

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR SIN ESCOBILLAS CON
NÚCLEO DE POLÍMEROS.**

AUTOR: BRYAN STEVEN PÉREZ GORDILLO

TUTOR: ING. JHONNY JAVIER BARZOLA IZA MSC.

IBARRA – ECUADOR

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100414694-8		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Pérez Gordillo Bryan Steven		
DIRECCIÓN:	Juan Elías Terán y Luis Corrales		
EMAIL:	bsperezg@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0989257834

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR SIN ESCOBILLAS CON NÚCLEO DE POLÍMEROS
AUTOR (ES):	Bryan Steven Pérez Gordillo
FECHA: DD/MM/AAAA	09/MAYO/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Electricidad
ASESOR /DIRECTOR:	MSC. JHONNY JAVIER BARZOLA IZA.

Constancia

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autor a terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que se asume responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 09 de mayo del 2023

EL AUTOR:



Bryan Steven Pérez Gordillo.

Cédula: 1004146948.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Yo, Jhonny Barzola en calidad del tutor del señor Bryan Steven Pérez Gordillo certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: "IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR SIN ESCOBILLAS CON NÚCLEO DE POLÍMEROS".

Para obtención del título de Ingeniero en Electricidad, aprobado la defensa, impresión y empastado.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "J. Barzola", is positioned above the printed name.

MSc. Jhonny Javier Barzola Iza
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado primero a Dios, a mis padres por darme la oportunidad de estudiar e inculcarme valores, a mis profesores que han sabido impartirme toda su sabiduría y paciencia, por ultimo a todas las personas que me han aportado en el crecimiento de mí como persona.

Bryan Pérez

Contenido

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	I
CONSTANCIA	II
CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO	III
DEDICATORIA	IV
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
Introducción	XIV
Contexto	XIV
Planteamiento del problema	XVI
Justificación	XVII
Alcance	XVIII
Objetivos.....	XIX
Capítulo 1: Análisis y características de diseño de los motores de corriente directa	1
1. Características de diseño de corriente directa	1
1.1. Teoría de funcionamiento	1
1.2. Estructura de la máquina de corriente directa	2
1.3. Tipos de motores de corriente directa	6
1.3.1. Motor de corriente directa de excitación separada.....	6
1.3.2. Motor de corriente directa en derivación	6
1.3.3. Motor de corriente directa en serie	6
1.3.4. Motor de corriente directo compuesto	6
1.3.5. Motor de corriente directa de imanes permanentes	7
1.3.6. Aplicaciones.....	7
1.4. Motor de corriente directa sin escobillas.....	7
1.5. Características de diseño del rotor	10
1.6. Características de diseño del estator.....	11
1.7. Componentes mecánicos de una máquina de corriente directa.....	14
1.7.1. Eje.....	14
1.7.2. Armazón	15
1.7.3. Ventilación	15
Capítulo 2: Diseño de un prototipo de motor de corriente directa sin escobillas con núcleo de polímeros	17
2.1. Descripción	17

2.2.	Diagrama de flujo.....	17
2.3.	Metodología	18
2.4.	Descripción del programa AutoCAD	18
2.4.1.	Simulación de prototipos en 2D.....	19
2.4.2.	Simulación de prototipos en 3D.....	20
2.4.3.	Modelamiento de prototipos	21
2.5.	Diseño de un motor sin escobillas de imanes permanentes.....	22
2.6.	Diseño del Rotor de un motor de corriente directa sin escobillas.....	22
2.6.1.	Determinación de número de vueltas de bobinado del rotor.	24
2.6.2.	Dibujo del prototipo en AutoCAD del Rotor	28
2.7.	Diseño del Estator de un motor de corriente directa sin escobillas	30
2.7.1.	Dibujo de prototipo en AutoCAD del Estator	33
2.7.2.	Diseño del armazón del estator	34
2.8.	Determinación de distribución de imanes	36
2.9.	Selección de piezas mecánicas del motor de corriente directa sin escobillas... 38	
2.9.1.	Selección de rodamientos	38
2.9.2.	Selección de tornillos y tuercas de sujeción	39
2.9.3.	Selección de eje	40
2.9.4.	Selección de ventilación	41
2.9.3.	Parámetros mecánicos y eléctricos del motor	41
Capítulo 3: Implementación de un prototipo de motor de corriente directa sin escobillas con núcleo de polímeros.....		46
3.1.	Configuración de AutoCAD para impresión de prototipo	46
3.1.1.	El formato de archivo STL	46
3.1.2.	Teselación y resolución en archivos STL	46
3.1.3.	Tolerancias de desviación y tolerancia de ángulos en archivos STL	47
3.2.	Generación de archivos STL de impresión en 3D	48
3.3.	Selección de material de polímeros.....	49
3.3.1.	PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta	49
3.3.2.	PLA Ferro-Magnético.....	50
3.4.	Impresión de diseños en material de polímeros	52
3.4.1.	Impresión del Rotor	52
3.4.2.	Impresión del Estator.....	54
3.4.3.	Impresión del armazón del estator	56
3.5.	Ensamble de prototipo de motor de corriente directa sin escobillas.....	58
3.5.1.	Ensamble de estator.....	58

3.5.2. Bobinado del rotor	61
3.5.3. Ensamble del armazón del estator	62
3.6. Pruebas del prototipo.....	63
3.6.1. Prueba del prototipo en vacío.....	64
3.6.2. Prueba de rotor con carga.....	74
3.6.3. Característica del devanado	79
Conclusiones	81
Recomendaciones.....	81
Referencias.....	82
Anexos.....	85

Índice de Figuras

Figura 1 Rotación de motores eléctricos. (A) Dos campos magnéticos y (B) un campo magnético y material magnético	1
Figura 2 Principio de funcionamiento del motor de corriente directa. (A) Corriente del rotor y campo magnético del estator, (B) dos campos magnéticos	2
Figura 3 Carcasa de un motor de corriente directa	3
Figura 4 Estator de un motor de corriente directa.	3
Figura 5 Rotor de un motor de corriente directa	4
Figura 6 Cojinete de bolas	5
Figura 7 Escobillas de un motor de corriente directa	5
Figura 8 Colector de un motor de corriente directa	6
Figura 9 Motor DC Brushless Componentes básicos	8
Figura 10 Circuito equivalente de un motor DC	9
Figura 11 Estator y Rotor Inrunner y Outrunner.	10
Figura 12 Distribución de los imanes	11
Figura 13 Estator de motor DC Brushless	11
Figura 14 Conexión Estrella de los devanados del estator	12
Figura 15 Fuerza contraelectromotriz de motor DC Brushless de forma trapezoidal... ..	12
Figura 16 Imán permanente de Neodimio	13
Figura 17 Imán permanente de Samario-Cobalto	14
Figura 18 Eje de motor DC Brushless EMAX	14
Figura 19 Modelamiento de un diseño en 2D de AutoCAD	20
Figura 20 Modelamiento de un diseño en 3D de AutoCAD	20
Figura 21 Modelamiento de prototipo 2D con dimensiones proyectadas a 3D	21
Figura 22 Resultado del modelamiento de prototipo 3D de AutoCAD.	21
Figura 23 Vista a Desglose del prototipo en 3D	22
Figura 24 Dimensionamiento de relación de Ranura con Imán)	23
Figura 25 Factor de aislamiento de ranuras	24
Figura 26 Conexión en estrella.....	27
Figura 27 Esquema de bobinado para un estator de 36 ranuras y rotor de 6 pares de polos	28
Figura 28 Dibujo del rotor tridimensional realizado en el programa computacional AutoCAD.....	28
Figura 29 Dimensionamiento del rotor medidas generales	29
Figura 30 Diseño tridimensional final del rotor realizado en el programa computacional AutoCAD.....	29
Figura 31 Cálculo de número mínimo de polos	30
Figura 32 Dimensionamiento del estator medidas generales.....	32
Figura 33 Dimensionamiento del estator de la base interior y diámetros	32
Figura 34 Dibujo del estator tridimensional realizado en el programa computacional AutoCAD.....	33
Figura 35 Diseño tridimensional final del estator realizado en el programa computacional AutoCAD.....	33
Figura 36 Dimensionamiento del Armazón del Estator mediante igualdad de diámetros	34
Figura 37 Dimensionamiento del armazón del estator a partir de la longitud.....	35

Figura 38 Dibujo del almacén del estator tridimensional realizado en el programa computacional AutoCAD.....	35
Figura 39 Diseño tridimensional final del almacén del estator realizado en el programa computacional AutoCAD.....	36
Figura 40 Distribución de los imanes permanentes en el estator.....	37
Figura 41 Dimensionamiento de las paredes de separación de los imanes	37
Figura 42 Rodamiento de ranura profunda HLB y sus componentes.....	38
Figura 43 Dimensiones de rodamiento de ranura profunda "BHL"	39
Figura 44 Tornillo y tuerca de sujeción con sus partes tipo M3.....	39
Figura 45 Dimensión del tornillo y la tuerca de sujeción tipo M3.....	40
Figura 46 Eje y dimensión del eje de acero templado.....	40
Figura 47 Dimensionamiento de la ventilación del motor	41
Figura 48 Motor eléctrico para Dron 3200 Series.....	41
Figura 49 Tabla de alambres esmaltados	43
Figura 50 Resolución de figuras tridimensionales con aproximaciones geométricas ..	46
Figura 51 Resolución de archivos STL.....	47
Figura 52 Tolerancias de desviación y tolerancias de ángulo en archivos STL	47
Figura 53 Almacén de estator en formato STL	48
Figura 54 Rotor en formato STL.....	48
Figura 55 Estator en formato STL	49
Figura 56 PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta.....	50
Figura 57 PLA Ferro-Magnético	51
Figura 58 Modelo del rotor laminado y convertido en código G para impresión.	52
Figura 59 Diferentes vistas del rotor impreso en PLA Ferro-Magnético.....	54
Figura 60 Modelo del estator laminado y convertido en código G para impresión.	54
Figura 61 Diferentes vistas del estator impreso en PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta.	56
Figura 62 Modelo del almacén del estator laminado y convertido en código G para impresión.	56
Figura 63 Diferentes vistas del almacén del estator impreso PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta.....	58
Figura 64 Designación de pesos de los imanes en la balanza analítica.	59
Figura 65 Organización y clasificación de los pares de los imanes según su peso.	60
Figura 66 Ensamblaje y calibración de los imanes en el estator.....	60
Figura 67 Esquema del principio de bobinado para las fases R, S y T.	61
Figura 68 Entradas, saltos, configuración y secuencia de las bobinas y fases R, S y T.	62
Figura 69 Lubricación y medidas de los rodamientos.	62
Figura 70 Ensamble de los rodamientos y eje en el almacén del estator.	63
Figura 71 Colocación de tuercas y tornillos de sujeción. Fuente: Autor.....	63
Figura 72 Prototipo de motor sin escobillas con núcleo de polímeros e imanes permanentes ensamblado.	64
Figura 73 Variador de velocidad (ESC) de 30 amperios de capacidad.....	64
Figura 74 Servo Test "Comprobador".....	65
Figura 75 Curva de voltaje de línea "S" graficado en MATLAB.....	66
Figura 76 Curva de corriente medido en la fase "R" graficado en MATLAB	67
Figura 77 Curva de voltaje de Fase medida en "R y S" graficado en MATLAB	68
Figura 78 Curva de voltaje de Fase medida en "R y T" graficado en MATLAB	69

Figura 79 Curva de voltaje de Fase medida en "T y S" graficado en MATLAB.....	70
Figura 80 Curva de voltaje de Fase medida en "R y T" graficado en MATLAB	71
Figura 81 Curva de voltaje de Fase medida en "R y S" graficado en MATLAB	72
Figura 82 Curva de voltaje de Fase medida en "S y T" graficado en MATLAB.....	73
Figura 83 Curva de voltaje de Fase medida en "R y T" graficado en MATLAB	74
Figura 84 GemFan Hurricane 5147 - hélice de 3 palas para motor DC Brushless.	75
Figura 85 Curva de voltaje de Fase con carga medida en "R y S" graficado en MATLAB	76
Figura 86 Curva de voltaje de Fase con carga medida en "R y T" graficado en MATLAB	77
Figura 87 Curva de voltaje de Fase con carga medida en "S y T" graficado en MATLAB	78
Figura 88 Curva de voltaje de Fase con carga medida en "R y T" graficado en MATLAB	79
Figura 89 Curva de corriente obtenida en MATLAB.....	80

Índice de tablas

Tabla 1 Aplicaciones de los diferentes tipos de motores de corriente directa.....	7
Tabla 2 Herramientas de trabajo del programa computacional AutoCAD.....	19
Tabla 3 Principio de bobinado.....	27
Tabla 4 Especificaciones mecánicas para el diseño del motor de corriente directa sin escobillas.....	42
Tabla 5 Especificaciones eléctricas para el diseño del motor de corriente directa sin escobillas.....	43
Tabla 6 Piezas y materiales del diseño del motor de corriente directa sin escobillas con núcleo de polímero.....	44
Tabla 7 Propiedades de impresión PLA Fibra de Carbono Proto-pasta.....	50
Tabla 8 Propiedades térmicas PLA Fibra de Carbono Proto-pasta.....	50
Tabla 9 Propiedades de impresión PLA Ferro-Magnético.....	51
Tabla 10 Propiedades térmicas PLA Ferro-Magnético.....	51
Tabla 11 Ajustes de impresión para el rotor en material PLA Ferro-Magnético.....	53
Tabla 12 Ajustes de impresión para el estator en material PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta.....	55
Tabla 13 Ajustes de impresión para el armazón del estator en material PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta.....	57
Tabla 14 Pesos equivalentes de los 12 imanes.....	59
Tabla 15 Características de alambre esmaltado N° 24.....	66
Tabla 16 Parámetros de funcionamiento de voltaje medición de Línea "S".....	67
Tabla 17 Parámetros de funcionamiento de corriente en la fase "R".....	67
Tabla 18 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y S".....	68
Tabla 19 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y T".....	69
Tabla 20 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y T".....	70
Tabla 21 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y T".....	71
Tabla 22 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y S".....	72
Tabla 23 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "S y T".....	73
Tabla 24 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y T".....	74
Tabla 25 Especificaciones técnicas de GemFam Hurricane 5147.....	75
Tabla 26 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase con carga medidos en "R y S".....	76
Tabla 27 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase con carga medidos en "R y S".....	77
Tabla 28 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase con carga medidos en "S y T".....	78
Tabla 29 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase con carga medidos en "R y T".....	79
Tabla 30 Medición de resistencia interna aplicado voltaje continuo.....	80

RESUMEN

En el transcurso de los años hasta la actualidad el avance del diseño y prototipo de motores Brushless de corriente directa se ha ido desarrollando de manera continua indicando una gran variación entorno al diseño y estructura de dichos motores por ello se ve la necesidad de la implementación de un prototipo de motor Brushless de corriente directa para el análisis del funcionamiento paramétrico y características de trabajo. En el presente trabajo de grado se desarrolla un prototipo de motor sin escobillas con núcleo de polímeros de imanes permanentes mediante el diseño en software de modelado 3D para el análisis de funcionamiento. Para el desarrollo del mismo se realizó una recolección de datos con las características y funcionamiento de motores Brushless de corriente directa estableciendo así parámetros eléctricos y mecánicos que tendrá el motor, luego de ello se dispuso el dimensionamiento de las partes del motor teniendo así un modelo para el diseño en el programa computacional AutoCAD en 3D, establecido el diseño óptimo se ingresó el archivo al programada de modelado e impresión 3D denominado Ultimaker Cura, en este se ajustó los parámetros de impresión del modelo utilizando el material de PLA "Acido Poliláctico" Fibra de Carbono para el estator ya que es un material muy rígido y resistente y para el rotor se designó utilizar PLA Ferro-Magnético que es un material que atrae campos magnéticos.

El trabajo de grado concluye con la implementación del motor Brushless de corriente directa con núcleo de polímero de imanes permanentes, donde se muestra el ensamblaje del rotor con sus devanados el estator con los 12 polos magnéticos y el armazón del estator con las partes mecánicas y de sujeción, Validando el funcionamiento en vacío del prototipo se tiene como resultados el voltaje de rotura de inercia que es de 6 a 12 Voltios en corriente directa, el funcionamiento con carga que depende del voltaje aplicado y la hélice utilizada.

Palabras clave: Motores Brushless de corriente directa, diseño de motor de corriente directa, diseño 3D, impresión 3D, imanes permanentes.

ABSTRACT

In the course of the years until nowadays the advance of the design and prototype of direct current Brushless motors has been developing in a continuous way indicating a great variation around the design and structure of these motors for that reason it is seen the necessity of the implementation of a prototype of direct current Brushless motor for the analysis of the parametric operation and characteristics of work. In this degree work, a prototype of a brushless motor with a permanent magnet polymer core is developed through the design in 3D modeling software for performance analysis. For the development of the same one a data collection was made with the characteristics and operation of Brushless motors of direct current establishing this way electrical and mechanical parameters that will have the motor, after it was arranged the dimensioning of the parts of the motor having this way a model for the design in the computational program AutoCAD in 3D, Once the optimal design was established, the file was entered into the 3D modeling and printing program called UltimakerCura, in which the printing parameters of the model were adjusted using the PLA "Polylactic Acid" Carbon Fiber material for the stator, since it is a very rigid and resistant material, and for the rotor it was decided to use Ferro-Magnetic PLA, which is a material that attracts magnetic fields.

The degree work concludes with the implementation of the direct current Brushless motor with permanent magnet polymer core, where the assembly of the rotor with its windings, the stator with the 12 magnetic poles and the stator frame with the mechanical and fastening parts are shown. Validating the no-load operation of the prototype, the results are the voltage with which it breaks the inertia which is from 6 to 12 Volts in direct current, the operation with load which depends on the applied voltage and the propeller used.

Keywords: Brushless DC motors, motor design, 3D design, 3D printing, permanent magnets.

Introducción

Contexto

Los motores eléctricos habituales generalmente realizan un proceso de transformación de energía eléctrica a energía mecánica, se los utiliza así para impulsar diferentes equipos o dispositivos, que se conecten mediante elementos adecuados.(Farina, 2018).

Uno de ellos es el motor a inducción que tiene un amplio campo aplicativo, este se ha considerado en electrodomésticos y aplicaciones industriales volubles.(Mademlis, Kioskeridis, & Theodoulidis, 2015).

Para aplicaciones que se requieran mayores características existen motores especiales, el motor de paso está muy arraigado con la tecnología aeroespacial, robótica, sistemas informáticos y posicionamiento de piezas debido a su elevado grado de regulación de velocidad que este posee.(Huertas, 2017).

Así mismo para mayor control de flexibilidad y exactitud se puede utilizar un Motor dc que su velocidad puede ser ajustable.(WEG-S.A., 2016).

Para aplicaciones más eficientes en las cargas, altas temperaturas y velocidad más eficaz el motor de reluctancia es el más competente, ya que se lo puede emplear en distintas áreas de la industria que este requiera.(Ibarra, 2013).

Por otro lado el Servomotor integra características electromecánicas que permiten ejecutar diferentes acciones dependiendo su aplicación como por ejemplo para regular la producción se lo puede utilizar manteniendo el control sobre el movimiento del motor, adicionalmente también se lo usa para impresoras 3D debido a su gran precisión y en general en la robótica en la manufactura.(Gandhi, 2018).

En el ámbito de operaciones industriales los motores dc sin escobillas tienen un amplio campo de utilización gracias, a su tamaño compacto, control y gran eficiencia entorno al nivel de potencia requerida.(Delgado & Bolaños, 2013). Cada motor cuenta con características únicas de eficiencia y utilidad en los diferentes campos de trabajo. Hay que tomar en cuenta las falencias que uno de ellos tiene, se puede decir que el motor de inducción tiene la necesidad de una corriente de arranque relativamente elevada y adicional el par de arranque es fijo.(Pacheco & Santos, 2020).

Así como también los motores de corriente directa poseen algunas desventajas que provocan que se reduzca su rendimiento como por ejemplo el desgaste en las escobillas, emisiones electromagnéticas que requieren de mantenimiento continuo.(Gavilánez &

Yumbo, 2019). El motor de paso también cuenta con falencias en su diseño ya que su torque es demasiado bajo debido a esto no permite que las cargas se aceleren rápidamente, además existe calentamiento al momento de colocar una configuración de alto rendimiento en el motor.(TT MOTOR Co, 2019). Una Desventaja del Motor de Reluctancia es que necesita de corrientes muy altas para vencer el momento de inercia. Haciendo una comparación tenue con el motor de imanes permanentes, la necesidad de corrientes altas es nula debido a que este debe magnetizar su rotor con ayuda del estator para empezar su funcionamiento (Viego, Gómez, & Quispe, 2015).

Con el pasar de los años estos motores de imanes permanentes han ido evolucionando obteniendo así motores en dc sin escobillas, este motor ha tenido gran acogida en sectores industriales, mecánica automotriz, electrodomésticos y vehículos eléctricos, debido a que no cuenta con escobillas que se desgastan entorno al uso que se le de este motor cuenta con una gran eficiencia y durabilidad.(Keeping, 2013)

Planteamiento del problema

En el transcurso de los años hasta la actualidad el avance del diseño y prototipo de motores se ha ido desarrollando de manera continua acelerada encontrando una gran variación específico-técnico en el diseño de modelos y estructuras de los motores, para diferentes aplicaciones, tanto en grandes industrias, como procesos tecnológicos electrónicos, hay que recalcar las diferentes características eléctricas que se reflejan en el rendimiento de la máquina, como es, el diseño que estos motores poseen, eficiencia y parámetros requeridos para vencer el momento de inercia donde el motor empieza su arranque y en el transcurso de su funcionamiento dependerá del ensamblado y configuración que se le brinde al motor.

Uno de los motores más utilizados en la actualidad es el motor DC Brushless con imanes permanentes, ha sido de gran aplicación en el ámbito electrónico, la eficiencia y respuesta de trabajo que este tenga, van de acuerdo a las características de diseño que este motor disponga.

Formulación del problema:

¿Cómo implementar un prototipo de motor de corriente directa sin escobillas, para el análisis del funcionamiento paramétrico y características de trabajo?

Justificación

La implementación de un motor brushless desde su diseño hasta la construcción tiene muchas ventajas debido a que las personas podrán diseñarlo dependiendo las características que ellos deseen para diferentes usos como por ejemplo la aplicación en vehículos aéreos no tripulados “Dron” o en industrias que necesitan un nivel de automatización. Adicional a estas ventajas usar este tipo de motores DC permite tener un mayor provecho a los sistemas porque estos disponen de una mayor eficiencia porque tienen menor cantidad de pérdidas por el desprendimiento de calor.

La utilización de los motores DC Brushless tienen otros beneficios como la reducción de ruido a diferencia de los motores convencionales y esto no reduce su capacidad de velocidad, sino que caso contrario estos motores se caracterizan por brindar una velocidad muy alta con tamaños reducidos. La construcción de estos elementos con algún tipo de polímero facilita su construcción y la vuelve más económica que usar elementos metálicos.

Se debe mencionar también que al implementar un prototipo de motor DC Brushless se va a tener apertura al estudio de diseño de máquinas, ya que representa una parte muy esencial dentro del nivel de diseño de motores y características de estabilidad.

Alcance

El presente trabajo de titulación a elaborarse está orientado al área del diseño de máquinas y al estudio de sus características eléctricas. Este tiene como finalidad la implementación de un prototipo de motor DC Brushless con imanes permanentes y núcleo de polímero, para el desarrollo del mismo se realizará una investigación donde se buscará información sobre diseño paramétrico y características de los motores, además se realizará el diseño del motor DC Brushless de imanes permanentes con la utilización del software AutoCAD, para la construcción del diseño se utilizará como herramienta una impresora 3D de material PLA “polímero” para la impresión del prototipo.

También se debe mencionar que las características eléctricas y técnicas finales que tendrá el prototipo son para aplicaciones de pequeña escala debido a que tendrá un voltaje nominal de 12V, corriente nominal 1.5 A, potencia continua de 18 W y una velocidad nominal de 4000 RPM, con la utilización de los 12 polos del estator, el diámetro externo que tendrá el motor será de 5.2 cm y largo total de 5.4 cm.

Para el análisis de funcionamiento el prototipo hay que mencionar que se realizará diferentes pruebas de velocidad, torque y eficiencia del prototipo.

Objetivos

Objetivo General

Implementar un prototipo de motor sin escobillas con núcleo de polímeros mediante el diseño en software de modelado 3D para el análisis de funcionamiento.

Objetivos Específicos

1. Analizar las características técnicas de diseño de los motores de corriente directa.
2. Diseñar un prototipo de motor de corriente directa sin escobillas con núcleo de polímeros.
3. Implementar un prototipo de motor de corriente directa sin escobilla con núcleo de polímeros.

Capítulo 1: Análisis y características de diseño de los motores de corriente directa

En este capítulo se realizó la descripción de los diferentes tipos de motores eléctricos de corriente directa existentes, mediante un análisis de los aspectos más importantes que posee cada motor con el objetivo de conocer su estructura, diseño, características y funcionamiento, tomando como fuente principal el motor de corriente directa sin escobillas de imanes permanentes y así obtener la información adecuada para su posterior diseño.

1. Características de diseño de corriente directa

Las diferentes características de diseño del motor de corriente directa son los componentes esenciales que se toman para la fabricación del motor.

La fabricación de los motores eléctricos de corriente directa tiene una amplia diversidad de tipos y configuraciones, estos generalmente se encuentran equipados por una serie de componentes entre ellos el estator, rotor, eje, torque, rodamientos y la carcasa del motor que abraza todos los componentes del motor.

1.1. Teoría de funcionamiento

Principalmente el funcionamiento de un motor está dado por la interacción de dos campos magnéticos en la parte interior. Un campo magnético se desenvuelve en el estator, el otro campo magnético se origina en el rotor, estos campos magnéticos son generados a través de los devanados al momento que se energizan, o a su vez con la utilización de imanes permanentes por corrientes inducidas. Debido a la fuerza de interacción que producen estos dos campos magnéticos permite que se rompa la inercia del rotor y de lugar al torque de trabajo como se observa a continuación. (Kim, 2017)

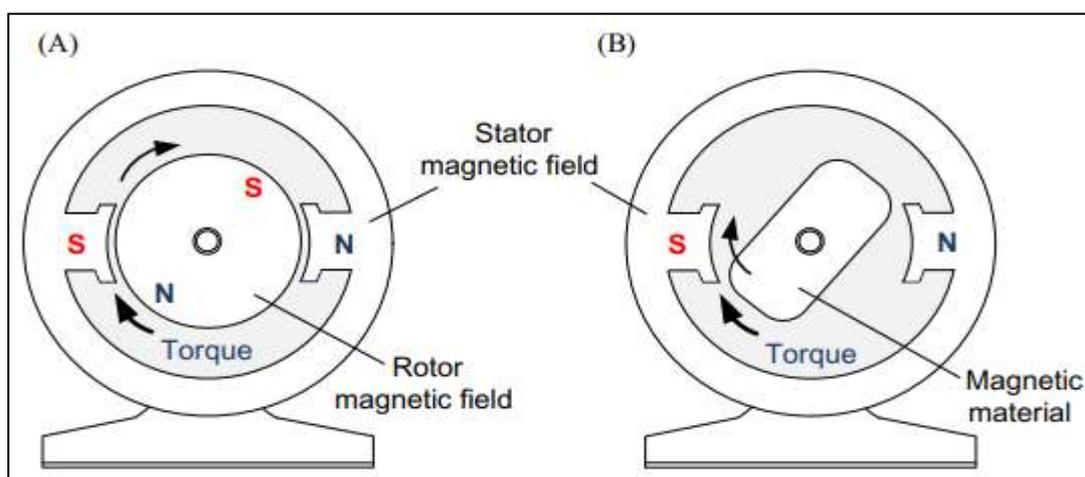


Figura 1 Rotación de motores eléctricos. (A) Dos campos magnéticos y (B) un campo magnético y material magnético. Fuente: (Kim, 2017)

Una vez producido el torque en el motor este debe desarrollarse de una manera continua funcionando de manera rotacional y se le pueda aplicar una carga mecánica, este principio de funcionamiento tienen todos los motores eléctricos.

En los motores de corriente directa el rotor empieza el momento de torque utilizando la fuerza producida en los conductores energizados colocados en el campo magnético producido por el estator como se observa en la Figura 2. (Kim, 2017)

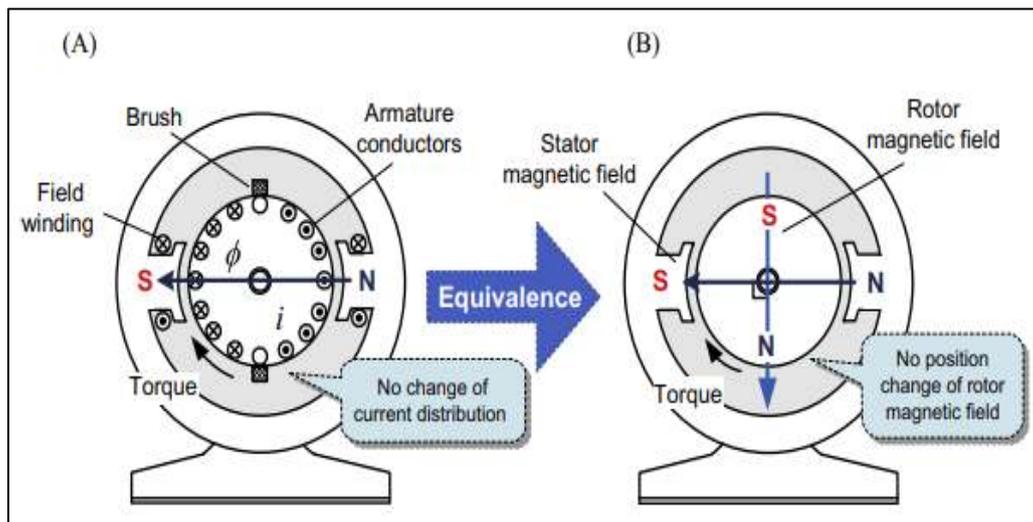


Figura 2 Principio de funcionamiento del motor de corriente directa. (A) Corriente del rotor y campo magnético del estator, (B) dos campos magnéticos. Fuente: (Kim, 2017)

Existen dos campos magnéticos en un motor de corriente directa, un campo magnético estacionario que pertenece al estator y un campo magnético producido por imanes o un devanado de campo. El otro es el campo magnético del rotor. (Kim, 2017)

1.2. Estructura de la máquina de corriente directa

Mencionando anteriormente los motores eléctricos de corriente directa funcionan transformando la energía eléctrica en mecánica, la utilidad y la aplicabilidad que estos tienen es específica ya que dependiendo el diseño y las diferentes modificaciones se los puede emplear en diferentes trabajos, el motor de corriente directa posee una serie de componentes clasificados de la siguiente forma:

Partes mecánicas

Conformado principalmente por la carcasa que viene siendo la parte estática del motor, tapas laterales llamado así porque tienen por nombre escudos, el núcleo del inducido que es el componente móvil del motor, que puede girar gracias a los cojinetes. (Patiño, 2018)

Partes electromagnéticas

Está formado de manera fundamental por un circuito magnético que se forma por agrupamiento de láminas magnéticas que conforman las masas polares del inductor adicional tiene dos circuitos eléctricos que son formados por dos devanados diferentes. El devanado del inductor que se encuentra alrededor de las mencionadas masas polares. El devanado inducido que se encuentra en las ranuras del rotor.(Patiño, 2018)

- **Carcasa**

Se la denomina así a la parte externa del motor o también llamada carcasa de motor, esta parte es la que protege a cada elemento o componente que tiene el motor en su interior. (Ortiz, 2018)



Figura 3 Carcasa de un motor de corriente directa Fuente: (Mecafenix, 2017) Editado por Autor

Se debe mencionar que depende el uso que se lo vaya aplicar al motor se debe utilizar un material más robusto y así emplearlo a la carcasa. Por ejemplo existe motores con carcasa: Aprueba de explosiones, Aprueba de goteo, Totalmente Cerrada, Totalmente Abierta y Sumergibles.(Ortiz, 2018)

- **Estator**

Encargado de crear el campo magnético fijo, que lleva el nombre de Excitación, para motores pequeños se lo puede lograr con imanes permanentes.(Patiño, 2018)



Figura 4 Estator de un motor de corriente directa. Fuente: (Mecafenix, 2017)

El estator no genera un movimiento mecánico, pero en cambio este puede generar movimiento magnético. Los devanados suministran flujo eléctrico a los polos

magnéticos. Los polos que posee un motor siempre deben ser pares, por ejemplo: 2, 4, 6, 8, 10 entre otros, es por esto que el funcionamiento de un motor de corriente directa simple necesita de dos polos como mínimo para funcionar “1 Norte y 1 Sur”. (Ortiz, 2018)

Existen dos tipos de estatores:

- a) Estator Ranurado
- b) Estator de polos salientes

- **Rotor**

Este componente realiza la transferencia mecánica puesto que del rotor transforma el cambio de energía eléctrica a energía mecánica.

Generalmente se componen de una serie de láminas de acero por lo que también es llamado armadura en donde se encuentran ubicados los devanados, que a la par con el estator generan un campo que genera el torque de fuerza que permite la rotación.(Patiño, 2018)

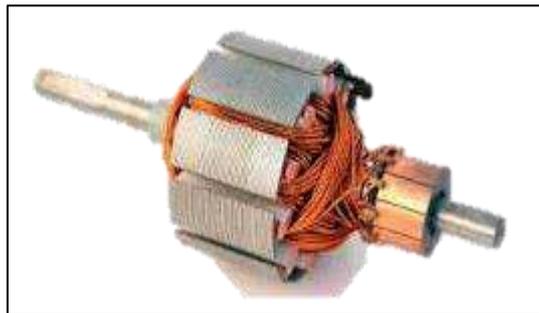


Figura 5 Rotor de un motor de corriente directa Fuente: (Mecafenix, 2017)

Pueden ser básicamente de tres tipos: (Ortiz, 2018)

- a) Rotor jaula de ardilla.
- b) Rotor de polos salientes.
- c) Rotor ranurado

- **Rodamientos**

También llamados cojinetes estos componentes trabajan junto los elementos de rotación del motor, su función principal es reducir la fricción generada entre el rotor y el eje para disminuir el consumo de potencia, adicional a esto mantiene fijo y sujeto los ejes mecánicos.(Ortiz, 2018)

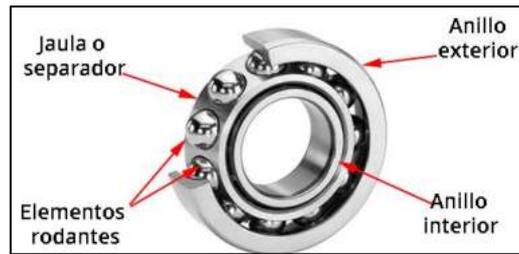


Figura 6 Cojinete de bolas Fuente:(Mecafenix, 2017)

Existen dos tipos de cojinetes:

- a) Cojines de bolas
- b) Cojinetes de deslizamiento

Los cojinetes de bolas son los más usados puesto que cumple cuatro funciones importantes que debe cumplir un cojinete: facilita el movimiento, resiste cargas disminuye la fricción y permite el posicionamiento de las partes móviles de la máquina.

- **Escobillas**

Permite la conexión eléctrica de la parte fija y la parte rotatoria en el interior de un motor eléctrico el objetivo principal es ejecutar una presión adecuada sobre los colectores o anillos giratorios, es así como se puede generar el contacto para el paso de la electricidad.(Ortiz, 2018)



Figura 7 Escobillas de un motor de corriente directa Fuente:(Mecafenix, 2017)

Después de realizar todo el proceso anterior la corriente que llega desde un alimentador de corriente directa al motor para que empiece su funcionamiento.

- **Colector**

Denominado al contacto que ocurre entre escobillas y devanados del rotor, utilizando un dispositivo de cobre tipo corona partida en sectores.

El colector se divide en dos partes principales básicas (Patiño, 2018):

- a) Delgas: Esta parte está en contacto con las escobillas que se encuentran en los sectores circulantes del colector que se los suelda a los extremos de los conductores que conforman los devanados del rotor.

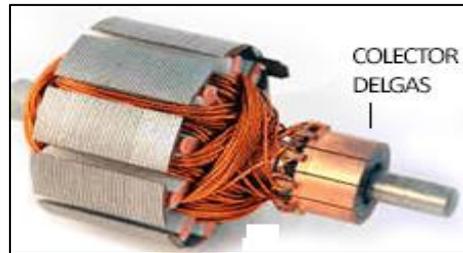


Figura 8 Colector de un motor de corriente directa Fuente: (Mecafenix, 2017)

- b) Micas: Son láminas delgadas que se las coloca de manera intercalada entre las delgas.

1.3. Tipos de motores de corriente directa

Generalmente los motores de corriente directa son diseñados para que su funcionamiento sea con corriente continua por ello existen diferentes tipos de motores de corriente directa, y estos se mencionan a continuación.

1.3.1. Motor de corriente directa de excitación separada

En este motor, el rotor y el devanado del estator se conectan con diferentes puntos de alimentación independientes, lo que se aprovecha con esto es tener el campo del estator constante al no depender directamente de la carga del rotor. (Tong, 2014).

1.3.2. Motor de corriente directa en derivación

Lo que ocurre en este motor, es que el estator y los devanados del rotor se encuentran conectados en paralelo. Ocurriendo que la corriente del estator con la corriente en los devanados del rotor sea cada una independiente una de la otra. (Tong, 2014).

1.3.3. Motor de corriente directa en serie

Para este motor los devanados del rotor y del estator esta conectados en serie. El torque es proporcional a I^2 por lo que facilita la relación de torque por corriente más alta a diferencia de los distintos motores de campo bobinado en corriente directa a costos muy bajos.(Tong, 2014)

1.3.4. Motor de corriente directo compuesto

Este motor resulta de la combinación de un motor en serie y un motor en derivación es decir posee las características de torque del motor en serie y las características de velocidad con regulación del motor en derivación. Generalmente está constituido por un

devanado de armadura en el rotor y dos devanados en el estator. El estator se conecta al rotor por un compuesto de bobinados en serie y en derivación.(Tong, 2014)

1.3.5. Motor de corriente directa de imanes permanentes

Es un motor de corriente directa que en sus polos posee imanes permanentes, debido a que no necesita un circuito de campo externo, no tiene pérdidas en el cobre del circuito. Los inducidos de este motor son parecidos a los motores con circuitos de campos separados lo que produce que su costo también sea igual. (Chapman, 2012)

1.3.6. Aplicaciones

La Tabla 1 muestra las diferentes aplicaciones que poseen los motores de corriente directa.

Tabla 1 Aplicaciones de los diferentes tipos de motores de corriente directa

Aplicaciones	
Motor de corriente directa de excitación separada	Esta configuración ha sido la más utilizada durante muchos años en aplicaciones industriales para motores de corriente continua con control electrónico de velocidad.(Tong, 2014).
Motor de corriente directa en derivación	Este motor facilita la regulación de la velocidad de manera más eficiente.(Tong, 2014)
Motor de corriente directa en serie	Debido a esto estos motores se los utiliza en motores de arranque de automóviles y algunos casos en motores de ascensor.(Tong, 2014)
Motor de corriente directa compuesto	Se lo utiliza para impulsar cargas como: maquinas reciprocas, prensas y cizallas. (Tong, 2014)
Motor de corriente directa de imanes permanentes	Las aplicaciones de este motor brindan diferentes beneficios en comparación de los motores en derivación, puesto que necesitan devanados de compensación. (Chapman, 2012)

La amplia variedad entorno a su velocidad y tipo de motores de corriente directa que existen han influido de manera directa en cuanto a su facilidad y flexibilidad de manejo, utilizándolos más a menudo en máquinas que su velocidad necesite ser variable y de la misma manera se necesite un amplio grado de control sobre ellos.

1.4. Motor de corriente directa sin escobillas

Como se menciona en los temas anteriores, existe una diferencia fundamental en la constitución de los motores DC Brushless en comparación con otros tipos de motores

esa diferencia es la falta de escobillas o de un sistema mecánico que permita el cambio de polaridad en los devanados.(Flores, 2015)

Para la fabricación de estos motores de corriente directa sin escobillas se toma cuenta dos diseños principales. (Reyes, 2013)

Inrunner

Estos principalmente son de tamaño reducido muy pequeños son capaces de desarrollar velocidades muy altas superior a 11000 rpm. Su deficiencia esta dado en su torque por lo que es necesario engranajes que reducen su velocidad para aumentar su torque. Adicionalmente para este diseño de motores el elemento que es móvil es su eje en donde están instalados los imanes permanentes.

Outrunner

Estos motores desarrollan un torque máximo a velocidades muy bajas, en estos motores los imanes permanentes van colocados en la carcasa externa del motor, esta gira mientras que el embobinado se encuentra fijo al eje.

El motor DC Brushless está constituido por un rotor que está formado por una serie de devanados y el estator contiene una serie de imanes permanentes. Estos imanes permanentes en el estator es la característica principal de estos motores, por ende su nombre motor sin escobillas. Debido a que los imanes permanentes generan un campo magnético constante no es necesario de escobillas para conducir la corriente por el rotor.(Pérez & Corres, 2015)

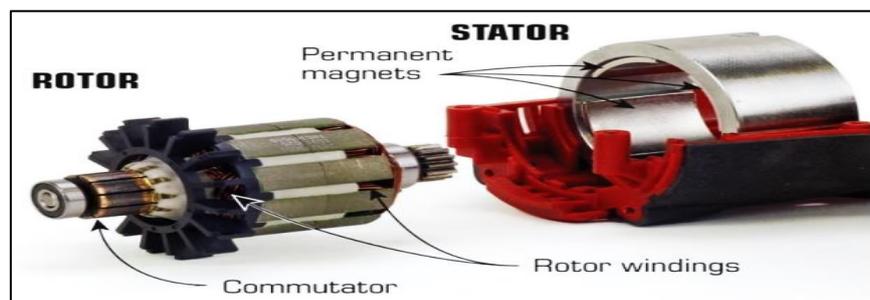


Figura 9 Motor DC Brushless Componentes básicos Fuente:(Paulson, 2020)

Como se observar en la Figura 9 se encuentra las partes principales del motor DC Brushless. Mencionando que este tipo de motores el estator es la carcasa, parte estática que se encuentra en el exterior y el rotor que es la parte móvil que está en el interior y se encuentra unida al eje del motor.

El funcionamiento de estos motores consiste en energizar una bobina para crear un campo magnético, mientras que el rotor tiene un campo magnético constante al momento que encuentra la variación, tiende a distribuir el campo creado por el estator y el rotor haciendo que el rotor rompa su momento de inercia para lograr una rotación. (Pérez & Corres, 2015)

Los motores DC Brushless generalmente pueden tener configuración dependiendo sus fases estas pueden ser monofásico, bifásico y trifásico. Los motores más utilizados son los trifásicos. (Reyes, 2013)

Circuito Equivalente de un motor de corriente directa

El circuito equivalente que se muestra en la figura 9, se forma de dos partes que son: Circuito de excitación "Campo" que produce un campo magnético inmóvil al que se muestra el rotor. Circuito motriz "Armadura" que representa al rotor. (Bañuelos, 2018)

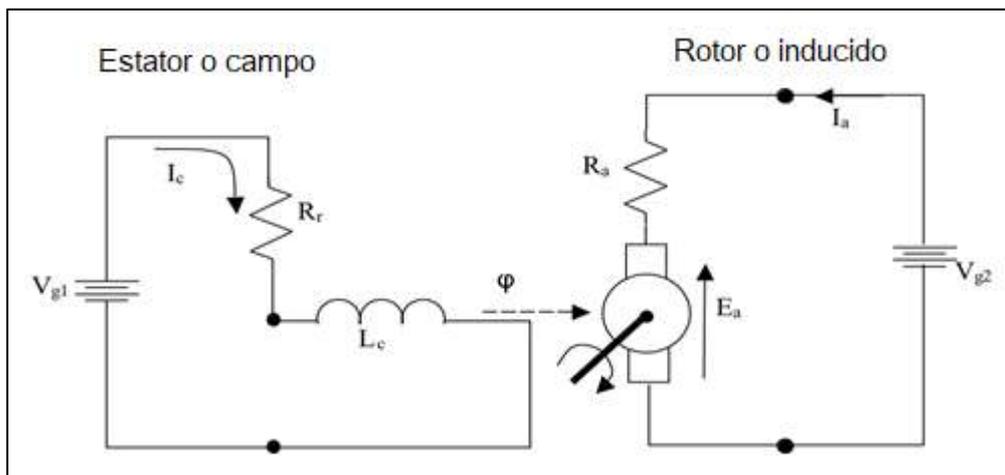


Figura 10 Circuito equivalente de un motor DC Fuente: (Mureira, 2015) Editado por Autor

E_a es el voltaje de la armadura, G representa un parámetro de la máquina denominada inductancia rotacional, ω_r es la velocidad de giro del rotor T es el torque generado y las corrientes I_c e I_a son las corrientes de campo y de armadura.

Puesto que R_a es relativamente pequeña la velocidad de rotación depende principalmente del voltaje de armadura E_a y adicionalmente de la corriente de excitación I_c . Para este trabajo mencionado se hace uso de motores de imanes permanentes por lo que I_c es constante. El torque que se genera es proporcional a la corriente de armadura, R_a hace difícil el control de manera precisa de la velocidad a través del voltaje aplicado a la armadura a pesar de su dependencia. (Bañuelos, 2018)

1.5. Características de diseño del rotor

Las posibilidades de construcción de los motores DC Brushless son limitadas, ya que su diseño depende de distintos parámetros como puede ser el número de polos de la máquina, disposición de la máquina o material de los imanes permanentes del rotor.

Como se sabe el rotor es la parte móvil que contiene un motor, esta parte principalmente se encuentra constituida por imanes permanentes. Estos imanes permanentes pueden variar con respecto al número que se los vaya a utilizar, existen diferentes formas de colocación en el diseño, así como también su posición en el rotor y la posición con respecto al estator. Tomando en cuenta todas estas posibilidades de combinación de estos parámetros se tiene la posibilidad de tener varios diseños del rotor.(Flores, 2015)

La posición que tiene el rotor con respecto al estator no posee una base concreta ya que depende del tipo que se lo vaya a seleccionar es así como se lo selecciona dependiendo si se lo desea a mayor torque o a mayor velocidad ya que existes configuraciones que son:(Flores, 2015)

- Inrunner: rotor en el interior. Estos generan mayores revoluciones por minuto con un menor torque.
- Outrunner: rotor en el exterior. Estos generan un torque mayor pero menor velocidad.

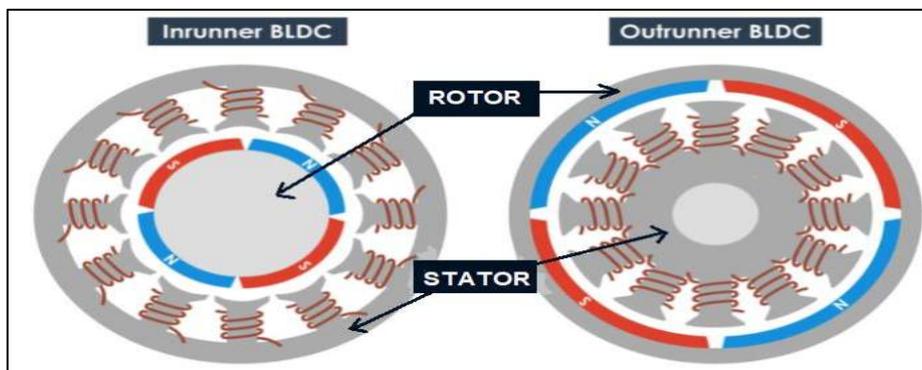


Figura 11 Estator y Rotor Inrunner y Outrunner Fuente: (Futurelab3D, 2019) Editado por Autor.

El número de imanes está relacionado con el número de pares de polos de motor. El número de pares de polos es un parámetro indispensable para poder determinar la velocidad de giro del motor.

Al momento de realizar el diseño y construcción de un motor, acorde a la densidad de flujo magnético que se necesita se debe elegir los materiales con los que se va a construir los imanes permanentes del motor. Se tienen materiales ferrosos muy utilizados en la construcción de motores eléctricos, pero para ciertos tamaños tienen menos densidad

de campo magnético, hoy en día existen diferentes materiales y aleaciones que permiten tener más densidad de flujo magnético con un reducido tamaño de imán.

Se puede encontrar diferentes tipos de colocación de montajes en el rotor estos pueden ser, montados en la superficie del rotor, enterrados en el rotor y en el interior en serie.(Cifre, 2019)

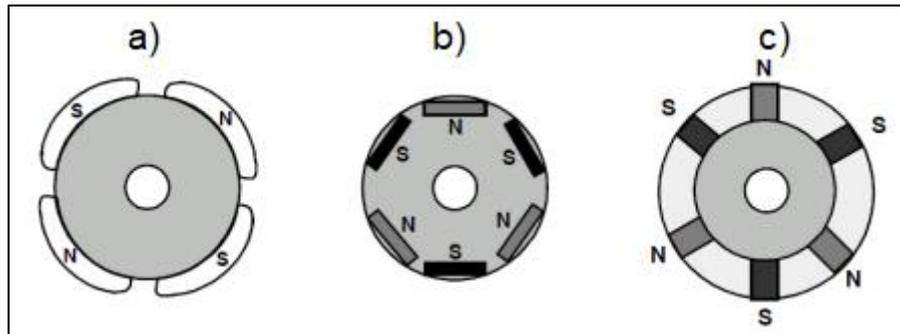


Figura 12 Distribución de los imanes: En superficie, enterrados y en el interior Fuente: (Cifre, 2019)

La Figura 12 muestra las diferentes distribuciones que pueden tener los rotores acorde a su disposición de imanes la primera configuración a) se caracteriza por un campo magnético isotrópico, su estructura mecánica el espacio que se forma en el entrehierro es mayor, lo que tiende a tener una menor capacidad de debilitamiento de flujo. En los imanes que se encuentran en el interior se tiene anisotropía “b) y c)” y el espacio que se forma en el entrehierro tiene a ser menor.(Flores, 2015)

1.6. Características de diseño del estator

Este componente se forma de un diseño previo estableciendo diferentes láminas de acero apiladas una tras otra o de un material similar resistente, designando una serie de ranuras que envuelven los devanados creando un campo magnético que según la polaridad establecida repele y/o atrae el campo magnético que crea el rotor.

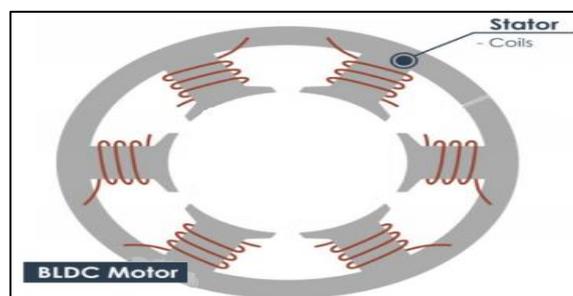


Figura 13 Estator de motor DC Brushless Fuente: HowToMechatronics. Editado por Autor

En la Figura 13 se observa el estator básico de un motor de corriente directa, en donde muestra los núcleos polares en el que se enrolla los devanados. Estos devanados en conjunto con los núcleos magnéticos del estator forman el circuito electromagnético del

motor, al que se lo puede encontrar en configuración monofásica, bifásica y trifásica.(Cifre, 2019)

La configuración trifásica es una de las más tradicionales, las bobinas se las conecta en estrella que serían los devanados. En el motor se tiene tres bornes de conexión (A, B y C) en un extremo se tiene cada fase de bobina por donde se puede conectar el circuito y del otro extremo se encuentran conectados en un mismo punto.

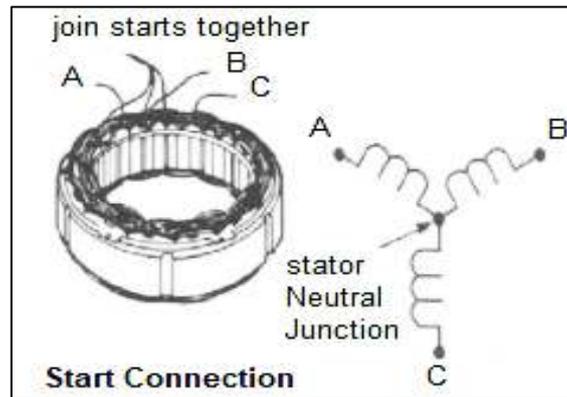


Figura 14 Conexión Estrella de los devanados del estator Fuente: (Cardozo & Cardozo, 2014) Editado por Autor

Dependiendo la configuración que el motor disponga en los devanados del estator se puede tener dos tipos de curvas de trabajo sinusoidal y trapezoidal. La disposición de los devanados da forma a la curva de trabajo conjuntamente con la distancia que existe en el entrehierro.(Cifre, 2019)

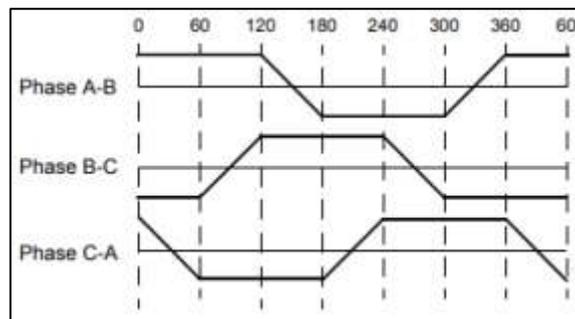


Figura 15 Fuerza contra-electromotriz de un motor DC Brushless de forma trapezoidal. Fuente:(Cifre, 2019)

Una distancia menor del entrehierro permite que exista una concentración de número de líneas de campo magnético mayor, teniendo como resultado una mayor inducción y por ende se tendrá una mayor fuerza electromotriz. Para el caso del motor DC Brushless su diseño establece una menor distancia en el entrehierro por lo que genera una señal de fuerza contra-electromotriz de forma sinusoidal.(Cifre, 2019)

Características de los imanes permanentes

Los imanes permanentes son materiales que puede ser imantados y tiene la capacidad de crear un campo magnético estable a disimilitud de los imanes temporales, debido a que estos imanes solo son capaces de crear un campo magnético al momento que se active una fuerza o alguna energía externa que lo genere. (Rodríguez & León, 2016)

La clasificación que tiene estos imanes se los puede nombrar como: tipo naturales y tipo artificiales. Los imanes permanentes tipo artificiales tienden a ser fabricados con materiales ferromagnéticos duros, se los denomina duros debido a que al momento de ser imantados pueden mantener las propiedades magnéticas hasta el momento en que pierda magnetismo.

La elección de los pares de imanes se debe conocer la elevada remanencia que esos imanes posean, debido a que entre mayor sea la remanencia el flujo magnético también será el mayor al que pueda generar el imán con elevada coercitividad, será más difícil que este se desmagnetice si tiene una coercitividad muy alta. El material con el que están compuesto los imanes permanentes son diversos como por ejemplo la ferrita con baja energía y costo muy bajo, así también como los imanes de tierras raras de energía muy eficiente y de costo muy elevado.(Quichimbo, 2013)

Las tierras raras son elementos que pertenecen a la tabla periódica las aleaciones de estos elementos generan los imanes permanentes de tierras raras. Estos imanes tienden a dividirse en:(Rodríguez & León, 2016)

a) Imanes de neodimio(Nd-Fe-B)

Se componen por boro, hierro y neodimio de ahí se genera sus rasgos metálicos, se oxidan de una manera muy fácil por lo que su recubrimiento es de barniz de zinc o níquel.



Figura 16 Imán permanente de Neodimio Fuente: YouWorldShop

b) Imanes de samario cobalto (Sm-Co)

Se caracterizan por su eficiencia en trabajos de altas temperaturas ya que poseen características térmicas muy estables, a diferencia de los imanes de neodimio son resistentes al óxido.

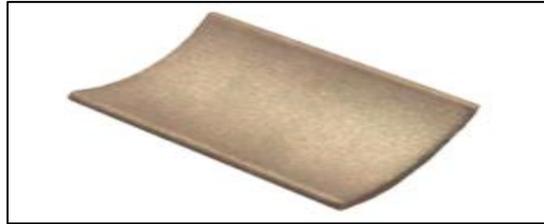


Figura 17 Imán permanente de Samario-Cobalto Fuente: Ningbo Shine Magnetic Technology Co.

La importancia y eficiencia de un motor de corriente directa más que su diseño es el material magnético que tendrán los imanes permanentes. La gran parte de motores utilizan el material de ferrita por su amplia disponibilidad y costo reducido. Hoy en día gracias a las diferentes investigaciones que se ha realizado a los materiales magnéticos existen cada vez más nuevas aleaciones como pueden ser: Níquel-Cobalto, Neodimio-Hierro y Samario-Cobalto. Al elegir una aleación con más densidad magnética que la ferrita aumenta la construcción del motor, permite el diseño y construcción de motores más compactos y ligeros. (Flores, 2015)

1.7. Componentes mecánicos de una máquina de corriente directa

Estos componentes mecánicos resultan de una mezcla de mecanismos y piezas sencillas que conforman una máquina. Estos componentes tienen la capacidad de modificar trayectorias, velocidades fuerzas y energías con ayuda de cambios intermedios.

1.7.1. Eje

El eje es un componente giratorio en motor el que se utiliza para transferir movimiento giratorio entre dos partes, comúnmente estos ejes se los acompaña con un par de rodamientos que giran juntamente con el eje esto se logra debido a que el diámetro interior del rodamiento es móvil.



Figura 18 Eje de motor DC Brushless EMAX Fuente: Autor

Son diseñados dependiendo el criterio de rigidez estática el que posibilita conservar las tolerancias en el entrehierro, esta operación no permite que frecuencias de inestabilidad

puedan perturbar al eje y su comportamiento, todo ello depende de la utilización y aplicación que se le vaya dar.

1.7.2. Armazón

Esta parte es indispensable en una máquina de corriente directa, ya que su función es proteger y cubrir al estator y al rotor contra daños físicos, humedad y químicos.

Existen diferentes tipos de carcasa como son:

a) Totalmente cerrada

No cuenta con un ventilador para su enfriamiento, disipa el calor a través de del marco y de la superficie del montaje, su diseño hace que no requiera un ventilador externo.(Harutyunyan, 2018)

b) A prueba de goteo

Se los utiliza para aplicaciones limpias, sin humedad y sin ningún tipo de exposición al exterior, el diseño que presenta esta carcasa evita que puedan ingresar gotas de agua al interior del motor.(Harutyunyan, 2018)

c) A prueba de explosiones

Está diseñado para aplicaciones en donde el riesgo es alto es decir para ubicaciones con gran riesgo de explosión, esto hace que el material con el que se encuentra fabricado sea de una dureza alta.(Harutyunyan, 2018)

d) De tipo sumergible

Esta carcasa está fabricada de diferentes tipos de materiales ya que depende del tipo del motor, diseño que este establecido y la aplicación a la que disponga la utilización en espacios con humedad y que conlleven una interacción directa con líquidos. (Flores, 2015)

1.7.3. Ventilación

La ventilación de motores eléctricos genera un flujo de aire eficaz optimizando el intercambio de aire del rotor con su carcasa, dependiendo el diseño que se haya establecido y dependiendo el motor la ventilación será colocada en un punto óptimo de la carcasa en el que permita el mayor ingreso de flujo de aire hacia el motor.

Existen dos tipos de ventilación para motores eléctricos más utilizados:

- a) Ventilación forzada:** Este sistema se lo aplica especialmente para motores eléctricos mediante variador de frecuencia, esta unidad de ventilación forzada tiene como función refrigerar el motor, este sistema es accionado por un variador

de frecuencia que gira a bajas revoluciones, obteniendo así un flujo de aire extra mejorando su refrigeración y rendimiento.(Quichimbo, 2013)

- b) Ventilación por aire natural:** Este sistema viene dado por el diseño del motor es decir en el diseño de su carcasa, en la que se establece una serie de grietas y orificios que permiten el ingreso de flujo de aire y dirigen este mismo flujo hacia la parte interior del motor teniendo así una refrigeración natural.(Tong, 2014)

Para finalizar este capítulo es importante señalar que las características de los motores de imanes permanentes sin escobillas de corriente directa escogido tienen diversas formas de diseño que dependiendo su aplicabilidad se puede modificar ciertos parámetros para su funcionamiento, en este caso se optó por realizar un motor de corriente directa "Outrunner" en el que el rotor como parte principal del motor se encuentra en la carcasa permitiendo así generar mayor torque.

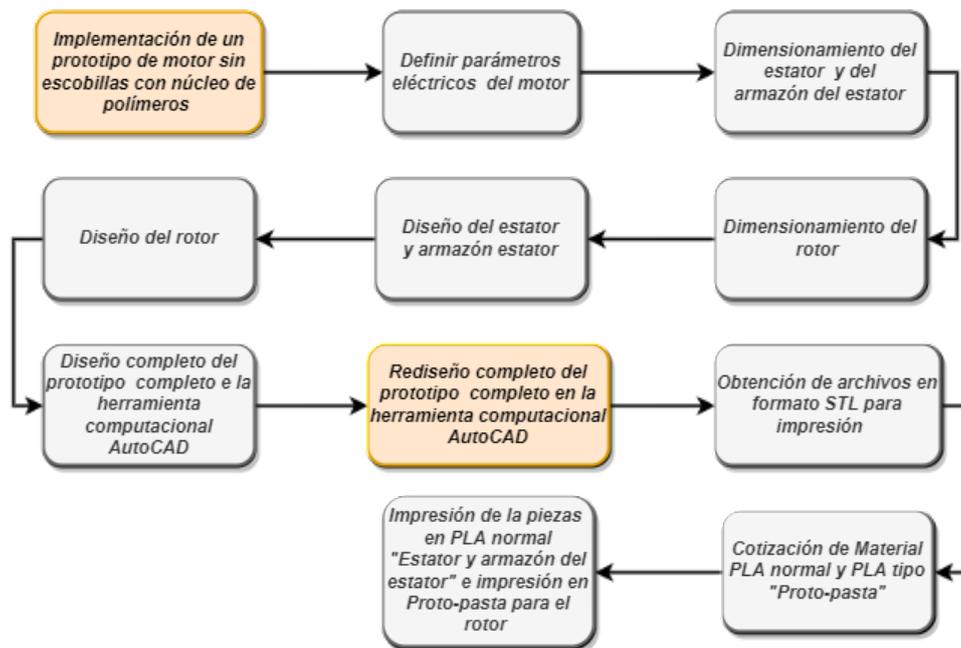
Capítulo 2: Diseño de un prototipo de motor de corriente directa sin escobillas con núcleo de polímeros

2.1. Descripción

Este trabajo de grado tiene como fin el dimensionamiento, diseño e implementación de un motor de corriente directa sin escobillas de imanes permanentes a través de impresión 3D. Este trabajo fue organizado de la siguiente manera en el capítulo 1 se realizó una búsqueda detallada de los tipos de motores DC que existen y sus características principales, en el capítulo 2 se muestra el dimensionamiento y el diseño de las partes del motor, en el capítulo 3 se realizó la implementación del prototipo con las diferentes pruebas de funcionamiento.

2.2. Diagrama de flujo

En este capítulo se muestra a detalle el proceso de diseño de un prototipo de motor de corriente directa sin escobillas con núcleo de polímeros, mostrando el diseño del estator, el rotor y materiales utilizados en el mismo. .



Obtenidos los datos de cada pieza del motor se estableció un diseño en la herramienta computacional AutoCAD en el que se realizó detalladamente cada pieza, dependiendo que tan funcional sea la pieza para corregir errores se realizó un rediseño ajustando una pieza de la otra. Para la impresión se estableció la utilización de PLA normal y PLA protopasta en el rotor debido a su resistencia.

2.3. Metodología

La metodología utilizada para desarrollar el trabajo de grado se desglosó en diferentes pasos que consisten en cumplir los objetivos previamente planteados estableciendo la estructura que se presenta a continuación:

1. Una recolección de datos de las diferentes características que poseen los motores Brushless de corriente continua, así también como los tipos de modelos Brushless que se existen y su estructura.
2. Se definió parámetros eléctricos y mecánicos tomadas de la investigación previamente realizada, adicional a ello se realizó una comparación de los tipos de motores de corriente directa existentes.
3. Se realizó un dimensionamiento de cada una de las piezas que tiene el motor, estator, rotor y armazón, previo a una recolección de información que se obtuvo de los tipos de motores Brushless existentes.
4. En el diseño del motor se utilizó el programa computación AutoCAD ya que es una herramienta muy útil al momento de crear modelos 3D, obtenidas las dimensiones de las piezas del motor se realizó un modelo 2D para luego de ello transformar a un modelo 3D.
5. Obtenido el modelo 3D del motor se comparó las diferentes piezas del diseño estableciendo un rediseño de piezas ya que se debía modificar cada pieza para que encaje una con otra.
6. El diseño final que se obtuvo previamente del rediseño se lo llevo a un formato que pueda ser impreso, es decir las piezas fueron transformadas a un formato STL.
7. El material de impresión que fue designado para las piezas se cotizó dependiendo las estructuras del motor estos fueron PLA ferromagnético y PLA "protopasta" fibra de carbono.
8. En la impresión de las piezas del motor los materiales PLA ya establecidos se modificaron nuevamente ajustando el diseño del motor y encajando de manera óptima cada pieza.
9. Una vez que se obtuvo las piezas impresas se realizó la construcción y ensamble de cada de las piezas y componentes.
10. Ensamblado el motor se procedió a realizar las pruebas y así validar y verificar datos del funcionamiento.

2.4. Descripción del programa AutoCAD

AutoCAD es un software que tiene distintas herramientas para el diseño de dibujos tanto en 2D como 3D. Los desarrolladores han ido modificando cada una de sus

herramientas con el objetivo de poder crear diseños más robustos y sofisticados teniendo así diseños casi reales. Hoy en día se está herramienta de diseño se ha ido acoplando a distintas ramas de trabajo utilizados principalmente por diseñadores, ingenieros, arquitectos y técnicos. (Fane, 2016)

Interfaz del programa AutoCAD

Se denomina Interfaz a la pantalla que aparece cuando se da inicio al programa es decir es la apariencia que posee el programa al momento de ejecutarse.

Esta interfaz cuenta con diferentes herramientas fundamentales para el diseño y modelamiento a continuación se nombran algunas de ellas:(Tickoo, 2016).

Tabla 2 Herramientas de trabajo del programa computacional AutoCAD

Área de diseño	Es toda el área de espacio por lo general de color negro en donde inicia el diseño "Dibujo"
Cuadros de diálogos	Brinda accesos rápidos en el área de trabajo
Barra de desplazamiento	Son las barras que permiten desplazarse en el entorno de trabajo.
Cuadros de estado	Brindan las coordenadas, botones de control y tipos de modo de la línea.
Barra líneas de comando	Esta barra por lo general recibe instrucciones de manera escrita.
Cuadro de presentaciones	Es como un folleto que consta del modelo, espacio de papel y tipos de presentaciones.
Barra de herramientas	Consta de diferentes herramientas principales que todo software posee: propiedades, zoom, modificar y estándar
Barra de menús	Son las opciones: insertar, archivo, edición, ver entre otras.
Lista de opciones	Es el listado de órdenes de cada grupo de trabajo. "Iconos"

Como se puede observar AutoCAD es un software que cuenta con diferentes características de trabajo y eficiencia, este cumple con el objetivo de los diseñadores de ser un programa usable, efectivo y portable.

2.4.1. Simulación de prototipos en 2D

El modelamiento 2D refleja imágenes que están compuestas por dos dimensiones, esto quiere decir tiene largo y ancho sin profundidad. Para la creación de estos modelos 2D se integran formas geométricas vectoriales tal como son: polígonos, puntos, líneas y arcos. Generalmente estos tipos de diseño son utilizados únicamente para fabricación de logos, ilustraciones y tipografías que tienen un acabado plano y geométrico.(Palm & Yarwood, 2017)

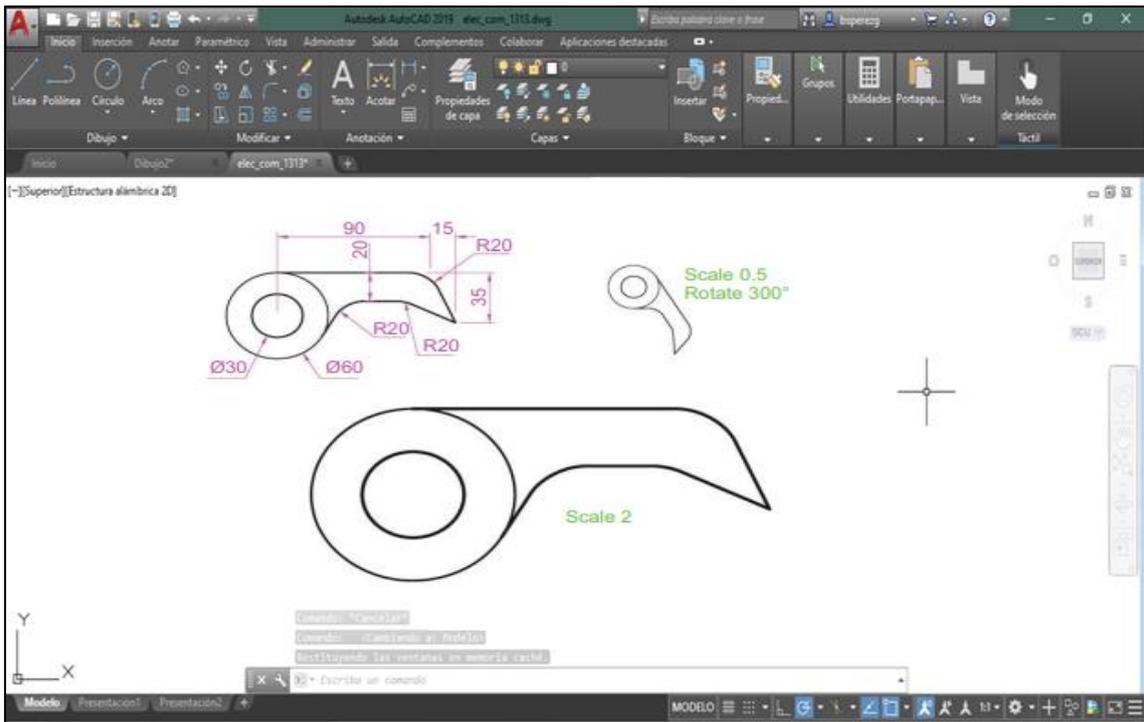


Figura 19 Modelamiento de un diseño en 2D de AutoCAD Fuente: (Palm & Yarwood, 2017) Editado por Autor.

Como se observa en la Figura 19 está constituido de un espacio bidimensional geométrico proyectado en un plano, que está conformado de dos dimensiones de largo y ancho sin tener ninguna profundidad.

2.4.2. Simulación de prototipos en 3D

El modelamiento 3D de AutoCAD posibilita la creación de diseños utilizando herramientas de sólido, superficie y malla, estas opciones conjuntamente con representaciones matemáticas dan origen a una forma tridimensional es decir permite la creación de modelos sólidos (ASCENT, 2018).

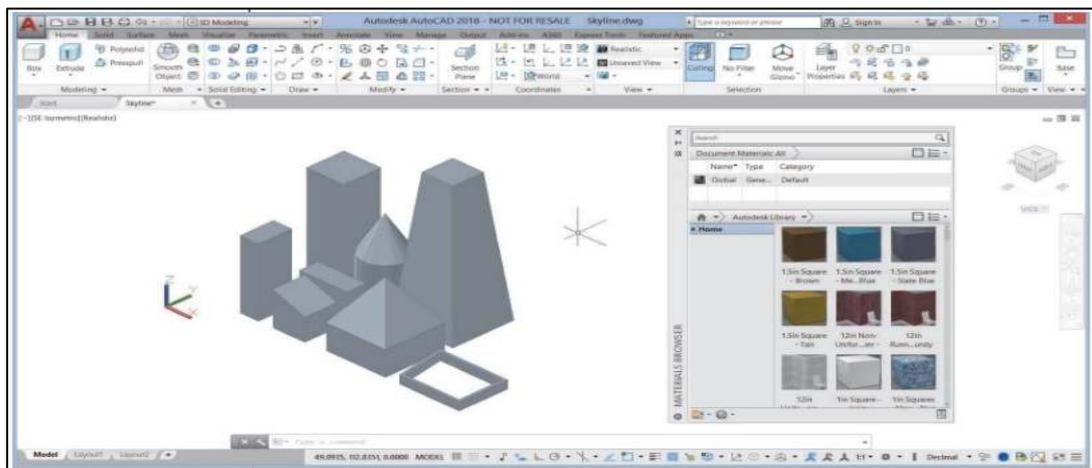


Figura 20 Modelamiento de un diseño en 3D de AutoCAD Fuente: (ASCENT, 2018).

Observando en la Figura 20 muestra un sólido tridimensional que tiene una construcción y diseño de una pieza en 3D.

2.4.3. Modelamiento de prototipos

El modelamiento de prototipos se centra en la utilización de un plano bidimensional en el que se obtiene una serie de medidas limitadas llamándolo medidas en 2D estas medidas tienen la característica de ser geométricos ya que solo brindan vistas en líneas, círculos, cuadrados y puntos (Steve, 2017).

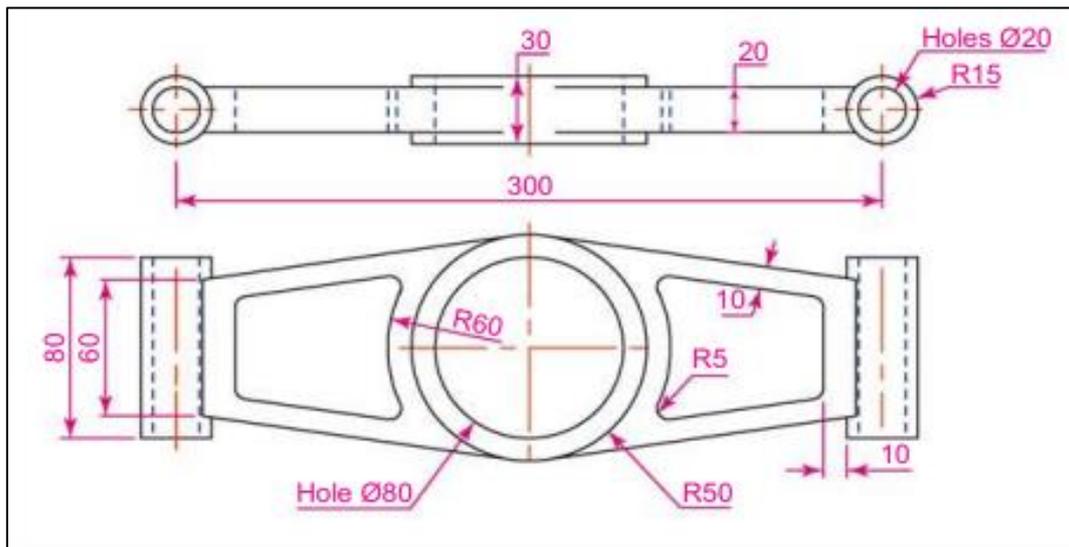


Figura 21 Modelamiento de prototipo 2D con dimensiones proyectadas a 3D. Fuente: (Steve, 2017)

Como se observa en la Figura 21 es una figura plana que consta de formatos planos, proyección plana (largo y ancho).

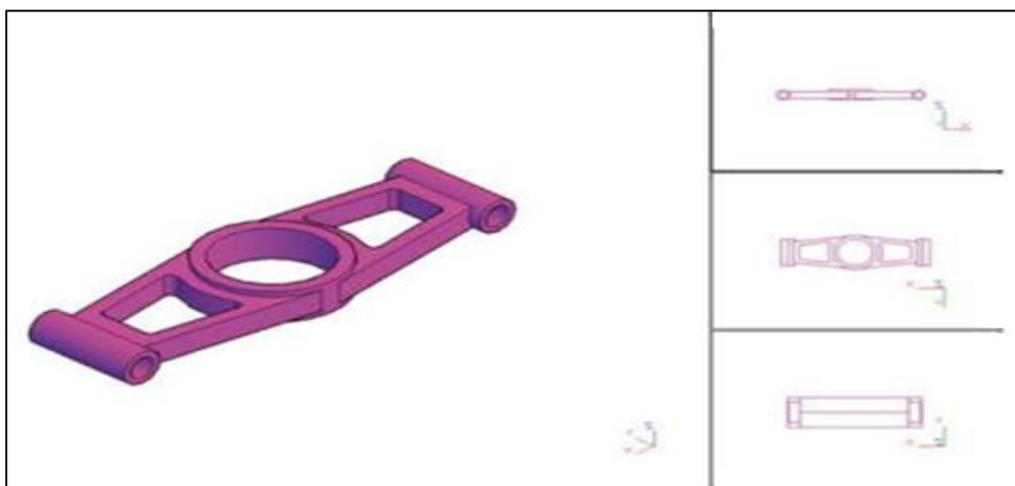


Figura 22 Resultado del modelamiento de prototipo 3D de AutoCAD. Fuente: (Steve, 2017)

Ahora lo que se realiza es el modelamiento 3D del prototipo con la ayuda del software computacional AutoCAD ya que para la fabricación de piezas el software ayuda modelando un diseño tridimensional.

2.5. Diseño de un motor sin escobillas de imanes permanentes

La Figura 23 muestra una vista desglosada del motor en conjunto. El estator encaja al rotor de una manera simétrica y con ayuda del armazón del estator se logra mantener fijo el sistema añadiendo una serie de aberturas para su ventilación. A lo largo del capítulo 2 se especifican cada de una de las características de construcción de las piezas que conforma el motor.

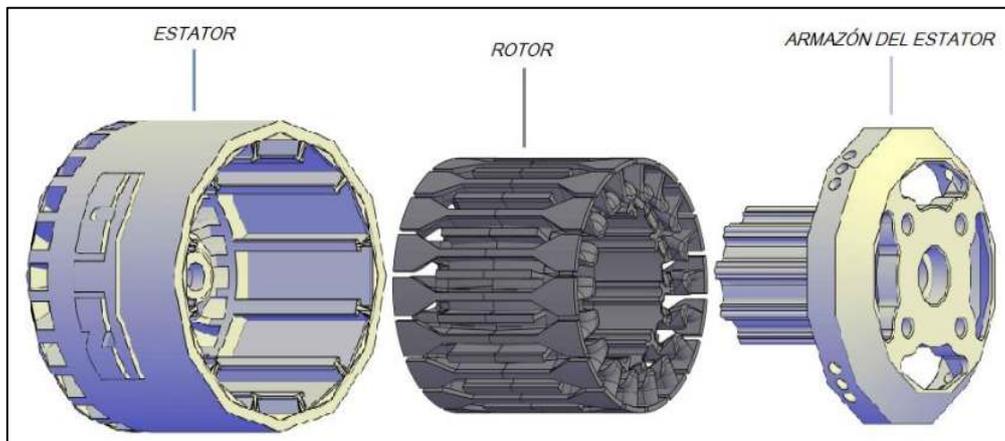


Figura 23 Vista a Desglose del prototipo en 3D Fuente: Autor

2.6. Diseño del Rotor de un motor de corriente directa sin escobillas

El diseño del rotor como pieza principal de un motor sabiendo que es la parte móvil que gira en el interior de un campo magnético, este campo es creado gracias a los imanes permanentes que contienen el estator y otro campo magnético generado por el rotor.

Se forma por circuito magnético, constituido por chapas de polímero, aisladas entre sí con espaciamentos, para reducir las pérdidas por corrientes parásitas. Para determinar el número espiras por ranura que tendrá el rotor se utilizó la siguiente ecuación.

$$Ranuras = \frac{1.44 * 2p * Vin}{2 * f * L * \varnothing_{interno} * K * 0.8} \quad (1)$$

En donde:

$2p$ = al número de polos del estator.

Vin = al voltaje de entrada de funcionamiento del motor.

f = frecuencia normal a la frecuencia de trabajo.

L = longitud de ranura a obtener.

$\emptyset_{\text{interno}}$ = al diámetro interno del estator.

K = número total de ranuras a obtener.

Obteniendo como resultado de la ecuación 1 lo siguiente.

$$Ranuras = \frac{1.44 * 6 * 12}{2 * 60 * 2 * 4.5 * 36 * 0.8} = 3.57$$

Del resultado obtenido se aproxima al decimal superior teniendo así.

$$Ranuras = 3.6$$

Equivalente a 36 ranuras como mínimo y 40 ranuras como máximo, adicional a ello como se observa la Figura 24 se tiene la relación de polos magnéticos con ranuras, se ha señalado los 12 imanes que se utilizará relacionando con las 36 ranuras tiene así un dimensionamiento funcional de las ranuras del rotor.

Número de Imanes	Número de Ranuras						Relación de Ranura con Bobina
	3	6	9	12	15	18 en adelante	
2	ABC	AbCaBc	AacBBaaCCbb	AaccBBaaCCbb	AAACCCbbbaaaCCCb	AAaccBBBaaCCCb	1:1
4	ABC	ABCABC	ABaCaCbCb	AcBaCbAcBaCb	AAcBaCCbAcBBaCb	AAcBBaCCbAAcBBaCCb	2:1
6			ABCABCABC			AcBaCbAcBaCbAcBaCb	3:1
8	ABC	ABCABC	AaABbBCcC	ABCABCABCABC	AcaCABabABCbcBc	ABaCacBcbABaCacBcb	4:1
10	ABC	AbCaBc	AaABbBCcC	AabBCcaABbcC A-b-C-a-B-c	ABCABCABCABCABC	AcabABCbcaCABabcBC	5,6:1
12			ABCABCABC			ABCABCABCABCABC AaBbCcAaBbCcAaBbCc A-B-C-A-B-C-A-B-C	6,7,8:1
14	ABC	AcBaCb	ACaBAbCBc	AacCBbaACcbB A-b-C-a-B-c	AaAaABbBbBCcCcC	AaBcCABbcaABCcabBC	7,8,9:1
16	ABC	ABCABC	AAbCCaBBc	ABCABCABCABC	AaAaAcCcCBbBbB	AaABbBCcCAaABbBCcC	8,9:1
18	ABC	ABCABC	AAbCCaBBc	ABCABCABCABC	AaAaAcCcCBbBbB	AaABbBCcCAaABbBCcC	9:1
20	ABC	ABCABC	AbbCaaBcc	AbCaCbAbCaBc	ABCABCABCABCABC	AaABbBCcCAaABbBCcC	10:1

Leyenda	
	Óptimo
	Funcional
	Bajo Rendimiento
	No Usable
ABC	Bobinado en el sentido de las agujas del reloj
abc	Bobinado en el sentido contrario a las agujas del reloj
-	Sin Bobinar

Figura 24 Dimensionamiento de relación de Ranura con Imán Fuente: (Quichimbo, 2013)

También en la Figura 24 se establece la relación de bobina con ranura obteniendo como resultado 8 vueltas de bobinado por ranura, además se tiene los criterios para principio del bobinado mostrados como Fases A, B y C.

$$Factor\ de\ aislamiento\ entre\ ranuras = \frac{\emptyset_{\text{interno}} * 2}{K * 2p} * V_{in} \quad (2)$$

Obteniendo como resultado de la ecuación 2 lo siguiente.

$$Factor\ de\ aislamiento\ entre\ ranuras = \frac{4.5 * 2}{36 * 6} * 12 = 0.5$$

Es decir el espacio entre ranura y asilamiento para cada bobina en relación de sus vueltas será 5 mm a partir del centro de ranura.

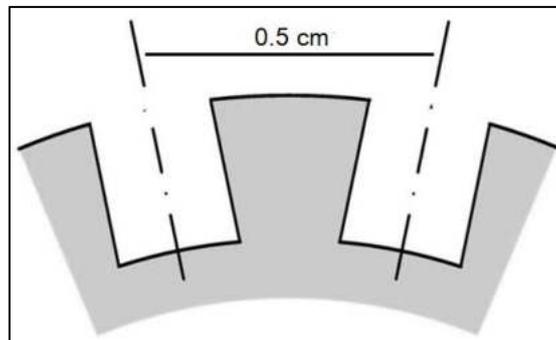


Figura 25 Factor de aislamiento de ranuras Fuente: (Quichimbo, 2013)

Establecidos los parámetros de dimensionamiento anteriores el diseño y forma radial de cada una de las ranuras ya dependerá del alambre de cobre esmaltado que se utilice, en los siguientes temas del trabajo de grado se dimensionará y seleccionará el tipo de alambre a utilizarse.

2.6.1. Determinación de número de vueltas de bobinado del rotor.

La parte principal de este dimensionamiento es numerar cada una de las ranuras del estator dimensionadas anteriormente desde la ranura 1 hasta la 36 de este modo aplicando diferentes ecuaciones para el cálculo del bobinado se obtuvo los diferentes resultados para poder bobinar el rotor sabiendo que este bobinado tendrá tres fases.

Numero de bobinas por grupo

Para calcular el número total que tendrá las bobinas se aplicó la siguiente ecuación

$$N^{\circ} \text{ de bobinas por grupo "U"} = \frac{K}{2pq} \quad (2)$$

En donde:

K = número total de ranuras a obtener.

$2p$ = número de par de polos.

q = número de fases.

Obteniendo como resultado de la ecuación anterior lo siguiente.

$$"U" = \frac{36}{12 * 3} = 1$$

Es decir que por cada ranura se tendrá 1 bobina con las vueltas establecida en la ecuación número (5).

Numero de ranura por polo y fase

Utilizando la ecuación que se muestra a continuación se obtuvo el número de ranura por polo y fase.

$$N^{\circ} \text{ de ranura por polo y fase "Krst"} = \frac{K}{q} \quad (3)$$

En donde:

K = número total de ranuras a obtener.

q = número de fases

Obteniendo así el resultado de.

$$\text{"Krst"} = \frac{36}{3} = 12$$

Es decir cada 3 ranuras se tendrá una fase con su respectiva bobina en relación a un polo del estator es decir a un imán.

Amplitud de bobina

El salto de ranuras o la amplitud que tendrá cada grupo de bobina.

$$\text{Amplitud de grupo "m"} = (q - 1)U \quad (4)$$

En donde:

U = número de bobinas por grupo.

De ello se obtuvo lo siguiente.

$$m = (3 - 1)1 = 2$$

Quiere decir que cada bobina tendrá el salto de 2 ranuras para empezar a bobinar otra bobina.

Numero de vueltas por ranura

A continuación se muestra la siguiente ecuación la cual establece el número de vueltas máximas y mínimas que puede contener bobina.

$$N^{\circ} \text{ de vueltas por ranura "N"} = \frac{l}{P \cdot 2p \cdot m} \quad (5)$$

En donde:

L = longitud aproximada del cable esmaltado en mm.

P = distancia de la amplitud de bobina en mm.

m = amplitud o salto de ranura que tiene cada bobina.

De ello se obtiene el siguiente resultado.

$$N = \frac{3000}{15 * 12 * 2} = 8.3$$

Se selecciona solo la parte entera del resultado que es 8 que será el número de vueltas o también se puede establecer dos inmediatos inferiores que puede ser 7 y 6 vueltas como mínimo, además este resultado también se puede apreciar en la Figura 24 relación de ranura con bobina.

Principio de cada fase.

Para obtener el inicio de fase de las bobinas se utilizó

$$\text{Pasos de principio de fase } X = \frac{K}{4 * p}, Y = \frac{K}{3 * p}, Z = \frac{K}{2 * p} \quad (6)$$

En donde:

K = número total de ranuras a obtener.

p = número de par de polos.

De la ecuación anterior se obtiene el siguiente resultado.

$$X = \frac{36}{4 * 6} = 1.5, \quad Y = \frac{36}{3 * 6} = 2, \quad Z = \frac{36}{2 * 6} = 3$$

Este resultado muestra el inicio de cada bobina con su respectiva fase es decir reemplazando X, Y, Z con R, S y T se obtiene que la fase R empezará su bobinado en la ranura 1, la fase S en la ranura 2 y la fase R en la ranura 3.

Grupo total de bobinas por ranura

Calculando el número de grupos totales del bobinado

$$\text{Grupo total del bobinado "Gt"} = 2 * p * q \quad (7)$$

En donde:

p = número de par de polos

q = número de fases

$$Gt = 2 * 6 * 3 = 36$$

De ello se establece que con la utilización de las tres fases R, S y T se tendrá por cada fase un total de 12 bobinas y en total el grupo de bobinas que se obtendrá será 36 bobinas.

Después de obtener todos los datos del bobinado se realizó una tabla de principios de fase que ayuda a establecer el orden del bobinado indicando la entrada de ranura en cada fase.

A continuación se muestra la tabla de principios con los datos obtenidos

Tabla 3 Principio de bobinado

R	S	T
1	3	5
4	6	8
7	9	11
10	12	14
13	15	17
16	18	20
19	21	23
22	24	26
25	27	29
28	30	32
31	33	35

Establecida la tabla anterior con la ecuación (2) se realizará el primer grupo de bobinas que pertenece a la fase R, aproximadamente se estableció 3 metros de largo de alambre esmaltado N° 22 AWG que se muestra en la Figura 49, con la ecuación (6) y la Tabla 3 se tiene el principio de bobina para la fase R que inicia en la ranura 1 como se observa en la Figura 27, luego de ello con la utilización de las ecuaciones (4) y (5) se tiene la amplitud que tendrá la bobina es decir cuántos saltos ranura constará y el número de vueltas establecidas en la bobina, también como se observa en la figura 27.

Así se continúa con las fases restantes S y T con el mismo procedimiento anterior simplemente hay que recalcar que para cada fase se debe dejar 15 cm libre para así poder tener un punto común en conjunto de las tres fases, como se observa a continuación.

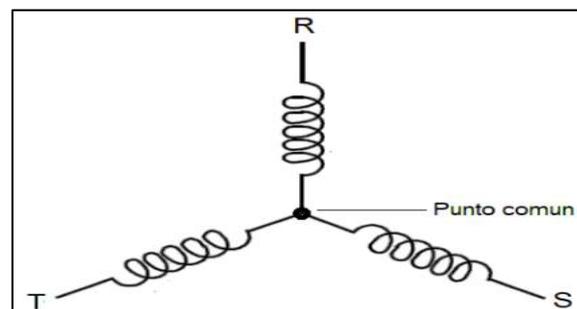


Figura 26 Conexión en estrella Fuente: Autor.

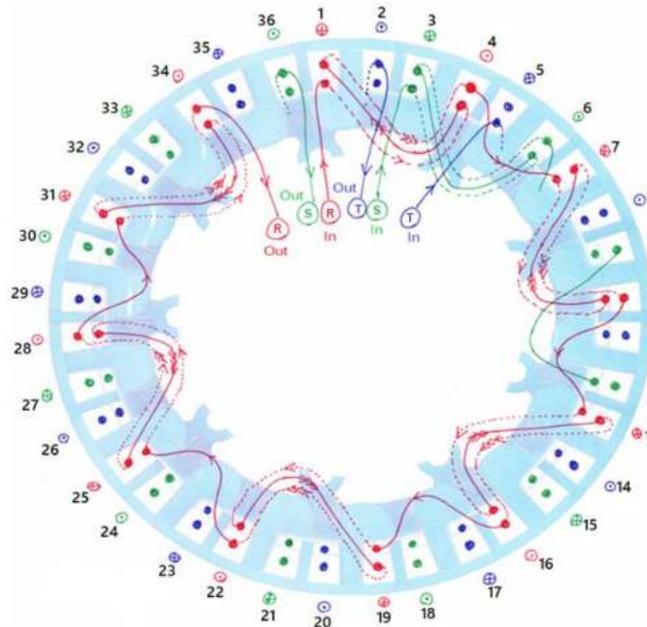


Figura 27 Esquema de bobinado para un estator de 36 ranuras y rotor de 6 pares de polos Fuente: Autor

En la figura anterior solo se muestra dos vueltas por grupo de bobina este simplemente busca representar el camino de las fases y las ranuras correspondientes para cada grupo de bobina, representado solamente la fase R ya que es el mismo procedimiento para las fases restantes.

2.6.2. Dibujo del prototipo en AutoCAD del Rotor

La pieza realizada tiene forma cilíndrica con un diámetro de 4 cm y con 36 ranuras dimensionadas anteriormente que rodean radialmente de manera radial. Las garras de ajuste internas que posee el rotor dan paso al ajuste con el armazón del estator manteniendo fija ambas piezas.

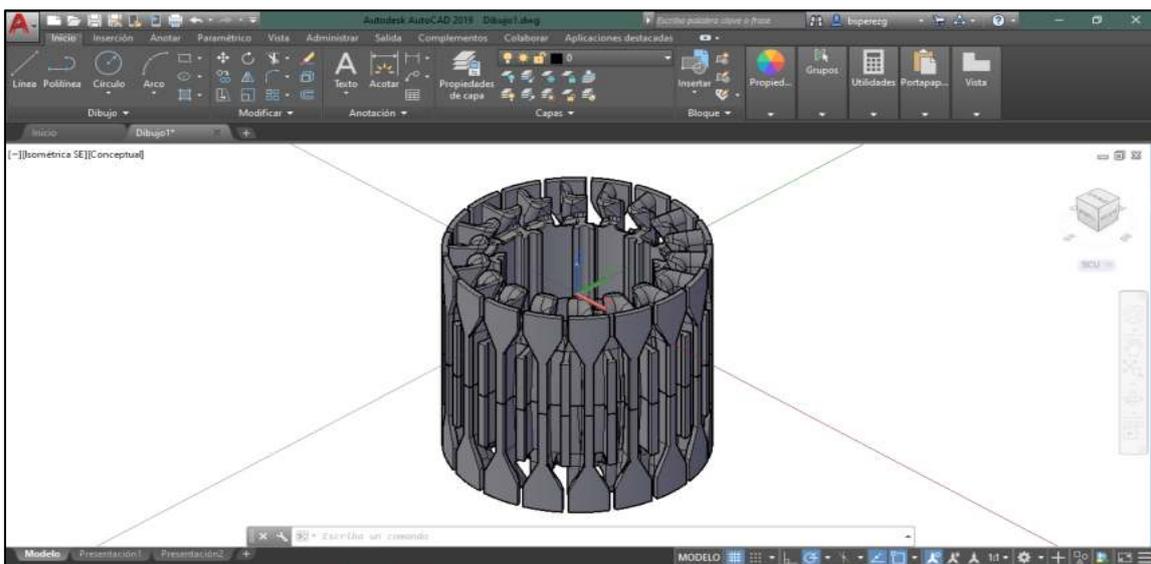


Figura 28 Dibujo del rotor tridimensional realizado en el programa computacional AutoCAD Fuente: Autor

Agregando las garras de ajuste que presenta la figura 30 alrededor del diámetro interior del rotor se asegura el ajuste con el armazón del estator, el espacio entre garra es de 3 mm que se ajusta con las aletas de fijación observadas en la Figura 38 manteniendo una presión adecuada asegurando su fijación.

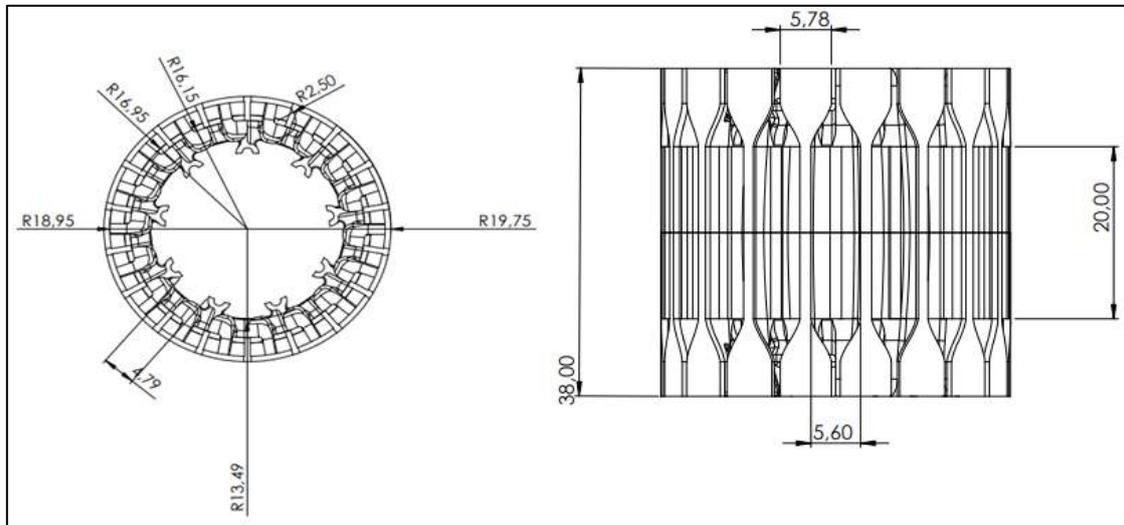


Figura 29 Dimensionamiento del rotor medidas generales Fuente: Autor

Como se observa la Figura 29 muestra las dimensiones generales del rotor, estas medidas servirán como base para las piezas restantes del prototipo de tal manera que se vayan ajustando unas con otras. El plano completo del rotor se puede observar en la sección de anexos.

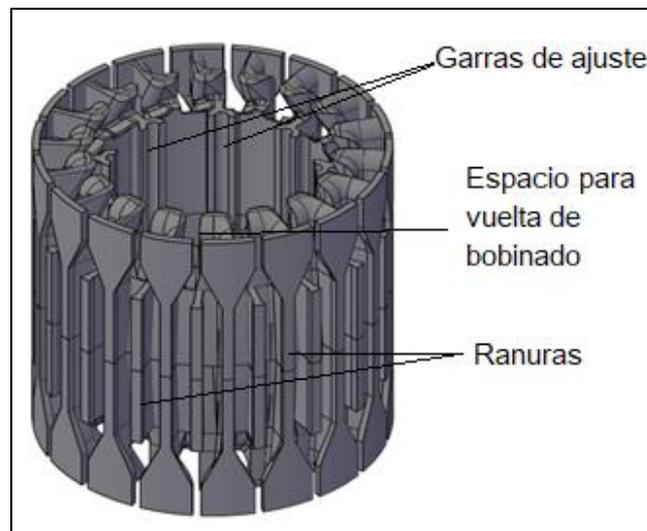


Figura 30 Diseño tridimensional final del rotor realizado en el programa computacional AutoCAD Fuente: Autor

El diseño de la Figura 30 es óptimo ya que al momento de realizar el bobinado tiene suficiente espacio para vueltas de bobina permitiendo realizar 8 vueltas de bobina dimensionadas anteriormente. Además el espacio entre ranuras realizadas permite de una manera efectiva el aislamiento entre bobinas.

2.7. Diseño del Estator de un motor de corriente directa sin escobillas

Para calcular el número mínimo de polos que tendrá el estator se toma como base los datos obtenidos del rotor, midiendo el diámetro externo “ \varnothing Externo” y el diámetro interno “ \varnothing Interno”

Entonces se procede a calcular el número mínimo de polos con la siguiente ecuación.

$$N^{\circ} \text{ mínimo de polos "N. m. p"} = \frac{\varnothing \text{ Exterior rotor}}{\varnothing \text{ Interior rotor}} \quad (8)$$

Obteniendo como resultado lo siguiente

$$N. m. p = \frac{19.75}{13.49} = 1.46$$

Del resultado y con la utilización de la figura 31 se obtiene el total de 6 pares de polos o también a 12 polos “imanes”, adicional a ello el resultado se puede corroborar en la Figura 24 que hace relación al número de ranuras del rotor con los polos del estator.

Pares de Polos	Numero Mínimo de Polos	
2	1,7	1,9
4	1,55	1,65
6	1,4	1,5
8	1,3	1,4
10	1,2	1,3

Figura 31 Cálculo de número mínimo de polos Fuente: (Quichimbo, 2013)

Una vez que se tiene el número mínimo de polos se procede a dimensionar las paredes que tendrá el estator de forma cilíndrica se representara como:

L = largo del imán.

t = espesor de pared.

r = el radio interno.

p =presión interna.

σ = tensión tangencial en las paredes del estator

Por efecto de la presión interna p , tiende a generarse una tensión tangencial σ en las paredes del estator, entonces equilibrando las fuerzas.

$$pL2r = 2\sigma Lt \quad (9)$$

De la ecuación (9) se despeja el espesor de la pared

$$t = \frac{pr}{\sigma} \quad (10)$$

Calculando la presión interna del estator es decir la fuerza centrípeta de los 12 imanes distribuidos en el estator.

$$p = 12 \frac{F(\omega)}{2\pi r L} \quad (11)$$

Donde:

$F(\omega)$ = fuerza centrípeta

Que percibe cada imán al girar a una velocidad ω , esta también se puede expresar como:

$$F(\omega) = m_{\text{iman}} * \omega^2 r \quad (12)$$

Donde:

m = masa del imán.

Después de ello se evalúa las ecuaciones (11) y (12) en la ecuación (13)

$$t = 6 \frac{m_{\text{iman}} * \omega_{\text{max}}^2 r}{\sigma \pi L} \quad (13)$$

Donde:

σ = Resistencia del material utilizado, en este caso el PLA.

Obtenido como resultado lo siguiente:

$$t = 6 \frac{18.66g * 20000^2 rpm * 27mm}{40g * 3.1416 * 50mm} = 1.8 mm$$

Cabe recalcar que se calculó la mitad del espesor con 6 imanes, lo que resta es multiplicar el resultado por 2 para obtener el espesor total.

$$t = 1.8 mm * 2 = 3.6 mm$$

Este resultado se aproxima al inmediato superior ya que así se obtendrá un espesor más resistente al momento de realizar el funcionamiento del prototipo.

$$t = 4 mm$$

De esta manera se encontró el espesor que tiene el estator con sus 6 pares de polos distribuidos radialmente.

El estator contiene los polos de la máquina, que son los imanes permanentes distribuidos radialmente. En el caso del prototipo que se diseñó se utilizó principalmente material PLA para ello anteriormente se estableció el espesor que tendrá todo el estator.

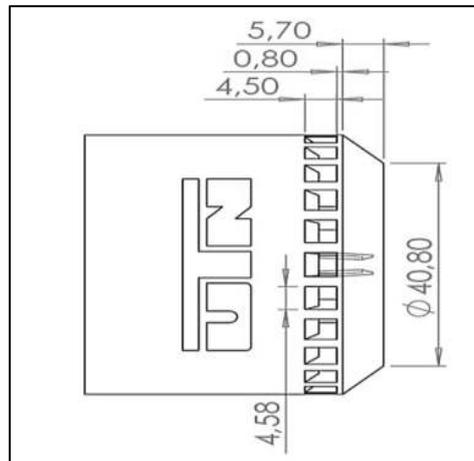


Figura 32 Dimensionamiento del estator medidas generales Fuente: Autor

Una vez que se obtuvo las medidas generales del estator y dimensiones presentadas en la Figura 32 y 33 procede a encajar la posición radial que tendrán los imanes de neodimio para ello se distribuyó simétricamente todos los 12 polos, y seguidamente se estableció el diámetro que tendrá el eje a partir del diámetro interno del estator.

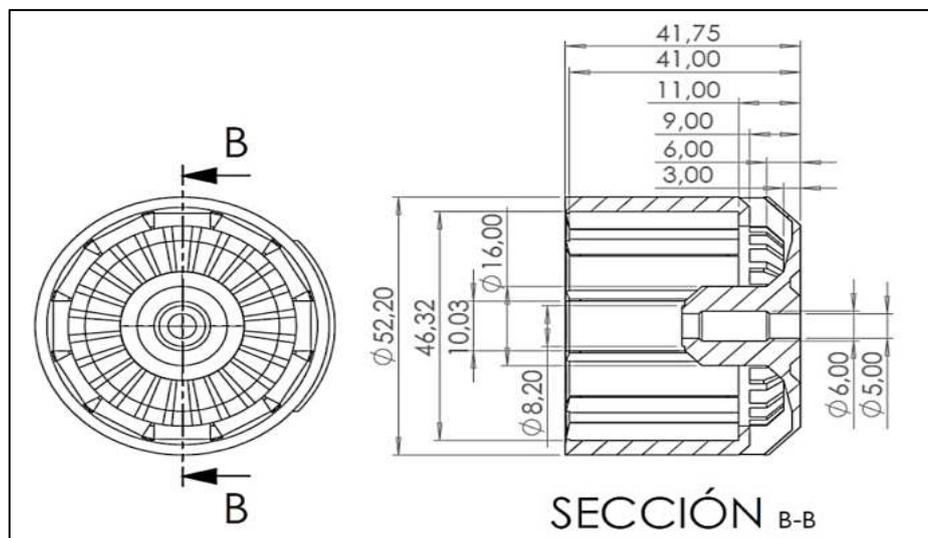


Figura 33 Dimensionamiento del estator de la base interior y diámetros Fuente: Autor

En la sección de anexos se presenta el plano de las dimensiones completas del estator a detalle, mostrando cada una de sus medidas.

2.7.1. Dibujo de prototipo en AutoCAD del Estator

Como se puede observar en la figura 34 se muestra la vista del estator tridimensional, esta pieza va a contener los imanes permanentes en su interior, que se fijó de una forma radial de esta manera se evitará que los imanes se desplacen fuera del estator. La posición en la que van cada uno de los imanes evitan el contacto directo con el rotor evitando daños en las ranuras.

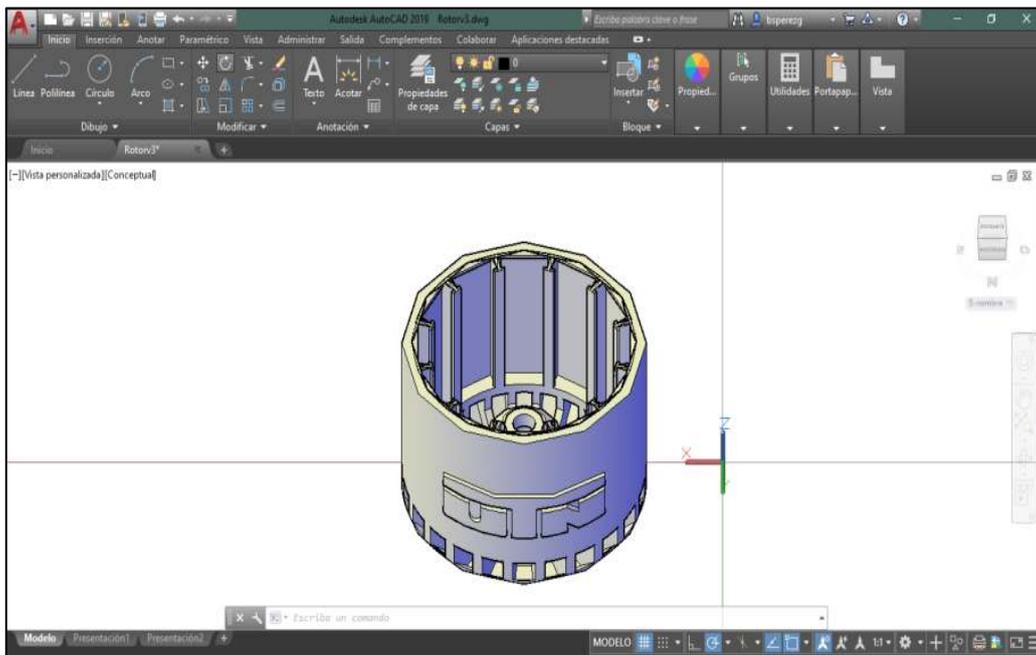


Figura 34 Dibujo del estator tridimensional realizado en el programa computacional AutoCAD Fuente: Autor

Para ajustar y aislar adecuadamente los imanes dentro del estator se agregó en los alojamientos de los imanes una forma de T que muestra la Figura35. Adicional a ello en el diseño se colocó en las paredes cilíndricas orificios alrededor del estator esto permitirá la ventilación natural del prototipo al momento del funcionamiento.

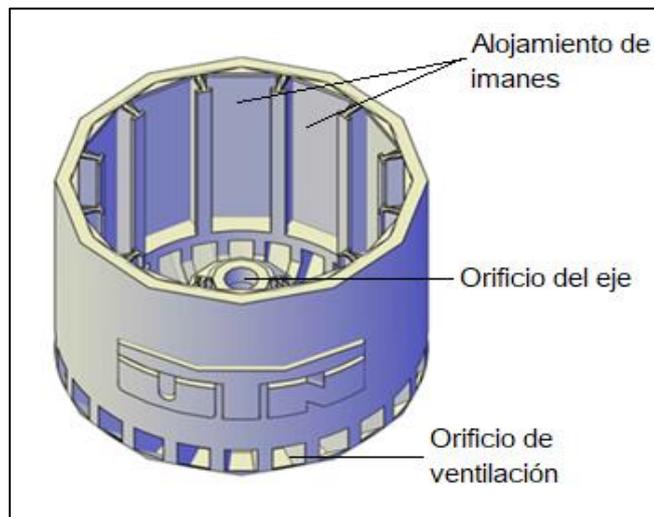


Figura 35 Diseño tridimensional final del estator realizado en el programa computacional AutoCAD Fuente: Autor

2.7.2. Diseño del armazón del estator

Con las dimensiones anteriores del estator y rotor se tomó el \varnothing *interno* “diámetro interno” y el \varnothing *externo* “diámetro” externo que posee el estator y rotor para dimensionar la pieza del armazón, para ello se buscó que las dos piezas tengan una simetría y así puedan formar una envoltura al rotor.

$$A_{motor} = A_{estator} - A_{rotor} \quad (14)$$

Con ello se obtiene una igualdad de diámetro.

$$\varnothing_{Estator\ interno} + \varnothing_{Estator\ externo} = \varnothing_{Rotor\ interno} + \varnothing_{Rotor\ externo} \quad (15)$$

$$A_{motor} = (\varnothing_{Estator\ interno} + \varnothing_{Estator\ externo}) - (\varnothing_{Rotor\ interno} + \varnothing_{Rotor\ externo}) \quad (16)$$

Obteniendo como resultado.

$$A_{motor} = (52.19 + 32.5) - (8.95 + 13.49) = 52.2$$

De ello se obtuvo el diámetro externo de la pieza del armazón de la resta de diámetros señalados como se observa en la Figura 36 y para obtener el diámetro interno se tomó como referencia el diámetro interno del estator, que muestra las dimensiones del armazón con sus diámetros señalados.

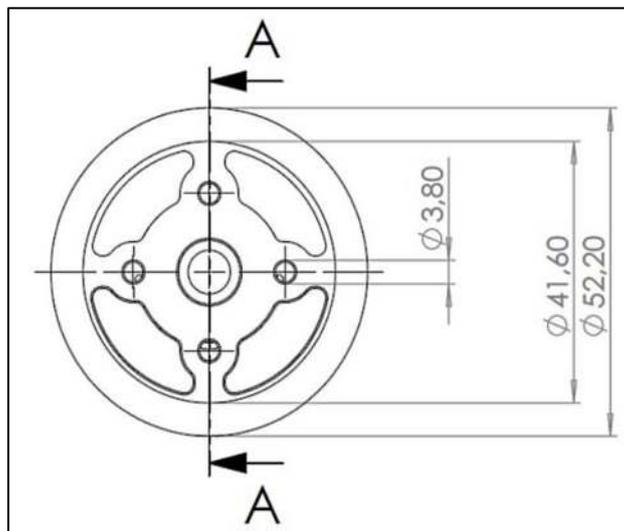


Figura 36 Dimensionamiento del Armazón del Estator mediante igualdad de diámetros

También aprovechando la forma circular del armazón se dimensionó orificios de ventilación y adicional se realizó orificios para los tornillos de sujeción de manera simétrica alrededor del orificio del eje.

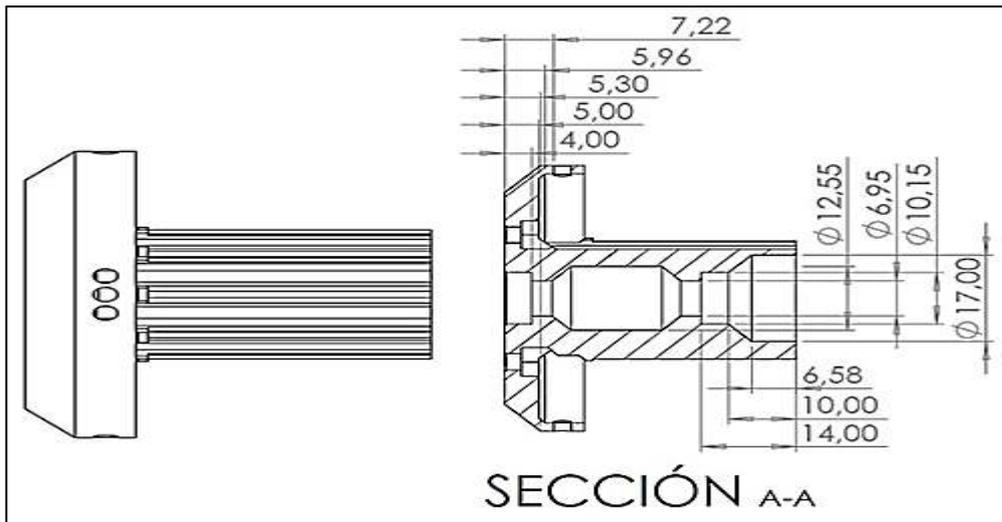


Figura 37 Dimensionamiento del armazón del estator a partir de la longitud

Una vez obtenida la parte circular del armazón se procedió a dimensionar el largo del armazón teniendo en cuenta que ya se tiene el rotor dimensionado, a partir de ello se tomó el largo del rotor y se dimensionó siguiendo ese parámetro, de igual manera se tomó las medidas de las garras interiores que posee el rotor para crear las aletas de fijación lo que permite que estas dos piezas se ajusten de una manera segura.

2.7.3. Dibujo del armazón del estator

La Figura 38 muestra el dibujo realizado en AutoCAD, esta pieza se encarga de unir el rotor con el armazón del estator manteniendo fijo el rotor al momento de su funcionamiento, esta fijación lo realiza los tornillos de sujeción dimensionados anteriormente.

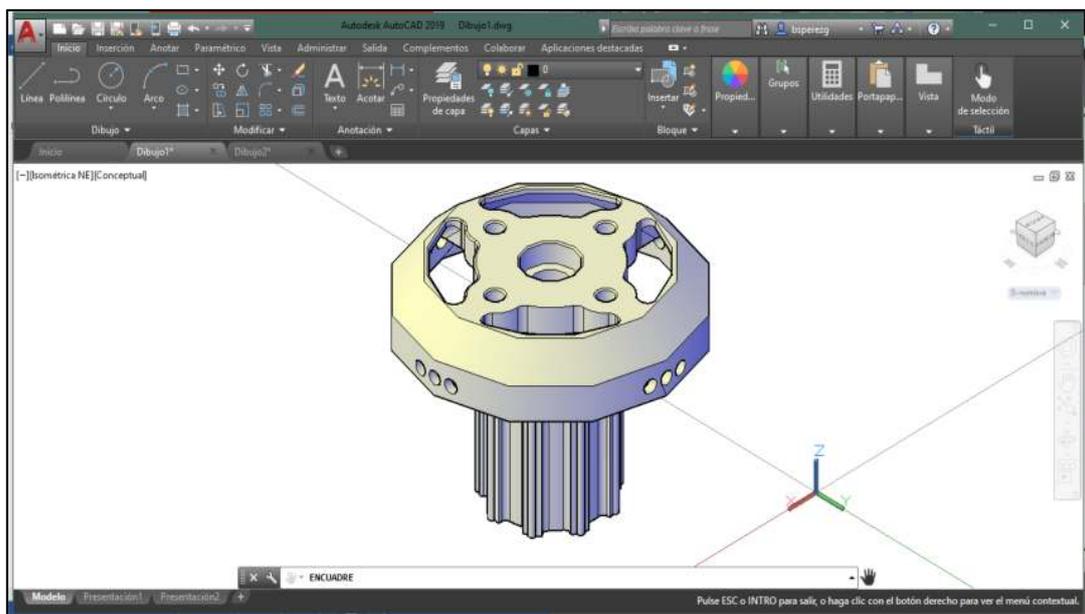


Figura 38 Dibujo del armazón del estator tridimensional realizado en el programa computacional AutoCAD

Las aletas de fijación que se observan en la Figura 39 se encargan de ajustarse a presión con las garras que posee el rotor, evitando vibraciones excesivas al momento que el prototipo empiece su funcionamiento con la ayuda de los tornillos de sujeción, adicional a ello esta pieza es encargada de llevar dos rodamientos uno concéntrico junto a los orificios de ventilación y uno en la parte interior de las aletas de fijación, estos se encargan de vincular el eje del motor con el armazón y el estator..

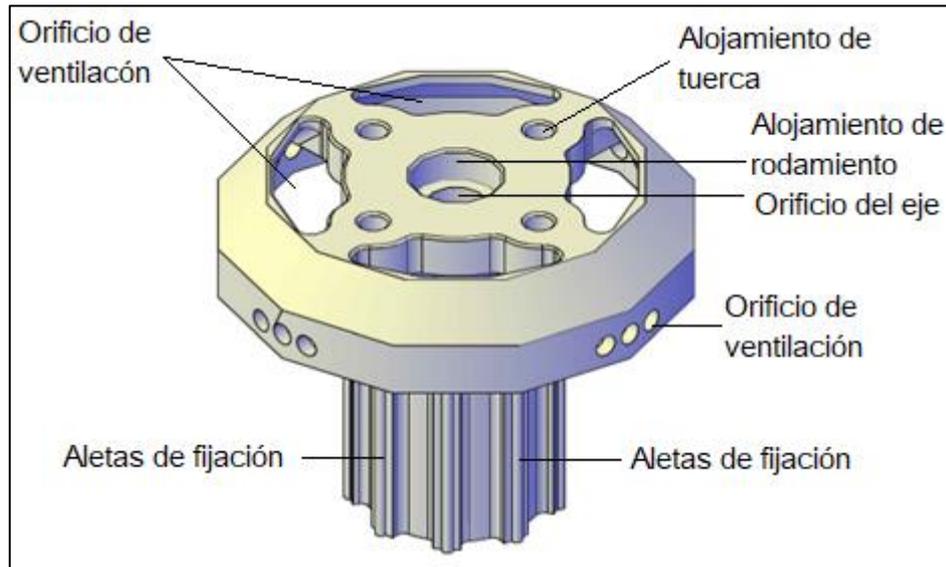


Figura 39 Diseño tridimensional final del armazón del estator realizado en el programa computacional AutoCAD

Aprovechando las dimensiones del armazón del estator se colocó orificios de ventilación distribuidos alrededor del armazón del estator de manera simétrica permitiendo así tener una mayor ventilación para el flujo de aire caliente que expulse el rotor.

2.8. Determinación de distribución de imanes

La Figura 40 muestra la división del estator con 12 alojamientos o 6 pares de polos de imanes permanentes, distribuidos alrededor del estator. Esta división se realizó a partir del diámetro externo del estator con medida de $52,2 \text{ mm}$ dimensionada anteriormente, se dividió con rectas paralelas partiendo desde el alojamiento para el eje de tal manera que toda la distribución de los imanes sea cada 15 mm de manera axial.

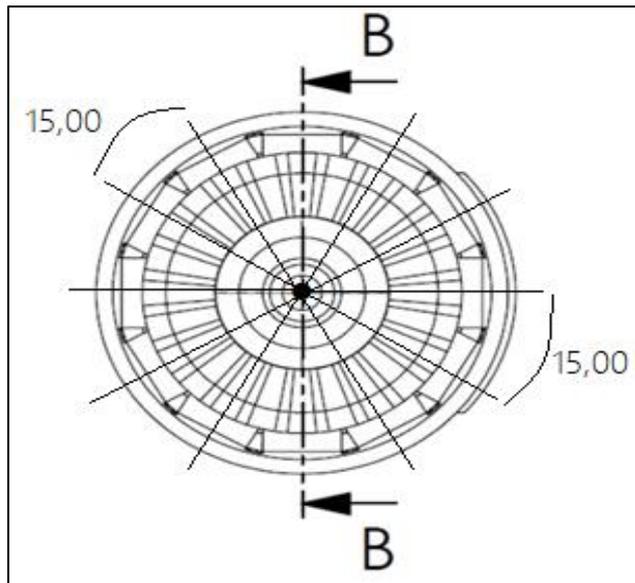


Figura 40 Distribución de los imanes permanentes en el estator Fuente: Autor

Distribuidos los alojamientos de los imanes en el estator se estableció el largo, ancho y espesor que tendrán, obteniendo como resultado lo siguiente, *Largo = 30,00 mm*, *Ancho = 10,00 mm* y *Espesor = 2,08 mm*. El espesor se diseñó con 2 mm menos, para que así el imán se ajuste de una manera segura al alojamiento.

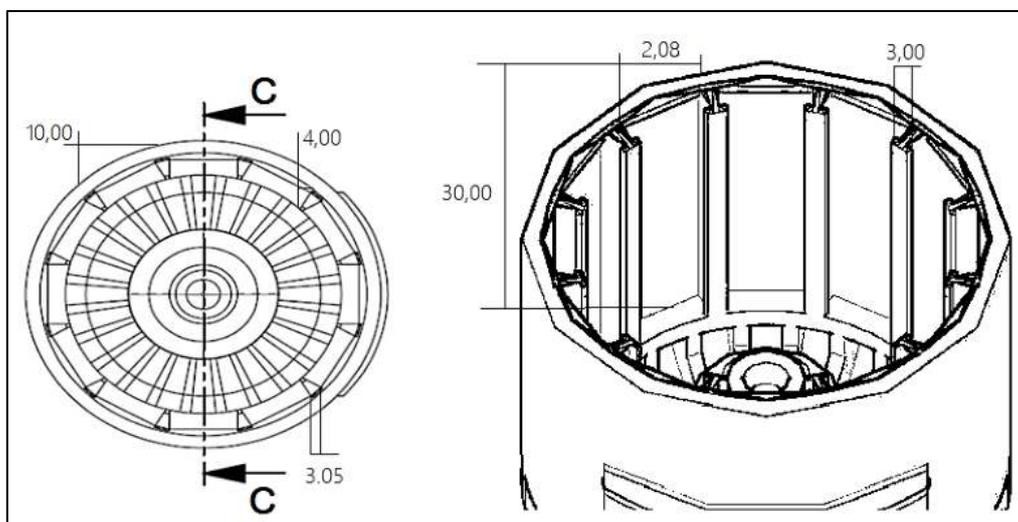


Figura 41 Dimensionamiento de las paredes de separación de los imanes Fuente: Autor

Luego de ello se diseñó las aletas de cada imán es decir las paredes que separaran un imán de otro, en este caso se optó por realizar paredes tipo "T", que debido a la vibración que pueda generar el motor se desplacen, es por esto que los alojamientos tendrán un ajuste de manera vertical como horizontal.

Como se observa en la Figura 41 se tiene las mediciones de las paredes en forma de "T" obteniendo como resultado *Altura = 4 mm*, *Largo = 30,00 mm* y el ancho total de la aleta en forma de "T" *Aleta ancho superior = 3,00 mm* y *Aleta base = 3,05 mm*.

2.9. Selección de piezas mecánicas del motor de corriente directa sin escobillas

La selección de piezas mecánicas fueron escogidas empezando desde el armazón del estator que requiere de tornillos de sujeción para ajustarse con el rotor, de igual manera el eje que une todo el prototipo y los rodamientos que permiten la rotación del motor.

2.9.1. Selección de rodamientos

Son elementos rodantes con una jaula conformada por dos anillos, su división es simple ya que existen rodamientos radiales y rodamientos de apoyo acorde a la dirección de la carga.

Características de los Rodamientos

- a) Su fricción es bajo y la diferencia entre el par inicial y el de funcionamiento es muy pequeña.
- b) Con la estandarización mundial, los rodamientos se pueden encontrar en cualquier parte y se los puede sustituir fácilmente.
- c) El mantenimiento y el cambio resultan sencillos debido a la simplicidad de la estructura de ensamble.
- d) Pueden soportar cargas tanto radiales como axiales de forma simultánea o independiente.
- e) Se utilizan en diferentes aplicaciones sin importar temperaturas.

Rodamientos rígidos de bolas de una hilera de ranura profunda “HLB”

Se utilizó este tipo de rodamiento para la aplicación en el motor debido a que son el tipo de rodamientos más utilizado. Su uso está ampliamente difundido. Las pistas de rodadura en los anillos interior y exterior cuentan con arcos circulares de radio ligeramente superior al de las bolas y adicional a ello su jaula conformada por los anillos es de acero como muestra la Figura 42.

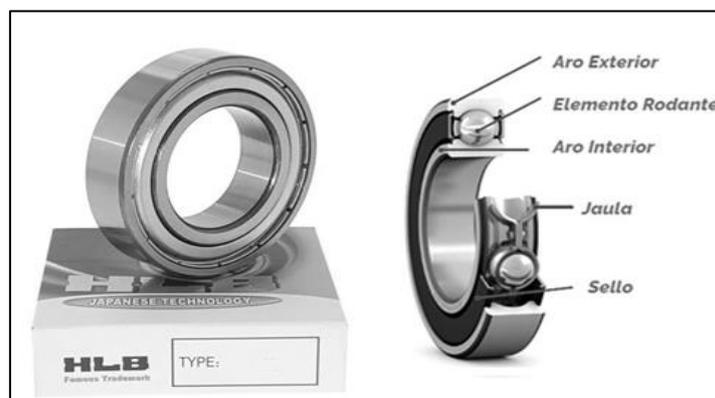


Figura 42 Rodamiento de ranura profunda HLB y sus componentes Fuente: Autor

Además de las cargas radiales, también pueden soportar cargas axiales en cualquier dirección. Debido a su bajo par, son altamente adecuados en aplicaciones que necesiten altas velocidades y bajas pérdidas de potencia.

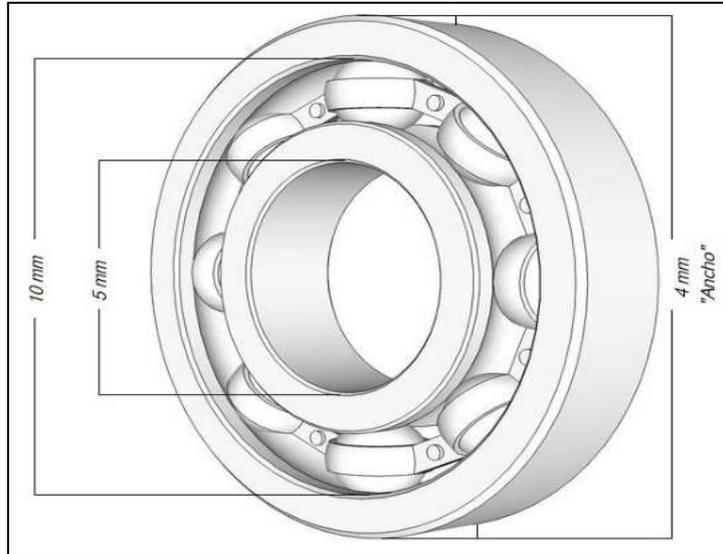


Figura 43 Dimensiones de rodamiento de ranura profunda "BHL"

La figura 43 muestra las mediciones que tiene el rodamiento seleccionado "diámetro interior" \varnothing interno = 5,00 mm, "diámetro exterior" \varnothing externo = 10,00 mm y el "ancho" espesor = 4,00 mm. Este tipo de rodamientos cuenta con blindaje de acero instalado en ambas caras y están pre lubricados con grasa.

2.9.2. Selección de tornillos y tuercas de sujeción

Al momento de unir el armazón del estator con el rotor se utilizó tornillos de sujeción de tipo M3 ya que se une de una manera segura. Estos tipos de tornillos se los utiliza para eludir rotación o el movimiento entre las partes unidas.

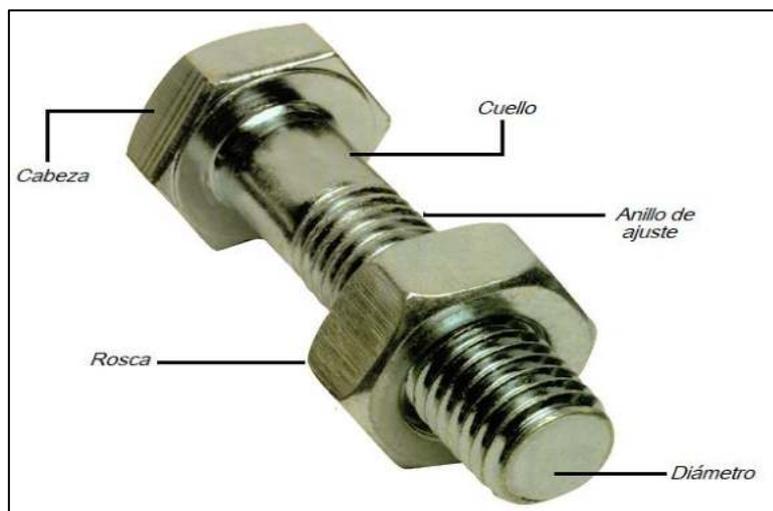


Figura 44 Tornillo y tuerca de sujeción con sus partes tipo M3 Fuente: Autor

La tuerca es el complemento del tornillo ya que se juntan los dos para sujetar las piezas como se observa en la Figura 44. La tuerca utilizada es de tipo hexagonal debido a que tiene mejor sujeción al momento de trabajar con vibraciones altas.

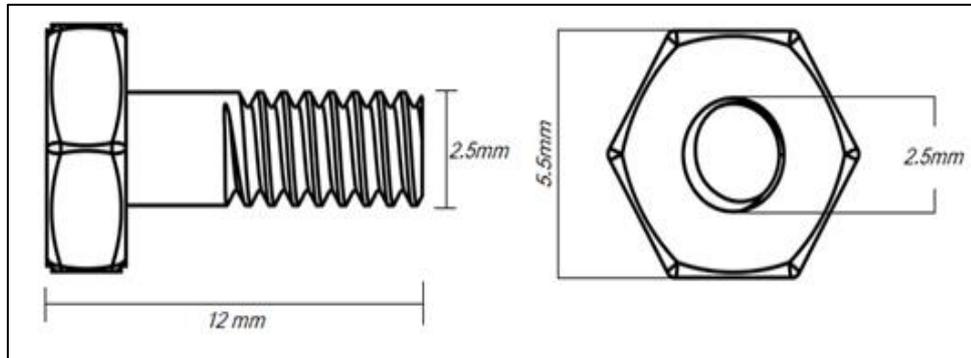


Figura 45 Dimensión del tornillo y la tuerca de sujeción tipo M3

La Figura 45 muestra las mediciones obtenidas, el largo del tornillo $Largo = 12\text{ mm}$, “diámetro de la rosca” $\varnothing_{rosca} = 2,50\text{ mm}$. La tuerca que se utilizó tiene como “diámetro interior” $\varnothing_{interior} = 2,50\text{ mm}$ y el “grosor” $Grosor = 5.50\text{ mm}$ de tipo M3.

2.9.3. Selección de eje

El eje es un elemento eficaz a la hora de dirigir el giro de una pieza. En este caso el eje va ensamblado interiormente en el motor es decir sobre los rodamientos de tal modo que este empiece a rotar sobre los puntos indicados colocados en los rodamientos.

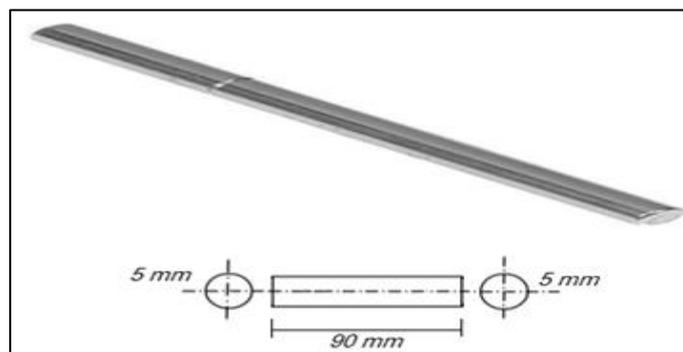


Figura 46 Eje y dimensión del eje de acero templado Fuente: Autor

El tamaño seleccionado del eje va acorde al diámetro interior del rodamiento por ello en la Figura 46 indican las mediciones establecidas para el eje obteniendo como resultado Diámetro $\varnothing = 5,00\text{ mm}$ y Longitud $L=90,00\text{ mm}$. Para mayor eficiencia y mejor rotación se estableció que el eje debe ser de acero templado ideal para trabajos de rotación.

2.9.4. Selección de ventilación

Para la ventilación se colocó orificios continuos dimensionado anteriormente alrededor del estator de dimensiones *Largo* = 4,50 mm y *Ancho* = 4,58 mm. Adicional a ello se colocó 4 aberturas en el armazón del estator de *Largo* = 21,00 mm y *Ancho* = 7,00 mm, como se observa en la Figura 47 este sistema de ventilación suministra un flujo de aire natural y eficiente hacia el interior del rotor

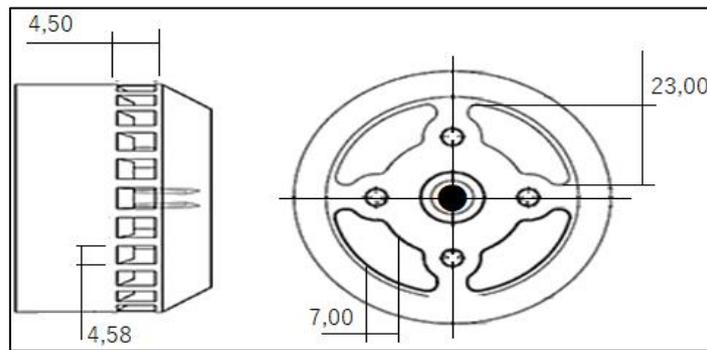


Figura 47 Dimensionamiento de la ventilación del motor Fuente: Autor

Los orificios mencionados brindan la circulación segura del aire natural refrigerando el interior del motor y el aire caliente forzado que es generado debido a la rotación del rotor es también expulsado por esta ventilación natural.

2.9.3. Parámetros mecánicos y eléctricos del motor

De la recopilación de información de motores de corriente directa sin escobillas de imanes permanentes que se realizó anteriormente se tomó diferentes valores mecánicos y eléctricos del motor 3200 SERIES indicado en la Figura 48 existente en el mercado adaptándolo al modelo que se lo va a diseñar.

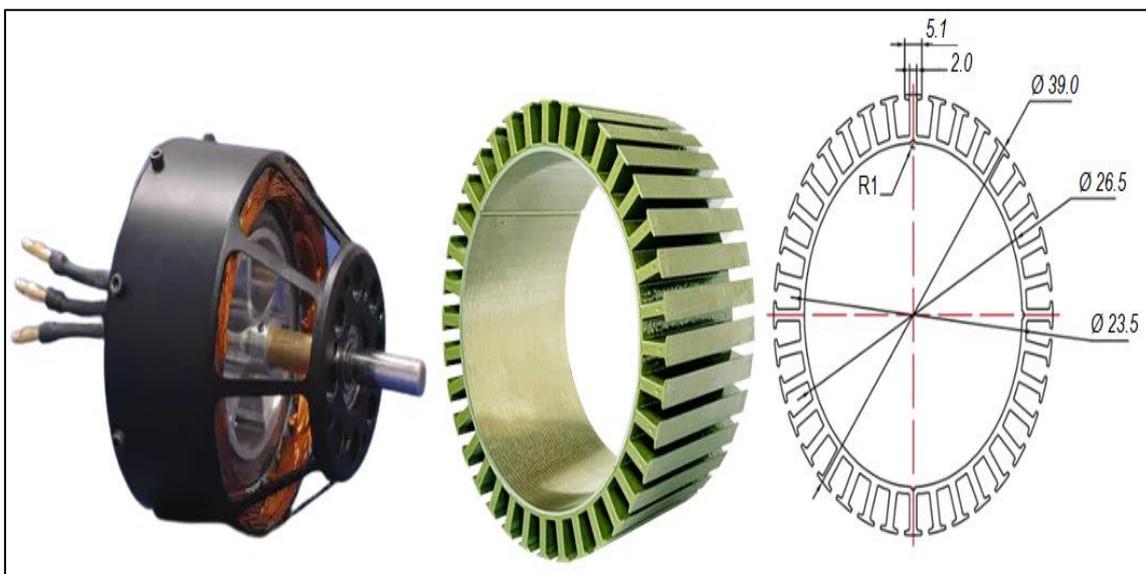


Figura 48 Motor eléctrico para Dron 3200 Series Fuente: (María, 2015).

La Tabla 4 muestra las especificaciones mecánicas del motor 3200 SERIES.

Tabla 4 Especificaciones mecánicas para el diseño del motor de corriente directa sin escobillas Fuente: (María, 2015).

Especificaciones	Valor	Unidades
Diámetro del estator	50.2	mm
Largo del estator	40.3	mm
Diámetro del rotor	40.0	mm
Altura del rotor	30.7	mm
Diámetro del armazón	50.2	mm
Largo del armazón	40.0	mm
Diámetro del eje	5.0	mm
Longitud del eje	70.0	mm

Las especificaciones eléctricas que tiene el motor se tomaron de investigaciones anteriores del motor 3200 SERIES que se estableció una potencia base de 18W indicada en la ecuación (17), una resistencia que viene establecida del alambre de cobre esmaltado que se muestra en la Figura 49 equivalente a 0.02073 *ohm/m* y un voltaje de 12V.

Calculando la corriente se obtiene la siguiente ecuación.

$$P = V * I \quad (17)$$

Obteniendo como resultado lo siguiente:

$$P = 12 * I.5 = 18 W$$

Despejando de la ecuación (1) se obtiene la corriente

$$I = \frac{P}{V} \quad (18)$$

Obteniendo como resultado lo siguiente:

$$I = \frac{18}{12} = 1.5 A$$

Calculando la Resistencia Real que tendrá el motor

$$R_{real} = \frac{V}{I} \quad (19)$$

Obteniendo como resultado lo siguiente:

$$R_{real} = \frac{12}{1.5} = 8.0 Ohm$$

En la Tabla 4 se muestra las especificaciones eléctricas que tiene el motor

Tabla 5 Especificaciones eléctricas para el diseño del motor de corriente directa sin escobillas

Especificaciones	Símbolo	Valor	Unidades
Voltaje	V	12	V
Corriente	I	1.5	A
Frecuencia	f	60	Hz
Potencia	P	18	W
Velocidad	n_s	5250	rpm
Resistencia del alambre	R_a	0.515	Ohm/m
Resistencia Real	R	0.8	Ohm

1	2	3	4	5	6	7
0000	11.86	107.2	-	-	0.158	319
000	10.40	85.3	-	-	0.197	240
00	9.226	67.43	-	-	0.252	190
0	8.252	53.48	-	-	0.317	150
1	7.348	42.41	-	375	0.40	120
2	6.544	33.63	-	295	0.50	96
3	5.827	26.67	-	237	0.63	78
4	5.189	21.15	-	188	0.80	60
5	4.621	17.77	-	149	1.01	48
6	4.115	13.30	-	118	1.27	38
7	3.665	10.55	-	94	1.70	30
8	3.264	8.36	-	74	2.03	24
9	2.906	6.63	-	58.9	2.56	19
10	2.588	5.26	-	46.8	3.23	15
11	2.305	4.17	-	32.1	4.07	12
12	2.053	3.31	-	29.4	5.13	9.5
13	1.828	2.63	-	23.3	6.49	7.5
14	1.628	2.08	5.6	18.5	8.17	6.0
15	1.450	1.65	6.4	14.7	10.3	4.8
16	1.291	1.31	7.2	11.6	12.9	3.7
17	1.150	1.04	8.4	9.26	16.34	3.2
18	1.024	0.82	9.2	7.3	20.73	2.5
19	0.9116	0.65	10.2	5.79	26.15	2.0
20	0.8118	0.52	11.6	4.61	32.69	1.5
21	0.7230	0.41	12.8	3.64	41.46	1.2
22	0.6438	0.33	14.4	2.89	51.5	0.92
23	0.5733	0.26	16.0	2.29	64.4	0.73
24	0.5106	0.20	18.0	1.82	85.0	0.58
25	0.4547	0.16	20.0	1.44	106.2	0.46
26	0.4049	0.13	22.8	1.14	130.7	0.37

1 - Numero AWG (American Wire Gauge)
 2 - Diametro en milimetros
 3 - Seccion en milimetros
 4 - Numero de espiras por centimetros
 5 - Kg por kilometro
 6 - Resistencia en ohmios por kilometro
 7 - Capacidad de corriente en amperes

Figura 49 Tabla de alambres esmaltados Fuente: (Quichimbo, 2013)

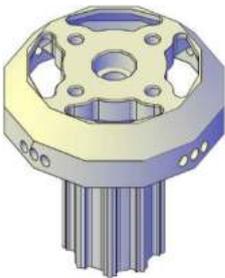
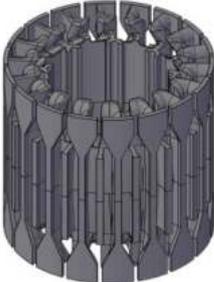
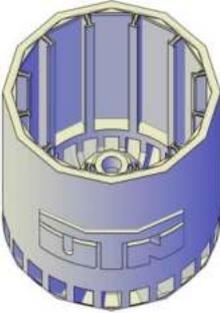
El dimensionamiento establecido anteriormente se diseñó 6 pares de polos en el estator o 12 imanes permanentes distribuidos de manera uniforme alrededor del diámetro

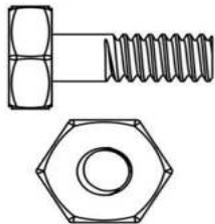
interno del estator. El rotor que se dimensionó tendrá 36 ranuras que constan de un bobinado de 8 vueltas por ranura con alambre N° 22 AWG “1 mm”.

El alambre seleccionado fue establecido mediante la Figura 49 que muestra la tabla de alambres esmaltados para bobinado, que coincide con las especificaciones del diseño del prototipo a diseñar.

Una vez establecidos los diseños con sus dimensiones se procedió a realizar la Tabla 6 que indica las piezas y materiales que se dimensiono y escogió para su posterior implementación.

Tabla 6 Piezas y materiales del diseño del motor de corriente directa sin escobillas con núcleo de polímero.

Pieza o material	Descripción	Dimensiones	Especificaciones	Unidades
	Armazón del estator	Diámetro exterior = 52.2mm, Diámetro interior = 41.0 mm Diámetro del eje = 10.0 mm Largo = 42.0 mm Diámetro en las garras de ajuste = 20.0 mm	La pieza designada tiene como función el ajuste con las demás piezas adicional a ello se tiene establecido la ventilación del motor, y los orificios donde van colocados los rodamientos	1 pieza
	Rotor	Diámetro exterior = 39.0 mm Diámetro interior = 26.0 mm Largo = 37.0 mm Largo de garra = 30.0 mm Ancho por ranura = 3.0 mm	Esta pieza cumple la función principal de enrollar los devanados del motor y también ajustarse con el armazón, este ajuste lo realizan las 8 garras interior que esta pieza posee.	1 pieza
	Estator	Diámetro exterior = 52.0 mm Diámetro interior = 47.0 mm Diámetro de colocación de imanes = 42.0 mm Largo = 42.0 mm Largo y ancho de orificios de ventilación = 5 x 5 mm Largo, ancho y espesor del alojamiento del imán = 30 x 10 x 4 mm	Pieza encarga de contener los 12 imanes colocados radialmente, adicional consta de orificios colocados alrededor que sirven como apoyo de la ventilación principal, además consta del orificio en el que se ajusta con el eje.	1 pieza

	<p>Tornillo y tuerca de sujeción</p>	<p>Largo = 12.00 mm Diámetro de la rosca = 2.50 mm Diámetro interior = 2.50 mm Grosor = 5.50 mm</p>	<p>Estos elementos principalmente fueron designados para sujetar las piezas, en este caso sujeta el armazón con el estator, es de tipo M3 ya que mejora la sujeción al trabajar con vibraciones altas.</p>	<p>4 tuercas 4 tornillos</p>
	<p>Eje</p>	<p>Diámetro = 5.0 mm Largo = 90.0 mm</p>	<p>Principalmente se diseñó estas dimensiones teniendo en cuenta el diámetro interior de los rodamientos, además al ser de acero templado es ideal para trabajos de rotación</p>	<p>1 eje</p>
	<p>Rodamientos</p>	<p>Diámetro interior = 5.0 mm Diámetro exterior = 10.0 mm Espesor = 4.0 mm</p>	<p>Este tipo de rodamientos cuenta con blindaje de acero en ambas caras son pre lubricados y al ser rodamientos de ranura profunda con bolas brindan mayor duración en trabajos de rotación</p>	<p>2 rodamientos</p>
	<p>Alambre esmaltado N° 22</p>	<p>Longitud = 10 m Diámetro = 0.643 mm Resistencia = 0.515 ohmios/metro Capacidad = 0.92 A</p>	<p>Se estableció el alambre N° 22, ya que soporta la corriente nominal de funcionamiento del motor, adicional a ello consta de varias capas de esmalte que mejora el aislamiento y la resistencia mecánica del alambre.</p>	<p>10 metros</p>

Finalmente cerrando este capítulo hay que recalcar que para cada diseño se realizó un rediseño es decir se modificó algunas piezas, tanto en dimensiones de largo y ancho como también en partes secundarias, esto llevó a que las piezas puedan encajar unas con otras de manera óptima.

Capítulo 3: Implementación de un prototipo de motor de corriente directa sin escobillas con núcleo de polímeros

En este capítulo se muestra el proceso de la implementación del prototipo de motor de corriente directa sin escobillas con núcleo de polímero, anteriormente en el capítulo 2 ya se obtuvo un diseño definido del prototipo desglosado en piezas que son: rotor, estator y armazón de estator lo que corresponde hacer ahora es pasar de un diseño 3D a un archivo imprimible el que pueda ser ensamblado y así obtener los resultados adecuados para su posterior análisis de pruebas correspondientes.

3.1. Configuración de AutoCAD para impresión de prototipo

AutoCAD cuenta con diversas herramientas para exportar archivos 3D, al modelo final se aplicó la herramienta más utilizada que es exportar para obtener un formato STL del diseño ya previsto, es muy importante señalar que existen muchos formatos para visualización e impresión 3D. Pero se optó por la manera más fácil y adecuada para obtener estos archivos que traen una gran precisión de formato.

3.1.1. El formato de archivo STL

Este formato es la aproximación a la superficie de diseño sólido con la utilización de triángulos. La explicación del uso de diversos triángulos se la puede observar con la visualización de la Figura 50, en la que se muestra los diferentes tipos de figuras que se pueden presentar al momento de convertir un archivo CAD a STL.

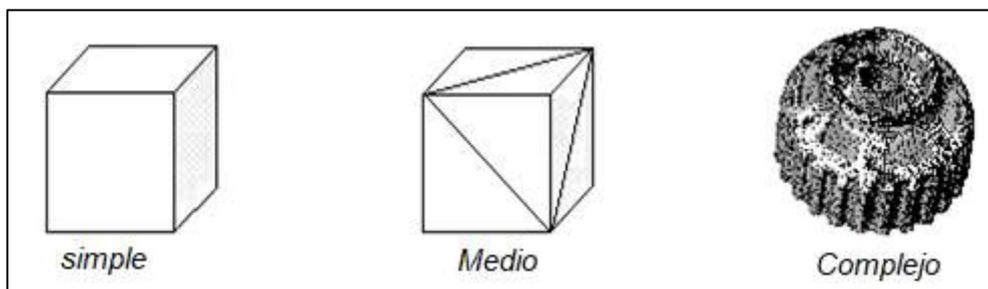


Figura 50 Resolución de figuras tridimensionales con aproximaciones geométricas

El modelo “simple”, como se puede observar en la figura anterior el uso de triángulos está limitado, el modelo medio existe la aproximación de sus superficies con alrededor de 12 triángulos. El modelo complejo deberá utilizar un sin número de triángulos ilimitados hasta que se tenga la superficie del modelo relleno completamente.

3.1.2. Teselación y resolución en archivos STL

Consiste en dividir la superficie del modelo “pieza” que se tenga en diversos triángulos, cuando el archivo STL utiliza pocos triángulos, aquellas superficies curvas estarán facetadas, es decir que tendrán grietas de los triángulos que no pudieron llenar.

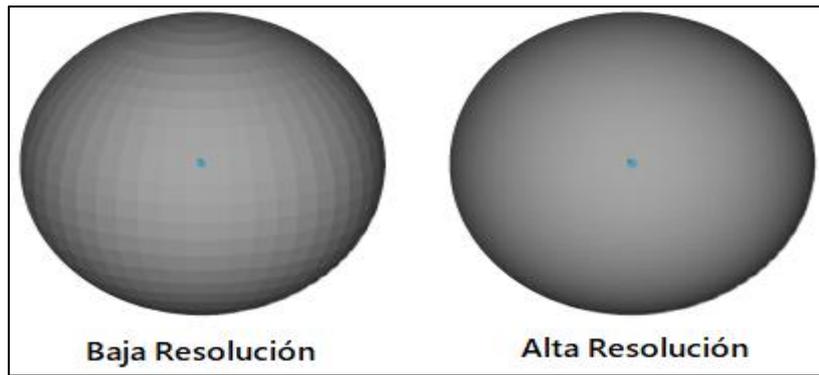


Figura 51 Resolución de archivos STL

Los moldes que están formadas de superficies planas generalmente no requieren de muchos triángulos como se puede observar en la Figura 51, al momento que se incrementa la resolución, eventualmente incrementa también el archivo STL.

3.1.3. Tolerancias de desviación y tolerancia de ángulos en archivos STL

Determina las distancias de ángulos del modelo y la superficie de este mismo, a tal modo que la forma del modelo sea lo más parecida al diseño del archivo de AutoCAD, esta desviación se ajusta al pasar del modelo CAD al modelo STL, obteniendo como resultado un modelo en formato para impresión "STL" igual al modelo 3D diseñado en AutoCAD.

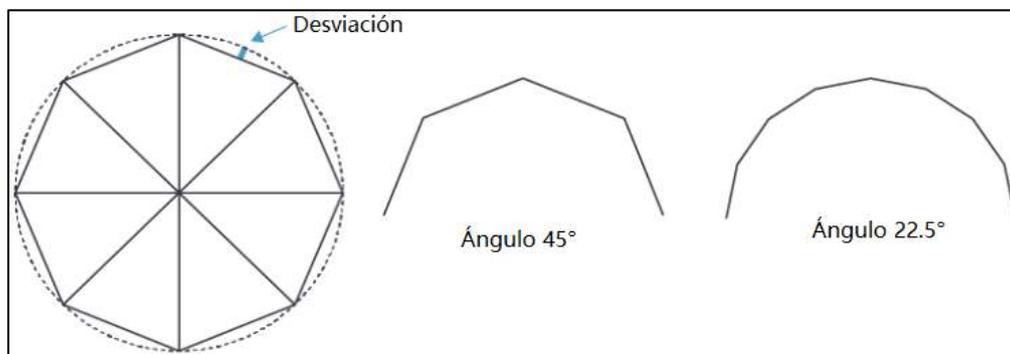


Figura 52 Tolerancias de desviación y tolerancias de ángulo en archivos STL

Al momento que se exporta el archivo STL las tolerancias de ángulo se las ajusta como indica la Figura 52, que es la dirección que toma un triángulo en comparación con los demás triángulos que poseen los archivos STL. Como se dijo anteriormente cuando el ángulo es más pequeño, más suave será el cambio entre los triángulos es por ello que cuando existe una transición más suave de triángulo a triángulo la resolución del archivo será la mejor.

3.2. Generación de archivos STL de impresión en 3D

Obtenidos los archivos STL se los puede ejecutar como archivos 3D ya que previamente se codificó la geometría del modelo establecido ajustando las tolerancias y teselación respectivas del modelo.

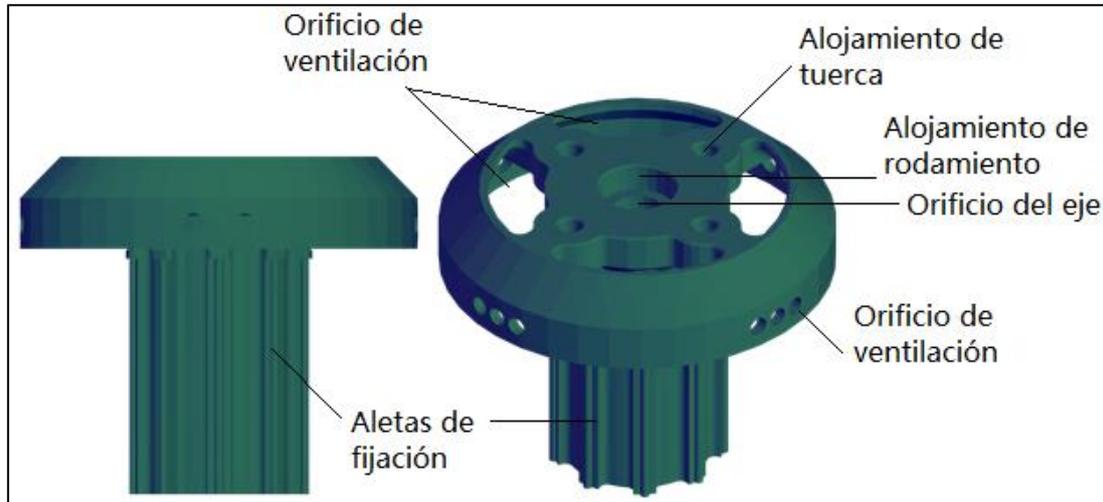


Figura 53 Armazón de estator en formato STL Fuente: Autor

Como se puede observar en la Figura 53 se tiene el Armazón del estator en formato STL, como se estableció en la fase del diseño el armazón del estator consta de las aletas de fijación que permite la unión con el estator, este armazón también consta de los orificios hexagonales donde se ubican las tuercas que permiten fijar todo el prototipo en conjunto, finalmente se observa los espacios realizados para los rodamientos que dan paso a la vinculación del eje con el armazón.

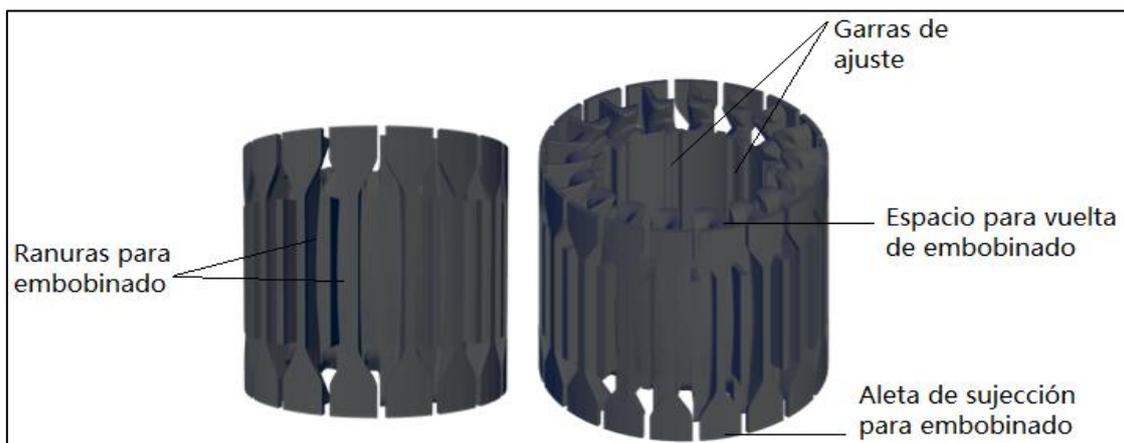


Figura 54 Rotor en formato STL Fuente: Autor

La Figura 54 muestra el modelo del rotor en formato STL, como se mencionó anteriormente, el rotor tiene forma de cilindro con un orificio hueco y de 50 mm de largo. Su estructura se conforma de 36 ranuras, en su interior aloja a 9 garras que sirven para encajar el rotor con el armazón del estator.

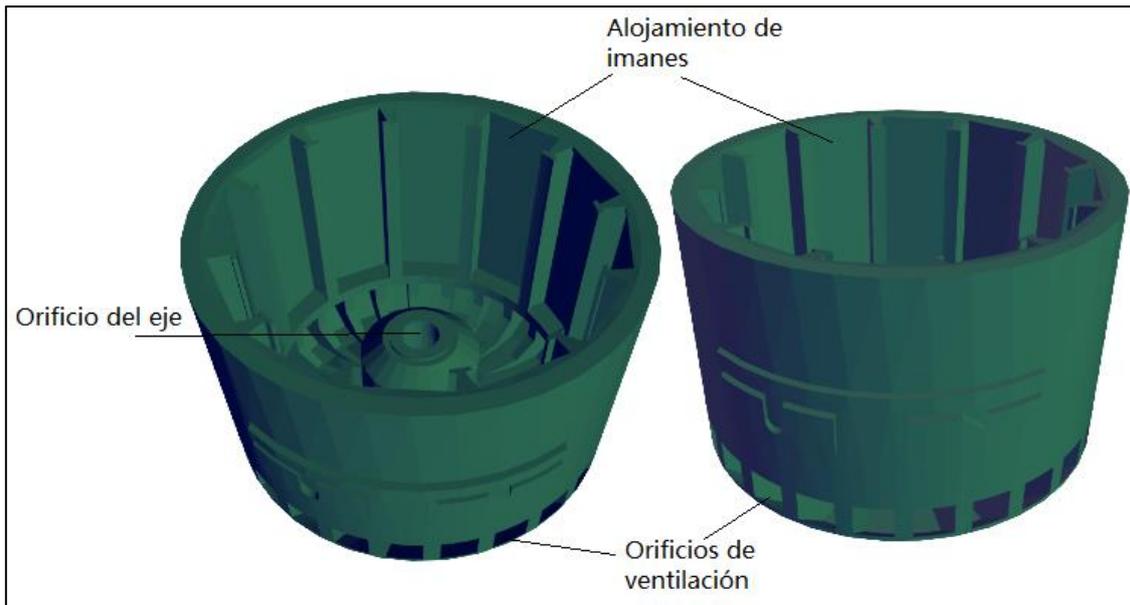


Figura 55 Estator en formato STL Fuente: Autor

Como se puede observar la Figura 55 muestra las diferentes vistas del estator en formato STL, esta pieza en su interior lleva los imanes permanentes de manera radial y como se observa existen los 12 alojamientos para los 12 imanes con su respectivo aislamiento entre ellos para evitar el contacto entre imanes. Además posee 24 orificios que rodean toda la pared del estator y sirven como ventilación natural del prototipo al momento que empiece la rotación permitiendo la entrada de flujo de aire.

3.3. Selección de material de polímeros

A continuación se muestra los tipos de PLAS “Ácidos Polilácticos” escogidos y más utilizados para impresión de prototipos, estos filamentos se escogieron dependiendo el uso y aplicación que se los va dar, debido a que el prototipo está constituido de piezas móviles de rotación se optó por utilizar las fibras PLA mostrados a continuación.

3.3.1. PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta

Filamento de fibra de Carbono se compone principalmente por 85% de polímero “PLA” y otra parte por retazos de fibra de carbono con porcentaje de “15%”, debido a los pedazos de fibra de carbono que posee esta Proto-Pasta se convierte en un material más rígido. Debido a esta rigidez el material que posee pierde características de flexibilidad como se observa en la Figura 56, que hace que este material sea idóneo para realizar piezas de soporte, herramientas, hélices o carcasas de motores entre otras.(Blanco, 2020)



Figura 56 PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta Fuente: Autor

La rigidez del filamento de fibra de carbono genera excelente resistencia estructural y adicional a ello una buena adherencia entre capas con poca desviación de ángulos entre ellas, los retazos de fibra de carbono son procesados de tal manera que no puedan causar taponamiento en las boquillas de las impresoras, pero tienden a ser lo suficientemente grande para dar una rigidez óptima. (Blanco, 2020)

La tabla 7 se muestra las principales propiedades de impresión para este material.

Tabla 7 Propiedades de impresión PLA Fibra de Carbono Proto-pasta Fuente: (Blanco, 2020)

Propiedades de impresión	Valor	Unidades
Temperatura de impresión	185 - 215	°C
Temperatura de base/cama	30-60	°C
Temperatura de cámara	No necesaria	-
Ventilador de capa	Recomendada	-
Velocidad de impresión	20 - 80	mm/s

A continuación en la Tabla 8 se muestran las propiedades térmicas del PLA Fibra de Carbono.

Tabla 8 Propiedades térmicas PLA Fibra de Carbono Proto-pasta Fuente: (Blanco, 2020)

Propiedades térmicas	Valor	Unidades
Temperatura de reblandecimiento	55	°C
Temperatura de fusión	150	°C

3.3.2. PLA Ferro-Magnético

Es un filamento compuesto de PLA con hierro, posee la característica principal de atraerse a los campos magnéticos, este filamento tiene baja probabilidad de oxidarse. Este filamento está constituido a que su porcentaje de polímero "PLA" de un 80% y un

20% de polvo hierro metálico convirtiéndose así en un material resistente y magnético a la hora de su aplicación.(Blanco, 2020)



Figura 57 PLA Ferro-Magnético Fuente: Autor

La tabla 9 se muestra las principales propiedades de impresión para este material

Tabla 9 Propiedades de impresión PLA Ferro-Magnético Fuente: (Blanco, 2020)

Propiedades de impresión	Valor	Unidades
Temperatura de impresión	215 - 225	°C
Temperatura de base/cama	60	°C
Temperatura de cámara	No necesaria	-
Ventilador de capa	Recomendada	-
Velocidad de impresión	40	mm/s
Multiplicador extrusión	0.9 – 0.95	-

A continuación en la Tabla 10 se muestran las propiedades térmicas del PLA Ferro-Magnético

Tabla 10 Propiedades térmicas PLA Ferro-Magnético Fuente: (Blanco, 2020)

Propiedades térmicas	Valor	Unidades
Temperatura de reblandecimiento	60	°C
Temperatura de fusión	200	°C

Este filamento indicado en la Figura 57 posee un gran campo de aplicaciones en la impresión 3D ya que al ser magnético se puede utilizar en actuadores, sensores magnéticos así como también en simulación de prototipos de hierro fundido y aplicaciones industriales. (Blanco, 2020)

3.4. Impresión de diseños en material de polímeros

Al momento que ya se generó un Archivo DWG a STL es necesario exportar la información a una plataforma multimedia de impresión. Para poder leer estos archivos existe diversas plataformas multimedia con lo que se podrá ejecutarlos, para ello se utilizó la herramienta computacional UltimakerCura un software de código abierto.

Lo que realiza UltimakerCura son los cortes de diseño es decir parte en láminas el diseño que se tiene en STL previamente convirtiéndolo en un código G para impresión, la impresora 3D podrá realizar los ajustes e instrucciones necesarias para poder imprimir el prototipo establecido.

3.4.1. Impresión del Rotor

Ingresando el diseño del rotor a UltimakerCura se realizó los cortes y el laminado del código G, a continuación se configura los parámetros de impresión del prototipo. Como se observa en la Figura 58 se tiene los tiempos de estimación y el material con el que se va a imprimir.

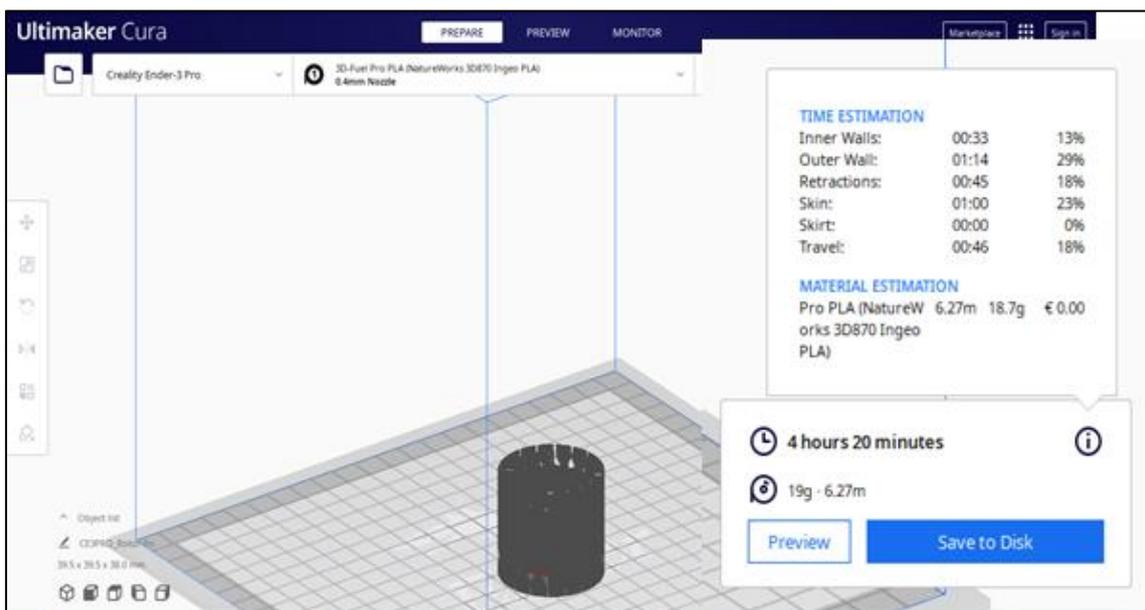


Figura 58 Modelo del rotor laminado y convertido en código G para impresión. Fuente: Autor

Luego de ello se establece las configuraciones adecuadas para cada tipo de PLA utilizado, en este caso para la impresión del rotor se está utilizando PLA Ferro-Magnético de este modo debe tener un ajuste óptimo en la impresora a continuación se muestra la Tabla 11 de parámetros establecidos para imprimir una pieza de calidad y resistencia alta.

Tabla 11 Ajustes de impresión para el rotor en material PLA Ferro-Magnético. Fuente: Autor

Ajustes de impresión	Ajuste principal	Valor o Variable	Unidades
Perfil	Calidad estándar	0.2	mm
Calidad	Altura de capa	0.2	mm
Paredes	Grosor de pared	0.8	mm
Superior e Inferior	Capa superior – Capa Inferior	3.0	-
Relleno	Densidad de relleno	90.0	%
	Patrón de relleno	Zigzag	
Material	Temperatura de impresión	220.0	°C
	Temperatura de la placa de impresión	50.0	°C
Velocidad	Velocidad de impresión	50.0	mm/s
Desplazamiento	Habilitar retracción	Si	-
	Distancia de retracción	6.0	mm
	Velocidad de Retracción	40	mm/s
	Modo peinada	Todo	-
Refrigeración	Activar refrigeración de impresión	Si	-
	Velocidad del ventilador	100	%
Soporte	Generar soporte	Si	-
	Ángulo de voladizo del soporte	45	°
	Patrón del soporte	Líneas	-
Adherencia de la placa de impresión	Tipo Adherencia de la placa de impresión	Ninguno	-
Extrusión doble	-	Desactivar	-
Modos especiales	-	Desactivar	-
Experimental	-	Desactivar	-

Una vez obtenidos los ajustes principales de cada parámetro, los ajustes secundarios o predeterminados inmediatamente se modifican solos no es necesario ajustar más información de la que se presentó en la tabla anterior, simplemente seleccionado un tipo de material en Ultimaker Cura se adapta de manera predeterminada a los parámetros de impresión.

En este caso es importante recalcar dos parámetros importantes para este PLA la temperatura y la velocidad. En torno a la temperatura que indica el fabricante es de 220 °C, la velocidad es de 30-60 mm/s, de esta manera se evita atascos en la impresora o que el PLA se puede derretir de una manera inestable.



Figura 59 Diferentes vistas del rotor impreso en PLA Ferro-Magnético. Fuente: Autor

En la figura 59 se observa la pieza del rotor impresa completamente en el material Ferro-Magnético esta pieza tiene todas las características del diseño tanto en formato CAD como en STL, la característica principal de esta pieza es que posee retazos de fibra de metal lo que lo hace óptimo para desarrollar trabajos de bobinado y a su vez es magnético lo que proporciona un rendimiento adecuado al momento de ensamblarlo con los demás componentes magnéticos.

3.4.2. Impresión del Estator

Ingresando el diseño del estator a Ultimaker Cura se realizó los cortes y el laminado correspondiente al código G del modelo seleccionado, a continuación se configura los parámetros de impresión del prototipo. Como se observa en la Figura 60 se tiene los tiempos de estimación y el material con el que se va a imprimir.

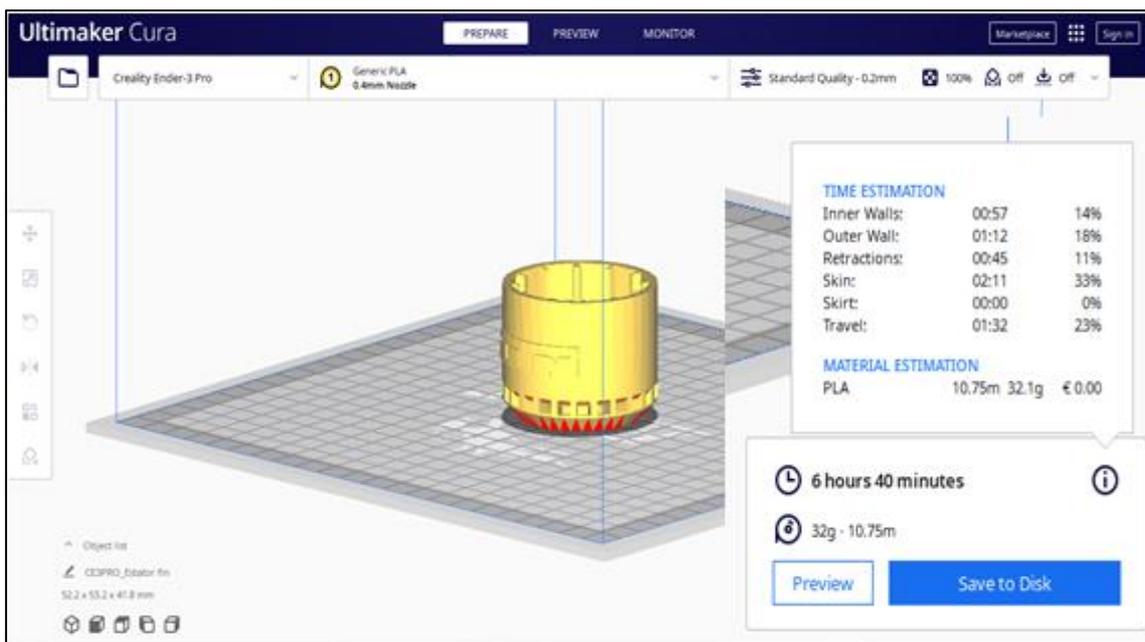


Figura 60 Modelo del estator laminado y convertido en código G para impresión. Fuente: Autor.

Luego de ello se establece las configuraciones adecuadas para cada tipo de PLA utilizado, en este caso para la impresión del Estator se está utilizando PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta, que debe tener un ajuste óptimo en la impresora a continuación se muestra la Tabla 12 de parámetros establecidos para imprimir una pieza de calidad y de alta resistencia.

Tabla 12 Ajustes de impresión para el estator en material PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta. Fuente: Autor

Ajustes de impresión	Ajuste principal	Valor o Variable	Unidades
Perfil	Calidad estándar	0.2	mm
Calidad	Altura de capa	0.2	mm
Paredes	Grosor de pared	0.8	mm
Superior e Inferior	Capa superior – Capa Inferior	3.0	-
Relleno	Densidad de relleno	90.0	%
	Patrón de relleno	Zigzag	
Material	Temperatura de impresión	215.0	°C
	Temperatura de la placa de impresión	60.0	°C
Velocidad	Velocidad de impresión	40.0	mm/s
Desplazamiento	Habilitar retracción	Si	-
	Distancia de retracción	4.0	mm
	Velocidad de Retracción	25	mm/s
	Modo peinada	Todo	-
Refrigeración	Activar refrigeración de impresión	Si	-
	Velocidad del ventilador	100	%
Soporte	Generar soporte	Si	-
	Ángulo de voladizo del soporte	45	°
	Patrón del soporte	Líneas	-
Adherencia de la placa de impresión	Tipo Adherencia de la placa de impresión	Ninguno	-
Extrusión doble	-	Desactivar	-
Modos especiales	-	Desactivar	-
Experimental	-	Desactivar	-

No es necesario ajustar más información de la que se presentó en la tabla anterior simplemente seleccionado un tipo de material PLA o el que se desee utilizar en Ultimaker Cura y este se adapta de manera inmediata a los parámetros de impresión que necesita. Es importante recalcar dos parámetros importantes para este PLA la temperatura y la velocidad. En torno a la temperatura que indica el fabricante es de 215 °C, la velocidad es de 40 mm/s, así evitamos atascos en la impresora o que el PLA se puede derretir de una manera inestable.

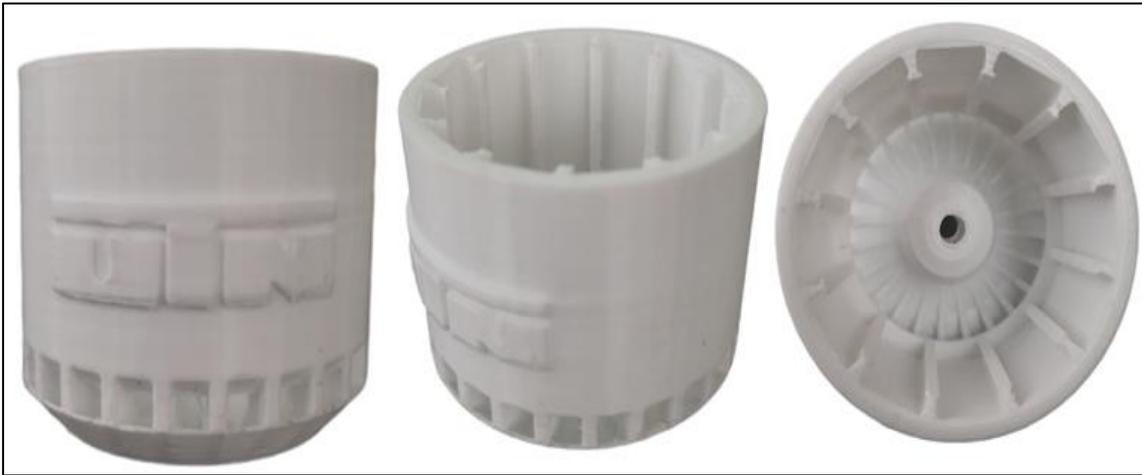


Figura 61 Diferentes vistas del estator impreso en PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta. Fuente: Autor

En la figura 61 se observa la pieza del estator impresa completamente en el material de Fibra de Carbono esta pieza tiene todas las características del diseño tanto en formato CAD como en STL, la característica principal es que posee residuos de polvo de fibra de carbono lo que lo hace óptimo para desarrollar trabajos mecánicos de rotación que proporciona un rendimiento adecuado al momento de ensamblarlo con los demás componentes mecánicos.

3.4.3. Impresión del armazón del estator

Ingresando el diseño del armazón del estator a Ultimaker Cura se realizó los cortes y el laminado correspondiente al código G, a continuación se configura los parámetros de impresión del prototipo. Como se observa en la Figura 62 se tiene los tiempos de estimación y el material con el que se va a imprimir.

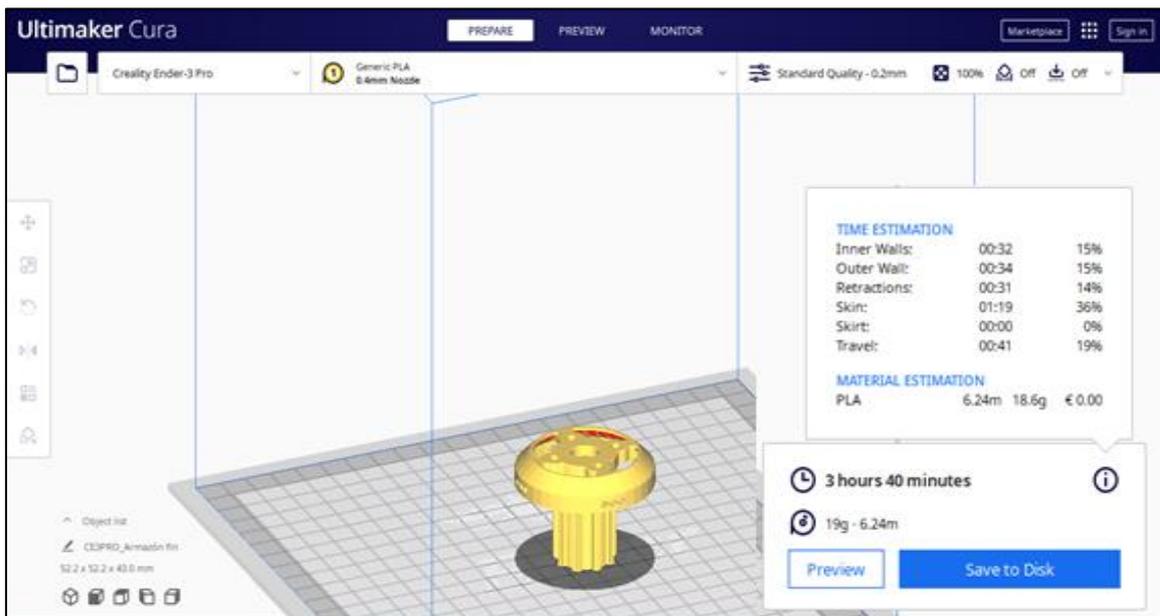


Figura 62 Modelo del armazón del estator laminado y convertido en código G para impresión. Fuente: Autor

Se establece las configuraciones adecuadas para cada tipo de PLA utilizado, en este caso para la impresión del Estator se está utilizando PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta, que debe tener un ajuste óptimo en la impresora a continuación se muestra la Tabla 13 de parámetros establecidos para imprimir una pieza de calidad y resistencia alta.

Tabla 13 Ajustes de impresión para el armazón del estator en material PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta. Fuente: Autor

Ajustes de impresión	Ajuste principal	Valor o Variable	Unidades
Perfil	Calidad estándar	0.2	mm
Calidad	Altura de capa	0.2	mm
Paredes	Grosor de pared	0.8	mm
Superior e Inferior	Capa superior – Capa Inferior	3.0	-
Relleno	Densidad de relleno	80.0	%
	Patrón de relleno	Zigzag	
Material	Temperatura de impresión	240.0	°C
	Temperatura de la placa de impresión	70.0	°C
Velocidad	Velocidad de impresión	40.0	mm/s
Desplazamiento	Habilitar retracción	Si	-
	Distancia de retracción	4.0	mm
	Velocidad de Retracción	25	mm/s
	Modo peinada	Todo	-
Refrigeración	Activar refrigeración de impresión	Si	-
	Velocidad del ventilador	100	%
Soporte	Generar soporte	Si	-
	Ángulo de voladizo del soporte	50	°
	Patrón del soporte	Líneas	-
Adherencia de la placa de impresión	Tipo Adherencia de la placa de impresión	Ninguno	-
Extrusión doble	-	Desactivar	-
Modos especiales	-	Desactivar	-
Experimental	-	Desactivar	-

Es importante mencionar dos parámetros para este PLA la temperatura y la velocidad. La temperatura que indica el fabricante es de 215 °C, la velocidad es de 40 mm/s, así evitamos atascos en la impresora o que el PLA se puede derretir de una manera inestable. En este caso es necesario generar un ángulo para para soporte ya que esta pieza posee características huecas debido a la ventilación del sistema para ello se designó un ángulo de 50° y un patrón de soporte de líneas.



Figura 63 Diferentes vistas del armazón del estator impreso PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta. Fuente: Autor

La figura 63 muestra la pieza del armazón del estator impresa completamente en el material de Fibra de Carbono esta pieza tiene todas las características del diseño tanto en formato CAD como en STL, la característica principal de esta pieza es que posee residuos de polvo de fibra de carbono lo que lo hace óptimo para desarrollar trabajos soporte y rotación mecánico que proporciona un rendimiento adecuado al momento de ensamblarlo con los demás componentes mecánicos.

3.5. Ensamble de prototipo de motor de corriente directa sin escobillas

Una vez que se obtuvo las piezas del motor tanto las partes impresas como las mecánicas se procedió a ensamblar cada parte con sus respectivos componentes, es necesario que cada pieza impresa debe tener una resolución establecida así tendrán concordancia una con la otra, cada parte del motor es importante por ejemplo el estator posee firmeza y balanceo con vibraciones casi nulas, el rotor consta de un bobinado con vueltas bien realizadas y con ajuste en cada bobina, el armazón está diseñado para soportar toda la estructura y el giro del estator debido a que en el interior están colocados los rodamientos.

3.5.1. Ensamble de estator

El ensamble del estator necesita estar balanceado de manera óptima, para ello se procedió a pesar en una balanza analítica los 12 imanes que conforman el estator, como parte principal se escogió un peso base el que servirá como aislante entre la balanza y el imán, evitando así que exista magnetismo entre los dos y a su vez se evita que los valores de los pesos se modifiquen a continuación se muestra la Figura 64 y una ecuación sencilla para determinar los pesos de los 12 imanes.

$$\text{Peso total del imán} = \text{peso base} - \text{peso del imán} \quad (20)$$

Obteniendo como resultado.

$$\text{Peso total del imán} = 186.2 - 80 = 96.7 \text{ g}$$



Figura 64 Designación de pesos de los imanes en la balanza analítica. Fuente: Autor

De esta manera se obtuvo el peso de los 12 imanes, lo que resta es ordenar de manera uniforme todos los imanes, para equilibrar bien el estator, se debe realizar organizar los pesos de los imanes como se observa en la Figura 65 y formar parejas entre ellos de peso similar y establecer un orden en los alojamientos del estator.

A continuación se muestra la Tabla 14 de los 12 imanes con sus respectivos pesos obtenidos de la balanza analítica.

Tabla 14 Pesos equivalentes de los 12 imanes. Fuente: Autor

Imán N°	Peso	Unidades
1	98.0	gramos
2	97.9	gramos
3	96.7	gramos
4	95.8	gramos
5	97.8	gramos
6	96.6	gramos
7	96.0	gramos
8	96.4	gramos
9	95.9	gramos
10	96.1	gramos
11	96.6	gramos
12	97.7	gramos

Después de ello se procedió a formar seis pares de imanes con los pesos obtenidos, es necesario que cada par de imanes conste de pesos iguales o parecidos así el estator tendrá una uniformidad en toda la pieza.

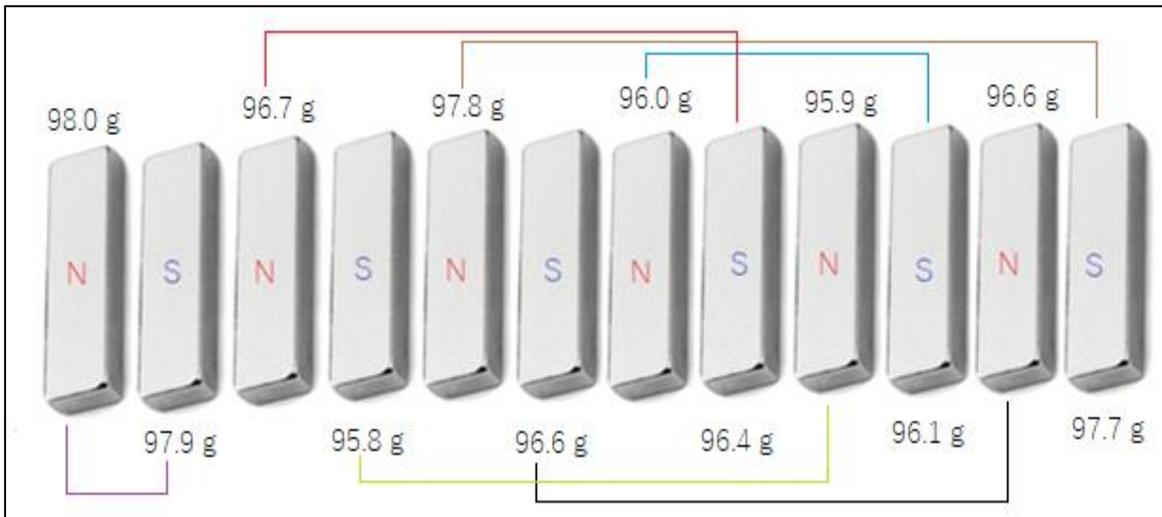


Figura 65 Organización y clasificación de los pares de los imanes según su peso. Fuente: Autor

Una vez clasificados los pesos de los imanes y establecido el orden de los alojamientos se procedió a colocar cada par de imanes en alojamientos opuestos es decir frente con frente balanceando cada peso. Al momento que se vaya a colocar los imanes deben ir opuestos es decir “Norte y Sur” como se observa en la Figura 66.



Figura 66 Ensamblaje y calibración de los imanes en el estator. Fuente: Autor

Una vez colocado todos los imanes radialmente en el estator con un imán suelto se prueban todos los polos de los imanes de tal manera que en cada imán sea repelido y



Figura 68 Entradas, saltos, configuración y secuencia de las bobinas y fases R, S y T. Fuente: Autor

Finalmente con los extremos de comienzo es decir con los 15 cm libres de cada fase R, S y T se las debe soldar las tres fases en un mismo punto común siendo esta la conexión en estrella indicada en la figura anterior.

3.5.3. Ensamble del armazón del estator

Esta pieza vincula todo el prototipo, encaja con el rotor y soporta la rotación del estator, para empezar a ensamblar el armazón se debe engrasar los rodamientos previamente seleccionados puesto que estos rodamientos van colocados en la parte interna del armazón, como se explicó en temas anteriores tiene las dimensiones que se observa en la Figura 69.



Figura 69 Lubricación y medidas de los rodamientos. Fuente: Autor

Una vez que se tiene los rodamientos engrasados se coloca en el interior del armazón en los alojamientos ya predispuestos de tal manera que queden bien ajustados, luego de ello se insertó el eje en el interior de cada uno de los rodamientos. La inserción del eje con sus respectivos rodamientos se puede observar en la Figura 70 que muestra el armazón acoplado al eje.



Figura 70 Ensamble de los rodamientos y eje en el armazón del estator. Fuente: Autor

Luego de ello se colocó las tuercas y tonillos de sujeción, para ubicar las tuercas se debe calentar las mismas a modo que derrita de una manera leve el PLA, esto se realizó para que la tuerca quede fija y al momento de insertar los tornillos mantengan un ajuste seguro para el armazón.



Figura 71 Colocación de tuercas y tornillos de sujeción. Fuente: Autor

Finalmente el motor ya estaría ensamblado correctamente. Los imanes se encuentran colocados y ajustados de manera radial, el rotor se encuentra devanado y conectado con el eje y los rodamientos.

3.6. Pruebas del prototipo

Una vez que se tiene el prototipo ya ensamblado como se observa en la Figura 72 con todas sus partes se procede a realizar las pruebas correspondientes del motor así se obtendrán las características de trabajo y la eficiencia del motor. Para el funcionamiento se debe adquirir algunos componentes que se detallan en este capítulo.

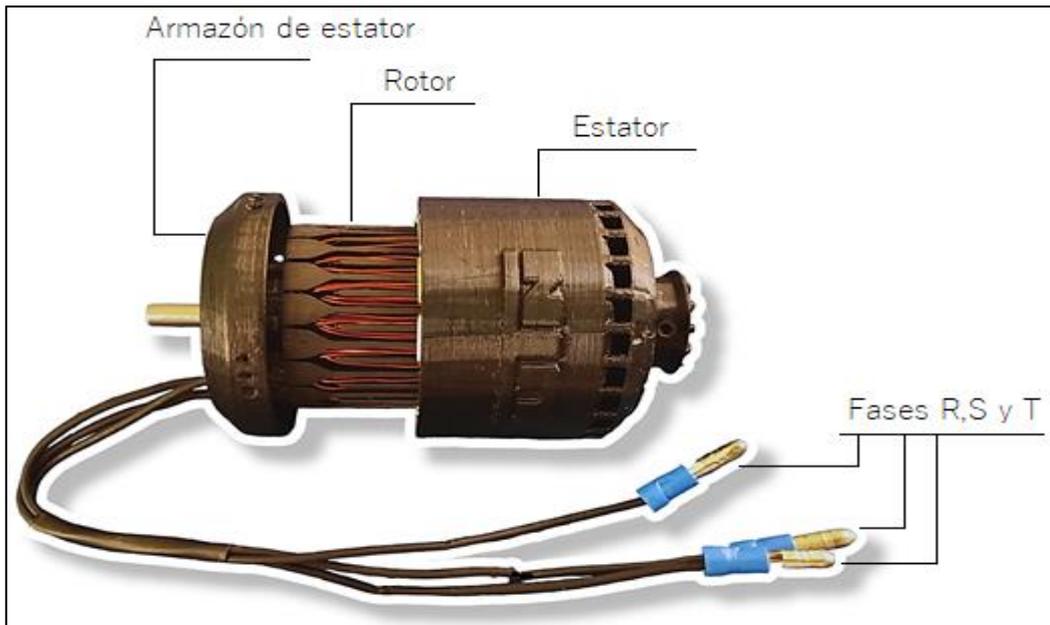


Figura 72 Prototipo de motor sin escobillas con núcleo de polímeros e imanes permanentes ensamblado. Fuente: Autor

3.6.1. Prueba del prototipo en vacío

La prueba en vacío se necesita dos componentes esenciales uno es el variador de velocidad “ESC” y el Servo Tester que ayudaran a que el prototipo funcione.

Control electrónico de velocidad o ESC

El variador de velocidad (ESC) se compone por un circuito con varios componentes. Como se menciona varia la velocidad de un motor eléctrico junto con el sentido de giro que disponga las fases del motor.

Los variadores de velocidad en general, son controladores de Modulación por Ancho de Puntos (PWM) que controlan motores eléctricos. El receptor del prototipo, envía una señal PWM al ESC con variaciones de 1 a 2 milisegundos. En la primera señal de 1.5 milisegundos el motor está en modo de inercia, a 1.5 ms el motor rompe la inercia y funcionará a la mitad de su potencia y a los 2ms el motor funcionará al 100% indicada en la Figura 67.

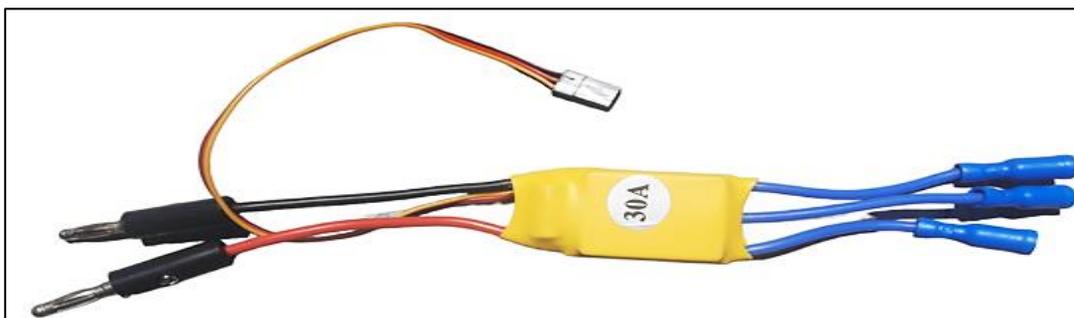


Figura 73 Variador de velocidad (ESC) de 30 amperios de capacidad Fuente: Autor

En los motores Brushless estos variadores crean una corriente alterna trifásica a partir de corriente continua proveniente de la fuente de alimentación. Uno de los polos genera un voltaje proporcional a la velocidad de giro del motor conocido como fuerza electromotriz. Este voltaje indica al ESC la rapidez y la dirección que debe girar el motor.

Servo Tester “Comprobador”

Es un pequeño módulo que permite analizar diferentes servomotores y también puede utilizarse como generador de señal para tener control de velocidad (ESC), indicado en la Figura 74.

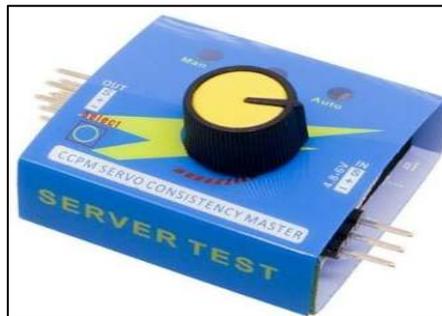


Figura 74 Servo Test “Comprobador”. Fuente: Autor

Este Servo Tester cuenta con 3 modos de operación.

- Manual: Permite girar la perilla y controlar la velocidad del motor de forma manual.
- Neutral: Hace que el motor gire de una manera lenta sin parar
- Automático: Generalmente este modo permite que el motor ingrese en modo de prueba girando de izquierda a derecha.

Funcionamiento del prototipo con voltaje de entrada de 9, 10, 11 y 12 Voltios “corriente directa”

Previamente de su conexión con los componentes es necesario verificar si las tres fases tienen un punto común, para ello se utiliza continuidad en un multímetro y se coloca las puntas entre fase “R”, fase “S” y fase “T”. Una vez realizado el proceso se obtuvo la siguiente tabla de características del alambre esmaltado y la resistividad obtenida por fase adicionada en la tabla siguiente.

$$\text{Resistividad por fase} = \rho \frac{l}{\delta} \quad (21)$$

Obteniendo como resultado.

$$\text{Resistividad por fase} = 0.0176 \frac{3000}{0.5106} = 103.4 \text{ Ohm} * \text{mm}^2/\text{m}$$

Tabla 15 Características de alambre esmaltado N° 24

Longitud de cable por fase	3000	mm
Diámetro del cable	0.5106	mm
Resistividad del Cobre	0.0176	Ohm*mm ² /m
Resistividad por fase	103.4	Ohm*mm ² /m

Establecida la tabla anterior se procedió a realizar el funcionamiento con los voltajes seleccionados para ello se designó una fuente de corriente directa que permita voltajes de entrada de 9, 10, 11 y 12 voltios continuos de entrada. Para cada voltaje seleccionado se midió entre fases es decir "R" con "S", "S" con "T" y finalmente "R" y "T". A continuación, se muestran las figuras donde se pueden apreciar los voltajes medidos, la primera medición que se realizó fue el voltaje de línea de motor teniendo como resultados la Tabla 16 donde se muestra diferentes parámetros e funcionamiento del motor. La segunda medición fue de corriente obteniendo los parámetros de funcionamiento.

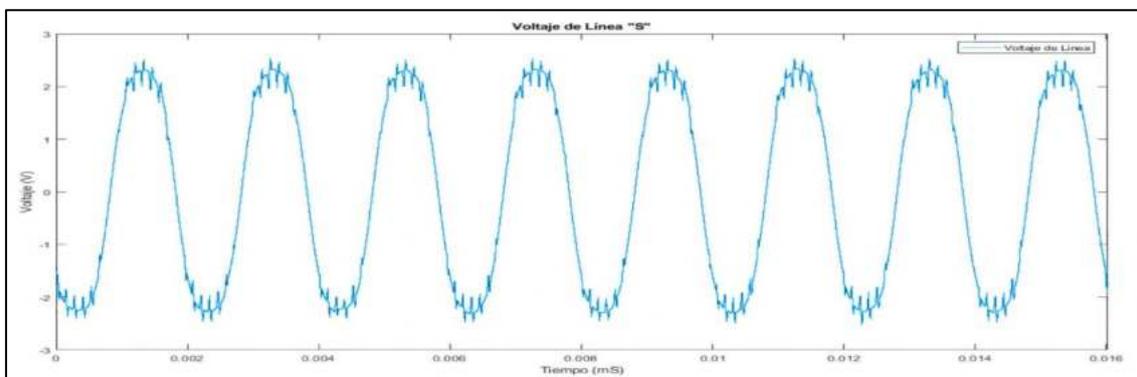


Figura 75 Curva de voltaje de línea "S" graficado en MATLAB Fuente: Autor

Obtenidos los datos de la línea "S" en el osciloscopio se procedió a filtrar la señal en el programa computacional MATLAB lo que se muestra en la Figura 75 obteniendo una curva sinusoidal con menos ruido y adicional se tiene una tabla de parámetros donde se muestra las diferentes especificaciones de la medición de voltaje de línea.

Tabla 16 Parámetros de funcionamiento de voltaje medición de Línea "S"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	9.04	V
V. Mínimos	9.79	V
Rms	3.75	V
Amplitud	18.1	V
Periodo	128	uS
Frecuencia	7.81	KHz
Tiempo de rizado	1.29	mS
Duty Cycle	6.3	%

Luego de ello también se obtuvo los valores de corriente medidos en la fase "R" la misma que se la filtro en el programa computacional MATLAB obteniendo la curva indicada en la Figura 76, luego de ello del osciloscopio se obtuvo una tabla de parámetros en donde se muestra las especificaciones obtenidas de funcionamiento.

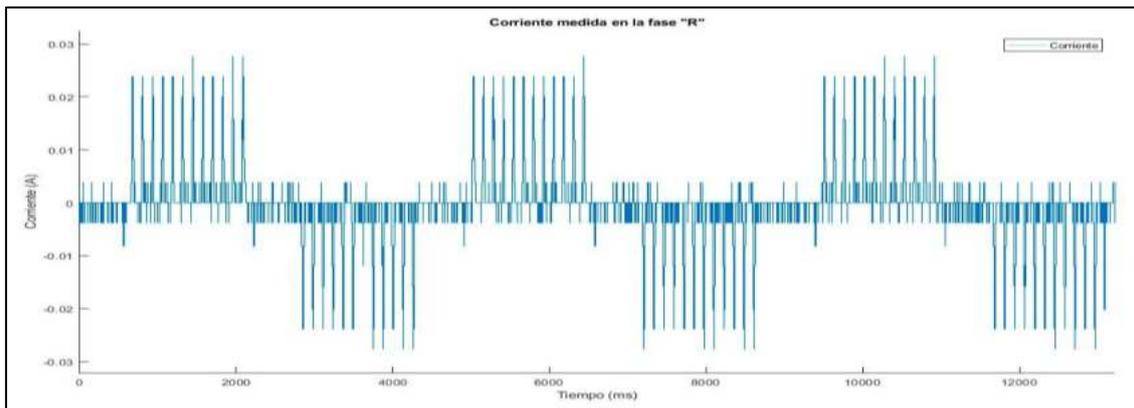


Figura 76 Curva de corriente medido en la fase "R" graficado en MATLAB Fuente: Autor

A continuación se muestra la Tabla 17 especificaciones de corriente obtenidas en el osciloscopio.

Tabla 17 Parámetros de funcionamiento de corriente en la fase "R"

Especificaciones	Valor	Unidades
A. Máximos	1.5	A.
A. Mínimos	2	A
Rms	3	A
Amplitud	4	A
Periodo	4.35	mS
Frecuencia	229.9	Hz
Tiempo de rizado	2.17	mS
Duty Cycle	35.9	%

Funcionamiento del prototipo con un voltaje de entrada de 9 Voltios

El funcionamiento de 9 Voltios de corriente directa inyectada en la entrada del controlador se estableció con una fuente de voltaje controlada que alimenta al control ESC que envía pulsos en corriente alterna a las fases del motor que permite el funcionamiento del prototipo.

Después de ello se procedió a realizar la medición en las diferentes Fases "R, S y T" en el osciloscopio con lo que se obtuvo una serie de datos que fueron ingresados a MATLAB para su posterior filtrado obteniendo así una curva sinusoidal mostrada en la Figura 77 esta curva presenta menos ruido.

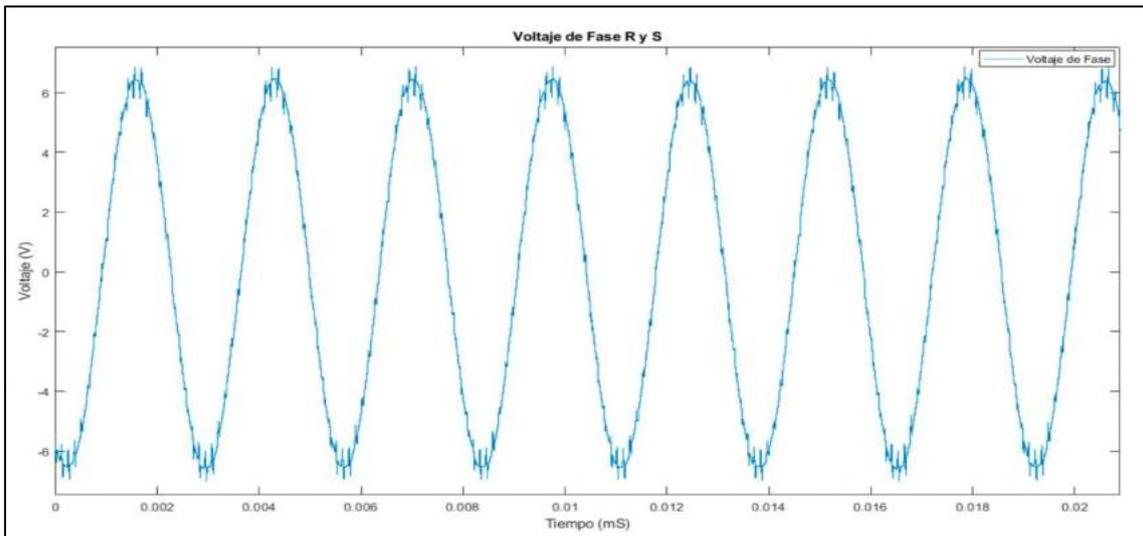


Figura 77 Curva de voltaje de Fase medida en "R y S" graficado en MATLAB Fuente: Autor

De la anterior medición se obtuvo una serie de datos con los que se puede indicar una serie de parámetros de funcionamiento de voltaje de fase que se muestran a continuación en la Tabla 18.

Tabla 18 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y S"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	19.5	V
V. Mínimos	-20.2	V
Rms	9.58	V
Amplitud	36.6	V
Periodo	128	uS
Frecuencia	7.8	KHz
Tiempo de rizado	1.16	mS
Duty Cycle	6.3	%

De la misma manera se procedió a medir con el mismo voltaje de entrada en las fases "R y T" teniendo la sinusoidal que se muestra en la Figura 78, también filtrada en MATLAB.

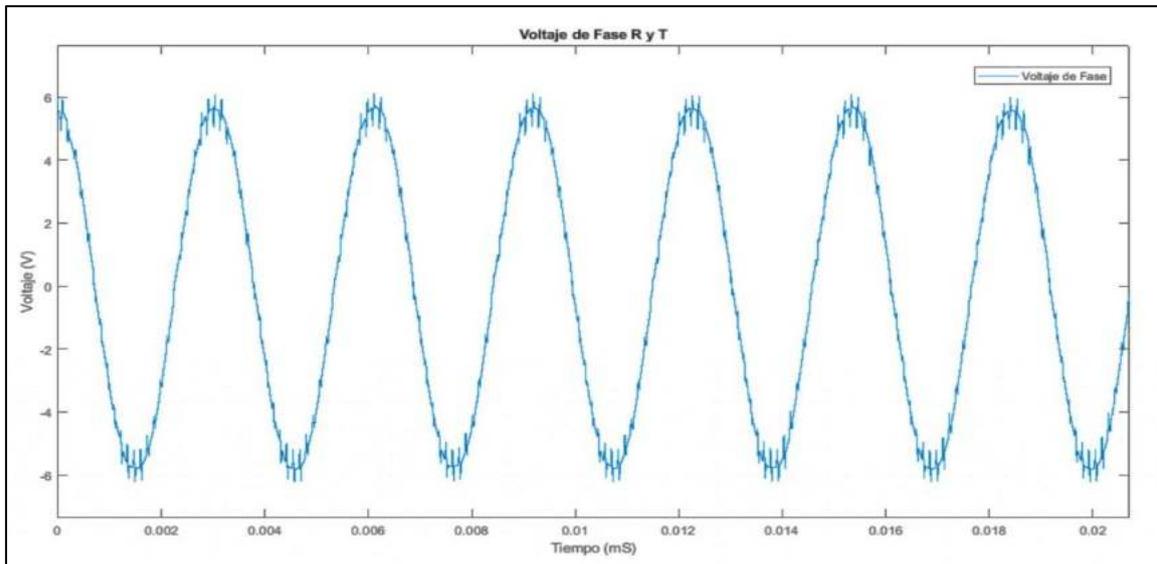


Figura 78 Curva de voltaje de Fase medida en "R y T" graficado en MATLAB Fuente: Autor

A continuación se muestra en la Tabla 19 las especificaciones de funcionamiento obtenidas en el osciloscopio.

Tabla 19 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y T"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	18.7	V
V. Mínimos	-19.9	V
Rms	8.60	V
Amplitud	37.5	V
Periodo	128	uS
Frecuencia	7.8	KHz
Tiempo de rizado	1.52	mS
Duty Cycle	95.3	%

Funcionamiento del prototipo con un voltaje de entrada de 10 Voltios

Se procedió a realizar la medición con un voltaje de entrada de 10 Voltios en las diferentes Fases "R, S y T" en el osciloscopio, se obtuvo una serie de datos que fueron ingresados a MATLAB para su posterior filtrado obteniendo así una curva sinusoidal con menos ruido con se observa en la Figura 79.

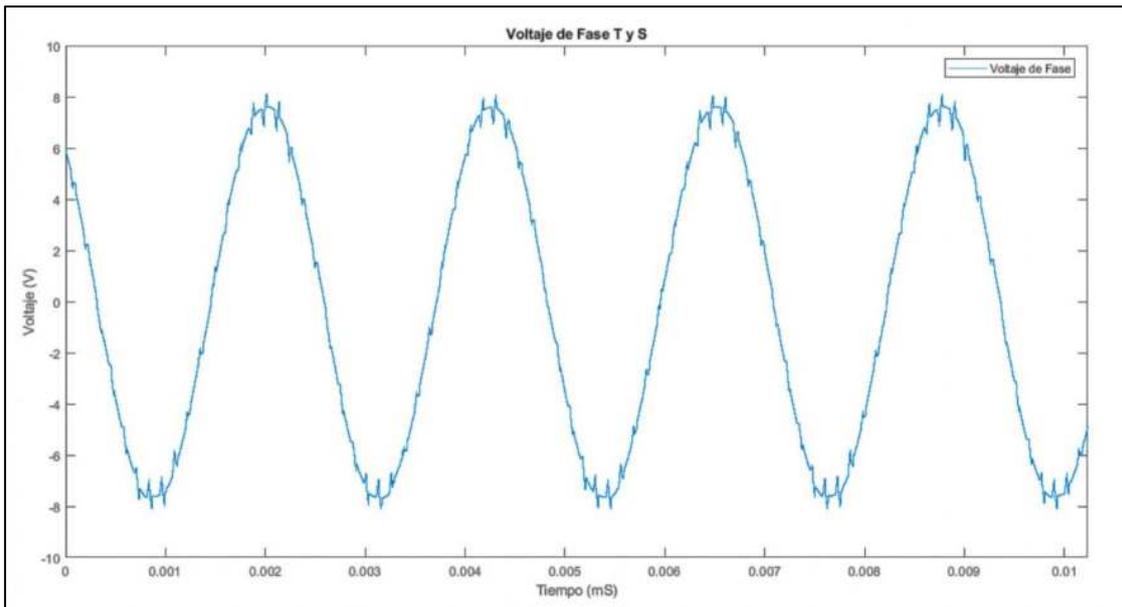


Figura 79 Curva de voltaje de Fase medida en "T y S" graficado en MATLAB Fuente: Autor

De la medición anterior se obtuvo una serie de datos que indica la Tabla 20 que muestra los parámetros de funcionamiento de voltaje de fase.

Tabla 20 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y T"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	23.8	V
V. Mínimos	-22.3	V
Rms	11.2	V
Amplitud	43.6V	V
Periodo	1.14	mS
Frecuencia	877.2	Hz
Tiempo de rizado	1.13	mS
Duty Cycle	10.5	%

De la misma manera se procedió a medir con el mismo voltaje de entrada en las fases "R y T" teniendo la sinusoidal que se muestra en la Figura 80, también filtrada en MATLAB.

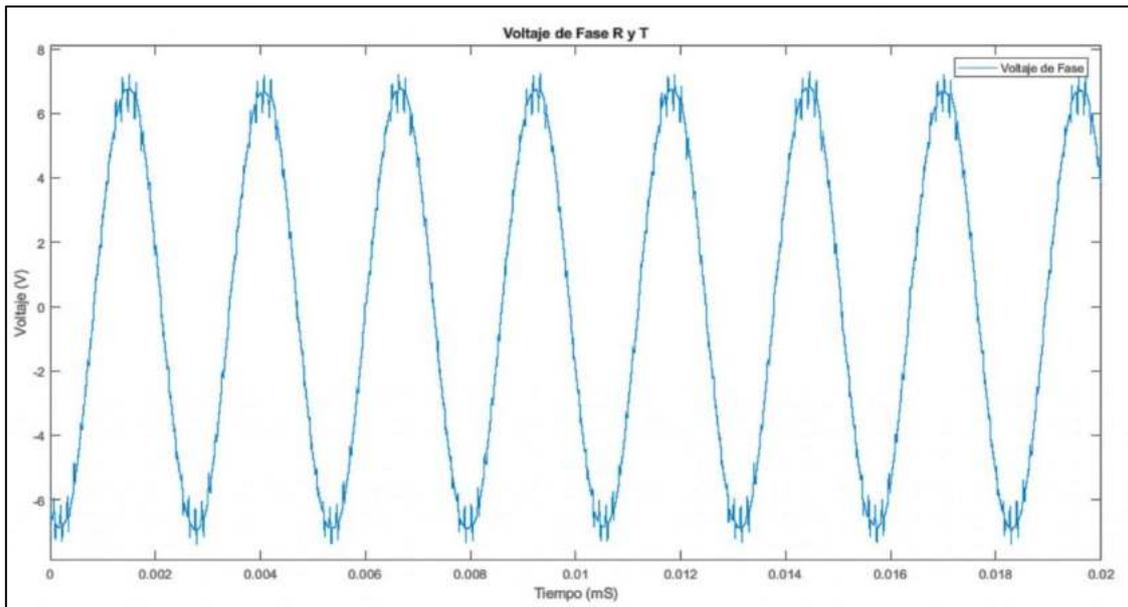


Figura 80 Curva de voltaje de Fase medida en "R y T" graficado en MATLAB Fuente: Autor

A continuación se muestra la Tabla 21 con las especificaciones de funcionamiento obtenidas en el osciloscopio.

Tabla 21 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y T"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	21.8	V
V. Mínimos	-22.6	V
Rms	10.2	V
Amplitud	37.5	V
Periodo	128	uS
Frecuencia	7.8	KHz
Tiempo de rizado	1.26	mS
Duty Cycle	4.7	%

Funcionamiento del prototipo con un voltaje de entrada de 11 Voltios

Con la medición de voltaje de entrada de 11 Voltios en las diferentes Fases "R, S y T" en el osciloscopio donde se obtuvo una serie de datos que se ingresaron a MATLAB para su posterior filtrado obteniendo así una curva sinusoidal con menos ruido como se observa en la Figura 81.

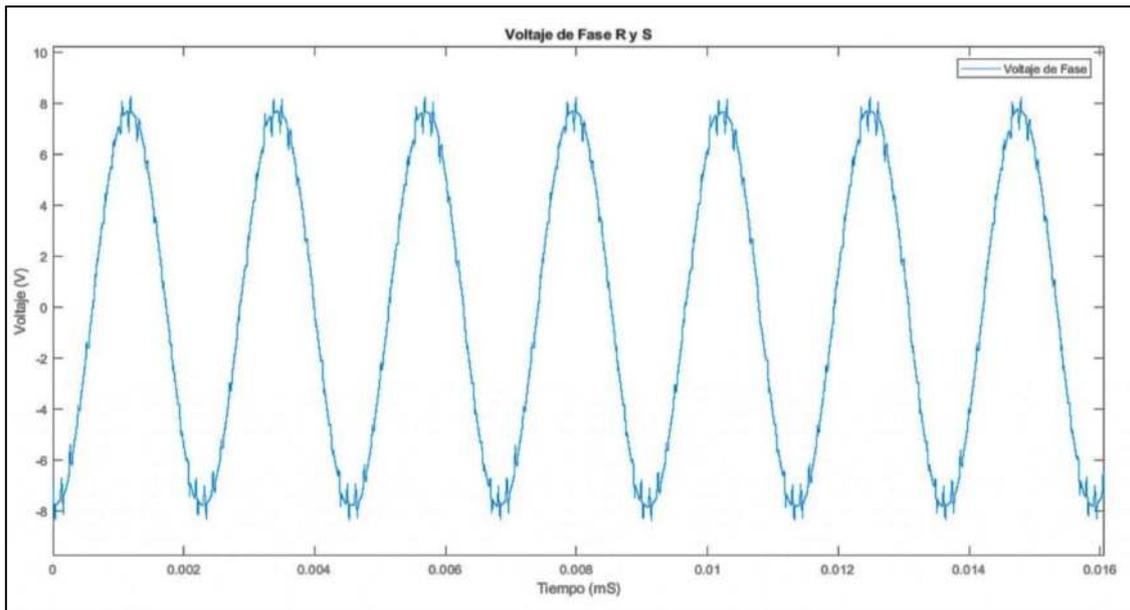


Figura 81 Curva de voltaje de Fase medida en "R y S" graficado en MATLAB Fuente: Autor

Así de la medición anterior se obtuvo una serie de parámetros de funcionamiento de voltaje de fase que se muestran a continuación en la Tabla 22.

Tabla 22 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y S"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	25.1	V
V. Mínimos	-25.1	V
Rms	11.5	V
Amplitud	46.4	V
Periodo	254	uS
Frecuencia	3.9	KHz
Tiempo de rizado	259	uS
Duty Cycle	1.6	%

De la misma manera se procedió a medir con el mismo voltaje de entrada en las fases "R y T" teniendo la sinusoidal que se muestra en la Figura 82, también filtrada en MATLAB.

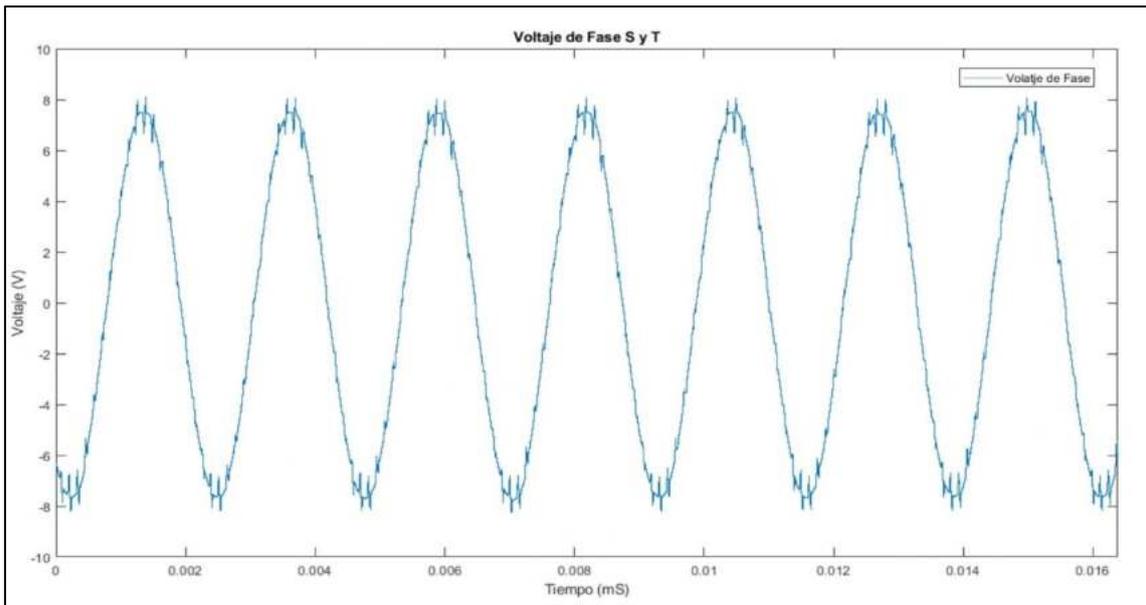


Figura 82 Curva de voltaje de Fase medida en "S y T" graficado en MATLAB Fuente: Autor

Obteniendo la curva anterior se tiene una serie de datos donde indican parámetros de funcionamiento del voltaje de fase que se muestran a continuación en la Tabla 23.

Tabla 23 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "S y T"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	25.1	V
V. Mínimos	-23.1	V
Rms	11.2	V
Amplitud	46.9	V
Periodo	124	uS
Frecuencia	8.06	KHz
Tiempo de rizado	768	uS
Duty Cycle	6.5	%

Funcionamiento del prototipo con un voltaje de entrada de 12 Voltios

La última medición que se realizó fue de 12 Voltios de corriente directa inyectada en la entrada del controlador se estableció con una fuente de voltaje controlada que alimenta al control ESC que envía pulsos en corriente alterna a las fases del motor permitiendo el funcionamiento del prototipo. Obteniendo como resultado la curva sinusoidal que muestra la Figura 83.

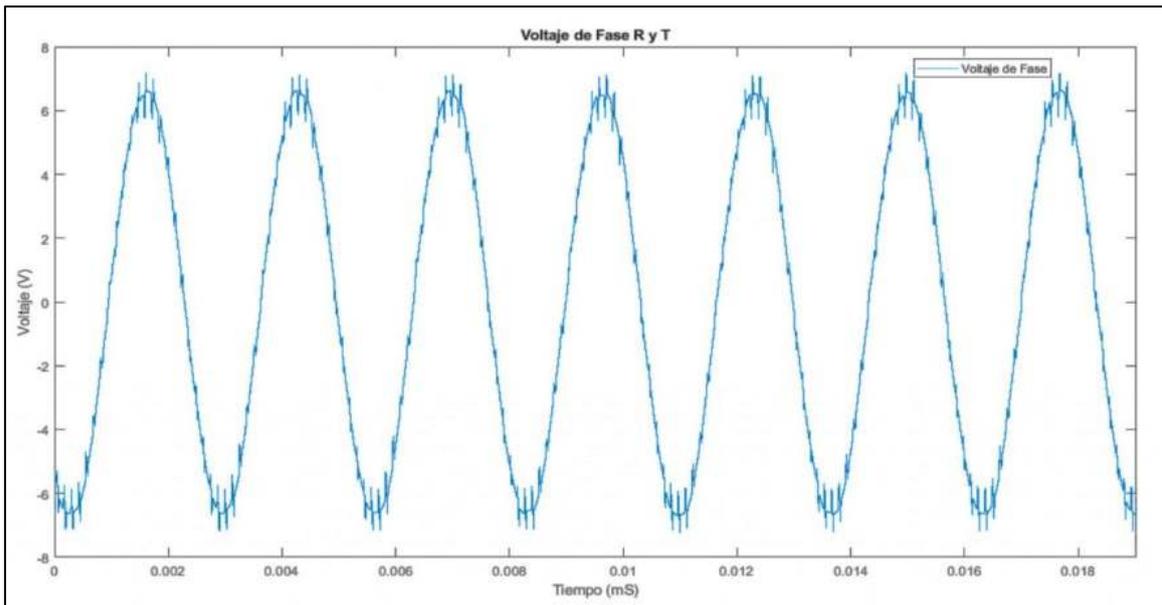


Figura 83 Curva de voltaje de Fase medida en "R y T" graficado en MATLAB Fuente: Autor

Así de la medición anterior se obtuvo una serie de parámetros de funcionamiento de voltaje de fase que se muestran a continuación en la Tabla 24.

Tabla 24 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase medidos en "R y T"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	25.1	V
V. Mínimos	-27.0	V
Rms	10.1	V
Amplitud	50.8	V
Periodo	130	uS
Frecuencia	7.6	KHz
Tiempo de rizado	1.42	mS
Duty Cycle	6.5	%

De esta manera se culminó la prueba en vacío del motor de corriente directa sin escobillas de imanes permanentes observando así valores similares en cada medición, tomando en cuenta que se escogió valores de voltaje de entrada como mínimo de 9 V y como máximo 12 V.

3.6.2. Prueba de rotor con carga

Las pruebas de rotor con carga se basaron principalmente con la utilización de una hélice de marca GemFam Hurricane 51477 que consta de 3 palas y diferentes características presentadas en la Tabla , de ello se estableció también voltaje de entrada de 9 voltios como mínimo y 12 voltios como máximo.



Figura 84 GemFam Hurricane 5147 - hélice de 3 palas para motor DC Brushless.

A continuación se muestra la Tabla 25 los parámetros técnicos de la hélice dispuesta para la realización de la prueba con carga del motor.

Tabla 25 Especificaciones técnicas de GemFam Hurricane 5147

Parámetros	Valor	Unidades
Tipo	GemFam	-
Modelo	51477	-
Palas	3	-
Material	Policarbonato	-
Paso	9.14	cm
Diámetro	12.93	cm
Ancho máx. del apoyo	1.55	cm
Diámetro agujero central	0.50	cm
Grosor agujero central	0.65	cm
Peso	4.25	g

Establecido los parámetros de la hélice utilizada se procedió a ensamblar en el motor en la parte del eje realizando un ajuste preciso y de manera centrada evitando doblar el eje.

Funcionamiento con 9 Voltios de entrada con carga

Alimentado con 9 Voltios de corriente directa inyectada en la entrada del controlador con una fuente de voltaje controlado que alimenta al control ESC y permite el funcionamiento del motor.

Se procedió a realizar la medición en las diferentes Fases “R, S y T” en el osciloscopio de esta forma se obtuvo una serie de datos que fueron ingresados a MATLAB para su

posterior filtrado obteniendo así una curva sinusoidal mostrada en la Figura 85 en donde muestra menos ruido.

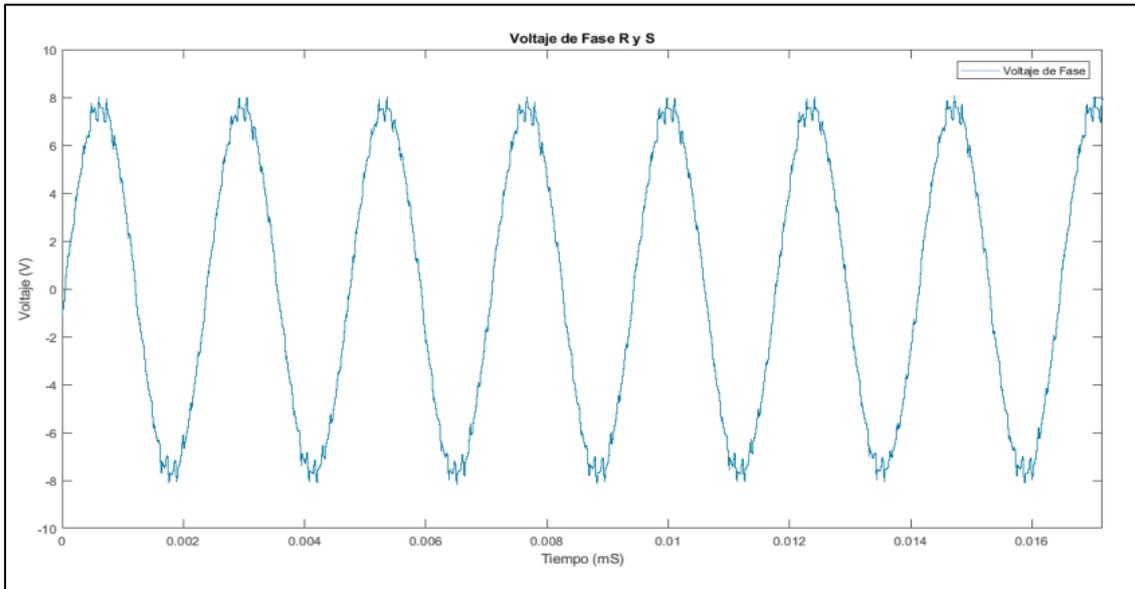


Figura 85 Curva de voltaje de Fase con carga medida en "R y S" graficado en MATLAB Fuente: Autor

Así de la curva anterior se obtuvo una serie de datos que indican una serie de parámetros de funcionamiento de voltaje de fase que se muestran a continuación en la Tabla 26.

Tabla 26 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase con carga medidos en "R y S"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	21	V
V. Mínimos	20.7	V
Rms	11.2	V
Amplitud	39.4	V
Periodo	134	uS
Frecuencia	7.46	KHz
Tiempo de rizado	1.11	mS
Duty Cycle	95.5	%

Funcionamiento con 10 Voltios de entrada con carga

De la misma manera se procedió a medir con voltaje de 10 V de entrada en las fases "R y T" teniendo la sinusoidal que se muestra en la Figura 86, también filtrada en MATLAB obteniendo así especificaciones generales de la curva.

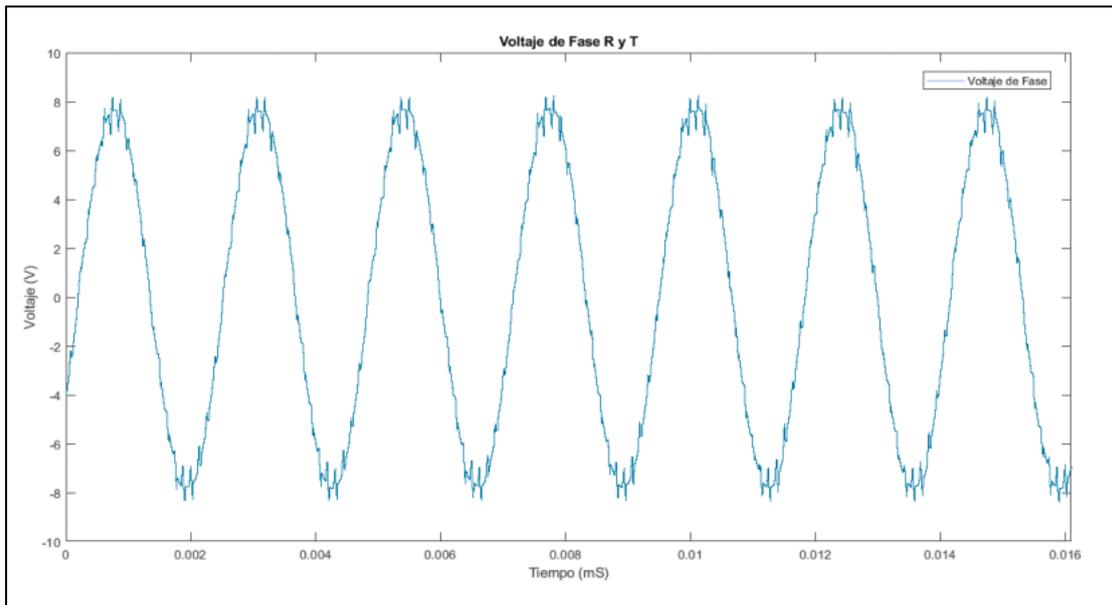


Figura 86 Curva de voltaje de Fase con carga medida en "R y T" graficado en MATLAB Fuente: Autor

De la anterior curva sinusoidal se obtuvo una serie de parámetros de funcionamiento de voltaje de fase que se muestran a continuación en la Tabla 27.

Tabla 27 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase con carga medidos en "R y S"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	22.6	V
V. Mínimos	-23.1	V
Rms	11.5	V
Amplitud	43.8	V
Periodo	128	uS
Frecuencia	7.8	KHz
Tiempo de rizado	1.12	mS
Duty Cycle	6.3	%

Funcionamiento con 11 Voltios de entrada con carga.

Se procedió a realizar la medición con un voltaje de entrada de 11 Voltios en las diferentes Fases "S y T" en el osciloscopio, se obtuvo una serie de datos que fueron ingresados a MATLAB para su posterior filtrado obteniendo así una curva sinusoidal con menos ruido con se observa en la Figura 87.

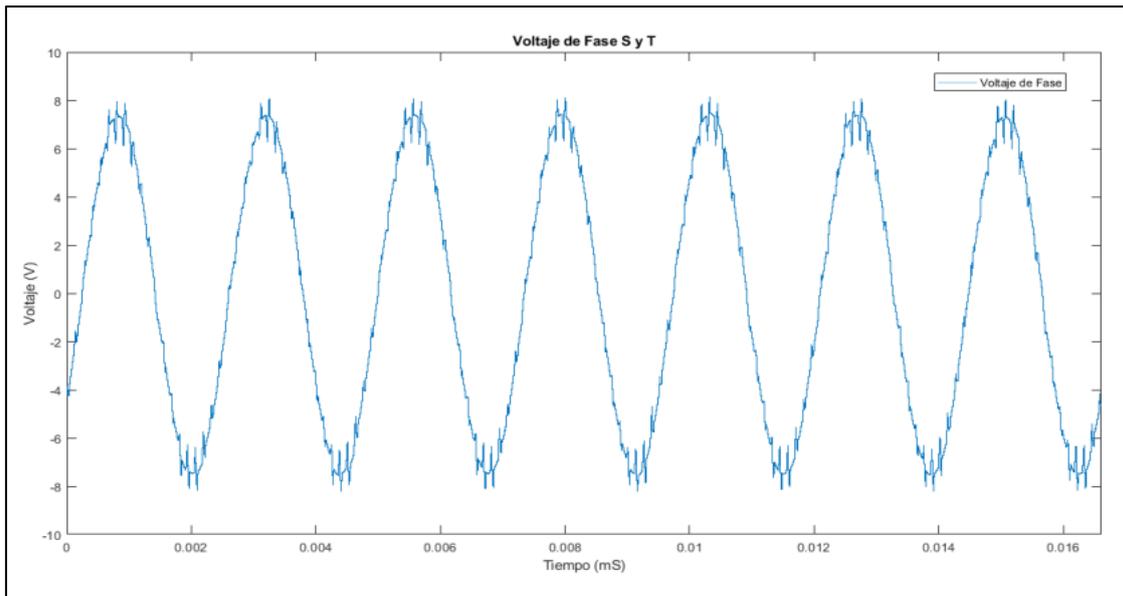


Figura 87 Curva de voltaje de Fase con carga medida en "S y T" graficado en MATLAB Fuente: Autor

De la anterior medición se obtuvo una serie de parámetros de funcionamiento de voltaje de fase que se muestran a continuación en la Tabla 28.

Tabla 28 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase con carga medidos en "S y T"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	25.1	V
V. Mínimos	23.1	V
Rms	11.1	V
Amplitud	47.2	V
Periodo	128	uS
Frecuencia	7.8	KHz
Tiempo de rizado	11.16	mS
Duty Cycle	4.7	%

Funcionamiento con 12 Voltios de entrada con carga

La última medición que se realizó fue de 12 Voltios con carga de corriente directa inyectada en la entrada del controlador se estableció con una fuente de voltaje controlada que alimenta al control ESC que envía pulsos en corriente alterna a las fases del motor permitiendo así el funcionamiento del prototipo. Obteniendo como resultado una curva sinusoidal que muestra la Figura 88.

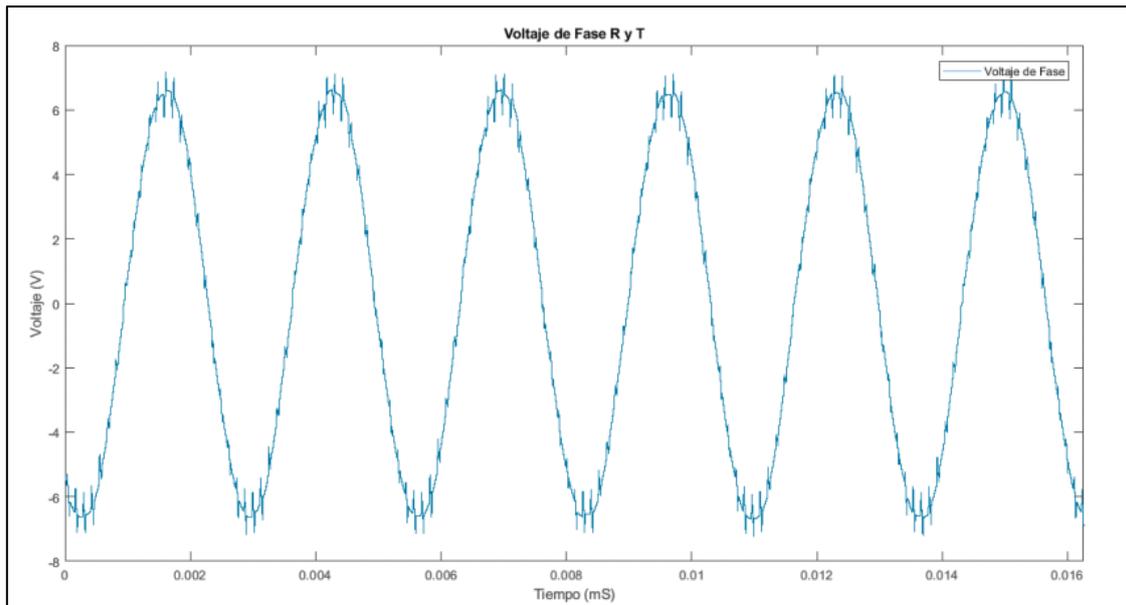


Figura 88 Curva de voltaje de Fase con carga medida en "R y T" graficado en MATLAB Fuente: Autor

A continuación se muestra la Tabla 29 las especificaciones de corriente obtenidas en el osciloscopio.

Tabla 29 Parámetros de funcionamiento de voltaje de Fase con carga medidos en "R y T"

Especificaciones	Valor	Unidades
V. Máximos	27.5	V
V. Mínimos	25.1	V
Rms	13.8	V
Amplitud	51.8	V
Periodo	140	uS
Frecuencia	7.14	KHz
Tiempo de rizado	1.01	mS
Duty Cycle	87.1	%

De esta manera se culminó la prueba con carga del motor de corriente directa sin escobillas de imanes permanentes observando así valores similares en cada medición, tomando en cuenta que se escogió valores de voltaje de entrada como mínimo de 9 V y como máximo 12 V.

3.6.3. Característica del devanado

La realización de esta prueba permite calcular la resistencia interna del rotor es decir el bobinado, se la realiza ingresando un valor de voltaje en corriente directa y se mide la corriente que circula en el bobinado cabe recalcar que se debe variar los valores de voltaje de ingreso.

A continuación se muestra la ecuación donde se obtiene la resistencia interna.

$$R_{int} = \frac{V_{DC}}{2 * I_{DC}} \quad (21)$$

Luego de ello se tiene la ecuación con datos utilizados para la prueba, obteniendo como resultado.

$$R_{int} = \frac{1}{2 * 1.09} = 0.45$$

Tabla 30 Medición de resistencia interna aplicado voltaje continuo

Voltaje (V)	Corriente (A)	Resistencia (Ohmios)
1	1.09	0.45
1.5	1.13	0.66
2	2.04	0.49

Realizando un promedio general de todas las mediciones de resistencias obtenidas se llegó a obtener una resistencia interna general.

$$R_{int} = 0.54 \text{ ohmios}$$

Una vez establecido los los valores de resistencia se procedió a medir la corriente que circula por la Fase "R" ingresado el voltaje continuo teniendo como resultado corrientes aproximadas a las mediciones realizadas.

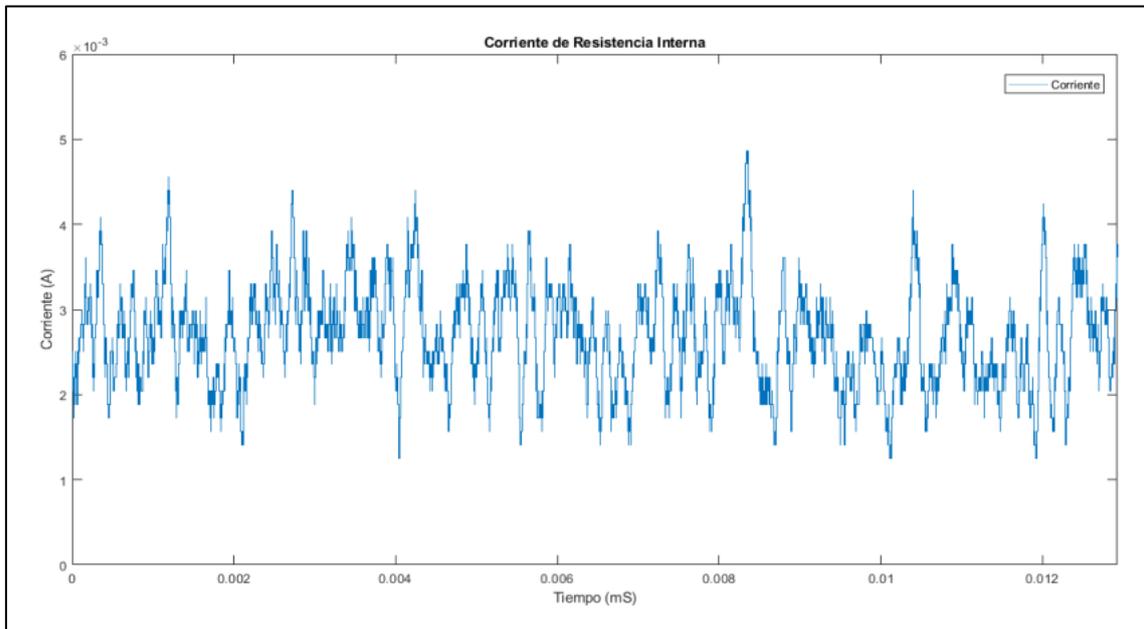


Figura 89 Curva de corriente obtenida en MATLAB. Fuente: Autor.

Culminando el capítulo tres se tiene una serie ensayos que muestran el funcionamiento y diferentes pruebas aplicadas al prototipo que se las detallaron anteriormente, de ello se tiene el trabajo óptimo también de cada una de sus piezas.

Conclusiones

- En el análisis de los tipos de motores Brushless de corriente directa existentes dependiendo el modelo al que se lo vaya a tomar de base se debe modificar el dimensionamiento y las características principales acorde con el objetivo establecido.
- Al momento de diseñar el prototipo se debe establecer los parámetros mecánicos, eléctricos y magnéticos acorde con el modelo que se tiene de base y modificar alojamientos tanto para el bobinado, polos magnéticos, partes mecánicas y sobre todo el ajuste del eje.
- En la implementación del prototipo el rotor debe estar impreso en material PLA ferro-magnético ya que este material aumenta el flujo magnético al interior del motor.

Recomendaciones

- Es recomendable la utilización de hélices de policarbonato o de materiales de mayor dureza para el funcionamiento debido a que las revoluciones por minuto generadas puede fisurar las aspas.
- Es importante filtrar las señales obtenidas de los diferentes voltajes ya que así se puede obtener una sinusoidal con menos ruido y así mejorar significativamente la frecuencia la curva filtrada.
- Se recomienda utilizar material PLA Ferromagnético en la impresión del rotor ya que así evitamos que el polímero interrumpa la curva magnetización y pierda sincronismo con el estator y por ende la capacidad de funcionamiento del motor sea reducida.

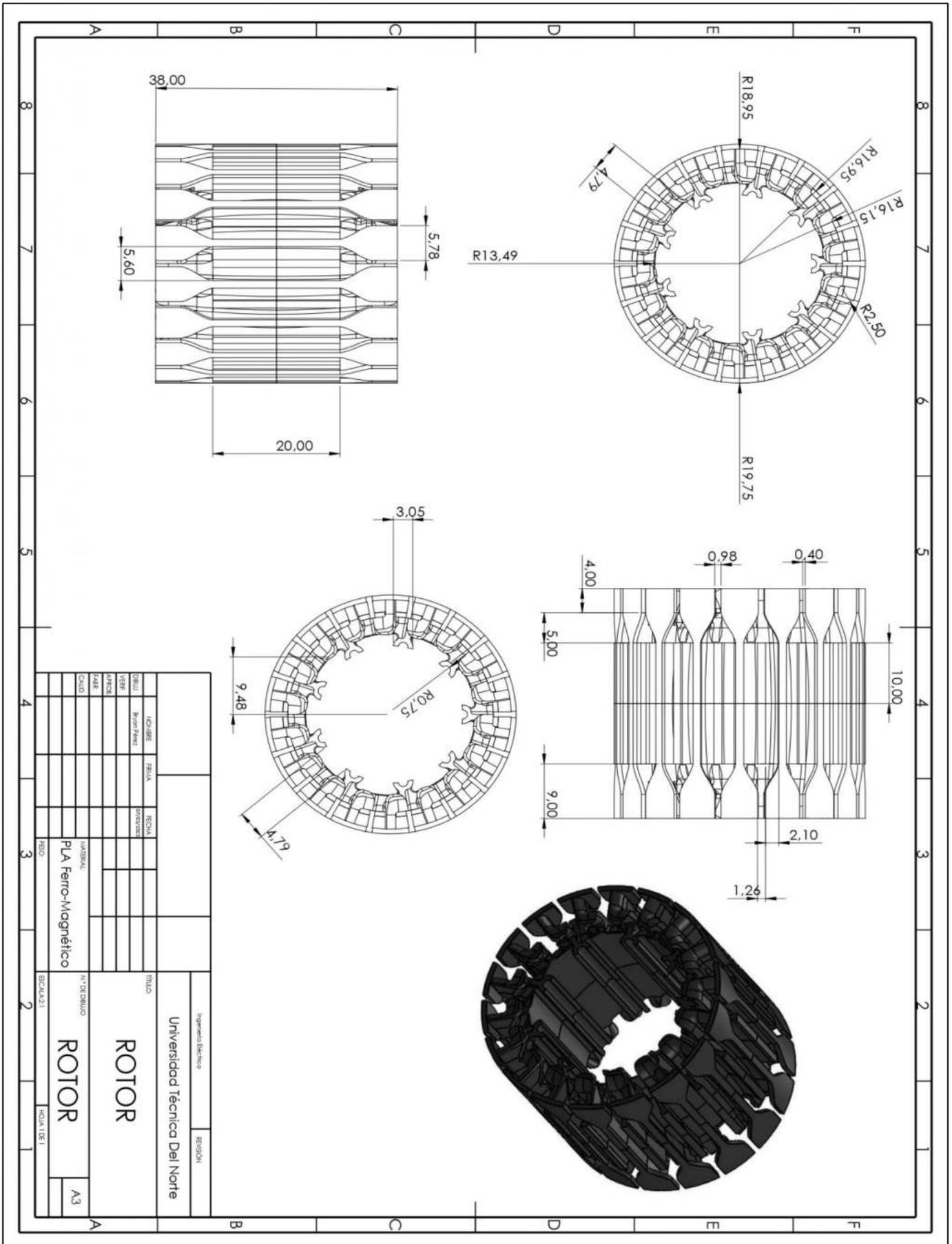
Referencias

- ASCENT. (2018). *AutoCAD 3D Drawing & Modeling* (1st ed.). Retrieved from www.ASCENT.com
- Bañuelos, P. (2018). Motores de Corriente Directa. Retrieved August 9, 2022, from Universidad de las Américas Puebla website: <https://slideplayer.es/slide/12209276/>
- Blanco, A. (2020). *Estudio comparativo entre la obtención de piezas mediante impresión 3D y su obtención mediante moldes u otros procesos de fabricación*. (Universidad Politécnica de Valencia). Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/153236/Blanco - Estudio comparativo entre la obtención de piezas mediante impresoras 3D y su obtención m....pdf?sequence=4>
- Chapman, S. (2012). *MÁQUINAS ELÉCTRICAS* (Quinta edi; P. Roig & A. Delgado, Eds.). Mexico: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Cifre, S. (2019). *Control Foc De Motores Bldc* (Universidad Politécnica de Valencia). Retrieved from <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/147763/Cifre - Control FOC de motores BLDC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Delgado, J., & Bolaños, C. (2013). *Control de velocidad para motor Brushless sin sensores*. Retrieved from <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/13593/1/DelgadoJoseDavid2013.pdf>
- Fane, B. (2016). AutoCAD for dummies. In *AutoCAD For Dummies, 17th Edition* (17th ed., Vol. 17). <https://doi.org/978-1-119-25581-9>
- Farina, A. (2018). Motores eléctricos trifásicos: usos, componentes y funcionamiento. *Ingeniería Eléctrica, 0*, 68–72. Retrieved from https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/ie330_farina_motores_electricos.pdf
- Flores, P. (2015). DRIVER BASADO EN PROCESADOR ARM 32 BITS PARA UN MOTOR DC BRUSHLESS DE TRES FASES EMPLEANDO LA TÉCNICA DE CAMPO ORIENTADO. Retrieved from http://backus1.uniandes.edu.co/~enar/dokuwiki/doku.php?id=archianalysis#analysis_function_catalog
- Gandhi, M. (2018, September 24). Aplicaciones de los servomotores industriales | AUTYCOM. Retrieved May 11, 2021, from <https://www.autycom.com/aplicaciones-servomotores-industriales/>
- Gavilánez, B., & Yumbo, W. (2019). *INSTRUCTIVO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN Trabajo de titulación* (ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO). Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/11587/1/65T00309.pdf>
- Harutyunyan, V. (2018). Tipos Comunes de Carcasas de Motores Eléctricos. Retrieved August 13, 2021, from <https://hvhindustrial.com/es/blog/tipos-comunes-de->

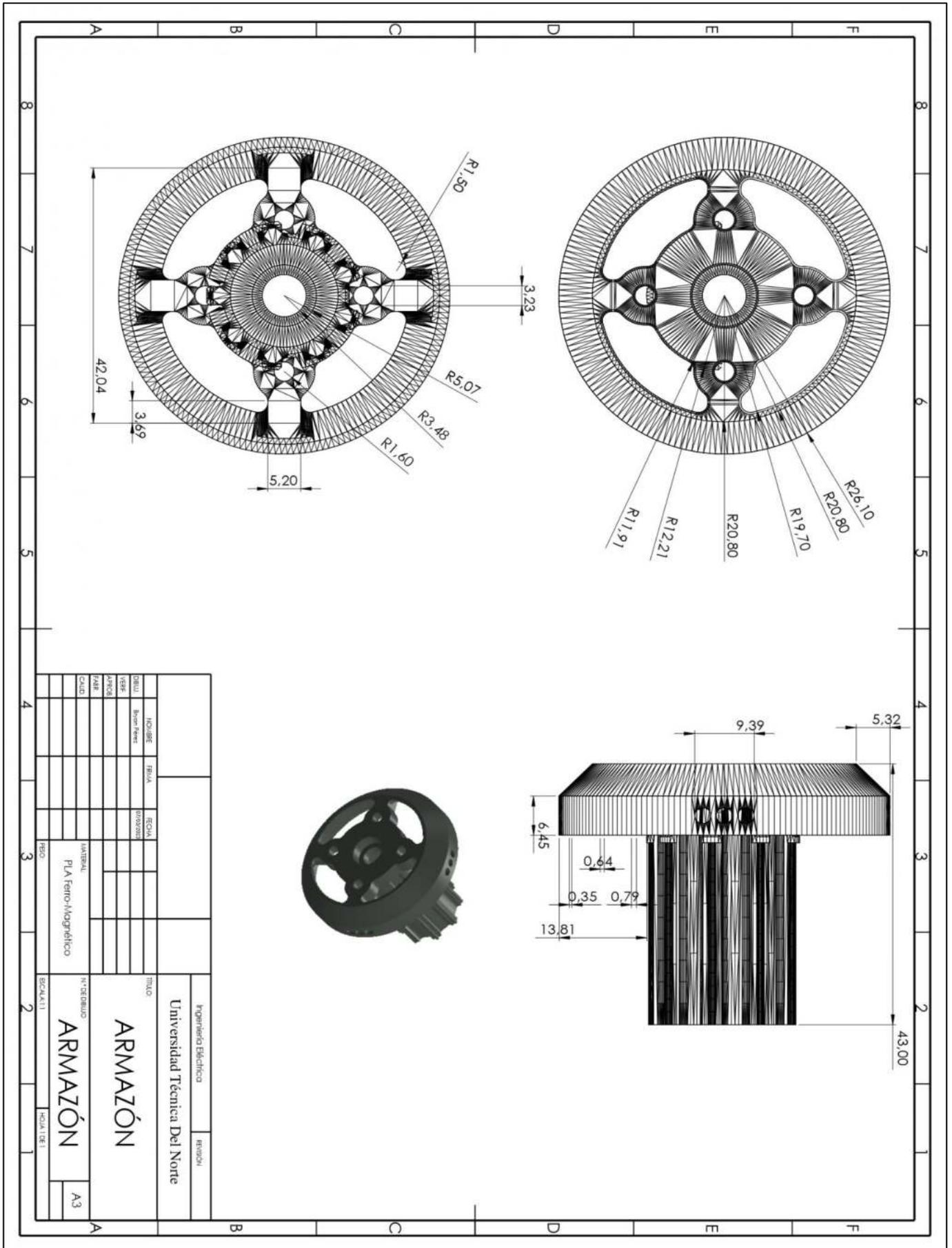
carcasas-de-motores

- Huertas, J. (2017). *Diseño y prototipado electrónico del hardware de control para motores paso a paso*.
- Ibarra, F. (2013). *Diseño de la geometría y caracterización de un motor híbrido de reluctancia autoconmutado*.
- Keeping, S. (2013, March 27). Introducción al control del motor CC sin escobillas | DigiKey. Retrieved May 12, 2021, from <https://www.digikey.com/es/articles/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control>
- Kim, S. (2017). Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors. In R. Lisa & G. Harris (Eds.), *Electric Motor Control*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812138-2.00011-8>
- Mademlis, C., Kioskeridis, I., & Theodoulidis, T. (2015). Optimization of single-phase induction motors - Part I: Maximum energy efficiency control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(1), 187–195. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.842386>
- María, P. (2015, August 16). Virtual Expo. Retrieved August 1, 2022, from Virtual ExpoTechnology website: <https://www.aeroexpo.online/es/prod/neumotors/product-185483-28688.html>
- Mureira, R. (2015). Motor de Corriente Continua. Retrieved August 9, 2022, from Smart Dreams website: <http://smartdreams.cl/motor-de-corriente-continua/>
- Ortiz, J. F. B. (2018). *Reparación de una Bicicleta Eléctrica* (Universidad San Francisco De Quito). Retrieved from <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/7287/1/138226.pdf>
- Pacheco, W., & Santos, K. (2020). *Technological analysis of three-phase squirrel cage induction motor Análise*. 6, 291–303.
- Palm, B., & Yarwood, A. (2017). Introduction to AutoCad 2D and 3D Design. In *BioTechniques* (1st ed., Vol. 34). Retrieved from <https://www.future-science.com/doi/10.2144/mar03intro>
- Patiño, J. (2018). *Motores de Corriente Continua, Electricidad Motores de corriente directa (C . D .)* (No. 1; Vol. 1). Ciudad Bolívar.
- Paulson, M. (2020). Brushed Vs. Brushless Cordless Drill Motors: Know The Difference. Retrieved July 15, 2021, from Cordless Drill Guide website: <https://cordlessdrillguide.com/brushed-vs-brushless-motor/>
- Pérez, G., & Corres, J. (2015). *Control motor brushless sensorless* (Universidades Pública de Navarra; Vol. 1). Retrieved from http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/19222/TFG_GonzaloSolchaga.pdf?sequence=1
- Quichimbo, J. (2013). *Diseño y construcción de un generador eléctrico de desplazamiento lineal con imanes permanentes para acoplamiento a un aerogenerador de eje vertical*. Universidad Nacional De Loja.
- Reyes, S. (2013). Control híbrido de motores DC sin escobillas usando FPGA.

- (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica; Vol. 1). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.003><https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.018><http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.005><http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.902757><http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.902757>
- Rodríguez, M., & León, M. (2016). *Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema de energía eólica* (Universidad Politécnica Salesiana). Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13147>
- Steve, H. (2017). *AutoCAD 3D Modeling Exercise Workbook* (Romano, Ja; L. Brengelman, Ed.). Retrieved from www.ebooks.industrialpress.com
- Tickoo, S. (2016). *Autocad Electrical 2016 for Electrical Control Designers* (VII). Retrieved from www.cadcim.com
- Tong, W. (2014). Mechanical design of electric motors. In *Mechanical Design of Electric Motors*. <https://doi.org/10.1201/b16863>
- TT MOTOR Co. (2019, July 4). Ventajas y Desventajas del motor paso a paso. Retrieved May 12, 2021, from <http://www.usattmotor.com/news/advantages-disadvantages-of-stepper-motors-8479616.html>
- Viego, R., Gómez, J., & Quispe, E. (2015). Motores sincrónicos de reluctancia controlados con variadores de frecuencia: una aplicación para ahorrar energía. *Ingeniería Energética*, 36(1), 72–82. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- WEG-S.A. (2016). Motores Eléctricos Guía de Especificación. In *Motores Eléctricos DE WEG*.



Anexo 2 Plano completo del rotor motor sin escobillas de imanes permanentes con núcleo de polímeros.



Anexo 3 Plano completo del armazón del estator motor sin escobillas de imanes permanentes con núcleo de polímeros.