema de Entrenamiento Electromecánico de 2kW Modelo 8013 – LabVolt	49
2.6.4.	AEL-ACINA Aplicaciones de Motores Trifásicos de Inducción Trifásicos de Jaula de Ardilla - Edibon.....	50
2.6.5.	Plataforma de Ensayos de Sistemas de Protección Utilizando Ieds de la Universidad Politécnica Salesiana.	50
2.6.6.	Plataforma Didáctica Con Motores De Inducción Para Pruebas De Control.	51
3.	COMPONENTES	52
3.1.	TIPO DE MOTORES EN EL MERCADO SELECCIONADOS.....	52
3.1.1.	Motor de Inducción Lineal.	52
3.1.2.	Motor de C.C. de Imanes Permanentes	52
3.1.3.	Motor de Reluctancia	53
3.1.4.	Motor de C.C. sin escobillas BLDC.....	54
3.1.5.	Motor C.C. paso a paso	54
3.1.6.	Motor de Histéresis Síncrono	55
3.2.	SISTEMAS DE CONTROL PARA MOTORES.....	55
3.2.1.	Controlador USFULL FU9000D para Motor de Inducción Lineal	55
3.2.2.	Controlador DC 0-90 V para Motor C.C. de Imanes Permanentes	56
3.2.3.	Controlador Bonfiglioli AEC401 - 19 para Motor de Reluctancia.....	56
3.2.4.	Controlador de Motor C.C. sin escobillas BLDC.....	57
3.2.5.	Controlador de motor C.C. paso a paso.....	58
3.2.6.	Control para Motor de Histéresis Síncrono	58
4.	SIMULACIÓN Y DISEÑO	59
4.1.	Simulación Motor de inducción Lineal	59
4.1.1.	Esquema de simulación.	59
4.1.2.	Bloques del esquema de simulación.....	60
4.2.	Simulación Motor de C.C. de Imanes Permanentes	62
4.2.1.	Esquema de simulación	63
4.2.2.	Bloques Del Esquema De Simulación del Motor PMDC.....	63
4.3.	Simulación de Motor de Reluctancia	65
4.3.1.	Esquema de simulación	66
4.3.2.	Bloques Del Esquema De Simulación del SRM	67
4.4.	Simulación comportamiento de un motor BLDC.....	69
4.4.1.	Esquema de simulación	70
4.4.2.	Bloques de simulación para un motor BLDC.....	70

4.5.	Simulación de Motor C.C. paso a paso	73
4.5.1.	Esquema de simulación	73
4.5.2.	Bloques de simulación para motor paso a paso	74
4.6.	Simulación de Motor de Histéresis Síncrono	76
4.6.1.	Esquema de simulación	76
4.6.2.	Bloques para simulación de motor de histéresis.....	77
4.7.	Diseño de Armario y Carcasa Para Motores	77
4.8.	Modelado de Motores Especiales.....	79
4.9.	Representación Final del Banco en 3D	81
5.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	83
5.1.	Resultados Motor de Inducción Lineal.....	83
5.2.	Resultados Motor C.C. de Imanes Permanentes	84
5.3.	Resultados del comportamiento de un motor de Reluctancia.....	86
5.4.	Resultados del comportamiento de un motor BLDC.....	88
5.5.	Resultados de Motor C.C. paso a paso	89
5.6.	Resultados de Motor de Histéresis Síncrono.....	91
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
	ANEXOS.....	95
	ANEXO A: PRESUPUESTOS	95
	ANEXO B: PLANOS DISEÑO DE ARMARIO.....	95
	ANEXO C: PLANOS DISEÑO DE MOTORES.....	95
	ANEXO D: ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE MOTORES	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	96

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Génesis del motor lineal a partir del desarrollo de un motor rotativo [6].	20
Figura 2: Parámetros principales del motor lineal. [7]	21
Figura 3: Modelo equivalente del motor de inducción lineal por fase [8].	22
Figura 4: Esquema de motor de CC imanes permanentes [9].	24
Figura 5: Motor de núcleo de hierro [10].	25
Figura 6: Motor de devanado superficial [10].	25
Figura 7: Motor núcleo de hierro [10].	25
Figura 8. Armadura del motor CC de imanes permanentes. [11]	26
Figura 9. Circuito equivalente de un motor PMDC. [12]	27
Figura 10. Concepto básico del motor de reluctancia [13].	28
Figura 11: Motor de reluctancia Conmutado [15].	29
Figura 12: Circuito Equivalente para una fase de un SRM. [16]	29
Figura 13: Esquema de motor brushless. [6]	30
Figura 14: Controlador para un motor brushless. [17]	31
Figura 15: Controlador DC para un motor blcd. [18].	33
Figura 16: Circuito eléctrico equivalente para los devanados del estator. [19].	35
Figura 17: Sistema de motor paso a paso. [20]	36
Figura 18: Circuito equivalente de imanes permanentes o motor paso a paso híbrido. [22].	37
Figura 19: Motor de histéresis principales aplicaciones. [23]	38
Figura 20: Rotación de los imanes estáticos. [24].	39
Figura 21: Banco de pruebas de motores eléctricos [27].	41
Figura 22: EEM 3.3-3 Motor de Inducción Monofásico con Bobinado Inicial Bifilar de 300W. [42].	48
Figura 23: Banco de Ensayos Modular BEM199 – AlecopGroup. [44]	49
Figura 24: Diseño del sistema de suministro de energía eléctrica para el Laboratorio de Control y Operación de Máquinas Eléctricas. [45]	49
Figura 25: AEL-ACINA + RACKS. [46]	50
Figura 26: Tablero de pruebas para pruebas de dispositivos electrónicos inteligentes Ied's de control y protección de la Universidad Politécnica Salesiana. [fuente: Plataforma de pruebas de la UPS].	51
Figura 27: Ensamblaje de motores de inducción acoplados. [Fuente: Banco de pruebas de la UPS]...	51
Figura 28: Modelo de motor de inducción lineal H2W Tech. [48]	52
Figura 29: Modelo de motor de C.C. de Imanes Permanentes Vevor. [49]	53
Figura 30: Modelo Motor de Reluctancia. [50].	53
Figura 31: Motor C.C. sin escobillas BLDC, Times Brilliant. [51]	54
Figura 32: Motor C.C. paso a paso. [52]	54
Figura 33: Motor de histéresis síncrono. [53]	55
Figura 34: Controlador USFULL FU9000D [54]	55
Figura 35: Esquema de funcionamiento del LIM con el VFD. [48].	56
Figura 36: Modelo de control de velocidad QWork. [55]	56
Figura 37: Controlador Bonfiglioli AEC401. [50].	57
Figura 38: ControladorZM-6535A. [51]	57
Figura 39: Controlador HBS860H. [52].	58
Figura 40: Comportamiento de Motor de Histéresis [25].	58
Figura 41: Esquema MatLab/Simulink de simulación de Motor de Inducción Lineal [56].	60
Figura 42: Esquema de funcionamiento interior de la simulación del LIM. [56]	60
Figura 43: Bloque de entrada de voltaje. [56]	61
Figura 44: Función del estator y rotor del LIM. [56]	61
Figura 45: Función matemática para los parámetros del LIM. [56].	62

Figura 46: Bloque de Fuerza y Sistema Mecánico. [56]	62
Figura 47: Esquema Matlab/Simulink de simulación de motor PMDC. [57]	63
Figura 48: Diagrama interior del motor PMDC. [57].....	64
Figura 49: Fuente ideal de voltaje constante. [57]	64
Figura 50: Motor DC Matlab. [57].....	64
Figura 51: Modelo dinámico de la simulación del motor PMDC. [57].....	65
Figura 52: Par de carga de la máquina. [57].....	65
Figura 53: Esquema Matlab/Simulink de simulación de motor de Reluctancia. [58].....	67
Figura 54: Sensor de posición para el SRM. [58]	67
Figura 55: Modelado matemático del sensor de posición. [58].....	68
Figura 56: Convertidor del SRM. [58]	68
Figura 57: Sistema de bloques para el convertidor del SRM. [58].....	68
Figura 58: Modelo SRM modelo 6/4. [58].....	69
Figura 59: Esquema de control de velocidad de un motor BLDC. [59].....	70
Figura 60: Arquitectura interna del bloque control. [59]	71
Figura 61: Buck converter. [59]	71
Figura 62: Puente Inversor. [59].....	72
Figura 63: Bloque motor BLDC. [59]	72
Figura 64: Secuencia de conmutación de los sensores Hall. [60]	73
Figura 65: Esquema de motor C.C. paso a paso. [61]	74
Figura 66: Signal Builder. [61].....	74
Figura 67: Controlador de motor paso a paso. [61].....	75
Figura 68: Bloque de motor paso a paso. [61].....	75
Figura 69: Esquema de la simulación de un motor de histéresis síncrono [Fuente: Autor].	76
Figura 70: Fuente programable. [62].....	77
Figura 71: Bloque de motor síncrono. [62]	77
Figura 72: Modelado en vista lateral de armario en 3D.	78
Figura 73: Modelado frontal de armario en 3D.	78
Figura 74: Carcasa de sujeción para el motor.	79
Figura 75: Representación 3D motor de Inducción Lineal.....	79
Figura 76: Representación 3D motor de C.C. de Imanes Permanentes.....	79
Figura 77: Representación 3D motor de Reluctancia.....	80
Figura 78: Representación 3D de motor BLDC.	80
Figura 79: Representación 3D motor paso a paso.	80
Figura 80: Representación 3D motor de histéresis.....	81
Figura 81: Vista realista de armario (vista 3D).	81
Figura 82: Vista dimensional o rayos x de armario (vista 3D).....	82
Figura 83: Forma de onda de velocidad de LIM.	83
Figura 84: Forma de onda de fuerza de empuje de LIM.	84
Figura 85: Forma de onda de velocidad angular de motor PMDC.....	85
Figura 86: Respuesta de la corriente del motor PMDC.....	85
Figura 87: Respuesta de la fuerza del motor PMDC.....	85
Figura 88: Forma de onda del flujo del motor.....	86
Figura 89: Forma de onda de la corriente del motor.	87
Figura 90: Forma de onda de la velocidad del motor	87
Figura 91: Velocidad del motor BLDC.....	88
Figura 92: Comportamiento con respecto al torque del motor.....	89
Figura 93: Respuesta de la posición del rotor a una secuencia de pulsos.	89
Figura 94: Respuesta de las corrientes de fase del motor paso a paso.	90

Figura 95: Torque desarrollado, cambio de torque en la carga.	90
Figura 96: Velocidad del rotor de motor de histéresis síncrono.	91
Figura 97: Torque del motor de histéresis síncrono.	91
Figura 98: Corriente del rotor del motor de histéresis síncrono.	92

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Curva de desconexión de interruptores termomagnéticos. [41]	47
Tabla 2: Parámetros motor LIM.	59
Tabla 3: Parámetros motor PMDC.	63
Tabla 4: Parámetros de motor de Reluctancia.	66
Tabla 5: Parámetros de motor BLDC.	70
Tabla 6: Parámetros de motor paso a paso Nema.	73
Tabla 7: Parámetros de motor de histéresis Síncrono.	76

RESUMEN

El proyecto presenta un diseño y simulación de un banco de pruebas para máquinas eléctricas especiales, las cuales cuentan con sus dispositivos de protección y control, el trabajo de investigación busca la posibilidad de implementar este tipo de proyecto dentro de los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana. El sistema está conformado por 6 máquinas especiales diferentes, cada una de ellas está acoplada en una carcasa individual, colocadas dentro del armario de metal diseñado para su uso. Para su diseño se basó en las normas de seguridad y protección, tanto eléctricas como mecánicas, para que, en caso de surgir algún inconveniente con el banco, no sea de mayor riesgo y de esta forma se brinda seguridad a todas las personas que usen el banco de trabajo.

En el capítulo 1, se encuentra el planteamiento del problema, el cual hace referencia al porqué de realizar este trabajo de investigación. Se busca información de proyectos similares realizados y se analiza si la aplicación de este proyecto tiene bases suficientes para realizarlo. Se complementa la investigación con la justificación del proyecto y se determina con fundamentos teóricos si es aplicable.

Dentro del capítulo 2 se encuentran los fundamentos teóricos, donde se recopila la información de cada uno de los motores para poder definir a cada uno de ellos. La información obtenida de los motores nos ayuda a saber cuáles son las características del principio de funcionamiento y obtener los modelados dinámicos de las máquinas para poder llevarlas a la simulación. La información también nos sirve para entender cuáles serán los comportamientos de las curvas de las máquinas al momento de llevarlos a la simulación.

En el capítulo 3, se define los componentes que son utilizados para la implementación del banco de pruebas. Los elementos se han seleccionado en base a los usos académicos e investigativos que se realizarán. En los componentes seleccionados se debe considerar las características del comportamiento de cada uno de ellos, debido al uso que recibirá.

Para el capítulo 4 se realiza el proceso de diseño y simulación, dentro de las simulaciones están los esquemas utilizados para poder observar el comportamiento de las curvas de cada uno de los motores. Las simulaciones se las realiza con el software Matlab/Simulink, mediante el cual se puede observar de forma digital como será el comportamiento de los motores que se han seleccionado en el capítulo 3. El diseño del banco se realiza en AutoCAD 2D, 3D. Para realizar el diseño del banco se toma en cuenta las características de las dimensiones de los motores, para que, al momento del proceso de armado del banco, este soporte los comportamientos de los motores.

En el capítulo 5 se describe cada una de las gráficas de los resultados obtenidos, mediante su observación se puede detallar detenidamente el comportamiento de las máquinas en su estado transitorio. Los resultados de los motores varían en ciertos casos, debido a que, los fabricantes no citan todos los parámetros del circuito equivalente de la máquina y se debe estimar ciertos parámetros a partir de los datos de placa que tiene el motor.

Finalmente, en el capítulo 6 se realiza una lista de conclusiones y recomendaciones que hacen referencia a la construcción y diseño del banco. De igual manera con respecto al comportamiento y uso de las máquinas especiales.

Palabras clave: máquinas especiales, motor de reluctancia, motor de histéresis, imanes permanentes, modelo dinámico.

ABSTRAC

The present Project presents a design and simulation of a test bench for special electronic machines, which have their protection devices and control. The research work seeks the possibility of implementing this kind of project into the labs of Politecnica Salesiana University. The system is made up of six different special systems, each of them is attached to an individual case and placed inside the metal cabinet designed for their use. This design is based in the security and protection standards, both electrical and mechanical so in case to pass any inconvenient the damage with the bench would not be a greater risk protecting the users of the work bench.

At First Chapter, there is the Problem Statement, in which is mentioned the reason of this research project. It seeks the information of similar projects and analyses if the application of this project is solvent. The research is complemented with the justification of the project and determines with theory fundamentals if it is applicable.

Into Second chapter there are the theory fundamentals where the information of each one of the motors is recollected. It helps us to know which are the characteristics of the operating principle and to get the machines' dynamic modelling to carry them to the simulation. The information also is used to understand the machines' curves behaviour at the moment to take them to simulation.

In chapter Fourth the process of design and simulation is designed, inside the simulation there are the schemas used to observe the curves' behaviour of each one of the motors. The simulations are developed with the Matlab/Simulink software trough we can see by digital how the selected motors' behaviour at chapter three will be.

The bench design is made up in AutoCAD 2D 3D. To develop the bench design is taking into account the characteristics of the motors' proportions so that in the process of making up the bench it will support the motors' behaviour.

At Fifth chapter is described each one of the obtained results' graphics, through its observation it can be detailed the machines' behaviour on its transitory state. The result of the motors varies in some cases because some manufacturers do not cite all the circuit 'parameters equivalent to the machine and it must estimate some parameters starting from de plate of the motor.

Finally, in chapter 6 a list of conclusions and recommendations that refer to the construction and design of the bench is made. Similarly with respect to the behavior and use of special machines.

Key Words: special machines, reluctance motor, hysteresis motor, permanent magnets, dynamic model.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con excepción de las máquinas eléctricas convencionales, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de mejores técnicas de control en motores eléctricos con lo cual existe una gran variedad de máquinas eléctricas, los principios de funcionamiento de las mismas son esencialmente los mismos que en las máquinas convencionales, basadas en las mismas leyes electromagnéticas. Sin embargo, estas máquinas modernas adoptan geometrías, dimensiones y características de diseño muy variadas según el papel que deban desempeñar, el objetivo de este proyecto es dar introducción a algunos tipos de máquinas eléctricas especiales. [1]

Por otra parte, existe una gran diversidad de máquinas eléctricas convencionales en los laboratorios de máquinas eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana, en esta parte se genera la necesidad de incorporar nueva maquinaria de tipo especial para este tipo de laboratorios ya que juegan un papel importante en el desarrollo técnico y práctico del estudiante, en donde carece de máquinas eléctricas especiales, a nivel industrial son más las empresas que buscan mejorar su eficiencia en producción, en donde las máquinas eléctricas especiales desempeñan un papel importante en su desarrollo, por lo cual los avances tecnológicos han desarrollado mejoras en este tipo máquinas eléctricas especiales como mayor eficiencia y durabilidad. Por tal motivo, la Universidad Politécnica Salesiana puede optar por este tipo de máquinas eléctricas especiales ya que permitirán contribuir con el desarrollo práctico y técnico del estudiante.

En base a este motivo, se busca diseñar y simular un banco de máquinas eléctricas especiales didáctico, es importante que este tipo de bancos permita realizar conexiones con diferentes elementos eléctricos de forma segura, esto haciendo uso de dispositivos de señalización, señales de iluminación, sistemas de protección, relés de sobrecarga, entre otros. Con el fin de profundizar a detalle las prácticas en motores eléctricos, este tipo de proyectos busca garantizar un mejor desarrollo de conocimiento y habilidades prácticas.

1.2. ANTECEDENTES

Existe una variedad de trabajos realizados utilizando la misma metodología para la implementación de estos tipos de proyectos tales como, “Diseño e implementación de un banco de prueba para una máquina asíncrona trifásica (motor de inducción trifásico, Rotor tipo jaula y devanado)” de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil Ecuador, para el laboratorio de máquinas eléctricas [1], el desarrollo de este tablero está basado en los tipos básicos de control de motores de arranque que se han desarrollado en los últimos años como lo son los arranques por medio de estados sólidos.

Otro de los trabajos que tiene el mismo fundamento implicado en la dilemática del problema es, “Banco didáctico para prueba de motores eléctricos bifásicos y trifásicos”, de la Universidad Católica de Colombia, para el laboratorio de electrónica [2], lo que busca este proyecto es implementar un banco de pruebas que permita interconectar los diferentes elementos de forma segura, esto teniendo en cuenta los dispositivos de protección, dando así un mejor conocimiento en la parte del desarrollo práctico en máquinas de potencia.

También se pudo analizar otro proyecto en base a la implementación de un banco de pruebas de motores eléctricos monofásicos y trifásicos, asincrónicos, de la Universidad Industrial de Santander de Colombia, por parte de la facultad de ingenierías físico- mecánicas [3], el desarrollo de este banco se basa en la implementación básica del control de motores tales como: contactores, pulsadores, protecciones industriales, luminarias indicadoras, el banco de pruebas tiene como objetivo realizar prácticas de diferentes tipos de arranque de motores eléctricos.

Un proyecto dinámico que se observó a detalle es de la Universidad Nacional Autónoma de México [4], diseño y construcción de un banco de pruebas para caracterizar motores eléctricos monofásicos de arranque de condensador, el análisis de este proyecto era buscar si tiene ciertas similitudes de arranque entre los motores monofásicos y trifásicos, detallando las especificaciones sugeridas por el cliente para tenerlas en cuenta en el proceso, con el propósito de poder realizar las configuraciones pertinentes en las variaciones de voltaje y diferentes comportamientos con el ajuste de ángulos de los motores.

Por último es un proyecto que permite analizar el “Diseño y Construcción de una plataforma didáctica con motores de inducción para pruebas de control”, de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca Ecuador, el proceso de implementación de esta plataforma didáctica es el aplicar distintas técnicas de control en máquinas eléctricas, este tipo de sistemas cuenta con dos motores de inducción acoplados mecánicamente, el eje común posee un sensor de par y un encoder para medición de posición y velocidad. [5]

1.3. JUSTIFICACIÓN

El diseño y simulación de un banco de pruebas de máquinas eléctricas especiales busca garantizar y contribuir en el desarrollo didáctico de la formación académica de los estudiantes de Ingeniería Eléctrica, el cual busca generar conocimiento y crear la posibilidad de realizar prácticas que aporten una mejor formación académica.

Además, este proyecto trata de analizar a detalle el beneficio de incorporar un banco de pruebas con estas características ya que con esto los estudiantes se pueden familiarizar con máquinas eléctricas de esta magnitud, provocando el desarrollo práctico en su formación académica.

Se busca colaborar con la Universidad Politécnica Salesiana conjuntamente con el laboratorio de Máquina Eléctricas, realizando un estudio de un diseño y simulación para

pruebas con máquinas eléctricas especiales generando una mayor infraestructura en el laboratorio de máquinas eléctricas.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- Diseñar y simular un banco de pruebas para máquinas eléctricas especiales.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información de motores eléctricos especiales, funcionamiento, características, costes, etc.
- Simular acciones de máquinas especiales a colocar en el banco de pruebas.
- Diseñar y simular el banco de pruebas identificando previamente la problemática del tema

CAPITULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.MÁQUINAS ELÉCTRICAS ESPECIALES

2.1.1. Motor de Inducción Lineal

El motor de inducción lineal es un motor de tipo asíncrono de corriente alterna (CA), este motor a diferencia de los otros motores de inducción está diseñado para poder producir un movimiento en línea recta. Este tipo de motor tiene una longitud primaria o secundaria finita lo cual implica que son máquinas que impulsan una fuerza de accionamiento lineal, mientras que en el motor de inducción convencional tiene un movimiento circular, por el desarrollo de la misma al cortarle por una generatriz [6]. Los motores de inducción lineal funcionan de igual manera que los motores rotativos, los cuales funcionan con frecuencia con una fuente de alimentación trifásica y pueden soportar altas velocidades. Este tipo de motor es menos eficiente que el motor rotativo debido a que existen efectos finales que hace que reduzca la fuerza del motor lo que hace que no sea posible instalar una caja de cambios para lograr compensar la fuerza y la velocidad del motor. Figura 1.

En este motor a diferencia de los rotativos, puede producir un efecto de levitación lo cual hace que se use de manera frecuente en lugares que se necesite la fuerza del motor, pero sin contacto, lo que su uso es para levitación magnética, propulsión lineal, actuadores lineales y para bombear metales líquidos.

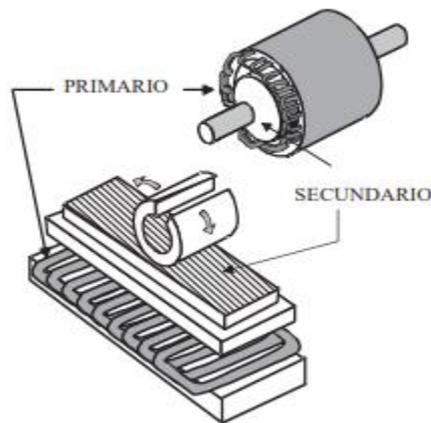


Figura 1: Génesis del motor lineal a partir del desarrollo de un motor rotativo [6].

2.1.1.1. Principio de Funcionamiento

Para entender el funcionamiento del motor lineal se presenta en la figura 2, donde se detalla que el movimiento lineal del inducido lo realiza a través de OX con una velocidad mecánica V .

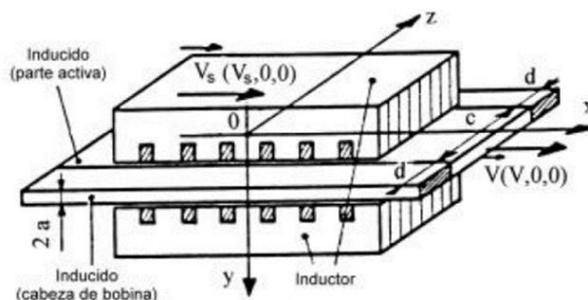


Figura 2: Parámetros principales del motor lineal. [7]

Donde:

V_s : Velocidad del campo magnético.

V : Velocidad del inducido (velocidad mecánica).

$2a$: Ancho del inducido.

c : Grosor de parte activa del inducido.

d : Grosor cabeza de la bobina. (linor)

En la dirección OZ circula una corriente de excitación la cual proviene del devanado del inductor, esto genera un campo magnético de inducción que se va dirigida hacia OY , si se realiza una correcta repartición de estos devanados mencionados y los mismos tienen una fuente de alimentación trifásica a una determinada frecuencia f , entonces esto hace que el principal campo magnético y la $f.m.m$ (fuerza magnetomotriz) se expandan hacia el eje OX ya con una velocidad lineal (V_s) con una onda deslizante [7].

El entre hierro se ve atravesado por el campo magnético del inductor, esto trae por consecuencia la formación de $f.e.m$ (fuerzas electromotrices) conjuntamente con corrientes y de éstas sale un flujo magnético deslizante. Mediante la interacción que se produce por los flujos magnéticos y las corrientes sobre él entrehierro es el que se encarga de determinar la fuerza lineal y el sentido del mismo será directamente proporcional al sentido que posee el campo magnético deslizante el cual lleva consigo una velocidad V la misma que es inferior a la velocidad de campo V_s . Todo esto da como consecuencia al resbalamiento del motor que se determina en la ecuación (1). [7]

$$S = \frac{V_s - V}{V} \quad (1)$$

Se llega a la conclusión que el principio de funcionamiento es muy similar a una máquina rotativa que posee un acople magnético asíncrono.

2.1.1.2. Modelo dinámico de la máquina.

Al iniciar el modelamiento dinámico de la máquina, se sigue un proceso de causa-efecto, el cual empieza con la energía eléctrica que entra al motor. Parte de esta energía se emplea para alimentar las pérdidas resistivas del primer devanado del motor (R_1), la energía sobrante es transformada en energía magnética para la reactancia (X_1). Al atravesar la energía por las reactancias (R_1) y (X_1), esta energía se transfiere al devanado secundario y se la usa como una caída de reactancia (X_m), esta caída de reactancia se convierte en la pérdida más importante para esta máquina debido a que depende del entrehierro del motor. La energía obtenida en el devanado secundario es usada para producir corriente sobre la placa de aluminio lo cual genera otra pérdida de resistividad sobre (R_2). La energía restante es usada para realizar trabajos mecánicos como: alimentar el movimiento, la fricción y más pérdidas llamadas misceláneas [8].

El modelamiento dinámico del motor está conformado por 2 resistencias (R_1, R_2) y 2 reactancias (X_1, X_m) y las constantes refieren a la potencia de la mecánica y la velocidad de la máquina. Para la representación final del modelado de la maquina se hace referencia la resistencia del secundario al primario, para lo cual en ese caso la relación de transformación o constante “a”, cuenta con cierto número de vueltas equivalentes en el devanado primario a diferencia de una única vuelta que formará en el devanado secundario. [8]

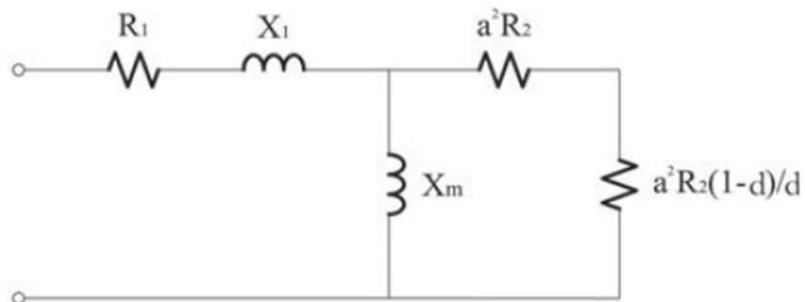


Figura 3: Modelo equivalente del motor de inducción lineal por fase [8].

Al tener el modelo equivalente del circuito del LIM, se obtiene la siguiente ecuación de voltaje donde tenemos:

$$Q = \frac{DR_r}{(L_m + L_{lp})v} \quad (2)$$

Q: factor asociado a la longitud del linor.

D: longitud del linor (m).

L_m: Inductancia mutua o de magnetización (H).

L_{lr}: Inductancia primaria de linor y primaria (H).

v: Voltaje de entrada de línea.

2.1.1.3. Aplicaciones

Existen dos grupos de aplicación para los motores de inducción lineal, según los diseños que se han presentado van según: motores lineales de baja aceleración y motores lineales de alta aceleración.

a) Motores lineales de baja aceleración:

- Tren de levitación magnética, aplicado principalmente en Japón.
- Sistemas de tránsito rápido para bombarderos.
- Modernos juegos de atracción como: montañas rusas.
- Cortadores láser.
- Robótica.

b) Motores lineales de alta aceleración:

- En aviones de guerra se usa para su despegue electromagnético, permite grandes velocidades en poco tiempo.
- Ráfagas de disparo de armas, comúnmente usado en el diseño de armas.
- Continuamente se está implementado en la propulsión de naves espaciales.
- Usado para acelerar las montañas rusas.

Sin embargo, cabe destacar que las construcciones de los motores de alta aceleración son muy dificultosas, además de demandar mucha energía [7].

2.1.2. Motor De CC De Imán Permanente

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica en un movimiento mecánico a través de medios electromagnéticos. Los motores de imán permanente usan la combinación de los campos magnéticos de la naturaleza permanente y campos magnéticos inducidos producidos por la corriente de excitación externa que fluye a través de los devanados del estator.

Este tipo de motor se puede excitar con señales eléctricas tanto continua o alterna, este motor tiene varias ventajas con respecto a los tipos de campo de devanado. En este motor no es necesario alimentar energéticamente para excitación ni para el devanado que conlleva asociado [9].

Se mejora la confiabilidad de este motor al no existir bobinas excitadoras, en el caso que falle ya no existe probabilidades que se presente una sobre velocidad debido a la pérdida del campo. El motor IP se puede utilizar en un lugar donde se requiere por completo encerrado para un ciclo de servicio de excitación continua.

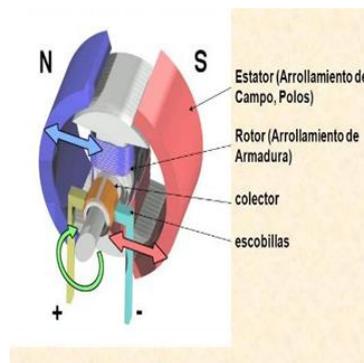


Figura 4: Esquema de motor de CC imanes permanentes [9].

En estos tipos de motores en su carcasa es donde se ubican los imanes, en este mismo lugar se encuentran las escobillas conjuntamente con su portaescobillas, estas se encargan de entregar al rotor la energía de alimentación mediante el colector y las delgas, esto permite que la corriente continua llegue a la bobina y así se genera la fuerza electromotriz [10].

Hay un motor de cc de imán permanente donde no son necesarias las escobillas, pero estas necesariamente usan diferentes tipos de conmutación, estos generalmente se usan como enfriadores de equipos de cómputo, se dividen en los siguientes:

- Motores de núcleo de hierro.
- Motores de devanado superficial.
- Motores de bobina móvil.

2.1.2.1. Tipos de Motores de CC de Imanes Permanentes

a) Motores de núcleo de hierro

A este motor se lo conoce como motor de reluctancia variable, su principal característica es que no dispone de un campo magnético fijo, es uno de los motores usados debido a que entrega poca fuerza [10].

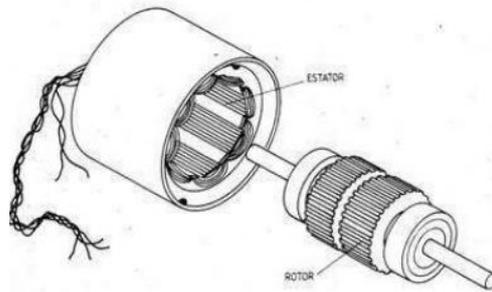


Figura 5: Motor de núcleo de hierro [10].

b) Motores de Devanado Superficial

Motor donde los conductores se encuentran fijos en la superficie del cilindro del rotor, la misma que se fabrica con discos de lámina los cuales se adhieren al motor mediante su eje. [10]

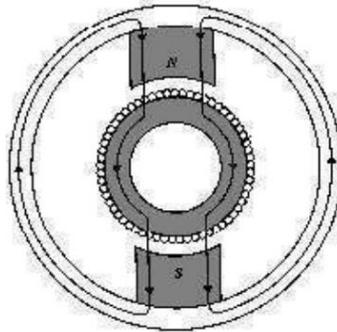


Figura 6: Motor de devanado superficial [10].

c) Motores de Bobina Móvil

Estos son diseñados con la finalidad de minimizar al máximo los momentos de inercia, de la misma manera a la inductancia de la armadura [10].

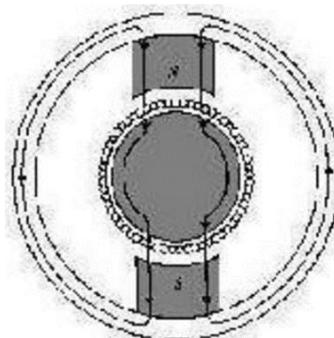


Figura 7: Motor núcleo de hierro [10].

2.1.2.2.Principio de Funcionamiento

El funcionamiento del motor PMDC tiene un funcionamiento similar al de un motor general de CC. El motor de CC tiene un conductor portador de energía que pasa por un campo magnético, este conductor experimenta una fuerza mecánica y esta fuerza tiene una dirección que es dirigida por la regla de la mano izquierda “Fleming”. En el motor CC de imán permanente, el armazón es colado dentro del campo magnético de un imán permanente y la armadura gira entorno a la dirección de la fuerza que genera la máquina. [11]

Cada uno de los conductores de la armadura experimentan la fuerza mecánica que viene dada por: $F = B * L * I$ Newton, por lo que viene dado B es la intensidad del campo magnético en Tesla, I es la corriente que fluye a través del conductor la cual viene dada en amperios y por último L es la longitud del conductor que va abajo del campo magnético en metros. Los conductores de la armadura sienten la fuerza y la acumulación de las fuerzas que producen un par que hacen que giren la armadura. [11]

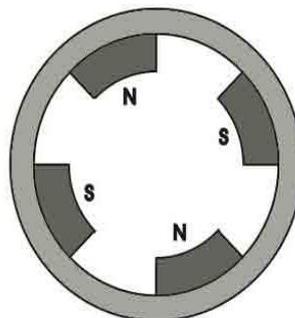


Figura 8. Armadura del motor CC de imanes permanentes. [11]

2.1.2.3. Modelo Dinámico de la Máquina

En el motor PMDC el campo se produce por el imán permanente lo cual hace posible que no exista la necesidad de graficar las bobinas de campo en el circuito la cual equivale a un motor de CC de imán permanente. El voltaje que se suministra a la armadura de esta máquina tiene una caída de resistencia de la armadura del mismo y su voltaje de suministro lo contrarresta la emf de la parte trasera del motor. [11] La ecuación que del motor viene dada por:

$$V = IR + E_b \quad V = IR + E_b + L_a \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Donde:

E_b : emf Trasero del motor.

I : Corriente de la armadura.

R : Resistencia de la armadura del motor.

L_a : Inductancia de la armadura del motor.

V : Voltaje de entrada.

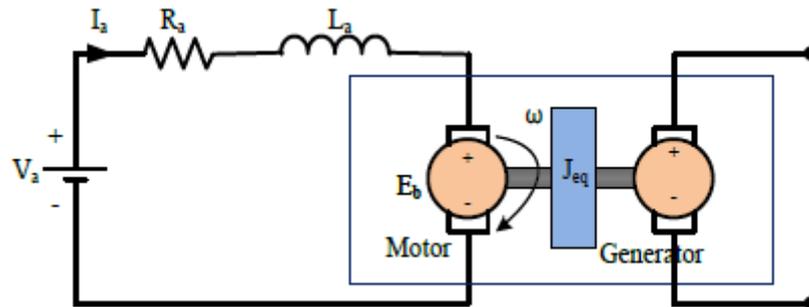


Figura 9. Circuito equivalente de un motor PMDC. [12]

Para los componentes que hacen referencia al par mecánico del motor PMDC, se aplica a partir de la segunda ley de Newton por consiguiente se tiene como resultado la siguiente ecuación: [11]

$$T_e = J_{eq} + B\omega + T_L \quad (3)$$

T_e : Torque generado

J_{eq} : Momentos de inercia polares.

$B\omega$: Constante de velocidad angular del motor .

T_L : Torque disipado por la carga.

2.1.3. Motor De Reluctancia

El motor de reluctancia es un motor para poder operar depende del par de reluctancia. El par de la reluctancia es un par inducido en un objeto de hierro en presencia de un campo magnético externo. Al hablar de reluctancia corresponde a la resistencia magnética, lo cual hace que se oponga al rotor al campo electromagnético. Este tipo de motor es de tipo ac de uso especial que se opera a una velocidad síncrona sin los devanados de campo del rotor que requieren los motores síncronos y que se pueden acelerar hasta que llegue una velocidad síncrona por sí mismo. Este motor tiene estatores tanto monofásicos como trifásicos. El motor de reluctancia conmutada permite realizar desde los accionamientos más pequeños hasta los motores más grandes. [13]

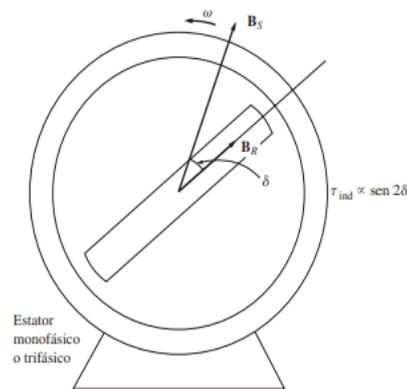


Figura 10. Concepto básico del motor de reluctancia [13].

2.1.3.1. Eficiencia Energética

Según [14] se especifica que los motores de reluctancia son muy empleados en el área de la minería, ya que permite obtener niveles de ahorro energético muy considerables en este estudio se detalla que los niveles de ahorro alcanzado bordean el rango de entre el 30% al 40% de las pérdidas todo en relación al motor y esto se debe gracias al diseño del rotor. La diferencia principal de este tipo de motor en comparación a los motores tradicionales es que en este no existen corrientes circulantes, como consecuencia no habrá pérdidas de corriente logrando tener niveles de eficacia mayores.

La ventaja más notoria en este tipo de motores es que debido a la no existencia de bobinados en el rotor, las pérdidas serán muy bajas y se compara con un motor de inducción tradicional entonces el ahorro energético será del 30%. [14].

2.1.3.2. Principio de Funcionamiento

Un eje giratorio de hierro que se apoya sobre unos dientes del rotor va orientado según un campo magnético que se produce debido a una corriente presente en los polos (4 polos) del estator, y por medio de una configuración de conmutación del campo magnético pues se logra un movimiento rotatorio del núcleo de hierro. [15]

Para entender todo es necesario conocer a que se refiere la reluctancia, y esta corresponde directamente a la resistencia magnética, esta se encarga de oponer al rotor al electromagnetismo del campo. La conmutación se realiza en las bobinas de la parte estática de la máquina y esto se lleva a cabo gracias a la implementación de electrónica de potencia que se conecta al motor, en la figura 11 se muestra el esquema de un motor de reluctancia conmutado. [15]

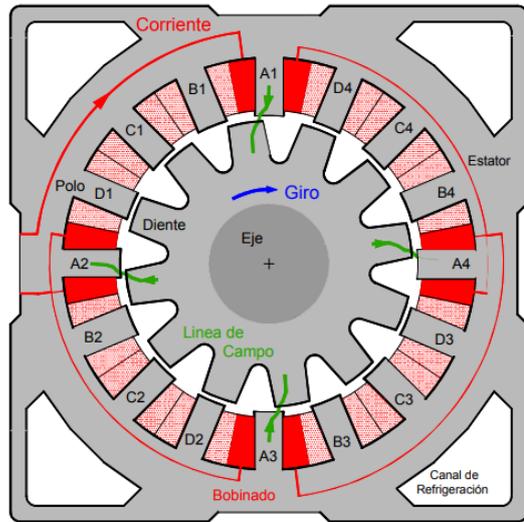


Figura 11: Motor de reluctancia Conmutado [15].

2.1.3.3. Modelo Dinámico de la Máquina

Para el modelamiento del SRM se conforma por tres elementos principales de la máquina: el modelo eléctrico, la característica del torque y el modelo mecánico. Este motor tiene una configuración en bloques don se puede observar que los voltajes son las señales de entrada del estator y las de salida son variables mecánicas. En el circuito equivalente del SRM en una sola fase del estor se lo modela con un circuito LR con una fuente de excitación $v(t)$ como se observa en la figura 12. [16]

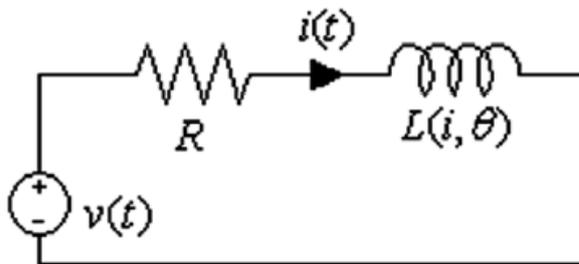


Figura 12: Circuito Equivalente para una fase de un SRM. [16]

En el análisis dinámico del motor están presentes las ecuaciones diferenciales de los elementos antes mencionados. Las ecuaciones diferenciales mecánicas que se obtienen para el modelamiento del motor se pueden describir por:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e(\theta, i) - T_m(\theta, \omega) \quad (4)$$

$$T_m(\theta, \omega) = b\omega + T_L$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

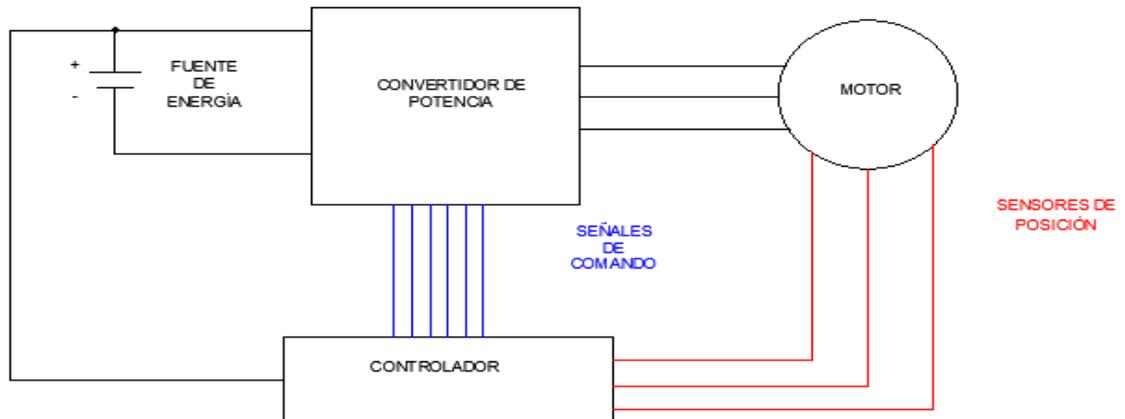


Figura 14: Controlador para un motor brushless. [17]

Como se puede observar en la figura 14, el sistema se estructura de la siguiente forma:

- Fuente de energía.
- Convertidor de potencia.
- Motor sin escobillas.
- Controlador del motor.

2.1.4.2.Fuentes de energía

Una fuente de energía es muy necesaria para el funcionamiento de un motor eléctrico para ello existen diversas formas de alimentar a un motor eléctrico como: alimentación directa por medio de una fuente de voltaje y un banco de baterías. [17]

2.1.4.3.Motores sin escobilla

Hoy en día es muy recurrente encontrar en el mercado motores de corriente continua sin escobillas (motores brushless), ya que este tipo de motores son más eficientes que los motores convencionales ganando popularidad en industrias como la automotriz, sistemas de automatización y en electrodomésticos.

La particularidad de los motores sin escobillas es que no usan escobillas para conmutar, ya que ese proceso lo hace un circuito de control en donde se realiza su conmutación electrónicamente.

Existen dos tipos de configuraciones para el estator, sinusoidal y trapezoidal. La diferencia de estas configuraciones es el modo básico del conectado de los devanados en el estator, ya que la forma del tipo de conexión de los devanados determina la forma de generación de la fuerza electromotriz. [17]

El rotor del motor brushless está compuesto por imanes permanentes que pueden variar de dos a ocho pares de polos de forma alternada de Norte y Sur.

2.1.4.4. Controladores de sistema

En los motores brushless sus devanados están distribuidos en su estator en múltiples fases, uno de los más utilizados es el motor que tiene tres fases con una separación de 120° entre ellas.

El controlador de un motor brushless debe excitar continuamente a los devanados adecuados para generar un campo magnético perpendicular a la dirección del rotor, la forma de controlar estos motores se clasifica de la siguiente manera:

- Conmutación Sinusoidal.
- Conmutación Trapezoidal.
- Control vectorial o control de campo orientado por sus siglas FOC (Field Oriented Control).

Este tipo de formas señaladas tienen como objetivo estimar la excitación óptima de cada una de las fases del motor.

Los controladores deben poseer las siguientes características:

- PWM para el control de velocidad del motor.
- Sistema para conmutar el motor.
- Procedimiento para detección de posición del rotor.



Figura 15: Controlador DC para un motor blcd. [18]

2.1.4.5. Modelado matemático de motor sin escobillas BLDC

El modelado matemático para un motor brushless se basa en el modelo implementado en el software Matlab/Simulink tomando en cuenta las variables específicas del motor. [19]

Los voltajes a través de los devanados del estator están definidos por:

$$\begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\phi a}{dt} \\ \frac{d\phi b}{dt} \\ \frac{d\phi c}{dt} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde:

- va , vb y vc son los voltajes externos aplicados en las 3 conexiones del motor eléctrico.
- Rs es la resistencia equivalente de cada devanado del estator.
- ia , ib y ic son las corrientes que fluyen en el devanado del estator.
- $\frac{d\phi a}{dt}$, $\frac{d\phi b}{dt}$ y $\frac{d\phi c}{dt}$ son las tasas de cambio del flujo magnético en cada devanado del estator.

El flujo total está definido por:

$$\begin{bmatrix} \phi a \\ \phi b \\ \phi c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Laa & Lab & Lac \\ Lba & Lbb & Lbc \\ Lca & Lcb & Lc \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi am \\ \phi bm \\ \phi cm \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde:

- ϕa , ϕb y ϕc son los flujos totales que unen cada devanado del estator.
- Laa , Lbb y Lcc son autoinductancias de los devanados del estator.
- Lab , Lac y Lba , etc son inductancias mutuas de los devanados del estator.

- $\varphi_{am}, \varphi_{bm}$ y φ_{cm} son flujos magnéticos permanentes que unen los devanados del estator.

Las ecuaciones definidas de voltaje y torque para los bloques a utilizar son:

$$\begin{bmatrix} vd \\ vq \\ v0 \end{bmatrix} = P \left(\begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix} - N\omega \begin{bmatrix} \frac{d\varphi_{am}}{d\theta r} \\ \frac{d\varphi_{bm}}{d\theta r} \\ \frac{d\varphi_{cm}}{d\theta r} \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

$$vd = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - N\omega i_q L_q \quad (9)$$

$$vq = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - N\omega i_d L_d \quad (10)$$

$$v0 = R_s i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} \quad (11)$$

$$T = \frac{3}{2} N (i_q i_d L_d - i_d i_q L_q) + [i_a \quad i_b \quad i_c] \begin{bmatrix} \frac{d\varphi_{am}}{d\theta r} \\ \frac{d\varphi_{bm}}{d\theta r} \\ \frac{d\varphi_{cm}}{d\theta r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos(\theta_e - 2\pi/3) & \cos(\theta_e + 2\pi/3) \\ -\sin\theta_e & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Donde:

- vd, vq y $v0$ son los voltajes del eje d, del eje q y de secuencia cero.
- P es la transformación de Park.
- N es el número de pares de polos de imanes permanentes del rotor.
- ω es la velocidad de rotación mecánica del rotor.
- $\frac{d\varphi_{am}}{d\theta r}, \frac{d\varphi_{bm}}{d\theta r}$ y $\frac{d\varphi_{cm}}{d\theta r}$ son las derivadas parciales de flujo magnético permanente instantáneo que une cada devanado de fase.
- i_d, i_q y i_0 son las corrientes del eje d, del eje q y de secuencia cero.

- $L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2}L_m$ es la inductancia del eje d del estator.
- $L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2}L_m$ es la inductancia del eje q del estator.
- $L_0 = L_s - 2M_s$ es la inductancia de secuencia cero del estator.
- T es el par del rotor, el par fluye desde la carcasa del motor.

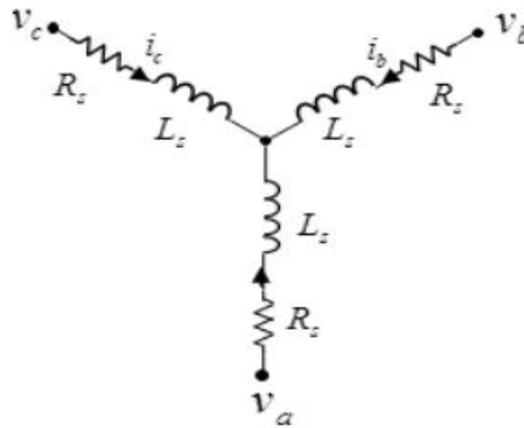


Figura 16: Circuito eléctrico equivalente para los devanados del estator. [19]

2.1.5. Motores Paso a Paso

Los motores paso a paso, son dispositivos electromecánicos que convierten una entrada de pulsos digitales a movimientos discretos e incrementales. Fueron creados por la necesidad de producir un desplazamiento angular definido y mantener su posición frente a un torque aplicado al eje. [20]

2.1.5.1. Características básicas de los motores paso a paso

Una de las principales características de los motores paso a paso, es su capacidad de avanzar por pasos. Los pasos de rotación son producto de un pulso de entrada y se refiere un incremento angular constante en la posición del rotor. Este tipo de motores es capaz de mantener su posición, avanzar o retroceder un número determinado de pasos, como también girar a una velocidad proporcional a la frecuencia de los pulsos de entrada, siempre como una sucesión de avances discretos o pasos. [20]

Los motores paso a paso competitivamente son de bajo costo, robustos, de rápida aceleración y respuesta. Una de las ventajas más significativas de los motores paso a paso con respecto a otros motores es su capacidad de poder ser controlado con precisión con un esquema de control de lazo abierto, por su otra parte los problemas típicos que presentan estos motores es su resonancia a altas velocidades. [20]

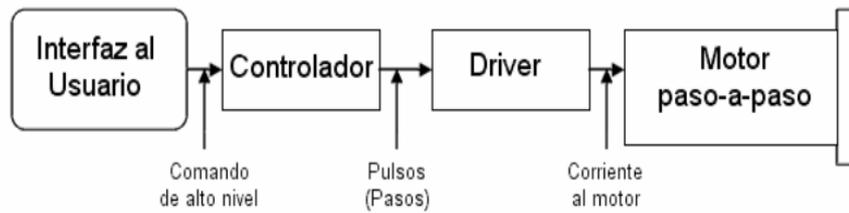


Figura 17: Sistema de motor paso a paso. [20]

2.1.5.2. Tipos de motores paso a paso

Los tres tipos básicos de motores paso a paso son el motor de reluctancia variable, el motor de imán permanente y el motor híbrido, que resulta de una combinación de los dos anteriores. En todos ellos, sólo en el estator existen bobinas. El estator está formado por una serie de polos inductores rodeados por sus devanados de excitación, y puede ser de un número variable de fases. El rotor en cambio puede ser de acero laminado, o bien ser un imán de magnetización permanente, según el tipo de motor. [21]

2.1.5.3. Principio de Funcionamiento

Principalmente consiste en una alimentación en secuencias para cada bobina interior (4 bobinas), este tipo de motores dispone de terminales los cuales son cinco, uno de ellos es el terminal común y es ahí donde se conecta a $+24\text{ V}$, siempre se debe considerar que un terminal debe estar directamente conectado a tierra, mientras que los demás deben estar conectados a $+24\text{ V}$ manteniendo un orden adecuado en la rotación. [21]

Cada vez que exista un cambio en el terminal que va directamente a tierra se dará un giro en el motor o como bien se conoce a estos, dará un paso, gracias a su óptimo sistema de rotación los giros o pasos que da el motor serán de manera muy suave, lo que es muy necesario en muchas de sus aplicaciones, un punto negativo que tiene el motor paso a paso es que su fuerza neta es muy baja justamente debida a la suavidad con que este trabaja. [21]

2.1.5.4. Aplicaciones

Las áreas de aplicación que permite el motor paso a paso son diversas, pero se va más influenciado en los siguientes ámbitos:

- Robótica
- Sistemas de control y automatización.
- Industria alimenticia.

- Industria textil.
- Empaquetado y embalaje.

2.1.5.5. Modelo Dinámico de un motor paso a paso

El modelo de motor paso a paso consta de secciones eléctricas y mecánicas. La sección eléctrica está representada por un circuito equivalente, cuya configuración depende del tipo de motor. Los circuitos equivalentes suponen que el circuito magnético es lineal (sin saturación) y que la inductancia mutua entre fases es insignificante. La sección mecánica está representada por un modelo de espacio de estado basado en el momento de inercia y el coeficiente de fricción viscoso. [22]

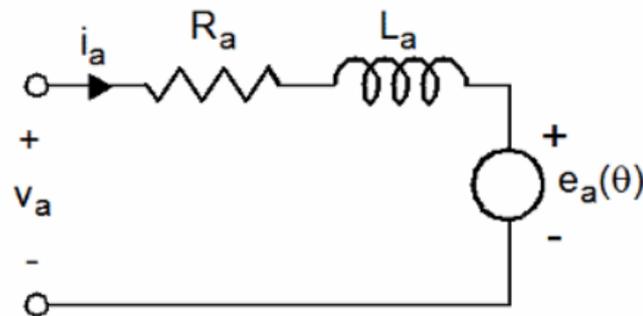


Figura 18: Circuito equivalente de imanes permanentes o motor paso a paso híbrido. [22]

En este modelo, R_a y L_a , respectivamente, representan la resistencia y la inductancia del devanado de fase A. Debido al gran valor del entrehierro introducido por los imanes, la inductancia del devanado del motor paso a paso híbrido o imanes permanentes puede considerarse independiente de la posición del rotor. La fuente de tensión $e_a(\theta)$ representa la fuerza contraelectromotriz (EMF) del motor, que es una función sinusoidal de la posición del rotor: [22]

$$e_a(\theta) = -p\phi_m \sin(p\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (14)$$

Donde

- p es el número de pares de polos. El número de pares de polos p viene dado por $p = N_r/2$.
- ϕ_m es el flujo magnético máximo del motor.

Tenga en cuenta que en la posición de referencia ($\theta = 0$), el polo norte del rotor está completamente alineado con el polo del eje A para lograr el valor cero de la fuerza contraelectromotriz de la fase A.

El par electromagnético producido por un motor paso a paso híbrido o de imanes permanentes bifásico es igual a la suma del par resultante de la

interacción de las corrientes de fase y los flujos magnéticos creados por los imanes y el par de retención, que resulta de la prominencia del rotor:

$$T_e = -p\phi_m i_a \sin(p\theta) - p\phi_m i_b \sin(p\theta - \pi/2) - T_{dm} \sin(mNr\theta) \quad (15)$$

Donde:

- m es el número de fase (m=2) del motor.
- Nr el número de dientes del rotor (Nr = 2*p).

2.1.6. Motores De Histéresis

El motor de histéresis con el cual se utiliza el fenómeno de las histéresis para lograr producir un par mecánico. El rotor de un motor de histéresis se compara con un cilindro liso de material magnético desdentado, sin protuberancias ni devanados.

El estator del motor puede ser monofásico o trifásico, para el primer caso se debe usar un capacitor permanente con un devanado auxiliar para poder suministrar un campo magnético tan uniforme como sea posible, ya que de esa forma se reduce en gran medida las pérdidas del motor. [23]

En los motores de histéresis son de igual forma que los de reluctancia ya que son de corriente alterna de uso especial que se pueden operar a una velocidad síncrona sin los devanados de campo del rotor que requieren los motores síncronos y se puede llegar a acelerar hasta llegar a una velocidad síncrona.

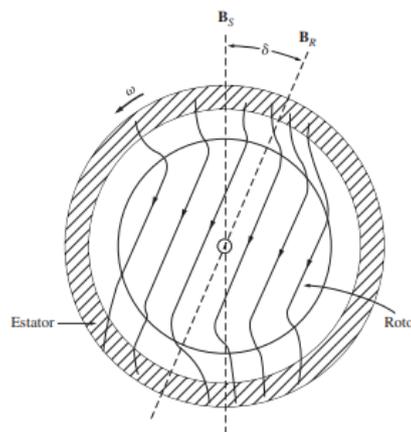


Figura 19: Motor de histéresis principales aplicaciones. [23]

2.1.6.1. Principio de Funcionamiento

Dispone de dos condiciones que se explicarán a continuación, sin embargo, en síntesis, el motor de histéresis se pone en marcha como un motor

monofásico de inducción y su funcionalidad se compara como la de un motor síncrono.

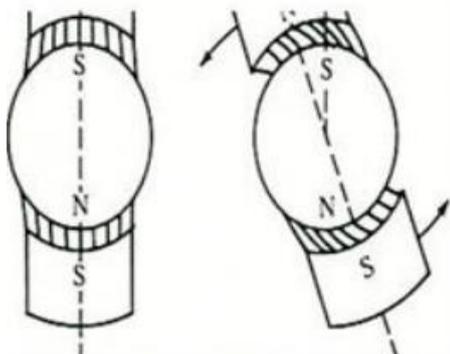


Figura 20: Rotación de los imanes estáticos. [24]

2.1.6.2. Condición Inicial

Al alimentar con corriente alterna directamente al estator se produce un campo magnético en los devanados principales y de igual manera en los devanados secundarios del motor, los rotores del motor empiezan generando un par de corrientes parásitas para finalmente alcanzar la histéresis, una vez alcanzada la histéresis el rotor sincroniza con el estator y esto hace que la corriente parásita sea cero. [25]

2.1.6.3. Condición de Funcionamiento en Estado Estable

Cuando el motor se encuentra trabajando de manera sincronizada el estator se encarga de inducir polos hacia el rotor donde la histéresis producida en el motor hará que existe un retraso de flujos es decir que el flujo del rotor quede retraso respecto al flujo del estator con un ángulo α (ángulo entre campos magnéticos de estator y rotor), por lo tanto se ve atraído el rotor hacia el estator giratorio mediante el par de histéresis, hay que recalcar que este no es directamente proporcional a la velocidad del rotor es decir que al existir más cantidad de magnetismo residual habrá más par de histéresis. [25]

2.1.6.4. Pérdida de Potencia por Histéresis

La pérdida que existe en el motor debido a la histéresis viene dada por la siguiente ecuación: [25]

Donde:

$$P_h = k_h f_r B_{max}^n \quad (16)$$

P_h : Pérdida por histéresis. (W)

k_h : Constante de histéresis.

f_r : Frecuencia de inversión de flujo en el rotor. (Hz)

B_{max}^n : Valor máximo de densidad de flujo en el espacio de aire. (T)

2.2. BANCO DE PRUEBAS

2.2.1. Definición De Banco De Pruebas

Un banco de pruebas es un equipo para trabajar en un laboratorio, es un prototipo experimental desarrollado como tablero de prácticas para las conexiones de diferentes máquinas y sistemas complejos que se planteen en el mismo.

Según lo investigado y manifestado de acuerdo al laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana y en términos investigativos la compañía italiana DE LORENZO [26], un prototipo de banco de pruebas ofrece una mayor proyección a prácticas y aplicaciones favorables para el desarrollo práctico del estudiante.

El prototipo de banco de pruebas es modular y se puede configurar para cualquier tipo de máquina que se requiera utilizar para una práctica, la misa que se deriva de los siguientes componentes como, instrumentos eléctricos y mecánicos, fuentes de alimentación y el freno electromagnético para las características de cada motor a ser estudiado.

Entonces un prototipo de banco de pruebas tiene que dar una fiabilidad y confiabilidad buena ya que estará expuesta al uso de estudiantes en formación, con esto se efectuará diferentes pruebas de uso del mismo, el banco debe ser capaz de desarrollar un funcionamiento óptimo en operaciones de los motores eléctricos especiales.

2.2.2. Diseño De Banco De Pruebas

Existen varios tipos de bancos de pruebas para motores eléctricos, uno de los cuales se ha investigado y cumplido con algunas características de proyecto es el entrenador de tecnología de motores de CA y CC CEM-301 [27], en donde el mismo está diseñado para cumplir con la operación de varias máquinas eléctricas, cubriendo un amplio desarrollo en motores eléctricos.



Figura 21: Banco de pruebas de motores eléctricos [27].

2.2.3. Experimentos

Para el desarrollo de experimentos en el banco de pruebas, se pueden evaluar los siguientes procesos:

- Medición de la resistencia de los devanados.
- Pérdidas sin carga.
- Eficiencia convencional.
- Prueba directa con freno electromagnético.
- Característica electromecánica.

2.2.4. Ensayos De Investigación

Su desarrollo será efectuado a medida investigativa, permitiendo establecer un diseño y simulación de un banco de pruebas que cumplan con las normativas establecidas con anterioridad, para ello se tiene que analizar algunos aspectos de los diferentes bancos de pruebas que existen.

Por el mismo se tiene que investigar los puntos a evaluar para determinar un debido banco de pruebas, ya que esto permitirá optimizar tiempo en el proceso de desarrollo de la implementación de este proyecto.

2.2.5. Características De Bancos De Pruebas

Los diferentes tipos de bancos de pruebas que existen deben considerar algunos aspectos generales en su diseño los cuales son:

1. Una cimentación que absorba las vibraciones que se producen debido a la existencia en el motor de fuerzas de inercia no equilibradas y de los correspondientes momentos resultantes.
2. Una bancada, cuya misión es soportar el motor.
3. Soportes para montar y fijar el motor en la bancada, así como regular la altura y alinear el motor con el freno.
4. Sistema de alimentación.
5. Cuando el banco se instala en una habitación aislada se habla de una celda o cabina de ensayo de motores, en este caso existe un pupitre de instrumentos en el exterior de la celda con los órganos de puesta en marcha, así como los instrumentos de control y registro [28].

2.3. NORMAS

Los estándares inadecuados de seguridad y salud y los peligros ambientales son particularmente evidentes en el caso del sector industrial. Los trabajadores del sector industrial no cuentan con la conciencia, los medios técnicos y los recursos necesarios para implementar medidas de salud y seguridad. Por ello, es imprescindible la conformación de entidades que establezcan normas necesarias para garantizar la protección de la salud y el bienestar de los trabajadores del sector industrial.

La conformación de estas entidades en todos los países motiva a una productividad de los trabajadores en los diferentes sectores, combinando de manera efectiva los servicios para permitir que las microempresas aumenten sus ingresos y servicios para ayudar a los trabajadores a proteger su salud y mejorar sus condiciones de trabajo. En Ecuador, la entidad encargada de garantizar la integridad de sus trabajadores es el IESS (Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social).

2.3.1. Seguridad y Salud de los Trabajadores y Mejoramiento del Medio Ambiente de Trabajo.

La gestión de la seguridad, salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente representa una de las principales estrategias de gestión para mejorar la productividad de las empresas en los países industrializados en las últimas décadas. Los principios de esta filosofía de gestión se han utilizado en la gestión de la salud y la seguridad (H&S) en la industria durante muchos años.

En [29] se expone el reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo, se enumeran varias normas que serán aplicados a cualquier actividad laboral y en cualquier lugar de trabajo siempre con la finalidad de prevenir todo tipo de riesgo laboral. Este reglamento es ecuatoriano y emitido por el IESS, entre los artículos más relevantes se

destaca el Art.29 que habla en específico de plataformas fijas y móviles, donde se detalla que su construcción debe ser con materiales sólidos y su estructura debe ser diseñada para soportar más del peso necesario para las maniobras de los trabajadores y el Art. 96, que menciona que las piezas sobresalientes de partes móviles así mismo de los elementos de transmisión, se deberán proteger de manera que no perjudiquen a las maniobras de los operadores y trabajadores, garantizando que no exista riesgo para el usuario

Como la gestión de la calidad total se centra en los productos y servicios que cumplen con ciertas especificaciones y expectativas del cliente, el control interno abarca el dominio de la salud, el medio ambiente y la seguridad.

2.3.2. Regulaciones para Motores y Armario Eléctricos

Durante los últimos cinco años, la industria de motores eléctricos ha participado activamente en proyectos de investigación y desarrollo destinados a aumentar la eficiencia de los motores durante toda su vida útil. De este modo, también han surgido una gran cantidad de normativas y regulaciones para la fabricación de motores eléctricos, y estos están ligados para proporcionar calidad, eficacia y ahorro energético, siempre buscando el menor impacto ambiental posible.

WEG Motores en su página web indican las normativas a las que se rigen en su producción siendo las siguientes:

- IEC (60034-30-1).
- NEMA (MG1).
- AS/NZS (1359.5).
- ABNT (NBR 17094-1).
- CNS (GB 18613) [30].

Cada país tiene se rige a una normativa en particular, Ecuador trabaja bajo la normativa IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) que establece términos y medidas internacionales comunes para las "clasificaciones de aparatos y maquinaria eléctricos", incluyendo magnetismo, electroacústica, multimedia, telecomunicaciones y todas las formas de producción y distribución de energía [30].

Por otro lado, con respecto a las normativas para armarios eléctricos que se manejan en Ecuador se tiene: la IEC 60529 y la NEMA 250. La primera hace referencia a la protección del armario, existe un término conocido como protección IP que otorga información para evitar el exceso de humedad y polvo en el armario, además, de la protección del personal y de las herramientas de este. La segunda, es similar a la primera, no obstante, el nivel de detalle descrito es mejor, ya que, otorga criterios para la construcción, rendimiento y pruebas [31]. Cualquiera de estas normativas puede ser aplicada para los armarios

eléctricos en Ecuador, dependerá del profesional a cargo del proyecto decantarse por una de estas.

2.4.RIESGOS

Primero se debe determinar a qué se refiere los riesgos laborales, el Instrumento Andino de Seguridad en el Trabajo dice que el riesgo es la probabilidad exista una lesión o enfermedad, debido a factores ambientales peligrosos en el trabajo. En la industria existe un 8% de accidentes directamente relacionados con la maquinaria utilizada en su producción, y de aquí se puede determinar los siguientes tipos de riesgo que se asocian a la maquinaria industrial. [32]- [33]

2.4.1. Riesgos Mecánicos

Son riesgos muy graves que pueden llegar a consecuencias fatales tales como: mutilaciones del cuerpo humano, lesiones fuertes e inclusive se puede ocasionar la muerte. Existen dos tipos de riesgos mecánicos muy comunes: [34]

- **Por Contacto:** Debido a un descuido del operario o debido a la existencia de alguna falla de la máquina que ocasiona que esta golpee al operario.
- **Por Proyecciones:** Existe momentos en los cuales la maquinaria desprende objetos de ella ya sea por falta de reajuste de la misma (mantenimiento), o incluso cuando los mismos operarios olvidan herramientas dentro a la máquina y al ponerla en marcha estas salen proyectadas y llegan a colisionar con los trabajadores. [35]

Por todo esto se ha incrementado la seguridad del ambiente laboral y la protección de los trabajadores mediante la realización de las siguientes acciones preventivas como, la protección y encubrimiento de partes (móviles) que pueden ser proyectadas hacia los trabajadores, el mantenimiento continuo de la maquinaria, la delimitación el área de trabajo para evitar los accidentes por contacto, la capacitación constante de los operarios y la señalética adecuada para cada área de trabajo [36].

2.4.2. Riesgos Eléctricos

Actualmente, la forma de energía más común en la sociedad industrial es la electricidad, fundamentalmente por su facilidad de transporte y transformación en otras formas de energía. Sin embargo, en situaciones específicas, la electricidad puede suponer un riesgo para la seguridad de las personas, ya que, por sus características, la electricidad es algo que no tiene un olor particular y no se ve. De esta manera, es necesario comprender qué reglas deben implementarse para minimizar los riesgos eléctricos presentes en las ocupaciones que involucran electricidad [37]. Los riesgos que se pueden presentar al trabajar con electricidad son los siguientes:

- **Electrocución:** Se produce por el contacto del operario con partes energizadas descubiertas o mal des energizadas.
- **Explosiones o incendios:** Por mal ubicación de materiales secos que pueden llegar a tener contacto con la energía y provocar accidentes graves.
- **Quemaduras:** Se producen por la mala o inadecuada interacción del operario con los equipamientos que producen arcos eléctricos que alcanzan al contacto con el trabajador provocando quemaduras graves al operario.
- **Caídas:** Por consecuencia a los choques eléctricos los cuales perturban a los operarios y producen caídas de gran altura. [37]

La ejecución de trabajos en tensión es un proceso complejo y de grandes requerimientos organizativos. Implica la interacción de todos los actores del proceso, desde su inicio hasta su conclusión y, por eso mismo, existe una gran necesidad de determinar las reglas de seguridad que son cruciales para minimizar la ocurrencia de accidentes relacionados con este peligro. Entre estas se encuentran, el uso de herramientas adecuadas con alto índice dieléctrico, el cumplimiento estricto de la normativa vigente para cada tipo de trabajo eléctrico, el respeto de las reglas de oro para trabajo en el área de la electricidad, la información y capacitación constante de los operarios y por último la manipulación eficiente de los equipos y herramientas.

2.4.3. Riesgo Térmico

Los riesgos térmicos están directamente relacionados a la temperatura, y se dan por contacto directo con partes calientes o a la exposición directa a lugares con altas temperaturas. De igual manera existen algunos tipos de riesgo térmico común. [38]

- **Evaporación:** Se produce al contacto del operario en zonas de trabajo donde el agua utilizada para la refrigeración de la maquinaria cambia su estado líquido a vapor el cual sale a altas temperaturas y a grandes distancias, pudiendo impactar a los trabajadores ocasionando consecuencias graves.
- **Punto Caliente:** En toda maquinaria existen puntos con alta temperatura, el riesgo se da al momento que un operario tiene contacto directo con estas zonas de la máquina, las cuales no poseen una correcta advertencia de seguridad, provocando quemaduras graves al operario afectado.
- **Radiación:** Este riesgo se debe más a la exposición continua del trabajador a la radiación solar debido a su jornada de trabajo, sin embargo, esto trae consecuencias graves para la salud de la piel del trabajador.

Para todo esto existen unas acciones correctivas necesarias con la finalidad de tratar de reducir al máximo estos riesgos laborales, entre estas, se tiene la señalización adecuadamente zonas específicas con altas temperaturas, el mejoramiento de la canalización de desfuegos de vapor y adecuar el equipamiento personal de los trabajadores que se ven expuestos a radiación solar [38].

2.4.4. Riesgo Producido por el Ruido

Una continua exposición a niveles altos de ruido tiende a provocar consecuencias graves con el pasar del tiempo, por lo general las afectaciones más grandes son la sordera profesional, esto también influye en el rendimiento de los trabajadores, ya que una constante afectación del ruido provoca accidentes por falta de concentración. [5]

Para este tipo de riesgo solo se puede recomendar las siguientes acciones preventivas: entregar a los operarios el equipamiento de más alta calidad, que los taponos de oídos deben soportar los ruidos a los que se van a exponer los trabajadores y controlar el tiempo al que se someten los trabajadores al ruido extremo [33].

2.4.5. Riesgos Producidos por las Vibraciones

Por lo general las vibraciones se producen en las maquinarias las cuales no fueron correctamente calibradas o inclusive llevan tiempo sin mantenimiento, estas vibraciones llegan a los operarios mediante el contacto con medio sólido que está amortiguando la energía u onda de intensidad que se produce en la máquina, las consecuencias que esta produce es que puede llegar a generar un golpe fuerte hacia los operarios, o a su vez, puede dejar inestables zonas de trabajo donde pueden tener accidentes de caídas los trabajadores. [38]

Para esto existen unos simples consejos para minimizar al máximo los accidentes por este tipo de riesgo: calibrar correctamente los equipos y maquinarias, según la normativa adecuada, llevar a cabo mantenimientos periódicos y verificar los reajustes de piezas continuamente.

2.5. PROTECCIONES ELÉCTRICAS

En un sistema de generación y distribución de energía eléctrica, la seguridad del suministro tiene un valor considerable para el cliente. Posiblemente, la mayor amenaza para esta seguridad es una falla de cortocircuito, que impone un cambio repentino y, a veces, violento en el sistema de energía. La gran corriente que puede fluir en condiciones de falla puede provocar la liberación localizada de una cantidad considerable de energía, lo que posiblemente provoque un incendio en el lugar de la

falla y daños mecánicos en todo el sistema, en particular en los devanados del transformador y de la máquina [39].

Para reducir el riesgo de daños debido a fallas de cortocircuito, se utiliza equipo de protección para detectar e iniciar la eliminación de fallas del sistema de energía AC. Los disparos y fusibles se usan comúnmente en voltajes de distribución más bajos, pero los relés de protección se usan ampliamente para funciones de protección importantes, junto con interruptores automáticos. Muchas condiciones de operación diferentes ocurren dentro de los sistemas de potencia y, por lo tanto, para brindar una protección óptima, se necesitan muchos tipos diferentes de interruptores, cada uno de los cuales responde a diferentes cantidades del sistema de potencia [40]. Uno de estos es el interruptor termomagnético, que limita el paso de corriente al sistema, mediante una combinación térmica y magnética, donde, la parte térmica cuida a la máquina ante sobrecargas, mientras que la parte magnética cuida a la máquina ante cortocircuitos [41].

Estos interruptores producen una curva de desconexión la cual va a depender del relé y del uso que le den a la protección esto se presenta en la Tabla 1.

CURVA	B	C	D	Z
Térmica	1.1-1.4	1.13- 1.44	1.1-1.4	1.1-1.4
Magnética	3-5 o 3.2- 4.8	5-10 o 7-10	10-14	2.4-3.6
Uso	Viviendas	Motores	Transformadores	Receptores electrónicos

Tabla 1: Curva de desconexión de interruptores termomagnéticos. [41]

2.6. MODELOS DE BANCOS DE PRUEBAS.

2.6.1. EEM 3.3-3 Motor de Inducción Monofásico con Bobinado Inicial Bifilar de 300W – Lucas Nuelle.

Este modelo de pruebas está constituido principalmente por un motor de inducción monofásico con bobinado de arranque bifilar de 300 Watts, a este sistema se acopla un programa computacional, manuales y una serie de información necesaria para el conocimiento sobre el motor y los componentes conjuntamente con la realización de las pruebas necesarias.

Este modelo tiene la facilidad de realizar pruebas inclusive a accionamientos y máquinas eléctricas gracias a que dispone de un servo máquina, la cual puede analizar equipos y maquinarias eléctricas, su controlador tiene la funcionalidad

de ser estático y dinámico es decir que se analiza los equipamientos ya sea en movimiento o quietos en su totalidad, además, tiene la capacidad de resistir hasta 4000 rpm y una fuerza máxima de 10 Nm gracias a su servo freno asíncrono auto enfriado. El programa Active Servo permite registrar cada dato obtenido con la finalidad de realizar las pruebas necesarias, indicando los puntos móviles y estáticos de funcionalidad. [42], [43]

En la Figura 22 se ilustra el modelo de banco de pruebas en estudio.



Figura 22: EEM 3.3-3 Motor de Inducción Monofásico con Bobinado Inicial Bifilar de 300W. [42]

2.6.2. Banco de Ensayos Modular BEM199 – AlecopGroup

Este banco de pruebas tiene la facilidad de ser usado con diferentes configuraciones dependiendo las pruebas a realizar, ya que se basa en un sistema escalable el cual permite una amplia compatibilidad con elementos convencionales, este banco se constituye de un motor a inducción de 800 Watts el mismo tiene doble funcionalidad en el sistema el primero es que puede funcionar como motor de arranque del sistema o su segunda funcionalidad es la de frenado del mismo, DIANA es su programa computacional el cual es amigable con el usuario y es de suma ayuda al momento de realizar simulaciones, análisis y creación de informes, es la figura 23 se especifica el banco en estudio. [44]



Figura 23: Banco de Ensayos Modular BEM199 – AlecopGroup. [44]

2.6.3. Sistema de Entrenamiento Electromecánico de 2kW Modelo 8013 – LabVolt

Este sistema consta de varios módulos el cual se puede agrupar de tres diferentes alternativas, esto se realiza dependiendo de las necesidades de las pruebas a realizar ya que cada configuración puede entregar diferentes valores de generación, consumo y uso de energía eléctrica. Una gran ventaja de este banco de pruebas es que este puede funcionar con diferentes tipos de máquinas eléctricas siempre y cuando sean de 2kW, en este banco, además, se puede realizar pruebas con motores de jaula de ardilla a cuatro polos, estos se pueden agregar mediante los acoples necesarios siempre y cuando el sistema en general no tenga vibraciones, en la Figura 24 se detalla este banco de pruebas. [45]



Figura 24: Diseño del sistema de suministro de energía eléctrica para el Laboratorio de Control y Operación de Máquinas Eléctricas. [45]

2.6.4. AEL-ACINA Aplicaciones de Motores Trifásicos de Inducción Trifásicos de Jaula de Ardilla - Edibon

Este sistema consta de un motor trifásico asíncrono de jaula de ardilla y su módulo EMT7, el cual es capaz de emular el funcionamiento de máquinas eléctricas en el campo industrial, con esto se puede llevar a cabo el estudio a fondo de los elementos de control de un motor a inducción, su ilustración gráfica se describe en la Figura 25. [46]



Figura 25: AEL-ACINA + RACKS. [46]

2.6.5. Plataforma de Ensayos de Sistemas de Protección Utilizando Ieds de la Universidad Politécnica Salesiana.

Este proyecto se basa en el diseño de un tablero de pruebas para pruebas de dispositivos electrónicos inteligentes Ied's de control y protección, que será utilizado en la Universidad Politécnica Salesiana para realizar las pruebas de los dispositivos que posee la institución. El diseño del tablero consta del diseño físico y diseño eléctrico en lo que se detallan los elementos que se compone los tableros para asegurar su correcto funcionamiento y los ensayos que se ejecuten en el tablero como se muestra en la figura 26. [47]



Figura 26: Tablero de pruebas para pruebas de dispositivos electrónicos inteligentes led's de control y protección de la Universidad Politécnica Salesiana. [fuente: Plataforma de pruebas de la UPS]

2.6.6. Plataforma Didáctica Con Motores De Inducción Para Pruebas De Control.

Este proyecto presenta la implementación de una plataforma como se observa en la figura 27, en la cual se pueda aplicar distintas técnicas de control de máquinas eléctricas, en lo que la plataforma consta de dos de motores de inducción que están acoplados mecánicamente, el eje común posee un sensor de par y un encoder para la medición de posición y velocidad. Los motores están acoplados a un armario de metal para poder colocar los elementos de control y potencia. El proyecto está construido en base a las normas de protección tanto mecánicas como eléctricas, con el fin de brindar seguridad y confiabilidad a los usuarios que realicen las pruebas en la plataforma. [5]



Figura 27: Ensamblaje de motores de inducción acoplados. [Fuente: Banco de pruebas de la UPS]

CAPITULO III

3. COMPONENTES

A continuación, se definirá los equipos y elementos que serán necesarios para la implementación del banco de pruebas de máquinas especiales, para esto se debe garantizar el diseño de una plataforma la cual debe cumplir las características que nos permitan realizar la prueba de las máquinas descritas anteriormente.

Dentro de los componentes se debe considerar los elementos con los cuales se incorporará el sistema de control y el circuito de potencia, para que de esta manera operen las máquinas de manera correcta y tener un mejor rendimiento de los mismos.

3.1. TIPO DE MOTORES EN EL MERCADO SELECCIONADOS

3.1.1. Motor de Inducción Lineal.

El motor seleccionado es fabricado por la empresa H2W Tech, es un motor de inducción lineal usado para movimientos de gran velocidad, su modelo es el LMA-06-062 el cual se adapta para los fines educativos que se requiere. Este tipo de motor requiere alimentación tipo AC trifásica de 380 volts. Este motor tiene una fuerza de atracción entre el ensamblaje de la bobina y el acero en la placa de la reacción únicamente cuando se energiza la a la placa de la bobina. Véase figura 28.

La velocidad de accionamiento de este motor puede ser controlada al ajustar la frecuencia de entrada o al conectarse directamente con un controlador de velocidad trifásico, la conexión del motor debe estar conectada con un sistema de cojinetes para mantener su corriente en el entrehierro. Es capaz de alcanzar una velocidad de 45 m/s en lo que se puede aplicar en lugares donde no tenga una posición fija. [48]



Figura 28: Modelo de motor de inducción lineal H2W Tech. [48]

3.1.2. Motor de C.C. de Imanes Permanentes

Para el motor de C.C. de imanes permanentes se utiliza un motor fabricado por la empresa VEVOR, tiene un voltaje de 90 Vcc el cual tiene una alta eficiencia y muchas características para la regulación de su velocidad. Su material exterior es de acero robusto lo cual causa que este tenga un bajo ruido y su tamaño sea pequeño, lo cual ayuda a su fácil montaje y desmontaje. Véase figura 29.

La velocidad del motor alcanza hasta 1750 RPM, tiene un paquete de un par de cepillos de carbono, los cepillos de carbono transfieren la energía o las señales entre el rotor y estator del motor. Se usa ampliamente en la industria ligera, textil, minera, dibujo, Etc. Este es un motor de corriente continua que se debe instalar con su respectivo controlador para alcanzar su eficiente rendimiento. [49]



Figura 29: Modelo de motor de C.C. de Imanes Permanentes Vevor. [49]

3.1.3. Motor de Reluctancia

Para este tipo es un motor de reluctancia síncrono que garantizan una solución económica que es muy sostenible en lo cual influye el impacto medioambiental total gracias a que este no contiene imanes y tiene aumento en su eficiencia. Este es un motor que se beneficia de una sencillez y de la fiabilidad de los motores de inducción y de la mayor eficiencia de los motores síncronos.

El motor de reluctancia que se escogió es un motor Bonfiglioli modelo BSR 90L E15, este es un motor que cuando al aplicarse este requiere aumentar la eficiencia o disminuir una o dos tallas del motor lo cual hace que tenga la misma potencia de salida. Véase figura 30. Es un motor que cuenta con un voltaje de alimentación de 230 Vcc, el cual viene incluido con un sensor de silicóna KTY 84-130. Este motor debe incluir un controlador para el correcto funcionamiento del mismo. [50]



Figura 30: Modelo Motor de Reluctancia. [50]

3.1.4. Motor de C.C. sin escobillas BLDC

Este tipo de motor BLDC es un motor de corriente continua tienen la característica de que no utilizan escobillas en la conmutación para la transferencia de energía, ya que su conmutación se da electrónicamente, esto permite que el motor elimine problemas convencionales como el bajo rendimiento, ruido, desprendan calor y requieren cambios periódicos.

Su modelo es 110BL110-430+ZM-6535A de tipo Micro Motor de imanes permanentes de marca Times Brilliant, su tensión nominal es de 48V trabaja a una potencia de 1KW, alcanzando una velocidad (RPM) de 3000rpm(max) y 2000rpm(min), las aplicaciones para este motor son para uso de bicicletas eléctricas, coches eléctricos y uso didáctico. Véase figura 31. [51]



Figura 31: Motor C.C. sin escobillas BLDC, Times Brilliant. [51]

3.1.5. Motor C.C. paso a paso

El motor paso a paso de corriente continua es conocido por producir un desplazamiento angular definido y mantener su posición frente a un torque aplicado al eje, una de sus características principales es su posicionamiento preciso esto sin la necesidad de emplear retroalimentación.

El modelo de este motor es HBS860H de marca HLTNC tipo stepper motor que trabaja a 400 W a una alimentación de 30 a 100 VDC, las aplicaciones para este motor son de bicicletas eléctricas, brazos robóticos y usos didácticos. Véase figura 32. [52]



Figura 32: Motor C.C. paso a paso. [52]

3.1.6. Motor de Histéresis Síncrono

El motor de histéresis es un motor síncrono que tiene un rotor cilíndrico y trabaja en las pérdidas por histéresis inducida en el rotor por la acción del flujo de rotación de los devanados del estator.

El modelo de este motor ES GLHJRND-2426-79D, tiene una potencia de 140W trabaja a 115 VAC con una corriente de 4 A y una velocidad de 12000RPM. Véase figura 33. [53]



Figura 33: Motor de histéresis síncrono. [53]

3.2. SISTEMAS DE CONTROL PARA MOTORES

3.2.1. Controlador USFULL FU9000D para Motor de Inducción Lineal

El inversor de frecuencia variable de la serie FD9000D tiene un nuevo desarrollo en el sistema de software. Esta es una unidad completamente automática lo cual hace mucho más fácil su manipulación para el uso del motor a controlar. Este tipo de controlador tiene muchas ventajas como lo es el ahorro de energía, el aumento del par, un control de velocidad y muy importante la protección del motor. Véase figura 34. [54]



Figura 34: Controlador USFULL FU9000D [54]

Este tipo de VFD tienen un accionamiento de velocidad variable accionamiento de velocidad ajustable y un accionamiento de CA lo cual hace que este controlador sea el idóneo para controla el motor LIM ya que ambos pueden trabajar con un voltaje monofásico y trifásico lo cual permite que los dos componentes funcionen correctamente como lo demuestra el funcionamiento del esquema del motor LIM. Véase figura 35.

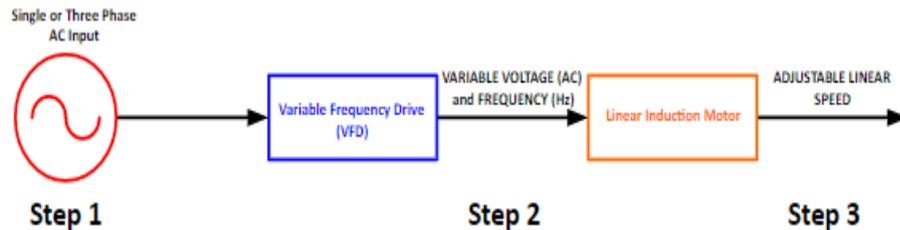


Figura 35: Esquema de funcionamiento del LIM con el VFD. [48]

3.2.2. Controlador DC 0-90 V para Motor C.C. de Imanes Permanentes

El controlador a usar es fabricado por la empresa QWORK, este tipo de controlador de velocidad se puede usar precisamente con el motor de C.C. de imanes permanentes. Este dispositivo ayuda a reducir el consumo de energía al poder controlar la velocidad del motor, la velocidad del motor se puede controlar con la perilla para poder ajustar el paso del voltaje libremente. Véase figura 36. [55]



Figura 36: Modelo de control de velocidad QWork. [55]

3.2.3. Controlador Bonfiglioli AEC401 - 19 para Motor de Reluctancia

Para los motores de reluctancia se recomienda un controlador de serie AEC de la marca Bonfiglioli, lo cual ofrece una solución eficaz para una recuperación temprana de la energía en el frenado. En la mayoría de las aplicaciones de este controlador, la inercia en un movimiento puede realizar que los motores eléctricos se ejecuten como freno, convirtiendo la energía cinética en eléctrica, esto hace que realice un proceso regenerativo y esta energía es devuelta en la red. Véase figura 37. [50]



Figura 37: Controlador Bonfiglioli AEC401. [50]

Este controlador funciona como un convertidor de alta frecuencia al alto rendimiento con una gama de potencia de 0.5 kw a 400 kW con lo que se logra controlar los motores de reluctancia en operaciones de lazo abierto y cerrado. [50]

3.2.4. Controlador de Motor C.C. sin escobillas BLDC

Un controlador ZM-6535A utiliza un chip de motor DC sin escobillas de alto rendimiento de los Estados Unidos. El controlador es adecuado para conducir motores C.C. pequeños y medianos sin escobillas. debido a la nueva tecnología PWM, la velocidad de funcionamiento del motor es alta, la vibración es pequeña, el ruido es bajo, el funcionamiento es estable. [51]

- El voltaje de CC es de 16vdc-50vdc.
- La frecuencia PWM no es inferior a 12 KHZ.
- La señal de entrada es compatible con TTL.
- Corriente de transmisión de hasta 6A a 35A.
- Dimensiones exteriores: 180cm x 70cm x 115cm.
- Peso: 0.915Kg.



Figura 38: Controlador ZM-6535A. [51]

3.2.5. Controlador de motor C.C. paso a paso

El controlador de motor paso a paso es un servocontrolador híbrido HBS860H para 1000RPM para controlar el motor paso a paso de circuitos cerrados. [52]

Este controlador tiene las siguientes especificaciones:

- Voltaje: AC20-75V, DC 30-100V.
- Segmentos: Hasta 256 segmentos.
- Velocidad nominal: 1000 RPM.
- Línea de codificador compatible: 1000 líneas.



Figura 39: Controlador HBS860H. [52]

3.2.6. Control para Motor de Histéresis Síncrono

Este tipo de motores de corriente alterna nos permiten controlar su funcionamiento por medio de contactores, pulsadores, luces de señalización, etc.

El control de este motor se puede realizar de la manera tradicional, por tal motivo el estudio de este motor es analizar el fenómeno de histéresis.

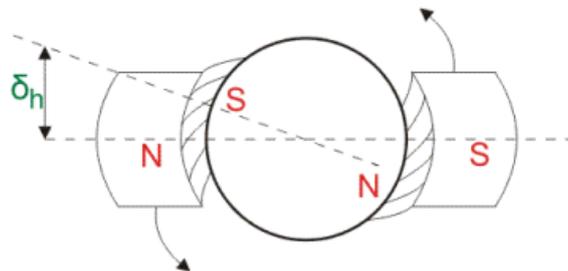


Figura 40: Comportamiento de Motor de Histéresis [25].

CAPITULO IV

4. SIMULACIÓN Y DISEÑO

Para realizar el proceso del diseño y simulación de un banco de pruebas para máquinas eléctricas especiales se debe tener en cuenta algunos aspectos y recursos necesarios para alcanzar el desarrollo del proyecto, por ello se busca recopilar información de costos de inversión, costo de mano de obra, recursos y fuentes investigativas que permitan el desarrollo óptimo del proyecto, por tal motivo se considera el desarrollo de una metodología del tipo deductiva.

En el diseño del banco se debe tener en consideración las dimensiones y características que tienen los motores especiales, así como también los componentes que deberán ir en conjunto con cada motor para su correcto funcionamiento. De esta forma se puede dimensionar correctamente el tamaño del banco donde se realiza las pruebas de los motores, el cual debe soportar cada uno de los comportamientos de los motores.

4.1. Simulación Motor de inducción Lineal

En el modelo de la simulación se toma las librerías brindadas por el software MatLab/Simulink, este modelo de LIM se realiza tomando en cuenta los efectos finales del flujo del entrehierro del marco dq, para lo cual se aplica las principales características del motor LIM tomadas de la Tabla 2. Entre los principales parámetros que se toma del motor y los parámetros que brinda el software se complementan, para de esta forma lograr la simulación del motor. [56]

PARÁMETROS	VALORES
Voltaje de entrada (V)	380
Corriente (I)	3 Amps
Potencia (P)	0.70 kW
Longitud primaria	1 m
Longitud del linor (d)	0.25 m
No de Polos	8
Resistencia Primaria (Rp)	1.298 Ω
Resistencia de Linor (R1)	0.976 Ω
Inductancia Primaria(Lp)	0.0684 H
Inductancia de Linor (Llp)	0.0416 H
Inductancia de magnetización (Lm)	0.0416 H

Tabla 2: Parámetros motor LIM.

Con los parámetros generales que se utilizaran para el motor LIM se realiza la simulación en la cual se observa el comportamiento de la curva de la velocidad y la fuerza que efectúan el motor.

4.1.1. Esquema de simulación.

El modelado del LIM está construido con parámetros trifásicos lo cual dificulta analizarlo, debido a esto se usa un modelo de circuito que facilita

representar en el software Matlab/Simulink. En el modelo del circuito equivalente del motor se indica que este contiene inductancias y resistencias los cuales están alimentados por tres fases de voltaje, V_a , V_b , V_c los cuales representan una red trifásica. Véase figura 41. [56]

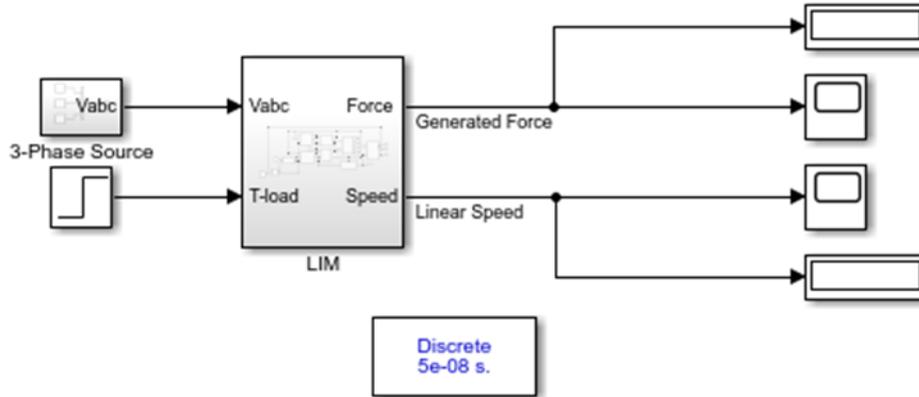


Figura 41: Esquema MatLab/Simulink de simulación de Motor de Inducción Lineal [56].

4.1.2. Bloques del esquema de simulación

Al observar el esquema de simulación dentro del bloque del LIM como se muestra en la figura 42, existen todos los actuadores los cuales hacen posible que funcione de correctamente la simulación y se los detallara a continuación:

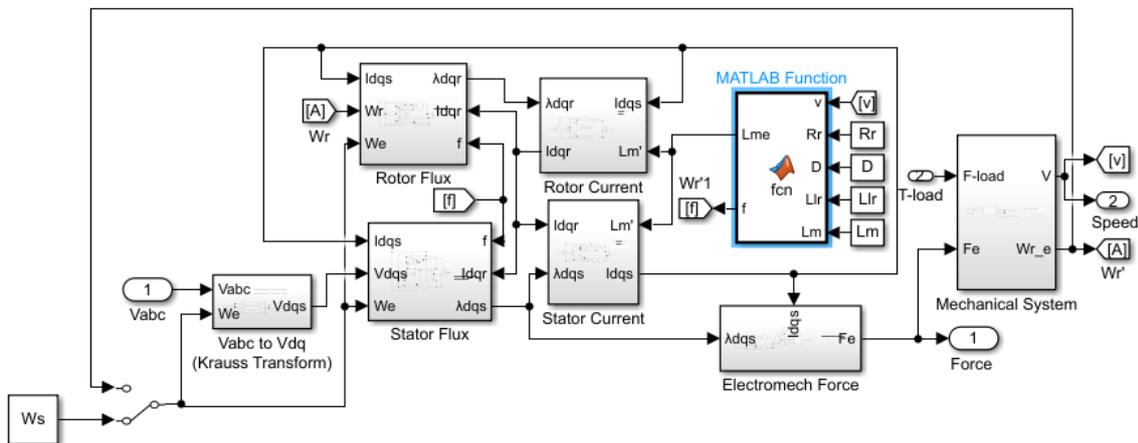


Figura 42: Esquema de funcionamiento interior de la simulación del LIM. [56]

Cada uno de los bloques se detallará a continuación para comprender de manera correcta como se usó sus parámetros y como hacen posible la simulación correcta del LIM.

4.1.2.1. Bloque de Voltaje V_{abc} a V_{dq}

Dentro de este bloque se tiene la entrada del voltaje de forma trifásica la cual hace que cambie a un voltaje síncrono que sea óptimo para el

funcionamiento del motor el cual ya vienen dentro del interior del motor, este voltaje pasa al estator del motor.

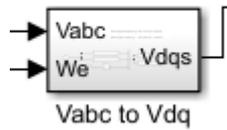


Figura 43: Bloque de entrada de voltaje. [56]

4.1.2.2. Bloque de Rotor y Estator del LIM

En el bloque del rotor y estator como forman un funcionamiento de forma continua y el modelo de simulación está basado en un modelado matemático se definen en 4 bloques diferentes, pero funcionan como uno solo, ya que para el flujo del rotor y estator son funciones diferentes que al igual que para la corriente del estator y rotor en sí puedan funcionar. El funcionamiento de estos 4 bloques hace que el motor encienda y empiece a funcionar a la espera de las fuerzas que deben ingresar en ellos que más adelante se define en función del modelo matemático del motor. En los la simulación al aplicar un sistema de corrientes trifásicas están van al estator donde producen un campo magnético que hace que actúe la una velocidad en el entrehierro del LIM. Al suceder todo esto aparecen unas corrientes inducidas en la placa secundaria de la máquina y que reacciona con un campo de inducción que producen la fuerza de traslación que obliga mover al estator y de esta forma se obtiene el movimiento lineal con el principio de funcionamiento de un motor de inducción.

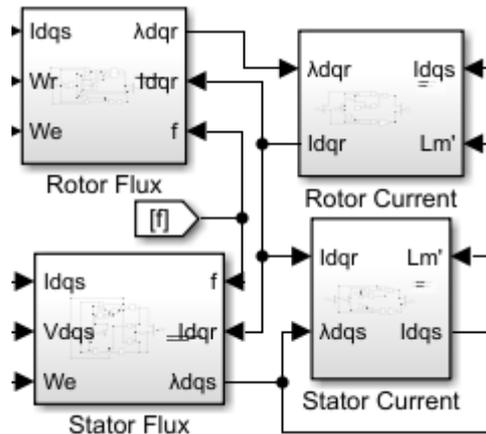


Figura 44: Función del estator y rotor del LIM. [56]

4.1.2.3. Bloque de la Función matemática del LIM.

En la función del modelo matemático del LIM se define los parámetros que se utilizará para la función del motor como son las características descritas anteriormente en la tabla 2. Esta función lleva la ecuación del modelo dinámico

del motor donde cada uno de los parámetros están definidos en base al motor comercial que se usará.

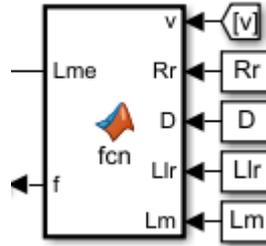


Figura 45: Función matemática para los parámetros del LIM. [56]

4.1.2.4. Bloque de Fuerza y Sistema Mecánico.

Estos dos bloques (figura 46) son los que se unen para poder actuar de la forma en cómo obtendrá en parte del comportamiento de las salidas del motor tanto en la curva de salida de la fuerza, como en la curva de la salida de la velocidad del LIM.

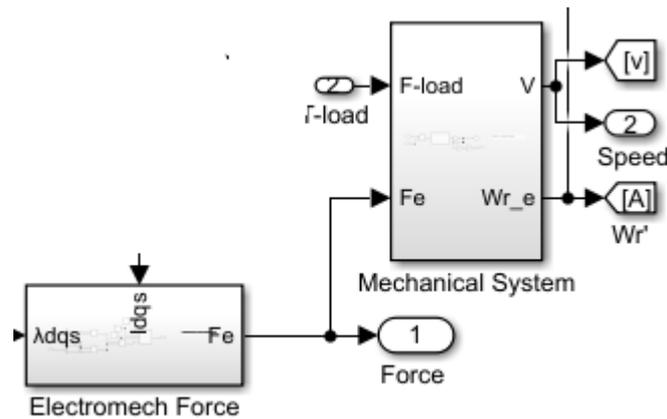


Figura 46: Bloque de Fuerza y Sistema Mecánico. [56]

4.2. Simulación Motor de C.C. de Imanes Permanentes

El modelo del motor PMDC está basado en un modelo el cual se representa mediante la lógica de bloques que brinda el software Matlab/Simulink el cual se encuentra en la página Web de MathWorks, en lo cual se define los parámetros numéricos para alcanzar el modelo indicado anteriormente. Los parámetros que se establece para su simulación se definen en la tabla 3, con estos parámetros se puede realizar el modelo dinámico. [57]

En este modelo los parámetros se llegan a una estimación debido a que los fabricantes no citan todos los parámetros necesarios para llegar a una exacta simulación del comportamiento del motor. Al ejecutar esta simulación permite obtener las curvas de comportamiento del motor, la cual constan con cada uno de los valores constantes para los cuales se les dará el valor asignado en la tabla de parámetros.

PARÁMETROS	VALORES
Voltaje de entrada	90 Vcc
Velocidad	1750 Rpm
Potencia	0.5 HP
Momento de Inercia	0.000401 Kg.m ²
Constante de Fricción Viscosa	0.0022358 N.m.s
Constante de Fuerza Electromotriz	0.233513 V/rad/s
Constante del Par del Motor	0.2335163 N.m/A
Resistencia de Armadura	3.4 Ω
Inductancia Eléctrica	0.0015 H

Tabla 3: Parámetros motor PMDC.

4.2.1. Esquema de simulación

En el esquema de simulación para validar la función del motor y tener la efectividad del control, se basó en un motor DC predeterminedo por el software MatLab/Simulink en el cual se usa en los parámetros descritos anteriormente, mediante la simulación se observa la respuesta de la curva de su velocidad angular. La respuesta de la curva de comportamiento se podrá observar en su estado de arranque normal del motor y en su estado conectada a su respectivo controlador. El esquema del motor se presenta a continuación en la figura 47.

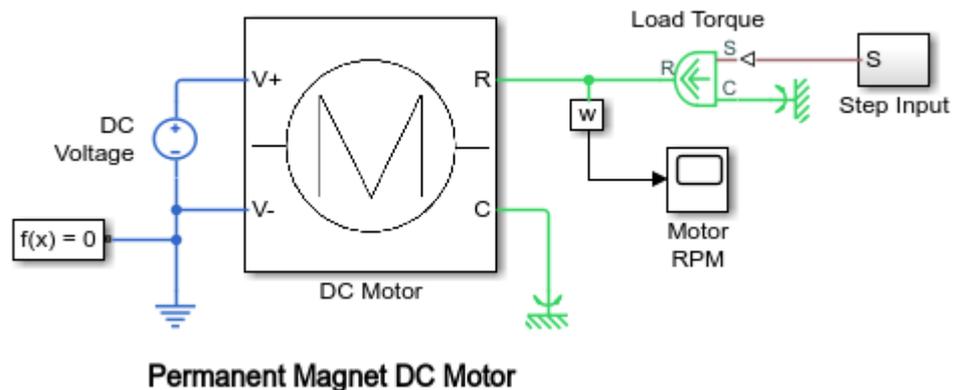


Figura 47: Esquema Matlab/Simulink de simulación de motor PMDC. [57]

4.2.2. Bloques Del Esquema De Simulación del Motor PMDC

En los bloques del motor del motor PMDC, dentro del bloque del DC motor se encuentra su estructura y se detalla cuál es su función de los bloques externos como los internos al motor PMD. Véase figura 48.

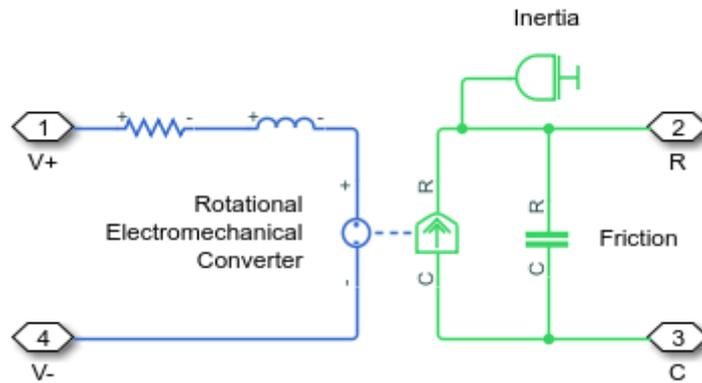


Figura 48: Diagrama interior del motor PMDC. [57]

4.2.2.1. Bloque de Voltaje DC

Este es un bloque de fuente de voltaje ideal lo cual hace que sea bastante potente para mantener el voltaje especificado en su salida de la máquina. El voltaje es un parámetro de constante en lo cual en la simulación se lo realiza con entrada de voltaje con 1.5 volts, para poder obtener una buena respuesta de la máquina.



Figura 49: Fuente ideal de voltaje constante. [57]

4.2.2.2. Bloque del Motor DC

En el bloque del Motor DC de MatLab, es mediante el cual se representa al motor PMDC el cual en el interior se define el modelo dinámico del motor el cual hace que funcione mediante los parámetros mencionados tabla 3. EL bloque del motor DC se representa en la figura 50.

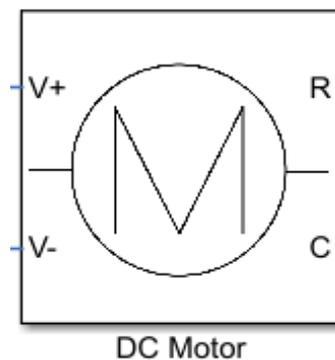


Figura 50: Motor DC Matlab. [57]

En el interior del bloque está el subsistema de un motor de CC, en el cual consta todo el modelo dinámico de cómo funciona la máquina la cual consta de la resistencia e inductancia y la fuerza externa que tiene el motor para su función. Este bloque hace que el armazón entra a participar dentro del campo magnético del imán permanente y su armadura empieza a girar en dirección a la fuerza que se ordene a la máquina de acuerdo a su fuerza. El bloque interno se puede observar en la figura 51.

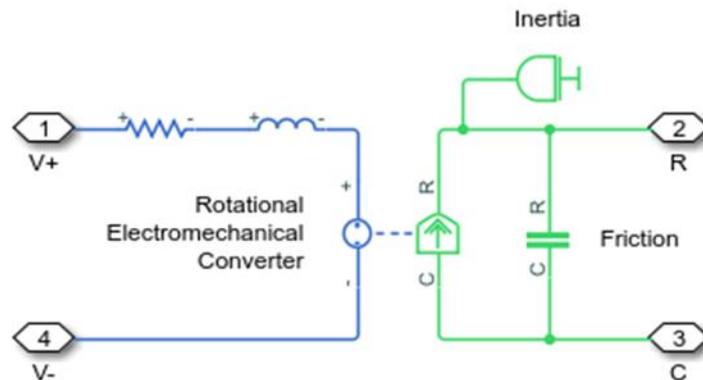


Figura 51: Modelo dinámico de la simulación del motor PMDC. [57]

4.2.2.3. Bloque del Par Ideal de Carga de la Máquina

El bloque representa a una fuente de torque ideal la cual es su función generar el torque en los terminales de la máquina para proporcionar la señal o curva física de entrada del motor. En las conexiones de R y C son la conservación rotacional mecánica que deberá tener la máquina, en el terminal S es la señal física en la cual a través de una señal del controlador que es impulsada desde la fuente. En la señal positiva del terminal S genera un par del cual actúa del terminal de C a R.

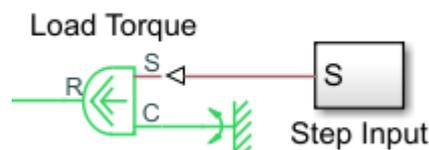


Figura 52: Par de carga de la máquina. [57]

4.3. Simulación de Motor de Reluctancia

En el modelo de simulación del motor de reluctancia se toma el modelo presentado en la página MathWorks [58], se muestra un variador 6/4 de 1.5 kW el cual está controlado por la corriente que usa un modelo específico que está basado en las curvas al magnetizarse. Al especificar (6/4) esto dice que el motor a simularse consta con 6 polos en el estator y 4 polos en el rotor, de tal manera que funciona el motor de reluctancia. La tensión de entrada para el motor es de 230 V, las librerías del software

Matlab/Simulink permiten acoplar sus características para tener una respuesta correcta de las curvas del comportamiento del motor.

La simulación del SMR (6/4) se implementó los siguientes parámetros los cuales son suministrados con los datos de placa del fabricante del motor y otros datos se los llegas a estimar debido a que los fabricantes no especificaron todos los datos necesarios para la simulación exacta del motor.

PARÁMETROS	VALORES
Voltaje	230 Vcc
Potencia nominal	0.37-9.2 kW
Polos en el estator	6
Polos en el rotor	4
Resistencia por fase	0.05 Ω
Corriente nominal	170 A
Ángulo de encendido	45 °
Ángulo de apagado	75°
Banda de histéresis	10

Tabla 4: Parámetros de motor de Reluctancia.

4.3.1. Esquema de simulación

Dentro del esquema se utilizó una tensión de entrada de 230V, en los cuales se contempló un ángulo de encendido de 45° y ángulo de apagado de 75°, para contemplar su rango de velocidad. La corriente de referencia inicial utilizada fue de 170 amperios, también se contempla una banda de histéresis la cual se acopla a los datos anteriores para obtener una mejor respuesta, de acuerdo a las cargas dependerá el tipo de las características de las formas de onda. En su funcionamiento el estator se coloca las bobinas, que están conectadas a pares diametralmente opuestos donde se forman las fases del motor. En el esquema el rotor puede hacer rotar en ambos sentidos horario o antihorario lo cual la energiza secuencialmente con las fases consecutivas del estator.

En la simulación se tomó referencias de los operacionales para simular al controlador de corriente y velocidad que debe ser conectado en el motor en forma física. El esquema de simulación se presenta en la figura 53.

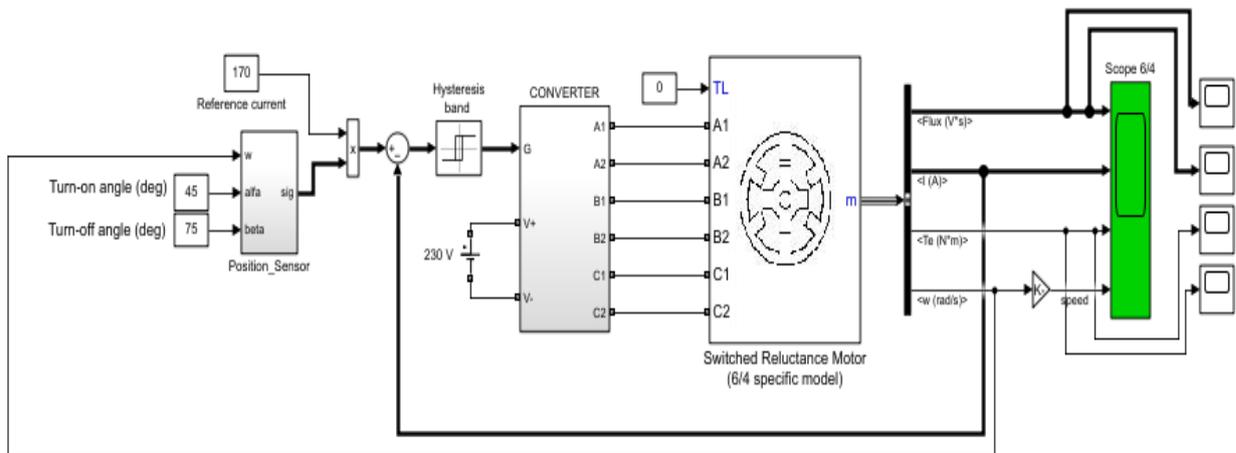


Figura 53: Esquema Matlab/Simulink de simulación de motor de Reluctancia. [58]

4.3.2. Bloques Del Esquema De Simulación del SRM

Los bloques del SRM representan a un variador 6/4 en lo cual se describe cual es la función de cada uno de los bloques dentro de la simulación del motor SRM.

4.3.2.1. Bloque del Sensor de Posición

En el sensor de posición se ingresa los ángulos de encendido y apagado los cuales son unos valores constantes que deberán estar ligados con el rango de velocidad de la máquina. Es un sensor mediante el cual se envía una señal que deberá ir con la corriente de referencia la cual es una señal que deberá ingresar al convertidor de la máquina. Este sensor se lo observa en la figura 54.

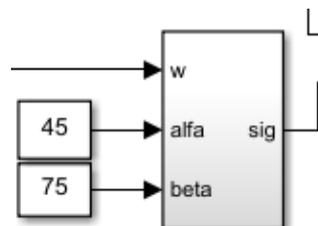


Figura 54: Sensor de posición para el SRM. [58]

Dentro del bloque de sensor de posición se ingresa el modelado por medio de ayuda de bloques para que este pueda funcionar como se lo describió anteriormente, los cuales consta de bloques sumadores y constantes para lograr la simulación del sensor de posición del motor. Figura 55.

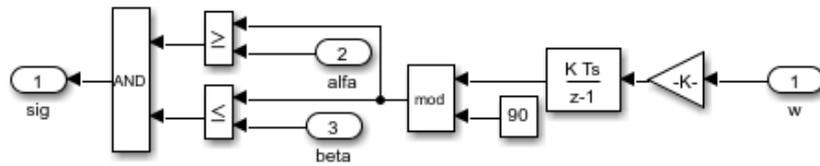


Figura 55: Modelado matemático del sensor de posición. [58]

4.3.2.2. Bloque del Convertidor

El bloque del convertidor se encarga de la conmutación de las corrientes y las fases de ingreso al motor, esto se logra a través de los interruptores estáticos que componen este modelo de motor y se puede obtener una rápida desmagnetización de las fases, esto es lo que controla la posición del rotor por medio de los sensores que contenga el motor.

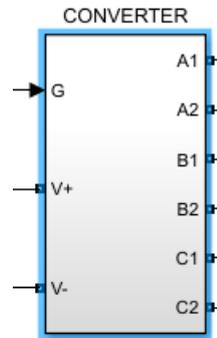


Figura 56: Convertidor del SRM. [58]

En la simulación del bloque del convertidor, los interruptores estáticos están dentro del bloque, para simular estos interruptores se realiza por medio de bloques de modelado matemáticos lo cual hace posible simular este tipo de convertidor.

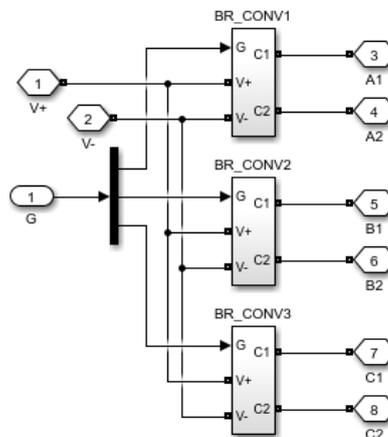


Figura 57: Sistema de bloques para el convertidor del SRM. [58]

4.3.2.3. Bloque del Motor

El bloque del motor está representado por un modelo trifásico 6/4 de acuerdo al modelo de la máquina que se usa físicamente, el motor está representado por una parte no lineal que se basa en la características magnetización que está compuesta por las curvas de respuesta que tendrá el motor. Este motor representa su parte mecánica por un modelo que se basa en el momento de inercia y los coeficientes de fricción viscosos. El modelo del bloque viene dado ya por la biblioteca del Matlab en la cual se debe ingresar los datos de los parámetros descritos en la tabla 4. Véase figura 58.

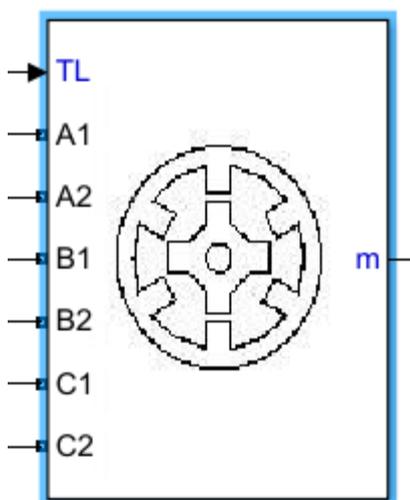


Figura 58: Modelo SRM modelo 6/4. [58]

4.4. Simulación comportamiento de un motor BLDC

Con respecto al modelo tomado para realizar las respectivas simulaciones del motor brushless se escogió un modelo basado en las librerías internas de Matlab los cuales nos ayudan a tener una perspectiva del comportamiento del motor, ya que los motores que se hemos investigado no tienen como tal una hoja con los datos respectivos del motor, por lo tanto los parámetros necesarios para la simulación se toman de las especificaciones del motor y el programa de Matlab, por tal motivo se toma en consideración un motor brushless con condiciones parecidas para que su estudio sea lo más congruente posible. La tabla 5 muestra los datos que fueron suministrados por parte del proveedor.

PARÁMETROS	VALORES
Número de polos	8
Tensión nominal	48V
No de velocidad de carga	4000
No corriente de carga (Max)	2.5A
Velocidad nominal	3000
Par nominal	3.2NM
Potencia nominal	1KW

Corriente nominal (máx.)	28A
Par máximo	9.6NM
Par constante	0.12NM/
Back EMF	8.4V/krpm
Rotor de inercia	730kg/ mm ²
La longitud del cuerpo	110mm
En masa	4.5 Kg

Tabla 5: Parámetros de motor BLDC.

4.4.1. Esquema de simulación

En el esquema completo del controlador de velocidad de un motor BLCD, en donde se puede verificar una fuente de para ideal la cual proporciona la carga. El subsistema de control utiliza una estructura de control en cascada basada en un PI con un lazo de control de velocidad externo y un lazo de control de voltaje de enlace de corriente continua interno, el voltaje CC se ajusta a través de un convertidor reductor C.C.- C.C. El BLDC es alimentado por un inversor trifásico controlado. Las señales de puerta para el inversor se obtienen de las señales de entrada. La simulación utiliza pasos de velocidad. Véase figura 59.

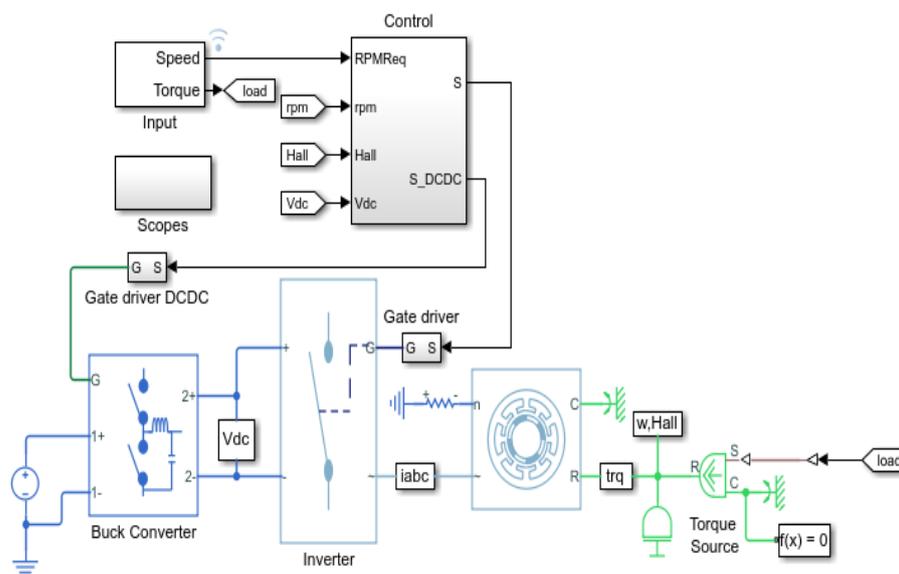


Figura 59: Esquema de control de velocidad de un motor BLDC. [59]

4.4.2. Bloques de simulación para un motor BLDC

4.4.2.1. Control de velocidad del motor BLDC

El controlador está diseñado por el programa Matlab/Simulink (R2021b), en donde se verifica que es un circuito cerrado que utiliza retroalimentación para el sensor Hall, control de velocidad y control de voltaje, en este modo se puede observar una regulación de las velocidades que nos permite un motor BLDC.

Las entradas analógicas se colocan en la parte interna de los subsistemas del programa ya que también se usan señales PWM para controlar la velocidad y la corriente. [59]

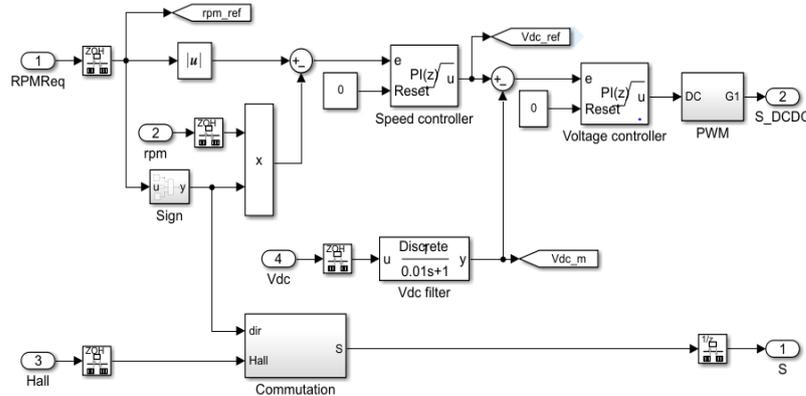


Figura 60: Arquitectura interna del bloque control. [59]

4.4.2.2. Convertidor reductor (Buck Converter)

El bloque Buck Converter representa un convertidor que reduce el voltaje de CC impulsado por un controlador adjunto y un generador de señal de puerta. Los convertidores reductores también se conocen como reguladores de voltaje reductores porque reducen la magnitud del voltaje.

Este tipo de bloque permite modelar un convertidor asíncrono con un dispositivo de conmutación o un convertidor síncrono con dos dispositivos de conmutación.

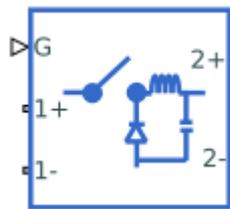


Figura 61: Buck converter. [59]

4.4.2.3. Puente Inversor (Inverter)

Este bloque representa un convertidor controlado trifásico de seis pulsos que consta de tres brazos de puente, cada uno con dos dispositivos de conmutación.



Figura 62: Puente Inversor. [59]

4.4.2.4. Bloque de motor BLDC

El bloque BLDC modela una máquina síncrona de imanes permanentes con un estator trifásico de bobinado en estrella. El bloque tiene cuatro opciones para definir la distribución del flujo de imanes permanentes en función del ángulo del rotor. Dos opciones permiten una parametrización simple asumiendo un trapecioide perfecto para la fuerza contraelectromotriz. Para una parametrización simple, especifique el enlace de flujo o la fuerza contraelectromotriz inducida por el rotor.

Las otras dos opciones brindan resultados más precisos utilizando los datos tabulados que usted especifique. Para obtener resultados más precisos, especifique la derivada parcial del enlace de flujo o la constante de fuerza contraelectromotriz medida para una velocidad de rotor determinada.

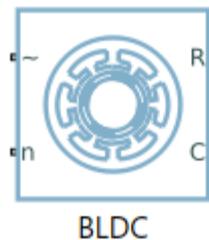


Figura 63: Bloque motor BLDC. [59]

4.4.2.5. Efecto Hall

Mediante los sensores de efecto Hall se puede detectar la posición del rotor, la misma que se podría verificar midiendo la fuerza contraelectromotriz. Por lo general los motores BLDC llevan integrados tres sensores separados cada uno por 60° eléctricos y cada sensor da como salida un estado lógico en alto cada 180° eléctricos de rotación, así mismo en bajo 180° . Se puede observar en la siguiente figura la conmutación que realiza un motor mediante sus sensores. [60]

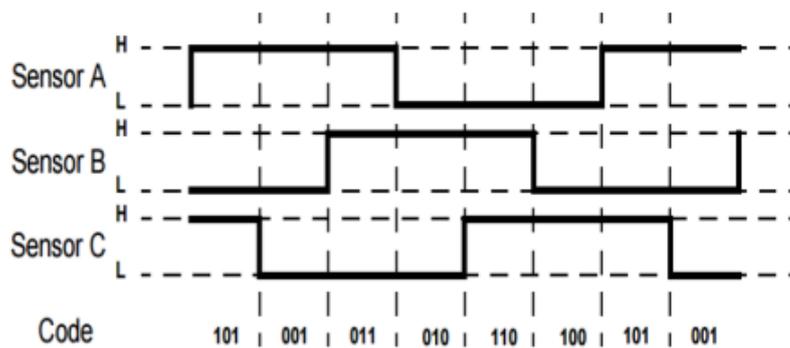


Figura 64: Secuencia de conmutación de los sensores Hall. [60]

4.5. Simulación de Motor C.C. paso a paso

El modelado de este motor es con respecto a un motor paso a paso híbrido en donde tratamos de colocar todos los parámetros establecidos por el proveedor para que su análisis sea lo más congruente posible, por medio del programa Matlab/Simulink podemos realizar el estudio respectivo al motor paso a paso ya que en sus librerías contamos con este tipo de motores facilitando el estudio del motor. La siguiente tabla 6 muestra las especificaciones del motor paso a paso.

PARÁMETROS	VALORES
Ángulo de paso	1.8°- 5%
Fases	2
Resistencia Aislamiento	100MOhm
Clase	Clase B
Masa	4.04Kg
Rotor de Inercia	2.8Kg.cm ²
Tensión nominal	3V
Corriente nominal	6A
Resistencia por Fase	0.5 - 10% Ohm
Inductancia por Fase	4.2-20% mH
Torque	4.5Nm

Tabla 6: Parámetros de motor paso a paso Nema.

4.5.1. Esquema de simulación

En el esquema de la simulación del motor paso a paso se utiliza un modelo híbrido bifásico en donde, se coloca los parámetros del motor paso a paso. Las fases del motor son alimentadas por dos convertidores MOSFET PWM de puente H, el bus de corriente continua está representado por una fuente de voltaje de 30VDC.

Las corrientes del motor están reguladas de forma independiente por dos controladores basados en histéresis que generan señales de accionamiento de los MOSFET comparando las corrientes con sus referencias. La frecuencia de conmutación es variable y depende de los parámetros del motor. [61]

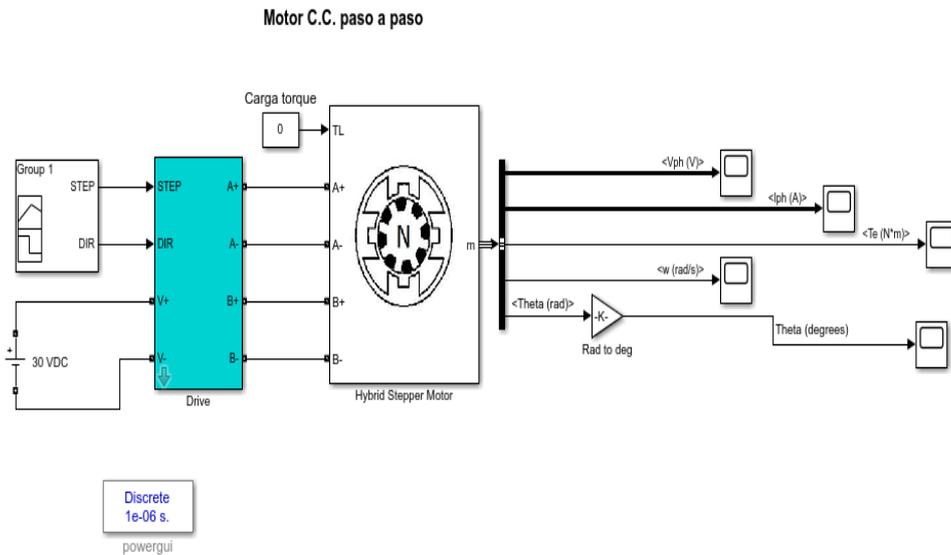


Figura 65: Esquema de motor C.C. paso a paso. [61]

4.5.2. Bloques de simulación para motor paso a paso

4.5.2.1. Creador de señales (Signal Builder)

El bloque Signal Builder le permite crear grupos intercambiables de fuentes de señales lineales por partes y utilizarlas en un modelo. Puede cambiar rápidamente los grupos de señales dentro y fuera de un modelo para facilitar las pruebas.

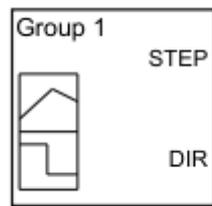


Figura 66: Signal Builder. [61]

4.5.2.2. Bloque de Control (Drive)

El controlador de motor paso a paso utiliza un modelo híbrido bifásico según las características específicas del motor a utilizar. Las fases del motor son alimentadas por dos convertidores MOSFET PWM de puente H. El bus de CC está representado por una fuente de voltaje DC. Las corrientes del motor están reguladas de forma independiente por dos controladores basados en histéresis que generan las señales de accionamiento de los MOSFET comparando las corrientes medidas con sus referencias. La ondulación en las formas de onda de corriente está controlada por la banda de histéresis de los comparadores. La frecuencia de conmutación es variable y depende de los parámetros del motor.

Se utiliza un esquema de excitación monofásico debido a su simplicidad. Las referencias de corriente de onda cuadrada se generan utilizando la amplitud de corriente y los parámetros de frecuencia de paso especificados. El movimiento del controlador paso a paso está controlado por las señales STEP y DIR recibidas del bloque Signal Builder. [61]



Figura 67: Controlador de motor paso a paso. [61]

4.5.2.3. Motor paso a paso híbrido

El bloque Stepper Motor (STM) implementa un modelo genérico que representa las dos familias más populares de motores paso a paso:

- Motores paso a paso de reluctancia variable.
- Motores paso a paso híbridos o de imanes permanentes.

El modelo de motor paso a paso consta de secciones eléctricas y mecánicas, la sección eléctrica está representada por un circuito equivalente, cuya configuración depende del tipo de motor. Los circuitos equivalentes suponen que el circuito magnético es lineal (sin saturación) y que la inductancia mutua entre fases es insignificante. La sección mecánica está representada por un modelo de espacio de estado basado en el momento de inercia y el coeficiente de fricción viscoso. [61]

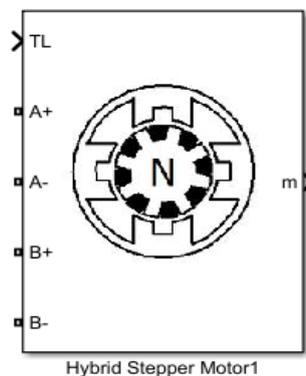


Figura 68: Bloque de motor paso a paso. [61]

4.6. Simulación de Motor de Histéresis Síncrono

Para la implementación de la simulación de un motor de histéresis síncrono se procedió a simular en el programa de Matlab/Simulink, esta máquina es de tipo síncrono por lo cual se toma como referencia un motor con características similares, este motor de histéresis síncrono trabaja a su máxima velocidad cuando su rotor está girando magnetizado de manera permanente en dirección transversal que se encuentre dentro del estator, este motor de histéresis síncrono tiene las siguientes características.

PARÁMETROS	VALORES
Voltaje	115 VAC
Ciclos	400
Potencia	140 W
Corriente	4Amp
Velocidad	12000 RPM
Diámetro de eje	5/16"

Tabla 7: Parámetros de motor de histéresis Síncrono.

4.6.1. Esquema de simulación

En el esquema de la simulación de un motor de histéresis se utiliza un motor síncrono de histéresis el cual es configurado con las características del motor, permitiendo verificar los comportamientos del torque del motor la velocidad del motor en donde es llamada velocidad de sincronismo ya que esta es el resultado de la disposición discreta del motor.

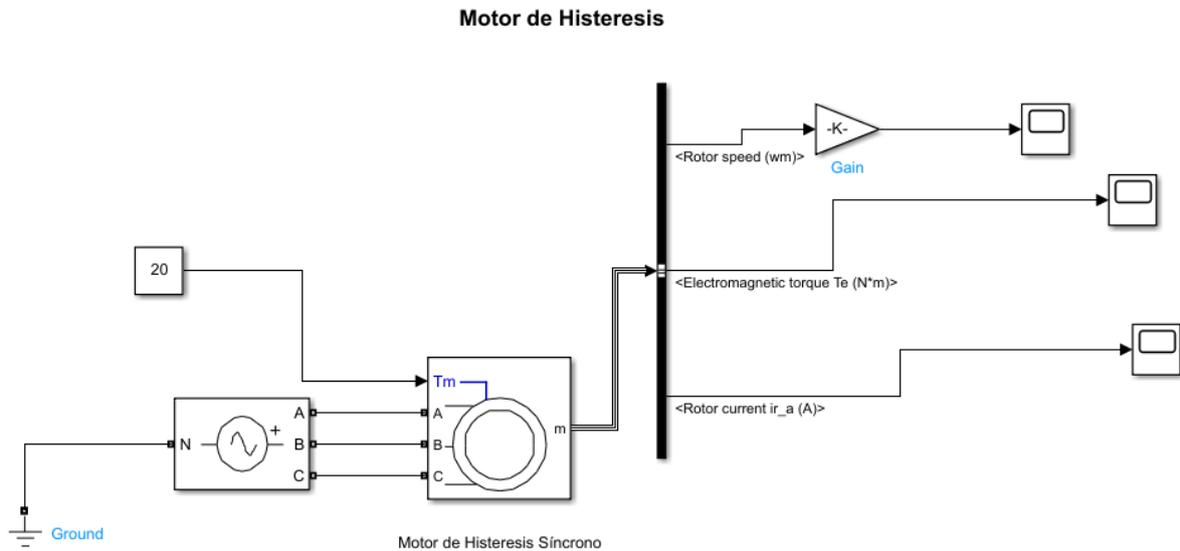


Figura 69: Esquema de la simulación de un motor de histéresis síncrono [Fuente: Autor].

4.6.2. Bloques para simulación de motor de histéresis

4.6.2.1. Fuente de fases programables

Utilice este bloque para generar una tensión sinusoidal trifásica con parámetros variables en el tiempo. Puede programar la variación de tiempo para la amplitud, fase o frecuencia del componente fundamental de la fuente. Además, se pueden programar dos armónicos y superponerlos a la señal fundamental. [62]

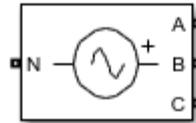


Figura 70: Fuente programable. [62]

4.6.2.1. Motor de histéresis síncrono

El bloque de máquina asíncrona implementa una máquina asíncrona trifásica (rotor bobinado, jaula de ardilla o jaula de ardilla doble) modelada en un marco de referencia dq seleccionable (rotor, estator o síncrono). Los devanados del estator y del rotor están conectados en estrella a un punto neutral interno. [62]

Este bloque puede ser configurado con parámetros de un motor síncrono que nos permita verificar el comportamiento de histéresis.

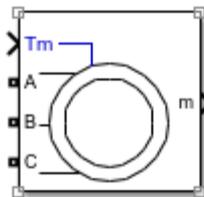


Figura 71: Bloque de motor síncrono. [62]

4.7. Diseño de Armario y Carcasa Para Motores

El armario se diseña de manera detallada con el fin de lograr distribuir cada uno de los motores especiales, ya que cada uno de ellos cuenta con carcasa en la que se puede colocar correctamente los elementos de cada motor como lo es su circuito de potencia, sus controladores y su cableado eléctrico para su encendido. El armario se divide en 2 secciones, en la parte inferior tiene un espacio en el cual se puede guardar componentes, herramientas o elementos externos de uso académico, en la sección superior del banco se subdivide en 4 bloques horizontales donde cada uno de ellos se ubicará cada una de las carcasas con el motor ya instalado, en cada bloque horizontal se instalará 3 motores, debido a que se instala 6 motores, en la sección restante de los bloques se deja los espacios correspondientes para poder colocar otros motores u otros elementos en un

futuro en caso de ser necesario. Este armario consta solo de puertas en la parte inferior, el parte superior cada uno de los motores ya consta con su propia tapa protectora. El armario tiene unas medidas de 188 mm de alto, 92 mm de largo por 47 mm de ancho. Véase figura 72, 73.

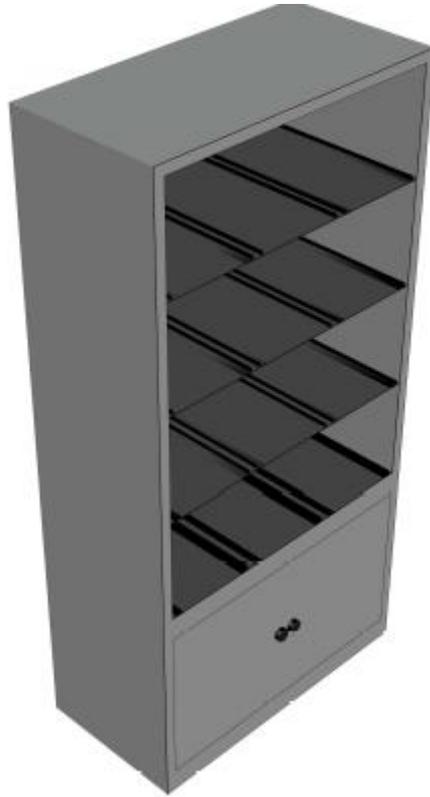


Figura 72: Modelado en vista lateral de armario en 3D.

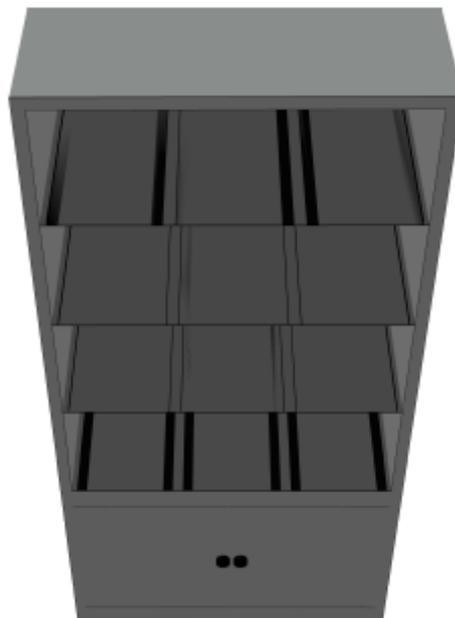


Figura 73: Modelado frontal de armario en 3D.

La carcasa que sostendrá a los motores y debe encajar en la parte superior mide 307 mm de altura y tiene 287 mm ancho por 415 mm de largo. Véase figura 74.

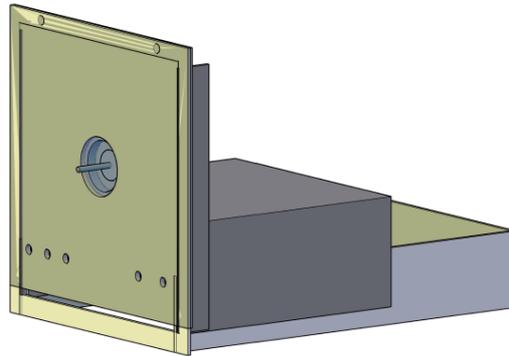


Figura 74: Carcasa de sujeción para el motor.

4.8. Modelado de Motores Especiales

Para obtener una mejor vista de todos los motores en general se realiza una representación de su modelado en 3D, los modelamientos de los motores sirven para tener una mejor idea de cuál es el detalle final del banco de pruebas para máquinas especiales, para lo cual se modela a partir de los datos proporcionados por los fabricantes de cada motor.

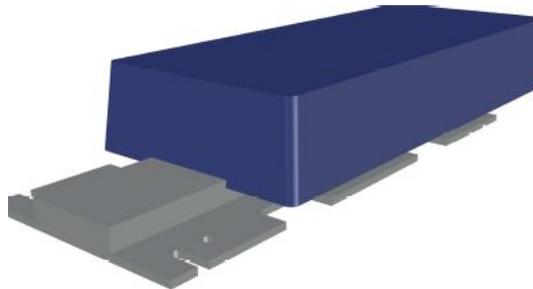


Figura 75: Representación 3D motor de Inducción Lineal.

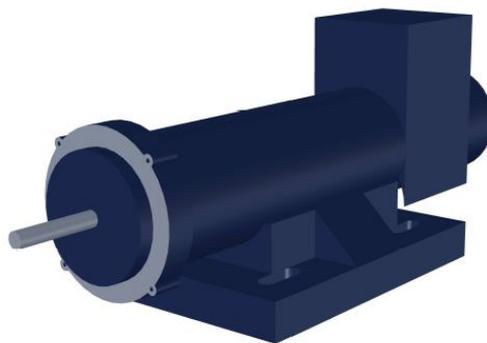


Figura 76: Representación 3D motor de C.C. de Imanes Permanentes.

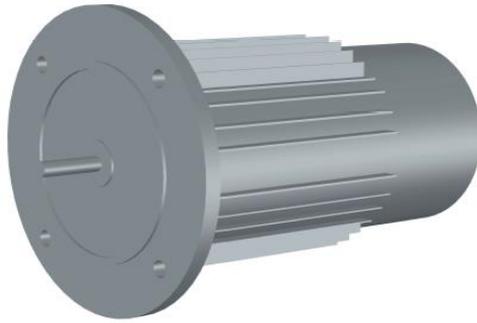


Figura 77: Representación 3D motor de Reluctancia.



Figura 78: Representación 3D de motor BLDC.

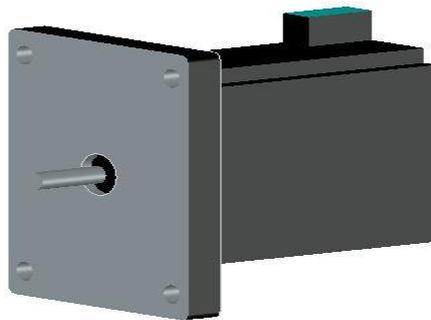


Figura 79: Representación 3D motor paso a paso.

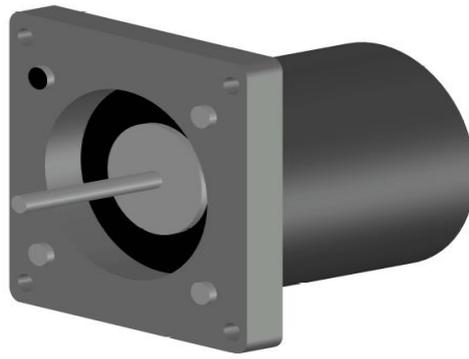


Figura 80: Representación 3D motor de histéresis.

4.9. Representación Final del Banco en 3D

Para obtener una mejor vista panorámica de todo el banco con sus acabados finales se modela, el armario y las carcasas de los motores ensamblados en el armario y así poder tener una mejor imagen de su acabado final, el mismo que se realiza mediante imágenes 3D.

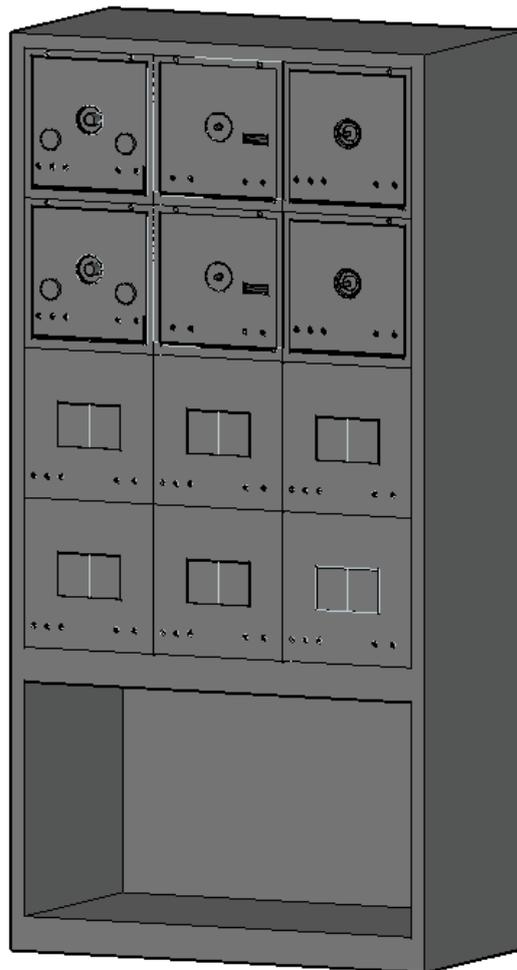


Figura 81: Vista realista de armario (vista 3D).

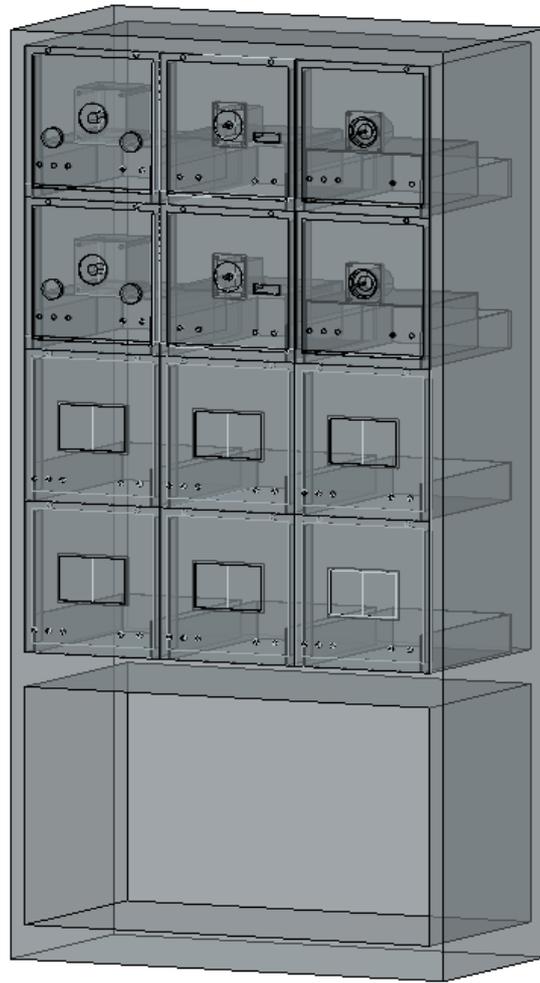


Figura 82: Vista dimensional o rayos x de armario (vista 3D).

CAPITULO V

5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Se modela cada uno de los componentes descritos anteriormente, ciertos componentes se realiza la simulación conjuntamente con otros debido a que ciertos componentes deben ir conectados conjuntamente para su correcto funcionamiento. En los resultados se observa el comportamiento de los motores en sus condiciones transitorias cuando se aplica los parámetros necesarios para su funcionamiento.

5.1. Resultados Motor de Inducción Lineal

Al modelar el motor LIM, se observa el comportamiento del motor en sus condiciones transitorias cuando se aplica por medio de la simulación una carga de 100 N, en una duración de 0 a 2 seg se observa el comportamiento de las formas de onda de la velocidad y la fuerza. En este modelo del LIM la onda de fuerza de empuje se produce debido al efecto final que presenta la librería de la simulación.

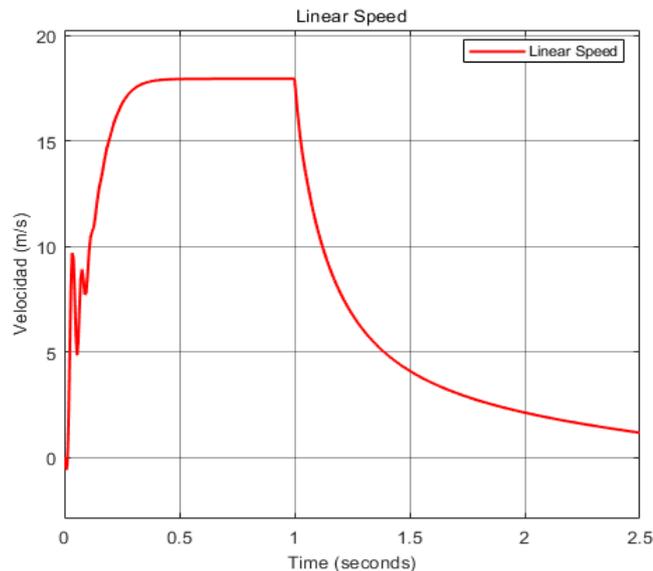


Figura 83: Forma de onda de velocidad de LIM.

En la figura 83 se puede observar que cuando el motor está en estado estable alcanza una velocidad aproximada de 18m/s, se observa que al aplicar la fuerza de carga en el periodo de 0 a 2 seg se observa que su velocidad empieza a disminuir, en lo que significa que cuando se vuelva a eliminar la carga la velocidad volverá a alcanzar su velocidad normal de 18 seg.

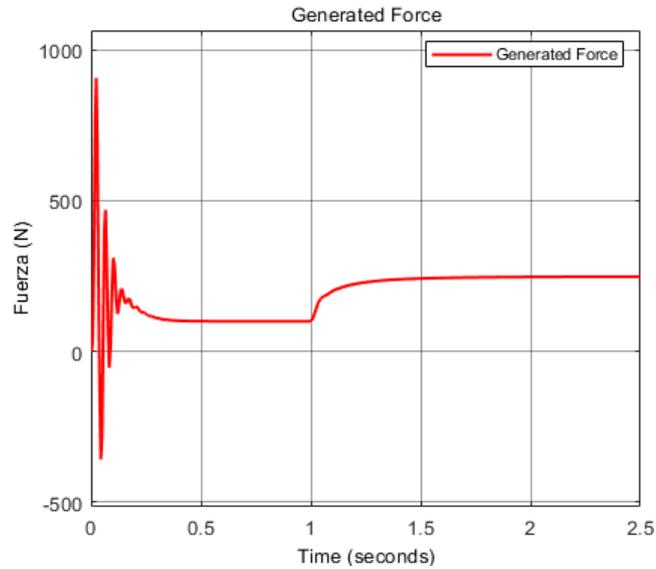


Figura 84: Forma de onda de fuerza de empuje de LIM.

En la figura 84 se observa que durante el arranque del motor su fuerza de empuje es nula, al aplicar la fuerza necesaria en el periodo de 0 a 2 seg se observa que en el segundo 1 su fuerza de empuje aumenta notablemente a un aproximado de 200 N de fuerza neta. Cuando se quita esta fuerza de empuje ocurre lo mismo que la onda de la velocidad de manera inversa, al quitar su fuerza esta cae a 0.

5.2. Resultados Motor C.C. de Imanes Permanentes

En el modelo de este motor se estableció los parámetros para que coincidan con un voltaje de ingreso de 90 Vcc, en el cual el modelo muestra el arranque del motor sin carga y al iniciar su funcionamiento este aumenta la curva de su velocidad, hasta que se aplica una carga de parada y se observa en la figura 85, como baja su nivel de velocidad hasta su aproximación a cero.

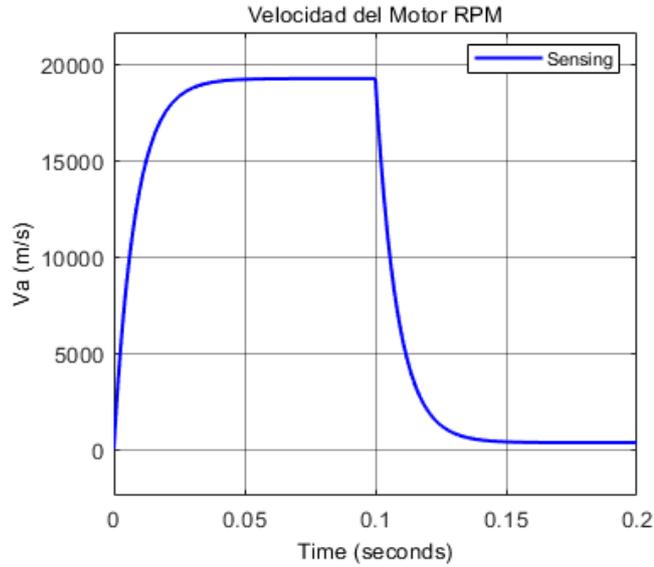


Figura 85: Forma de onda de velocidad angular de motor PMDC.

En la respuesta de onda de la simulación en el arranque a los 0.0 segundos, el motor no tienen ninguna carga externa y este aumenta su velocidad de manera proporcional hasta llegar a un punto donde el motor recibe una carga, en donde la onda se mantiene recta hasta ver la respuesta en el segundo 0.1 donde se aplica de una fuerza de parada al motor este disminuye su velocidad. Véase figura 85.

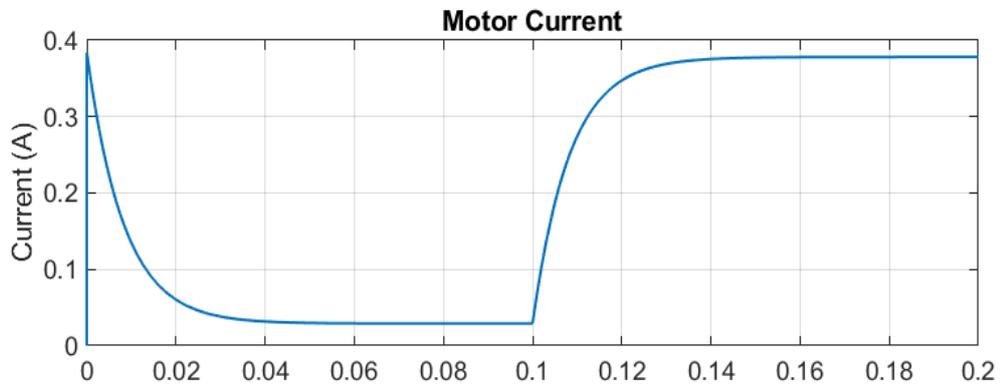


Figura 86: Respuesta de la corriente del motor PMDC.

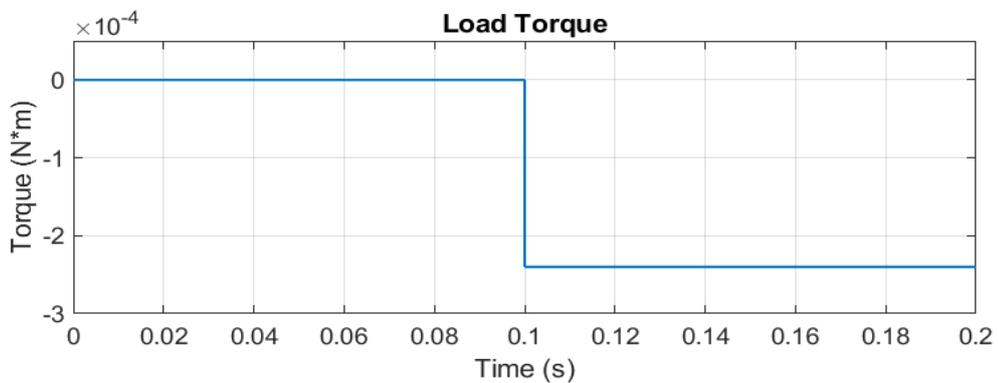


Figura 87: Respuesta de la fuerza del motor PMDC.

5.3. Resultados del comportamiento de un motor de Reluctancia

En el comportamiento de las formas de onda de la simulación se obtiene 4 respuestas como lo es el flujo (V, s), la corriente (A), el par T_e (N*m), y la velocidad del motor (rpm). Se observa 3 formas de onda en las figuras 88 y 89, debido a que es alimentado por un convertidor de potencia trifásico de las cuales consta de dos IGBT y dos diodos de rueda libre. El comportamiento dinámico del motor representa un rizado en sus formas de onda en lo que se observa muy pequeños debidos al controlador que tiene la simulación.

En la figura 88 se observa el comportamiento del flujo inicia el cual inicia en el segundo 0, inicia con un aumento notable y gran amplitud, mediante el motor continua su funcionamiento el flujo disminuye al igual que su amplitud hasta estabilizarse como se observa en la imagen.

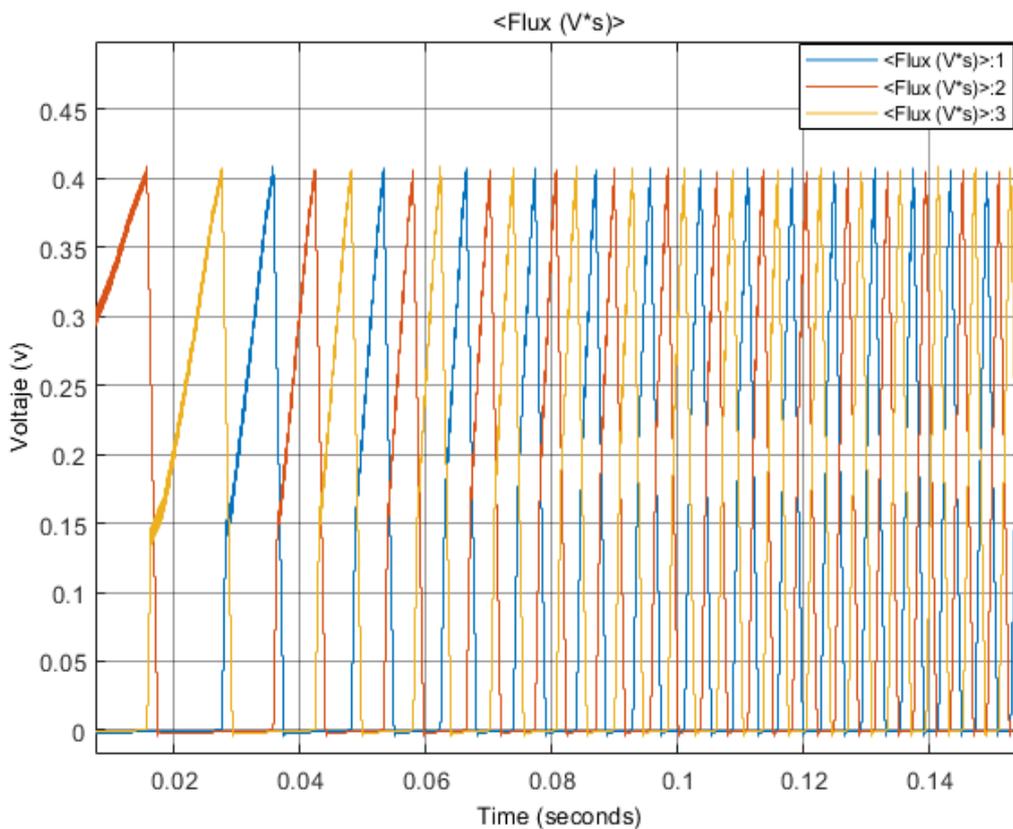


Figura 88: Forma de onda del flujo del motor.

En la onda de la corriente figura 89 se observa de igual manera que al arrancar el motor, esta aumenta notablemente hasta 200 amps en 0.20 segundos, hasta llegar la estabilización del motor y su corriente disminuya hasta llegar a un punto estable. El valor de la corriente se puede regular su valor de referencia debido a que la fem del motor es baja. Se observa una ondulación del par creado debido a la conmutación del regulador de histéresis, en lo cual se lo conoce como operación de par constante.

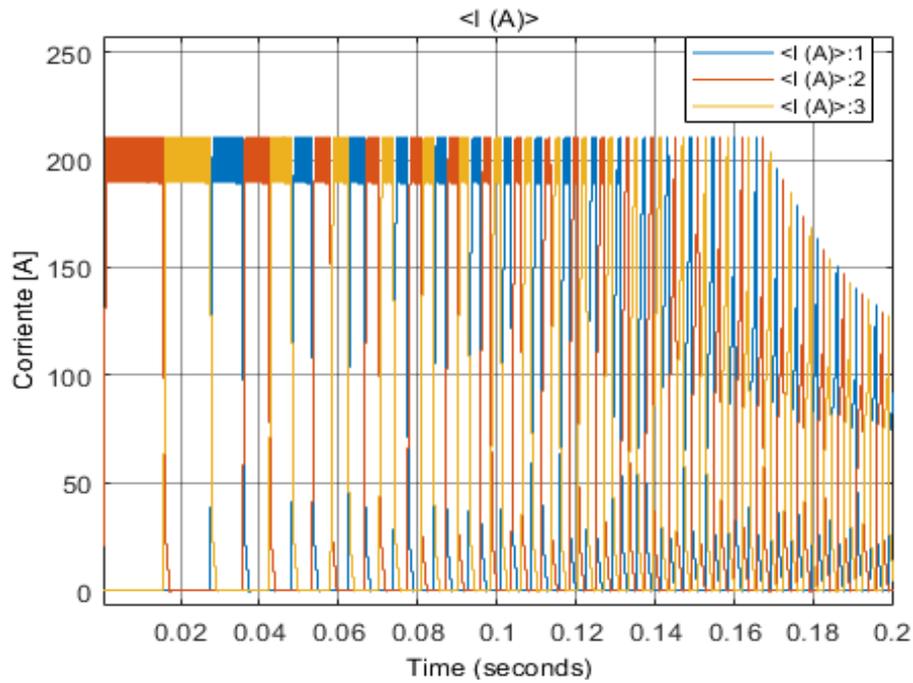


Figura 89: Forma de onda de la corriente del motor.

En la forma de onda de la velocidad del motor figura 90, se observa que al arrancar el motor esta toma una forma curva en la cual va de aumento hasta llegar los 4000 rpm en donde se estabiliza en los 0.5 segundos. Esta forma de onda indica el valor de la ganancia del controlador, en el tiempo que toma estabilizarse el motor.

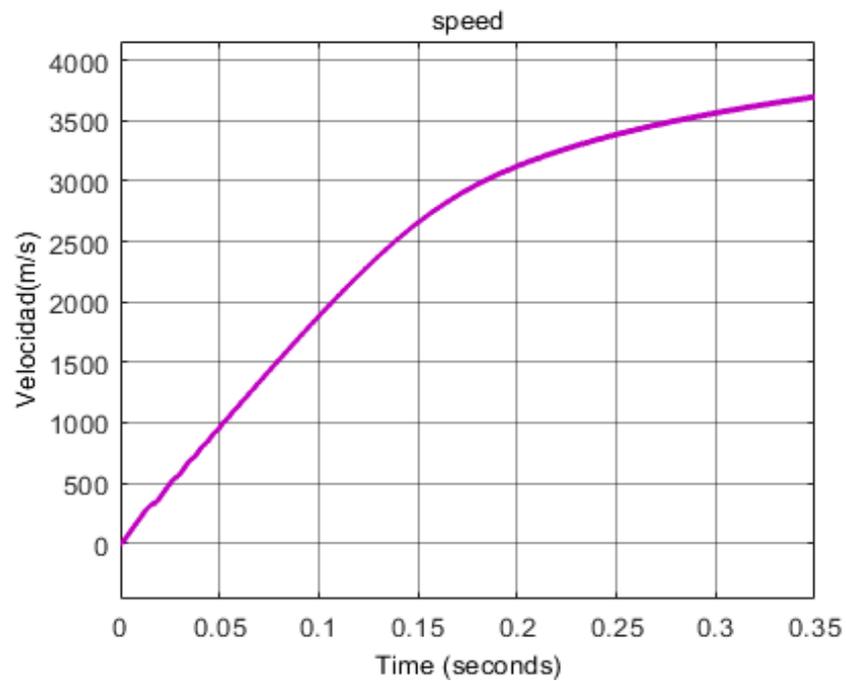


Figura 90: Forma de onda de la velocidad del motor

5.4. Resultados del comportamiento de un motor BLDC

En los resultados del motor sin escobillas BLDC se estableció parámetros importantes del motor que se va a utilizar para uso didáctico los cuales se puede detallar uno de los más importantes su velocidad de rotor, este controlador elaborado por el programa Matlab/Simulink no tiene inconvenientes en llevar al motor a su velocidad mínima ya que no presenta ningún error en estado normal, como se aprecia en la figura 91.

Se puede observar que la gráfica de color azul tiene una variación en su forma esto se debe al comportamiento del torque eléctrico el cual se debe al desfase entre la corriente resultante y la posición del rotor, de igual manera se observa la variación con respecto al tiempo esto se da debido al momento en el cual se aplica un torque de carga.

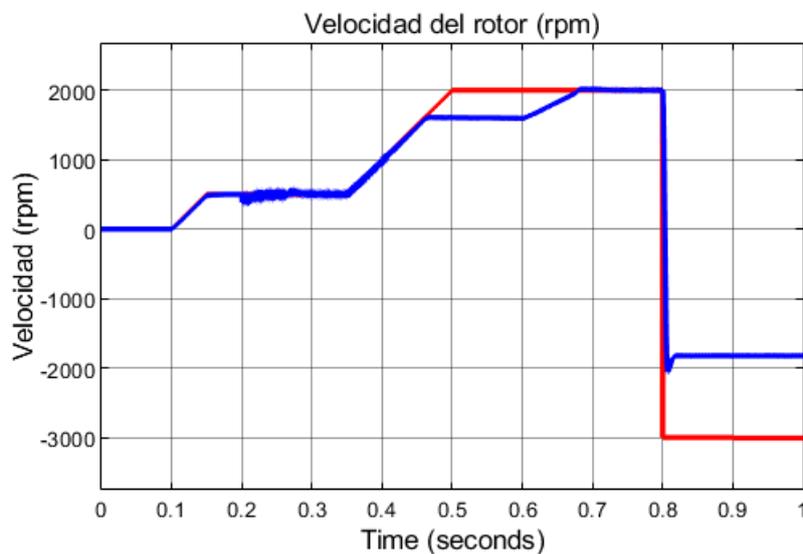


Figura 91: Velocidad del motor BLDC.

En la figura 92 se puede observar que el efecto del torque tiene cambios, ya que si el torque cambia la corriente sufre cambios, en esta gráfica se puede verificar el efecto que se aplica en el torque de carga sobre la corriente cuando se controla la velocidad, entonces con esto se dice que si se controla la velocidad y se aplica un torque de carga el motor va a aumentar, el torque se está generando para que su velocidad se estabilice, con esto se concluye que es necesario aumentar la corriente ya que estas variables son dependientes.

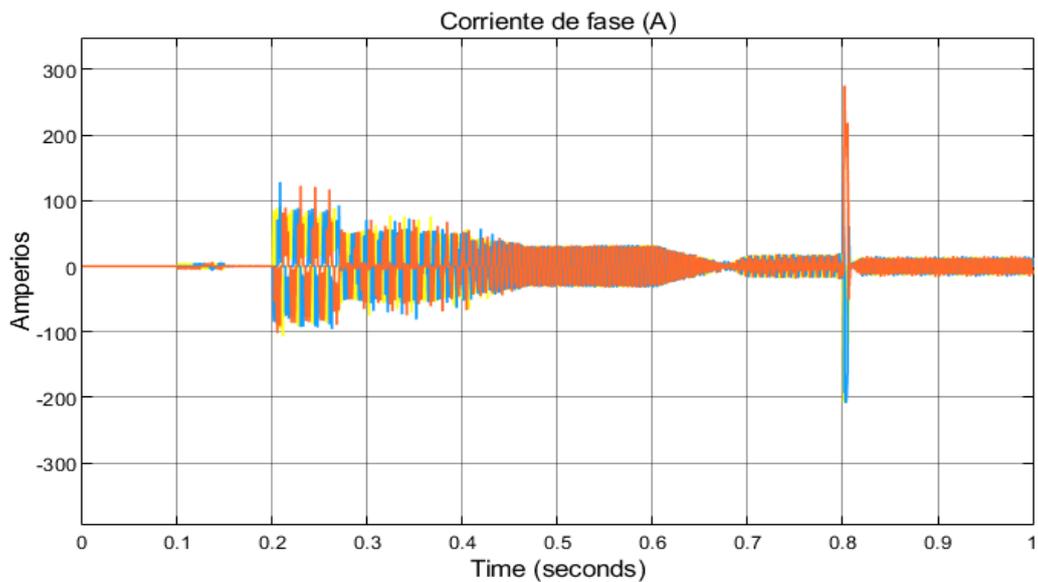


Figura 92: Comportamiento con respecto al torque del motor.

5.5. Resultados de Motor C.C. paso a paso

El funcionamiento del motor paso a paso se ilustra mediante las formas de onda principales (voltajes, corrientes, velocidad y posición) que se muestran en el bloque Scope. La simulación se realiza utilizando un solucionador de paso fijo con un tiempo de muestreo de 1 μ s, lo que proporciona una precisión aceptable para el PWM. Si se requiere una alta precisión de PWM, se puede usar un paso de tiempo más pequeño pero la simulación será más lenta.

La figura 93 muestra la respuesta del sistema para los estados de posición y velocidad. La figura 94 muestra la respuesta para las corrientes de fase, junto con la figura 95 del torque desarrollado por el motor.

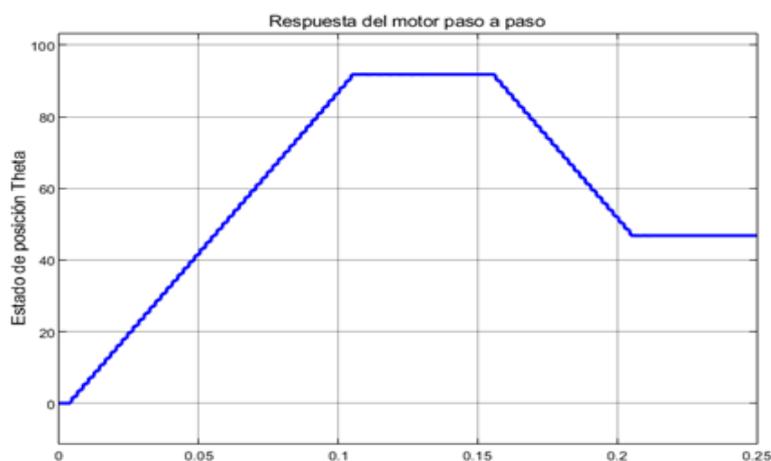


Figura 93: Respuesta de la posición del rotor a una secuencia de pulsos.

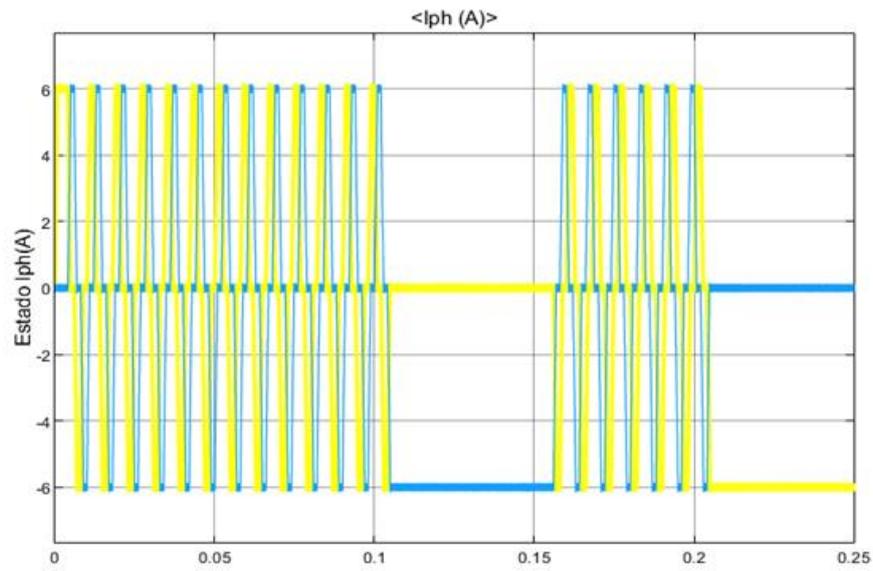


Figura 94: Respuesta de las corrientes de fase del motor paso a paso.

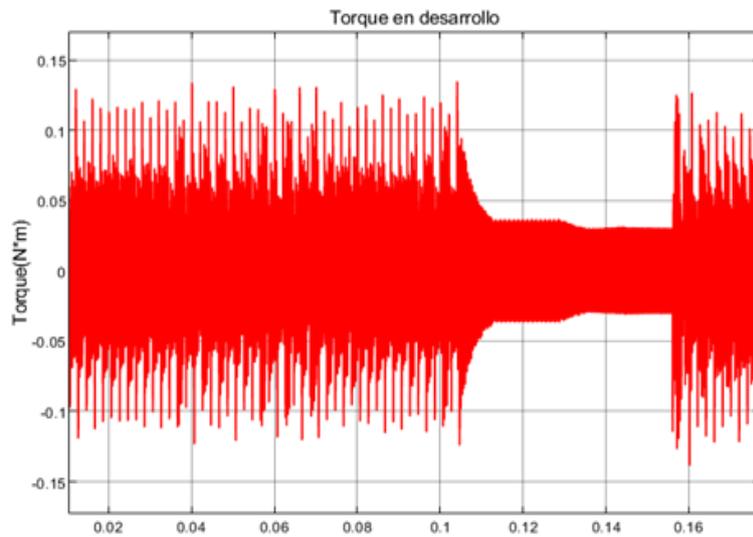


Figura 95: Torque desarrollado, cambio de torque en la carga.

En las gráficas se puede observar que el motor paso a paso sufre de sobreoscilaciones al efectuar cada paso, lo cual es una característica en ese modo de operación.

5.6. Resultados de Motor de Histéresis Síncrono

En el comportamiento del motor de histéresis síncrono se verifica el comportamiento de la velocidad del motor, su velocidad está exactamente sincronizada con la frecuencia de línea, entonces cuando el estator se energiza con voltaje VAC, el campo magnético giratorio se produce en el estator para mantener el campo magnético giratorio, los devanados principales y auxiliar deben suministrar continuamente al inicio, como en condiciones de funcionamiento.

De esta forma se desarrolla el par de corrientes de Foucault junto con el par de histéresis en el rotor ya que este se desarrolla a medida que el material magnético del rotor tenga una alta propiedad de pérdida de histéresis.

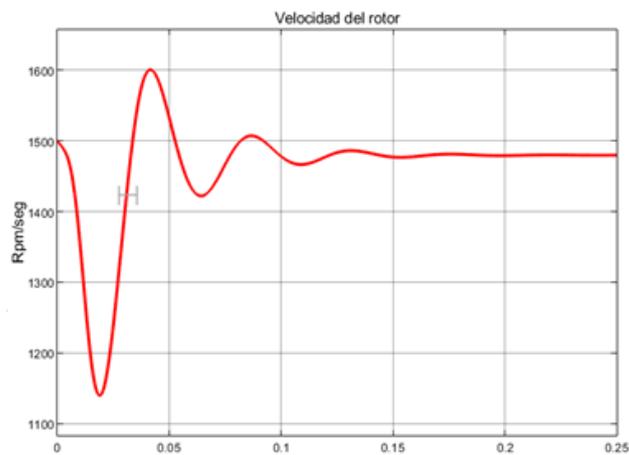


Figura 96: Velocidad del rotor de motor de histéresis síncrono.

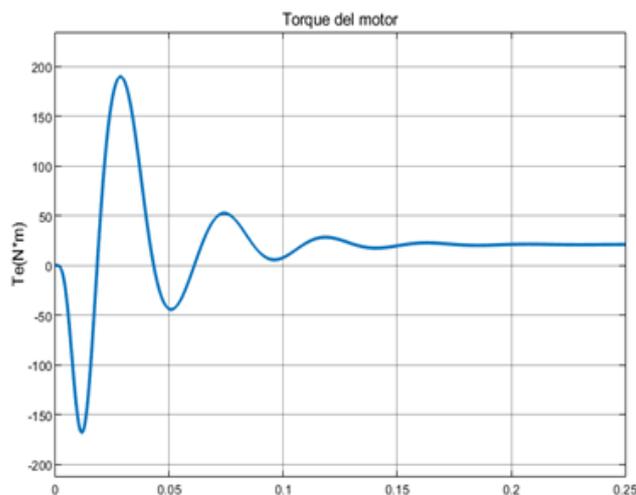


Figura 97: Torque del motor de histéresis síncrono.

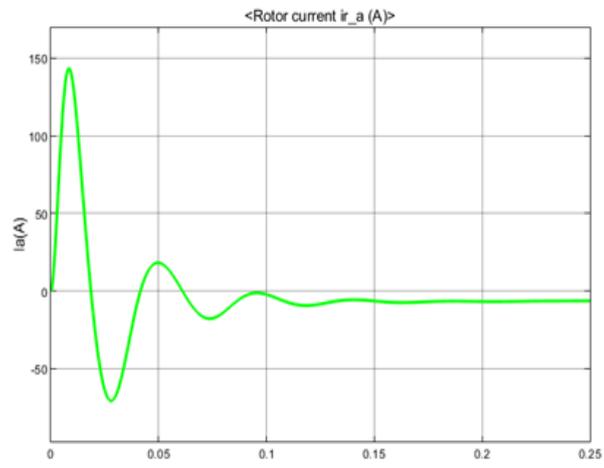


Figura 98: Corriente del rotor del motor de histéresis síncrono.

CAPITULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los principales objetivos del proyecto son desarrollar las simulaciones del comportamiento de máquinas eléctricas especiales, las cuales puedan ser implementadas de forma física, dentro de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, en un plazo no muy lejano. Esto se puede realizar mediante un banco controlado, para poder estudiar a fondo su comportamiento y sea de gran beneficio para el aprendizaje de nuevos estudiantes de la carrera.

Durante el desarrollo del proyecto se logra obtener mayor conocimiento acerca de las máquinas eléctricas especiales seleccionadas, debido a que, su utilización no es muy común. Para este tipo de motores existen múltiples aplicaciones que se pueden utilizar con diferentes configuraciones, cada una de ellas especificando el trabajo que va a realizar. Para poder controlar cada una de las máquinas especiales, se debe conocer sus partes principales, su modelo dinámico y su principio de funcionamiento, lo que permite el correcto dimensionamiento de potencia que se necesita para accionar la máquina.

Las simulaciones son de suma importancia para predecir el comportamiento de las formas de onda al momento de encender el motor, para las simulaciones existen diversos programas, para este proyecto se utilizó el software Matlab/Simulink el cual brinda diferentes comandos y librerías con los cuales se puede realizar el modelamiento correcto de los motores y entender las funciones de los mismos.

Para la selección de los componentes se recopiló información de acuerdo a las características de cada uno de ellos, para de esta forma obtener los componentes que se adecuen para los fines académicos requeridos, los cuales deben tener el correcto dimensionamiento y poder garantizar que el banco diseñado trabaje sin ningún inconveniente, todos los componentes eléctricos deben ser importados ya que no existen en stock en el país.

La construcción de la estructura del armario y las carcasas son muy ergonómicas para la ubicación de los componentes, los cuales se realiza de materiales muy resistentes y de excelente calidad. En la elaboración de estos se realiza dentro de la ciudad ya que si existen los materiales requeridos para obtener los acabados con la calidad requerida.

Se detalla que el diseño de construcción de las piezas mecánicas como armario y carcasa son prototipos similares a los que se tiene en los laboratorios de Electrónica de Potencia de la Universidad Politécnica Salesiana más detalladamente con el diseño de LabVolt, ya que la idea en principio es poder utilizar el armario metálico como soporte universal para diferentes bancos o cajones estructurales con motores que dispone la universidad en sus laboratorios con el objetivo de utilizar al máximo sus capacidades de soporte o almacenamiento.

Con la finalidad de terminar con el prototipo del diseño del banco de pruebas para máquinas eléctricas especiales, se ha realizado varias etapas, la investigación descriptiva de cada motor, simulaciones de motores y el diseño estructural del banco de pruebas para máquinas eléctricas especiales. Entonces, se puede argumentar que es posible realizar este tipo de proyectos en donde la intención es mejorar las instalaciones de los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, con el objetivo de brindar un mayor conocimiento a sus estudiantes. Las diferentes

ventajas de este proyecto es el uso de máquinas especiales, debido a que, este tipo de motores actualmente han reemplazado a diferentes máquinas convencionales en diferentes industrias, por la mayor confiabilidad y periodo de vida que ofrece.

En base a este proyecto se puede continuar con la investigación de nuevos alcances de las máquinas especiales y varios otros temas, como, por ejemplo:

- Implementar otro tipo de máquinas especiales a necesidad del avance tecnológico.
- Estudiar a profundidad cada una de las máquinas implementadas, ya que son de uso investigativo.
- Desarrollar una guía de pruebas prácticas para el uso correcto de este banco para máquinas eléctricas especiales.
- Generar un uso compartido con otros implementos o equipos de los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana.

Al momento de colocar cada motor en el armario, se recomienda verificar que las pestañas o rieles de cada motor, encajen de manera correcta con los del armario, esto ayudará a que el motor ingrese de manera correcta y sus piezas se mantengan íntegras para una mayor durabilidad.

Es importante mencionar que, para el uso correcto de cada motor, se tiene que verificar la alimentación del voltaje, tanto para el motor como para el controlador, ya que trabajan con fuentes de distinto voltaje, lo cual ayudara a extender la vida útil y evitar daños en los motores.

Además, se recomienda que la Universidad Politécnica Salesiana implemente nuevos seminarios acerca de este tipo de máquinas, que permitirá a los estudiantes obtener un mayor conocimiento y dar el uso adecuado a este tipo de máquinas.

Es recomendable tener presente la importancia de realizar un análisis a profundidad acerca de los motores de histéresis, ya que este tipo de motores no tienen un análisis práctico en función a su comportamiento de trabajo y poseen singularidades especiales que aún no han sido analizadas a detalle.

ANEXOS

Se ha creado un espacio online en el cual se encuentran todos los anexos que se utiliza para la construcción del banco de pruebas de máquinas eléctricas especiales. Para obtener acceso a los anexos de manera más detallada, se puede ingresar al link del grupo de investigación GIE (<https://www.ups.edu.ec/gie>) o dirigir un correo al coordinador del grupo de investigación Ing. Flavio Quizhpi (fquizhpi@ups.edu.ec). Los anexos contienen la siguiente información:

ANEXO A: PRESUPUESTOS

ANEXO B: PLANOS DISEÑO DE ARMARIO

ANEXO C: PLANOS DISEÑO DE MOTORES

ANEXO D: ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE MOTORES

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Cruz Moreno, Banco didáctico para prueba de motores Eléctricos bifásicos y trifásicos en laboratorio de electrónica de la Universidad Católica de COLOMBIA, Bogotá: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA , 2019.
- [2] J. Rodríguez Andrade, Diseño y construcción de un banco de pruebas para caracterización de motores eléctricos monofásicos, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [3] J. M. Cortez Fernández, H. I. Guevara Ganchozo y J. A. Rodríguez Enríquez, Diseño e implementación de un banco de prueba para una máquina asíncrona trifásica, para el laboratorio de máquinas eléctricas de la UPS sede Guayaquil, Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana, 2014.
- [4] E. F. Contreras Villamizar y R. Sánchez Rodríguez, Diseño y construcción de un banco de prácticas de motores eléctricos, como apoyo a la asignatura de diseño de máquinas II Bucaramanga, Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 2010.
- [5] J. D. Minchala Otavalo y J. F. Usiña Llivisaca, Diseño y Construcción de una plataforma didáctica con motores de inducción para pruebas de control, Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [6] J. Fraile Mora, Maquinas Eléctricas, Madrid: Mc Graw - Hill, 2016.
- [7] M. Damián Pérez, Máquinas Eléctricas Modernas, 2015.
- [8] J. D. Rairán Antolines, J. R. Bedoya Salamanca y A. Rodríguez García, Diseño y construcción de un motor de inducción lineal, 2004.
- [9] I. Caro, MOTOR DE IMANES PERMANENTES”, 2017.
- [10] R. M. Aduato Arana, Aplicación de la Inteligencia Artificial en la Detección de Falla en los Motores Eléctricos de Corriente Continua de Imán Permanente, Huancayo: Universidad Nacional Del Centro Del Perú, 2021.
- [11] Electrical4U, «<https://www.electrical4u.com/>,» 27 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.electrical4u.com/permanent-magnet-dc-motor-or-pmdc-motor/>.
- [12] Z. Maw Tun y T. Lin Naing, «PMDC Motor Modeling and Parameter Identification for Control Purpose,» Birmania, 2018.
- [13] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, Distrito Federal: MC Graw Hill, 2012.
- [14] E. L. r. e. d. Chile, «Motores de reluctancia: opción de menor consumo eléctrico para minería,» *Electricidad La revista energética de Chile*, 2017.
- [15] J. L. Yucra Huarillocla, Diseño de un motor lineal de reluctancia autoconmutado con imanes permanentes para generar electromagnetismo, Puno: UNiversidad Nacional Del Altiplano De Puno, 2020.

- [16] E. Galvis, V. Vasquez y J. Ferreira, «MOTOR DE RELUCTANCIA CONMUTADA: MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL,» *Respuestas*, vol. 12, nº ISSN 0122520X, pp. 29-37, 2007.
- [17] J. Jimbo Tacuri, Caracterización del funcionamiento de un motor eléctrico de corriente continua sin escobillas brushless con 1000watts de potencia., Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [18] EM-366 BRUSHLESS DC-MOTOR DRIVER 12-48V 30/25A, file:///C:/Users/PERSONAL/Desktop/Tesis/brushlees%7D.pdf, 2020.
- [19] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: NY: McGraw Hill, 1993.
- [20] A. A. Héctor Miler y L. H. Jorge Marco Antonio, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN INSTRUMENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE TORQUE DE UN MOTOR PASO A PASO, Santiago de Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, 2007.
- [21] R. S. Luis Eduardo, El motor paso a paso: Descripción, modelación, simulación., Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1990.
- [22] T. Kenjo y A. Sugawara, *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*, Oxford: 2nd Edition, Oxford University Press, 2003.
- [23] S. J. Chapman, MÁQUINAS ELÉCTRICAS”, 5th ed. McGraw-Hill, 5th ed. McGraw-Hill, 2012.
- [24] MOTOR DE HISTÉRESIS, HUANCAYO, Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ, 2021.
- [25] Motor de Histeresis, Huancayo - Perú: Universidad Nacional de Perú, 2021.
- [26] D. Lorenzo, Máquinas Eléctricas, Milan: De Lorenzo, 2019.
- [27] CHOIEO, «CHOIEO,» 31 10 2019. [En línea]. Available: <http://www.choieo.com>. [Último acceso: 24 05 2022].
- [28] H. Narvárez Pallarez, S. Villareal Acosta, J. E. Duarte Forero y A. Ricón Montenegro, Diseño y construcción de un banco de pruebas para motores monocilíndricos de cuatro tiempos a gasolina, Barranquilla, 2017.
- [29] IESS, «DECRETO EJECUTIVO 2393 REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD DE LOS TRABAJADORES Y MEJORAMIENTO DEL MEDIO AMBIENTE DE TRABAJO,» de *DECRETO EJECUTIVO 2393 REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD DE LOS TRABAJADORES Y MEJORAMIENTO DEL MEDIO AMBIENTE DE TRABAJO*, Quito, IESS, 1986, pp. 2-94.
- [30] WEG, «NORMATIVAS GLOBALES DE EFICIENCIA PARA MOTORES ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN,» WEG, Jaraguá, 2021.
- [31] Siemens, «Motores NEMA,» *Revista Electroindustrial Motores NEMA*, vol. 1, 2009.

- [32] CAN-IESS, «Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo,» de *Decisión 584, Sustitución la decisión 547*, Quito, IESS, 2005, pp. 1-13.
- [33] M. MUTUAL, *Manual Básico De Prevención De Riesgos Laborales*, Barcelona: F&P, 2007.
- [34] M. D. P. Guevara Lozano, *La importancia de prevenir los riesgos laborales en una organización*, Bogota: Universidad Militar Nueva Granada, 2015.
- [35] G. Ramos Fernández, *Riesgos Mecánicos Para Reducir Los Accidentes Laborales*, Guayaquil: Universidad De Guayaquil, 2016.
- [36] G. Ramos Fernández, *Evaluación De Riesgos Laborales En Un Taller Mecánico*, Almería: Universidad De Almería, 2013.
- [37] M. A. Díaz González, *Prevención De Riesgos Laborales Eléctricos*, Madrid: Universidad Carlos III Madrid, 2012.
- [38] M. Mutual, *Prevención De Riesgos Laborales*, Madrid: MC Mutual, 2015.
- [39] F. A. Acuña Acuña y C. V. Monroy Alarcón, *Estudio De Coordinación De Protecciones Eléctricas En Planta Eléctrica Típica*, Concepción: Universidad Del Bío-Bío, 2016.
- [40] D. Ortiz Villalba, W. Freire Llerena y J. A. Lara Sánchez, *Diseño E Implementación De Una Hoja De Cálculo Para Efectuar La Coordinación De Protecciones Eléctricas En Medio Voltaje*, Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE,.
- [41] A. Renzo Tamasco, *Capacitación Protecciones Eléctricas*, Colombia, 2007.
- [42] G. D. Quiñonez Rodriguez y C. Lopez Aguilar, *Influencia de la corriente de excitación en la generación eléctrica en el motor multifunción Lucas Nülle*, Chimbote: Escuela de Ingeniería en Energía, 2019.
- [43] B. Sarsembayev, K. Suleimenov y T. Duc Do, *High Order Disturbance Observer Based PI-PI Control System With Tracking Anti-Windup Technique for Improvement of Transient Performance of PMSM*, Nazarbayev: IEEE, 2021.
- [44] AlecopGroup, *Máquinas Eléctricas*, Monmdragón, 2015.
- [45] D. E. Vergara Tipán, *Diseño Del Sistema De Suministro De Energía Eléctrica Para El Laboratorio De Control Y Operación De Máquinas Eléctricas*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2000.
- [46] J. R. Morán Moncayo, *Proyecto de diseño y equipamiento del laboratorio de electricidad para la formación del estudiante en prácticas de instalaciones eléctricas de la Facultad de Educación Técnica para el De*, Guayaquil: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL, 2014.
- [47] F. A. Araujo Vasquez y C. G. Bermeo Calle, *Diseño e Implementación de Tablero De Pruebas Para Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IED's) De Control y Protección Del Laboratorio De Control, Automatización y Protecciones De La Empresa Eléctrica Centro Sur C. A.*, Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, 2018.

- [48] H. Technologies, «h2wtech.com,» [En línea]. Available: <https://www.h2wtech.com/>. [Último acceso: 1 mayo 2022].
- [49] VEVOR, «VEVOR Tough Equipment & Tools, Pay Less,» [En línea]. Available: <https://www.vevor.com/>. [Último acceso: 01 Mayo 2022].
- [50] Bonfiglioli, «Bonfiglioli.com,» España, 1968. [En línea]. Available: <https://www.bonfiglioli.com/spain/es>. [Último acceso: 21 05 2022].
- [51] Brilliant, Times, «Alibaba.com,» Beijing, 2022. [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/China-62062090176.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.45723578cs7ZRh. [Último acceso: 21 05 2022].
- [52] HLTNC, «Alibaba.com,» Zhejiang, China, 2022. [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/ES-62547432412.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.24594971SY1Ntf. [Último acceso: 05 2022].
- [53] Elinco, «Alibaba.com,» Estados Unidos, 2022. [En línea]. Available: <https://www.ebay.com/itm/353139391696?hash=item5238bf7cd0:g:ASEAAOSwu3VfDc1e>. [Último acceso: 05 2022].
- [54] USFULL, «usfull.com,» Zhejiang Fullwill Electric , 01 01 2005. [En línea]. Available: <https://usfull.com/#1>. [Último acceso: 30 05 2022].
- [55] QWORK, «qworktools.com,» [En línea]. Available: <https://www.qworktools.com/>. [Último acceso: 01 mayo 2022].
- [56] A. Hassan, «la.mathworks.com,» MATLAB Central File Exchange, 23 noviembre 2021. [En línea]. Available: Hassan Alam (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/92278-simulink-modeling-of-linear-induction-motor>). [Último acceso: 2022 mayo 30].
- [57] MathWorks, «la.mathworks.com,» MatLab, 2021. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/permanent-magnet-dc-motor.html>. [Último acceso: 30 mayo 2022].
- [58] H. Le-Huy, «Switched Reluctance Motor,» MathWorks - Universidad Laval, Canadá, 2022.
- [59] T. M. Works, «la.mathworks.com,» 20221. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/bldc-speed-control.html?searchHighlight=BLDC%20SPEED&s_tid=srchtitle_BLDC%20SPEED_1. [Último acceso: 02 junio 2022].
- [60] Dr. Jorge Francisco y Dr. José Luis Vázquez, Control híbrido de motores DC sin escobillas, Tonantzintla, Puebla: Instituto Nacional de Astrofísica,, 2013.
- [61] H. Le-Huy, «la.mathworks.com,» Matlab, 2021. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/stepper-motor->

drive.html?searchHighlight=stepper%20motor&s_tid=srchtitle_stepper%20motor_7. [Último acceso: 02 Junio 2022].

- [62] Simulink/MathWorks, «la.mathworks.com,» Matlab, 2021. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/phymod/sps/index.html?s_tid=CRUX_lftnav. [Último acceso: 03 Junio 2022].
- [63] F. Marquez y M. S. Rojas, “Diseño y construcción de un banco de, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería, 2011.
- [64] F. A. Quizhpi Palomeque, Diseño y Construcción de Plataforma de ensayos de sistemas de protección Utilizando Ieds, Cuenca: GIE, 2020.
- [65] J. Fraile Mora, MÁQUINAS ELECTRICAS, 8va ed. Garceta Grupo, 2016.
- [66] M. G. Bermúdez Moreira, «Riesgos Laborales Ergonómicos En El Área De Distribución De Una Empresa Del Sector Eléctrico,» *Revista Arbitrada Interdisciplinaria de Ciencias de la Salud. SALUD Y VIDA*, vol. 3, n° 6, 2019.

