

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Diseño y construcción de una armadura modular fija de motor-
generador AC-DC para prácticas de Electrotecnia”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Steeven Joel Martínez Tovar

Christian Geovanny Villacres Medina

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Marisol y Edilfo, ya que ellos han sabido aconsejarme y apoyarme para continuar cuando todo se tornaba oscuro, dándome la fortaleza necesaria para llegar a la meta.

Steeven Joel Martínez Tovar

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico primeramente a Dios por ser guía y luz en mi camino, todos mis logros son gracias a ÉL. A mis padres Julio Villacres y Carmen Medina por su apoyo incondicional, sus sacrificios, sus consejos y sus esfuerzos para poder convertirme en un profesional. A mis hermanos Kevin y Ronald por haber estado cuando más los necesité. A mi abuela Carmen por ser ejemplo de sabiduría y por siempre haber creído en mí.

Christian Geovanny Villacres Medina

AGRADECIMIENTOS

A Dios quien siempre me ha bendecido, a mis padres Marisol y Edilfo, pilares fundamentales en la consecución de este objetivo, al M.Sc. Eduardo Mendieta que depositó su confianza en nosotros para la realización de este proyecto, al Ing. Geancarlos Zamora que siempre tuvo la predisposición de ayudarnos, y a nuestro amigo Danilo Heras del cual recibimos un inesperado apoyo.

Steeven Joel Martínez Tovar

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por forjar mi camino en toda mi formación académica. Mis agradecimientos a mis Padres, hermanos y abuela por ser pilares fundamentales en mi vida. Mis agradecimientos al M.Sc. Eduardo Mendieta por otorgar su confianza para llevar a cabo el desarrollo del proyecto. Mis agradecimientos al Téc. Mario Pazmiño, Ing. Geancarlos Zamora, Danilo Eras y Jacinto Asunción, por la ayuda y asesoramiento en el desarrollo del proyecto. Y a mis amigos Ricardo Cedeño, Marco Valencia, Juan González, Juan Tumbaco, Steeven Martínez, Juan Castro, Luis Tapia, Heiner Cedeño y Álvaro Soriano por acompañarme en mi carrera universitaria.

Christian Villacres Medina

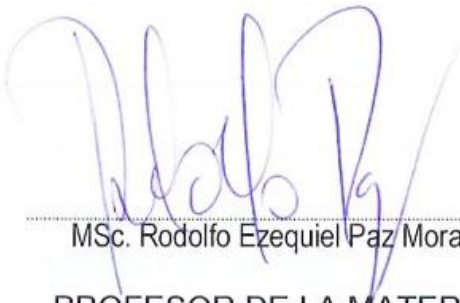
DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Steeven Joel Martínez Tovar y Christian Geovanny Villacres Medina damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

S. Joel Martínez T.
Steeven Martínez T.

Christian Villacres
Christian Villacres M.

EVALUADORES



MSc. Rodolfo Ezequiel Paz Mora

PROFESOR DE LA MATERIA



MSc. Eduardo Iván Mendieta Rengifo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El uso de máquinas eléctricas en la actualidad es imprescindible en la industria ecuatoriana, debido a la necesidad de implementar maquinarias eficientes que minimicen el costo de producción e incrementen la productividad en las empresas. Con el fin de fortalecer los conocimientos en maquinarias eléctricas, en estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción en la Espol, se presenta el diseño y construcción de una armadura modular fija de motor-generador AC-DC para prácticas de Electrotecnia. El diseño consistió en una estructura desmontable conformada por dos bobinas de campo y dos de armadura, devanados con hilo de cobre esmaltado calibre AWG 24, una banda Polycord, un eje de acero inoxidable AISI 1020, 4 núcleos ferromagnéticos de acero negro A36, una polea y porta carbones impresas en 3D con políácido láctico (PLA). Se utilizó la norma ASTM B258-14 para la selección del calibre de cobre y la norma IEC 60317-38 para el devanado de las bobinas. Con la ayuda de un osciloscopio, se realizaron pruebas de voltaje en la armadura de la máquina eléctrica operando como motor universal conectado en serie, alimentado a una fuente DC como motor DC y a una fuente AC para operar como motor AC. Además, se midió la velocidad angular del rotor utilizando un tacómetro digital. Para el prototipo trabajando como generador DC y AC, se alimentó a las bobinas de campo con una fuente de corriente directa y alterna, para obtener el voltaje inducido en las bobinas de armadura con un osciloscopio analógico y un multímetro digital. El dispositivo cumplió con los requerimientos de diseño planteados, siendo capaz de operar como motor y generador eléctrico, con el fácil intercambio de sus componentes eléctricos.

Palabras Clave: Armadura modular, Núcleos ferromagnético, Bobinas, Rotor.

ABSTRACT

The use of electric machines is currently essential in the Ecuadorian industry, due to the need to implement efficient machinery that minimizes the cost of production and increases productivity in companies. In order to strengthen knowledge in electrical machinery, in students of the Faculty of Mechanical Engineering and Production Sciences at the Espol, the design and construction of a fixed modular armature of AC-DC motor-generator for Electrotechnical practices is presented. The design consisted of a detachable structure consisting of two field coils and two armor, wound with AWG 24 enameled copper wire, a Polycord band, a shaft of AISI 1020 stainless steel, 4 ferromagnetic cores of A36 black steel, a pulley and 3D printed carbon carrier with lactic polyacid (PLA). The ASTM B258-14 standard was used for the selection of the copper gauge and the IEC 60317-38 standard for winding the coils. With the help of an oscilloscope, voltage tests were performed on the armature of the electric machine operating as a universal motor connected in series, fed to a DC source as a DC motor and to an AC source to operate as an AC motor. In addition, the angular speed of the rotor was measured using a digital tachometer. For the prototype working as a DC and AC generator, the field coils were fed with a direct and alternating current source, to obtain the voltage induced in the armature coils with an analog oscilloscope and a digital multimeter. The device complied with the design requirements, being able to operate as an electric motor and generator, with the easy exchange of its electrical components.

Keywords: *Modular armor, Ferromagnetic cores, Coils, Rotor.*

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| RESUMEN..... | I |
| ABSTRACT | II |
| ÍNDICE GENERAL | III |
| ABREVIATURAS..... | VI |
| SIMBOLOGÍA..... | VII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | X |
| ÍNDICE DE PLANOS..... | XI |
| CAPÍTULO 1..... | 12 |
| 1. Introducción | 12 |
| 1.1 Descripción del problema | 12 |
| 1.2 Justificación del problema | 13 |
| 1.3 Objetivos | 13 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 13 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 13 |
| 1.4 Marco teórico..... | 13 |
| 1.4.1 Campo Magnético..... | 13 |
| 1.4.2 Ley del Ampere..... | 14 |
| 1.4.3 Densidad Flujo magnético | 15 |
| 1.4.4 Ley de Faraday | 15 |
| 1.4.5 Motor eléctrico | 16 |
| 1.4.6 Generador eléctrico | 18 |
| 1.4.7 Ferromagnetismo..... | 19 |
| 1.4.8 Materiales Ferromagnéticos..... | 20 |
| 1.4.9 Benchmarking..... | 21 |
| 1.4.10 Factores de influencia..... | 21 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 2..... | 23 |
| 2. Metodología | 23 |
| 2.1 Requerimientos de Diseño | 24 |
| 2.2 Árbol de objetivos y restricciones | 25 |
| 2.3 Caja negra..... | 25 |
| 2.1 Tabla Morfológica | 26 |
| 2.2 Alternativas de Diseño..... | 26 |
| 2.3 Caja transparente | 30 |
| 2.4 Selección de la mejor alternativa..... | 30 |
| 2.4.1 Comparación por pares | 31 |
| 2.4.2 Matriz de Decisión | 32 |
| 2.5 Diseño del motor-generator eléctrico..... | 33 |
| 2.5.1 Núcleo del inductor e inducido | 33 |
| 2.5.2 Aislante | 35 |
| 2.5.3 Devanado | 35 |
| 2.5.4 Armadura | 36 |
| 2.5.5 Diseño del eje | 36 |
| 2.5.6 Selección de banda y polea..... | 39 |
| 2.5.7 Selección de rodamiento | 40 |
| 2.5.8 Diseño electromagnético | 40 |
| CAPÍTULO 3..... | 50 |
| 3. Resultados Y ANÁLISIS | 50 |
| 3.1 Análisis estructural del prototipo..... | 50 |
| 3.1.1 Análisis de esfuerzo del eje | 50 |
| 3.1.2 Análisis de deformación del eje | 51 |
| 3.1.1 Factor de seguridad del eje | 52 |
| 3.1.2 Análisis de esfuerzo del sistema motriz | 52 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| 3.1.3 | Análisis deformación del sistema motriz | 53 |
| 3.1.4 | Análisis factor de seguridad del sistema motriz | 54 |
| 3.2 | Análisis del generador de corriente alterna | 55 |
| 3.2.1 | Resultados con osciloscopio del generador AC..... | 55 |
| 3.2.2 | Resultados con multímetro digital del generador AC..... | 56 |
| 3.3 | Análisis del generador de corriente directa | 59 |
| 3.3.1 | Resultados con osciloscopio del generador DC..... | 59 |
| 3.3.2 | Resultados con multímetro digital del generador DC..... | 59 |
| 3.4 | Análisis del motor de corriente directa..... | 62 |
| 3.4.1 | Resultados con multímetro digital DC..... | 62 |
| 3.5 | Análisis de costo..... | 65 |
| 3.6 | Análisis de disponibilidad | 67 |
| 3.7 | Objetivos de desarrollo sostenible..... | 67 |
| CAPÍTULO 4..... | | 68 |
| 4. | Conclusiones Y Recomendaciones | 68 |
| 4.1 | Conclusiones..... | 68 |
| 4.2 | Recomendaciones..... | 69 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 70 |
| APÉNDICES..... | | 72 |

ABREVIATURAS

| | |
|-------|---|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| AISI | American Iron and Steel Institute |
| AWG | American Wire Gauge |
| FEMM | Finite Element Method Magnetics |
| PLA | Poly Lactic Acid |
| CAD | Computer Aided Design |
| IEC | International Electrotechnical |
| AC | Alternating Current |
| DC | Direct Current |
| FIMCP | Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción |

SIMBOLOGÍA

| | |
|-----------------|-------------------------------------|
| mm | Milímetro |
| rad | Radianes |
| s | Segundos |
| m | Metro |
| V | Voltios |
| mV | milivoltios |
| in | Pulgada |
| N | Newton |
| A | Amperios |
| I | Intensidad de corriente |
| A-v | Amperios vuelta |
| T | Tesla |
| B | Inducción magnética |
| x | Distancia de elongación |
| mm ² | Milímetros cuadrado |
| Rpm | Revoluciones por minuto |
| ε | Fuerza electromotriz |
| φ | Flujo magnético |
| S _{ut} | Esfuerzo último a la tensión |
| S _y | Esfuerzo a la fluencia |
| W | Watts |
| μ_0 | Permeabilidad relativa |
| k | Constante del resorte |
| Ω | Ohmios |
| ω | Velocidad angular |
| wb | Webers |
| ρ | Constante de resistividad del cobre |
| μ_k | Coeficiente de fricción dinámica |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Núcleo magnético..... | 15 |
| Figura 1.2 Elementos y partes de un motor eléctrico. | 16 |
| Figura 1.3 Motor eléctrico universal conectado en serie. | 17 |
| Figura 1.4 Flujo magnético debido a los polos magnéticos en un generador | 18 |
| Figura 1.5 Esquema de un generador eléctrico convencional..... | 19 |
| Figura 1.6 Muestra ferromagnética policristalina de la estructura de dominios. | 19 |
| Figura 1.7 Dominios magnéticos en un cristal de hierro..... | 20 |
| Figura 2.1 Flujograma metodología proceso de diseño..... | 24 |
| Figura 2.2 Árbol de objetivos y funciones..... | 25 |
| Figura 2.3 Caja negra motor-generador eléctrico AC-DC..... | 26 |
| Figura 2.4 Sistema de transmisión de banda y poleas. | 27 |
| Figura 2.5 Bobinas del estator y rotor conectados en serie..... | 28 |
| Figura 2.6 Motor universal conectado en paralelo..... | 29 |
| Figura 2.7 Caja transparente del motor-generador AC-DC. | 30 |
| Figura 2.8 Alternativa 2 del motor-generador AC-DC..... | 33 |
| Figura 2.9 Intensidad de flujo magnético vs campo magnético de materiales..... | 34 |
| Figura 2.10 Flujo magnético a través de la armadura de un motor universal. | 36 |
| Figura 2.11 Inducción en el entrehierro obtenido en software FEMM. | 41 |
| Figura 2.12 Circuito eléctrico de motor universal..... | 45 |
| Figura 2.13 Coeficiente de fricción dinámica de porta carbones. | 46 |
| Figura 3.1 Tensión de Von Mises en el eje del rotor. | 50 |
| Figura 3.2 Deformación del eje del rotor. | 51 |
| Figura 3.3 Factor de seguridad en el eje del rotor. | 52 |
| Figura 3.4 Tensión de Von Mises del sistema motriz del rotor. | 53 |
| Figura 3.5 Deformación del sistema motriz del rotor. | 54 |
| Figura 3.6 Factor de seguridad del sistema motriz del rotor..... | 55 |
| Figura 3.7 Voltaje AC en la armadura [V] vs tiempo[s] del generador. | 56 |
| Figura 3.8 Voltaje AC de armadura vs Voltaje de la fuente del generador. | 58 |
| Figura 3.9 Voltaje AC de Armadura vs Intensidad de corriente de la fuente. | 58 |
| Figura 3.10 Voltaje DC en la armadura [V] vs tiempo[s] del generador..... | 59 |
| Figura 3.11 Voltaje DC de armadura vs Voltaje de la fuente del generador..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.12 Voltaje DC de Armadura vs Intensidad de corriente de la fuente DC.... | 61 |
| Figura 3.13 Voltaje de fuente DC vs Velocidad angular del rotor. | 62 |
| Figura 3.14 Intensidad de corriente de la fuente DC vs Velocidad angular del rotor. | 63 |
| Figura 3.15 Fuerza contra electromotriz del motor vs velocidad angular. | 63 |
| Figura 3.16 Potencia absorbida, útil y pérdidas vs Velocidad angular..... | 64 |
| Figura 3.17 Par motor vs velocidad angular. | 64 |
| Figura 3.18 Curva de eficiencia del motor DC..... | 65 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 Características de máquinas eléctricas didácticas comerciales. | 21 |
| Tabla 2.1 Tabla Morfológica del motor-generator AC-DC. | 26 |
| Tabla 2.2 Método comparación por pares. | 31 |
| Tabla 2.3 Matriz de decisión de la mejor alternativa..... | 32 |
| Tabla 2.4 Porcentaje de la composición química del hierro negro. | 34 |
| Tabla 2.5 Propiedades mecánicas y térmicas del PLA..... | 35 |
| Tabla 2.6 Propiedades mecánicas de la aleación de acero y carbono 1018..... | 37 |
| Tabla 2.7 Parámetros de diseño del motor..... | 40 |
| Tabla 2.8 Parámetros de diseño del generator..... | 48 |
| Tabla 3.1 Pruebas con multímetro digital del generator AC. | 57 |
| Tabla 3.2 Pruebas con multímetro digital del generator DC. | 60 |
| Tabla 3.3 Costos de materiales. | 66 |
| Tabla 3.4 Costo de construcción del prototipo..... | 66 |

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Identificación y numeración de partes

PLANO 2 Piezas 1 y 2

PLANO 3 Piezas 3, 4, 7, 8, 13, 14 y 17

PLANO 4 Piezas 19, 20, 21 Y 22

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Las máquinas eléctricas cumplen un rol importante suministrando potencia para diferentes tipos de aplicaciones comerciales, industriales y domésticas. Los motores eléctricos por su gran versatilidad de operación no pueden ser equiparadas por ninguna otra clase de máquinas para generar movimiento. Se considera que los motores eléctricos se utilizan en un 90 por ciento de aplicaciones en el sector industrial; proporción que podría aumentar si se consideran las variaciones que existen en el sistema electromagnético del motor (Harper, 2004).

La globalización obliga a disponer una fuente de energía eléctrica en cualquier sitio del planeta, que cumpla las exigencias de calidad, por lo que, en la actualidad es necesario realizar investigaciones y desarrollo de generadores de energía eléctrica; con el uso de sistemas accionados por fuentes de energía renovable, disminuyendo el impacto en el medio ambiente (Barrado Rodrigo, 2011).

La importancia en el conocimiento de máquinas eléctricas para el desarrollo industrial de nuevos proyectos es evidente; con el uso de ecodiseños en los productos, el objetivo es disminuir impactos ambientales adversos y negativos. Actualmente se desea implementar nuevos modelos de negocio en la industria automotriz, realizando proyectos viables y amigables con el medio ambiente. “El cambio climático y la escasez mundial de recursos han llevado a replantear los servicios tradicionales de movilidad basados en motores de combustión” (Kley, Lerch, & Dallinger, 2011), es por eso que, en el futuro se desea introducir al mercado de manera definitiva, vehículos con propulsión eléctrica, dando lugar a nuevos retos y desafíos para la industria automotriz.

Por los avances tecnológicos mencionados, existe la necesidad de disponer en el laboratorio de prácticas para la materia de Electrotecnia de la FIMCP, de un motor-generador de corriente continua y alterna, permitiendo a los futuros profesionales

adquirir un sólido conocimiento en la construcción y diseño de máquinas eléctricas, desarrollando ingeniería sustentable.

1.2 Justificación del problema

En el laboratorio de prácticas de la materia de Electrotecnia, que se imparte en la Facultad de Mecánica y Ciencias de la Producción, existe la necesidad de implementar equipos eléctricos acorde a las exigencias de los desarrollos industriales modernos. En el tiempo actual del vehículo eléctrico y generadores alternativos, los futuros profesionales están en la obligación de fortalecer el conocimiento en el diseño de maquinarias eléctricas. El proyecto está dirigido a diseñar un módulo que permita la simple manipulación de componentes y partes eléctricas que forman parte de un motor-generator AC o DC.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un módulo de armadura fija para motor AC-DC para práctica de Laboratorio de Electrotecnia con piezas y componentes de fácil intercambio manual.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Elaborar partes y componentes eléctricos para el montaje de un estator fijo que proporcione un flujo magnético constante, generados por dos polos magnéticos montados en la armadura fija.
- Seleccionar partes y componentes eléctricos para el montaje del inducido del rotor tanto para corriente AC y DC alimentado por escobillas de fácil intercambio.
- Implementar un sistema de transmisión dinámica, en el caso de la armadura fija trabajando como generador eléctrico.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Campo Magnético

El campo magnético es un fenómeno físico fundamental para convertir un tipo de energía en otra, tanto en motores, generadores y transformadores. En estas

máquinas eléctricas existirán 4 principios básicos para entender al campo magnético (Chapman, 1987)

1. Un alambre que conduce electricidad producirá un campo magnético a su alrededor
2. Un voltaje en una bobina de alambre es producido por un campo magnético variable en el tiempo.
3. Si en un campo magnético existe el flujo de corriente a través de un alambre conductor, se producirá una fuerza inducida sobre él. Este es el principio fundamental de un motor.
4. Si en un campo magnético existe un flujo de corriente a través de un alambre en movimiento, tendrá un voltaje inducido sobre él. Este es el principio fundamental para el funcionamiento de un generador.

1.4.2 Ley del Ampere

La ley que gobierna en la generación de un campo magnético a través de una corriente es la Ley del Ampere:

$$\oint H \cdot dL = I_{net} \quad (1.1)$$

En donde H es la intensidad del campo magnético producido por la corriente a través de las espiras. En unidades del SI, I se medirá en amperios y H se medirá en amperios-vueltas por metro. La figura 1.1 muestra un núcleo magnético con un alambre de N vueltas alrededor de una de las columnas del núcleo; este núcleo está hecho de un material ferromagnético. El flujo magnético es producido por la intensidad de corriente en las N espiras, y el campo magnético multiplicado con la longitud media del cable conductor que forma la bobina. (Chapman, 1987).

Convirtiéndose la Ley del Ampere en:

$$HL_c = Ni \quad (1.2)$$

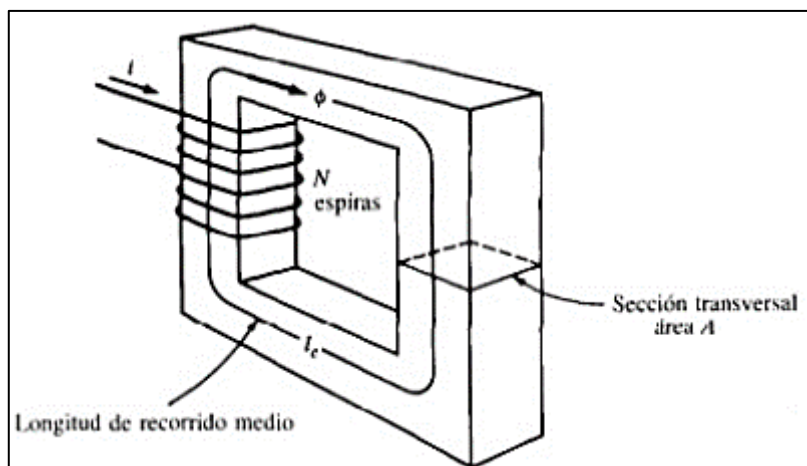


Figura 1.1 Núcleo magnético.

Fuente: Chapman, 1987.

1.4.3 Densidad Flujo magnético

La densidad de flujo magnético es la forma de cuantificar la concentración de líneas de flujo en la superficie de un elemento del circuito magnético (Harper, 2005). La relación entre la intensidad de flujo del campo magnético y la densidad del flujo magnético está dada por la siguiente ecuación:

$$B = \mu H \quad (1.3)$$

Donde μ es la permeabilidad magnética del material, y sus unidades en el SI son henrios por metro. La unidad de la densidad del flujo resultante es el tesla (Chapman, 1987).

1.4.4 Ley de Faraday

La Ley de Faraday indica que, si un flujo magnético atraviesa una espira de alambre conductor, se inducirá un voltaje directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo (Chapman, 2000), la siguiente expresión demuestra lo expuesto previamente:

$$e_{ind} = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (1.4)$$

Donde:

e_{ind} : Voltaje inducido en la bobina

φ : Flujo que circula en la bobina

1.4.5 Motor eléctrico

Es la máquina encargada de la transformación de energía eléctrica en energía mecánica. Para ello, se conecta la máquina a una fuente de energía eléctrica externa, lo que provoca que la corriente eléctrica fluya a través de las espiras del rotor; esta corriente interactúa con el campo magnético generado por el estator para producir la fuerza electromotriz que da el movimiento de rotación (Senner 1994).

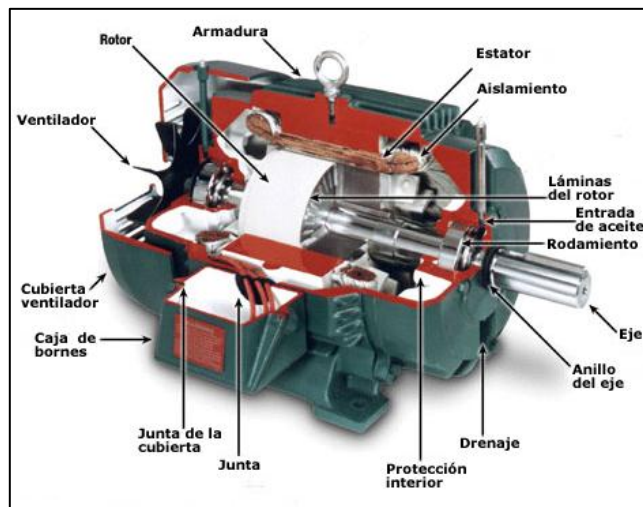


Figura 1.2 Elementos y partes de un motor eléctrico.

Fuente: Roldán, 2014.

En la figura 1.2 se observan los componentes elementales de un motor eléctrico de corriente continua, con bobinas de conmutación y de campo bien cercanas entre ellas, para mejorar la homogeneidad del campo magnético del sistema.

1.4.5.1 Motor eléctrico universal

El motor eléctrico universal es aquella máquina que puede ser operada tanto para corriente alterna y continua; siempre y cuando no exceda los 60 Hz. El motor universal posee el mismo sistema eléctrico del motor de corriente directa de conexión en serie; el flujo de corriente circula a través del devanado en la armadura y regresa a la fuente. Las principales características del motor universal son las velocidades altas, elevado par motor y una estructura compacta (Harper,2003). En los motores universales circularán corrientes de frecuencias muy elevadas (Senner, 1994).

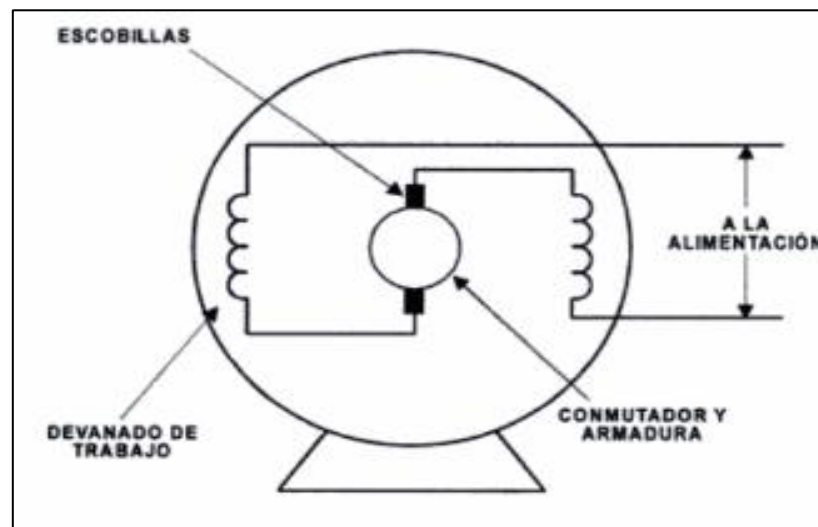


Figura 1.3 Motor eléctrico universal conectado en serie.

Fuente: Harper, 2005.

En la figura 1.3 se observa el circuito eléctrico de un motor universal operando con corriente alterna; los devanados de campo y armadura conectada en serie con las escobillas, donde el sentido de la corriente se altera de forma simultánea en el circuito (Harper, 2004). La desventaja de conectar un motor de corriente continua a una fuente de corriente alterna, es la pérdida de potencia y frecuencia de giro, provocando sobrecalentamiento por la mayor generación de chispas en las escobillas (Müller, 1994).

1.4.6 Generador eléctrico

Los generadores tienen como función transformar la energía mecánica en energía eléctrica, y se basan en los mismos principios electromagnéticos de los motores eléctricos para su operación (Harper,2004). Un generador eléctrico está conformado por el inductor, que crea el campo magnético, y el inducido, que se moverá dentro del campo magnético y será atravesado por líneas de campo como se observa en la figura 1.4.

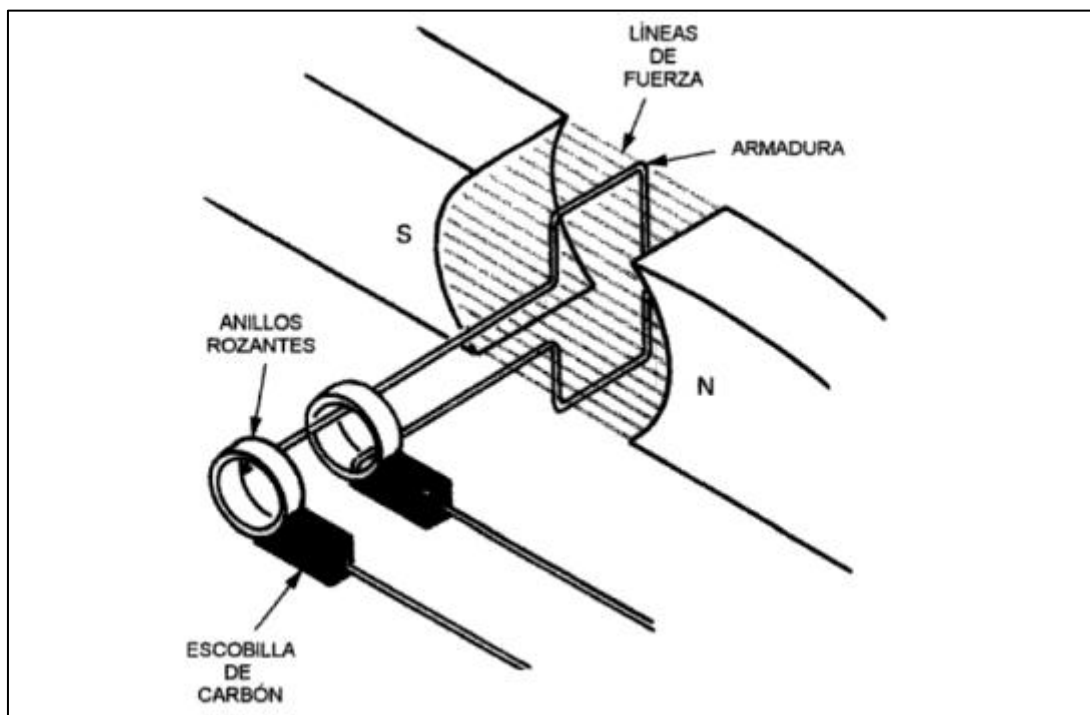


Figura 1.4 Flujo magnético debido a los polos magnéticos en un generador eléctrico AC.

Fuente: Harper, 2005.

El inductor está conformado por electroimanes, que es alimentado por una fuente de corriente continua auxiliar (Manzano,2008). En los generadores de corriente continua y corriente alterna, se utilizarán delgas DC y anillos rozantes respectivamente, para establecer conectar el circuito eléctrico entre el estator y el rotor.

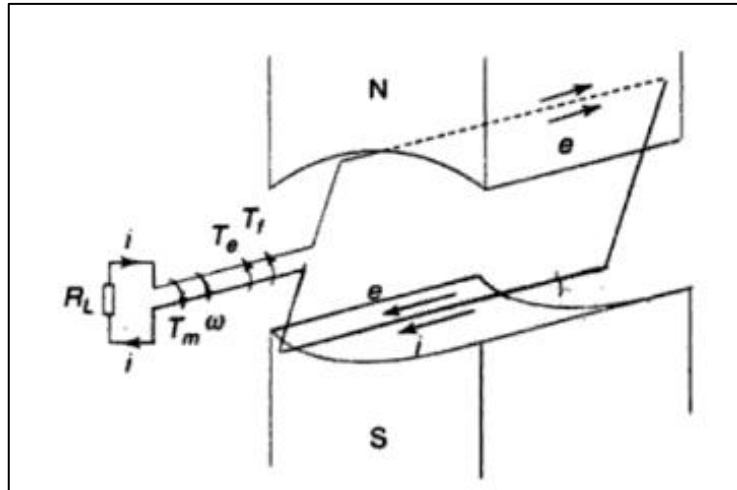


Figura 1.5 Esquema de un generador eléctrico convencional.

Fuente: Bhattacharya, 1998.

En la figura 1.5 podemos observar como un torque de entrada en el eje del rotor induce una corriente en las espiras de la armadura, con la contribución de un campo magnético producidas por imanes permanentes (Bhattacharya, 1998).

1.4.7 Ferromagnetismo

En el ferromagnetismo se definirá con la ayuda del término dominios magnetizados. Un material ferromagnético posee en su composición distintos dominios pequeños que contienen de 10^5 o 10^6 átomos magnetizados, a pesar de no estar inmerso en un campo magnético, en el sentido de que engloban dipolos magnéticos ordenados debido a los electrones giratorios. Entre dominios que se encuentran contiguos existe una región de transición de aproximadamente 100 átomos de espesor y se llamará pared de dominio.

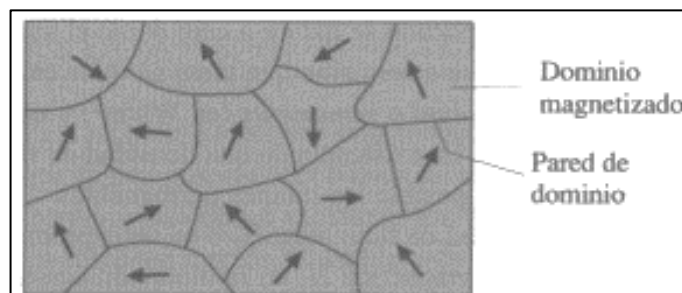


Figura 1.6 Muestra ferromagnética policristalina de la estructura de dominios.

Fuente: Cheng, 1993.

Los momentos magnéticos de los dominios en los materiales ferromagnéticos, tienen sentidos diferentes si se encuentran en un estado no magnetizado; como se observa en la figura 1.6, a diferencia que, si se aplica un campo magnético externo, la densidad de flujo magnético aumentará y se alinearán los dominios en la misma dirección de las líneas de campo magnético externo (Cheng, 1993).

1.4.8 Materiales Ferromagnéticos

En los generadores y motores eléctricos se deben considerar materiales ferromagnéticos blandos para la construcción de sus electroimanes; que tienen como principal característica producir una gran magnetización con un flujo de corriente bajo. Sus curvas de histéresis son altas y estrechas. Los materiales recocidos que poseen pocas dislocaciones en la red cristalina suelen tener estas características; facilitando el movimiento de las paredes de los dominios. Si se utilizan imanes permanentes, se debe tener una elevada resistencia de desmagnetización por parte del material, con una gran intensidad de campo coercitivo H_c y curvas de histéresis anchas.

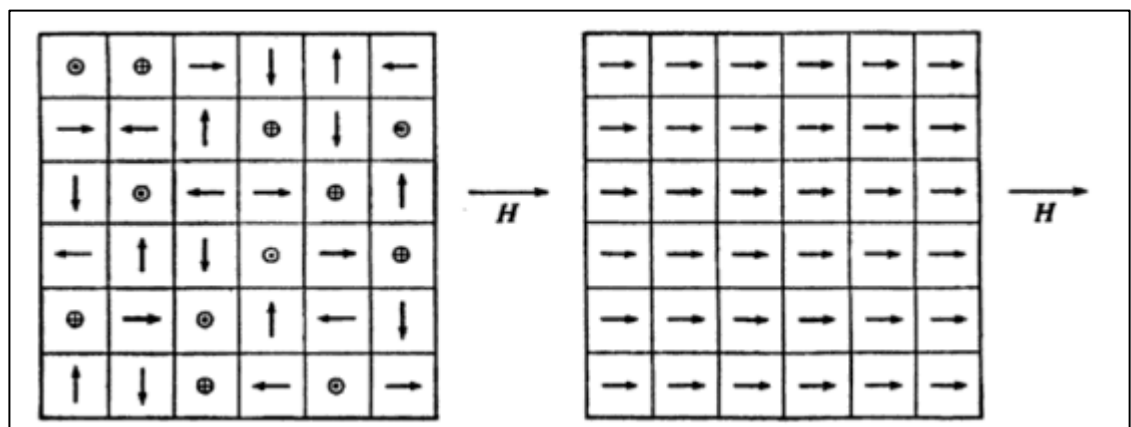


Figura 1.7 Dominios magnéticos en un cristal de hierro.

Fuente: Staff, 1981.

La figura 1.7 muestran los dominios magnéticos imanados por un campo magnético externo, generando una polaridad magnética en el material. Este principio físico se utiliza para producir el movimiento rotacional del rotor en motores y generadores eléctricos (Staff, 1981).

1.4.9 Benchmarking

Se localizaron dos empresas internacionales que resuelven el problema propuesto. Se ha observado en la investigación, un motor-generador didáctico con dos polos magnéticos en el sistema, un rotor devanado de cobre, bobinas de campo de imanes permanentes. Sus principales características se describen a continuación:

Tabla 1.1 Características de máquinas eléctricas didácticas comerciales.

Fuente: Autores.

| Características | A) Cebekit | B) TecnoEdu |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Rotor de máquina eléctrica. | Rotor devanado de cobre | Rotor devanado de cobre |
| Bobinas de estator. | Imanes permanentes | Electroimanes |
| Material núcleo de bobinas. | Neodimio | Hierro dulce (Metal blando) |
| Voltaje máximo de operación. | 6 V | 24 V |

- A) Kit educativo de experimentación Introducción a la fabricación y ensamble de motor eléctrico (Fadisel, 2019).
- B) Sistema para enseñanza de constitución y funcionamiento de máquinas eléctricas rotativas (Tecnología Educativa S.A, 2013).

1.4.10 Factores de influencia.

Para el diseño del motor-generador del proyecto, se tomaron en cuenta las siguientes características de los artefactos localizados:

- **Bobinas del estator y rotor:** Electroimanes con núcleos de material magnético blando para su fácil imanación con un campo externo.
- **Diámetro del rotor:** 7 a 14 cm.
- **Montaje:** Armar y desarmar la estructura del motor-generador con llaves, destornilladores, tuercas y tornillos.

- **Rendimiento:** El artefacto sólo se pondrá en funcionamiento para prácticas de laboratorio.
- **Mantenimiento:** Repuestos de accesorios asequibles.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para poder cumplir con los objetivos del proyecto, se elaboró un esquema del proceso de diseño, con la ayuda de un flujograma como se observa en la figura 2.1. En la primera fase, se identificaron los requerimientos de diseño por parte del cliente, siendo un límite para proceder a la siguiente fase del proceso de diseño. En la segunda etapa se realizó el diseño de forma del prototipo por medio del software Inventor, donde se consideró que la estructura del motor-generador sea modulable, es decir sencillo de armar y desarmar por parte de los estudiantes de la materia de Electrotecnia. En la tercera fase se generaron alternativas de diseño, con variantes en materiales de piezas y componentes eléctricos.

En la cuarta fase, considerando el material adecuado para las bobinas de inducción electromagnéticas del motor-generador AC-DC, se seleccionó la mejor alternativa de diseño mediante el uso de una matriz de decisión. La quinta fase consistió en obtener el torque magnético de la bobina inducida necesario para vencer la inercia del rotor. Se obtuvo el campo magnético, necesario para calcular el torque requerido, con la ayuda del software Femm versión 4.2.

En la sexta etapa del proceso de diseño, se realizó la construcción del motor-generador para corriente continua y alterna. Se tomaron datos del voltaje producido con la máquina eléctrica operando como generador, la potencia mecánica y velocidad cuando la máquina eléctrica actuó como motor, verificando si se cumplen los requerimientos de diseño del cliente.

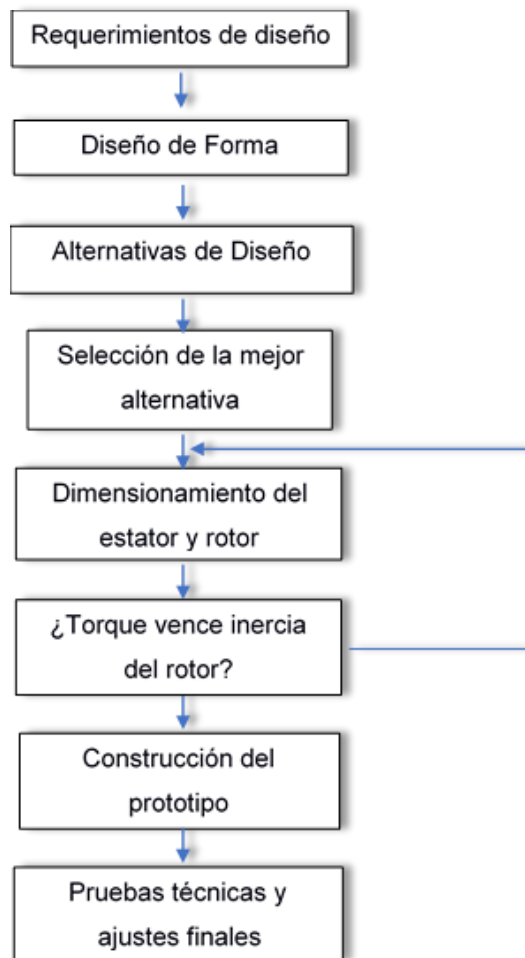


Figura 2.1 Flujograma metodología proceso de diseño.

Fuente: Autores.

2.1 Requerimientos de Diseño

El diseño de la máquina eléctrica deberá ser capaz de operar con una fuente de corriente directa o alterna. El prototipo será usado por estudiantes que cursan la materia de Electrotecnia, por lo que, la estructura diseñada será práctico de armar y de fácil traslado. La base modular fija permitirá la conexión de 2 o 4 polos magnéticos devanados de fácil fijación para su montaje en el estator. Para un generador DC o AC, se deberá considerar en el diseño un sistema de propulsión manual mediante una manivela o un motor que genere un torque de entrada al generador. El prototipo diseñado deberá ser capaz de fortalecer el conocimiento de operación de un motor-generador en los estudiantes de la materia de Electrotecnia.

2.2 Árbol de objetivos y restricciones

Se identificaron los requerimientos de diseño para la construcción del prototipo, con la finalidad de realizar un árbol de objetivos y restricciones. El esquema de la figura 2.2 se utilizó como herramienta para el análisis de alternativas de diseño.

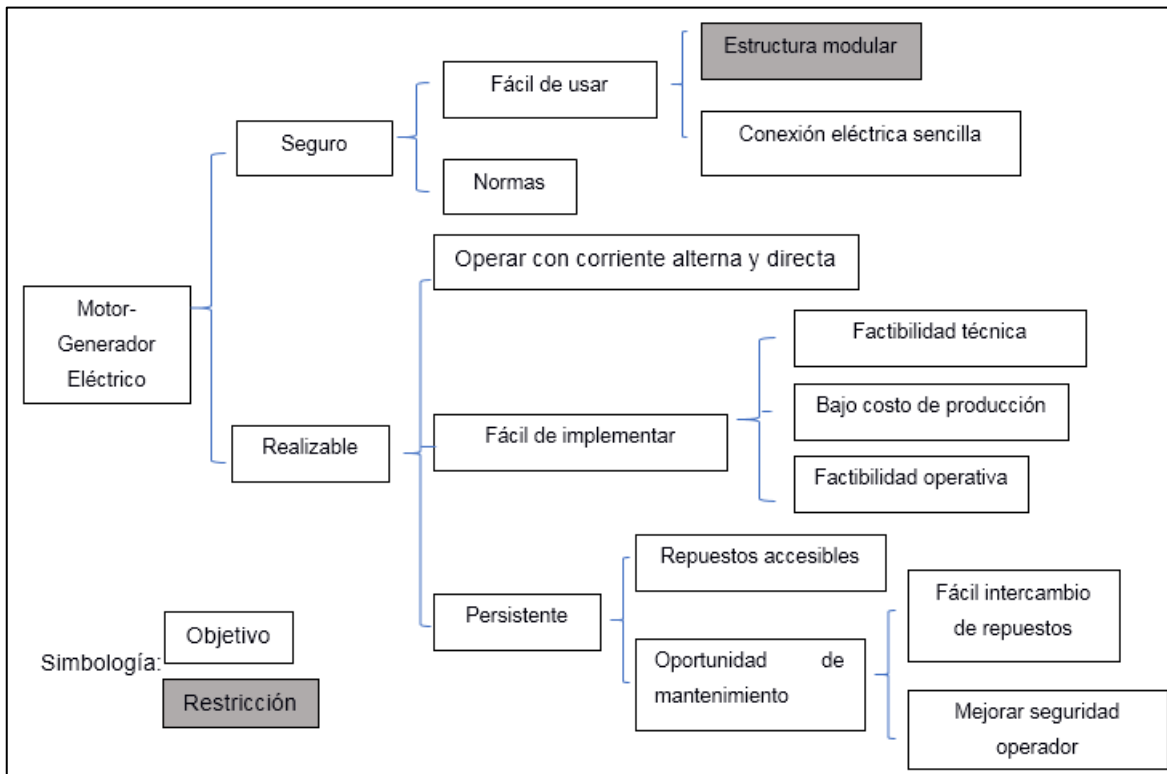


Figura 2.2 Árbol de objetivos y funciones.

Fuente: Autores.

2.3 Caja negra

Una vez identificados los objetivos y restricciones del proyecto, se realizó un esquema para generar los resultados esperados para cumplir con los requerimientos de diseño, como se muestra en la figura 2.3. La caja negra muestra las variables de entrada necesarias para producir variables de salida, donde no se presentarán las transformaciones que se realizan en la mitad del proceso; en esta etapa del proceso de diseño no se conoce aún los aspectos técnicos del sistema en desarrollo.



Figura 2.3 Caja negra motor-generador eléctrico AC-DC.

Fuente: Autores.

2.1 Tabla Morfológica

Con las funciones y características establecidas para cumplir los requerimientos de diseño planteados por parte del cliente, se realizó una tabla morfológica que permitió mostrar los medios y recursos disponibles para el desarrollo del proyecto. En la tabla 2.1 se visualiza lo descrito.

Tabla 2.1 Tabla Morfológica del motor-generador AC-DC.

Fuente: Autores.

| Medios | 1 | 2 | 3 |
|--|-----------------|----------------|-------------|
| Características del sistema/ Función | | | |
| Entrada mecánica en el generador eléctrico | Motor eléctrico | Manivela | ----- |
| Sistema de transmisión | Correa y poleas | Banda y poleas | Engranés |
| Material del núcleo de bobinas | Chapa magnética | Hierro negro | AISI 430 |
| Conexión del circuito eléctrico | En serie | ----- | En paralelo |
| Material eje del rotor | Acero SAE 1045 | AISI 1020 | AISI 4340 |

2.2 Alternativas de Diseño

A continuación, se analizaron las diferentes alternativas de diseño para la construcción del motor-generador AC-DC para prácticas de Electrotecnia en la FIMCP.

Alternativa 1

- Entrada mecánica del generador eléctrico.
Se ha considerado un motor eléctrico acoplada a una polea para transmitir el movimiento rotacional a través de una banda, a una segunda polea conectada al rotor de la máquina eléctrica operando como generador, como se observa en la figura 2.4; esto producirá un torque necesario para la generación de un voltaje eléctrico.
- Sistema de Transmisión
Se utilizará un sistema de banda y poleas para transmitir el movimiento generado por el motor eléctrico, hacia la máquina eléctrica operando como generador como se observa en la figura 2.4.

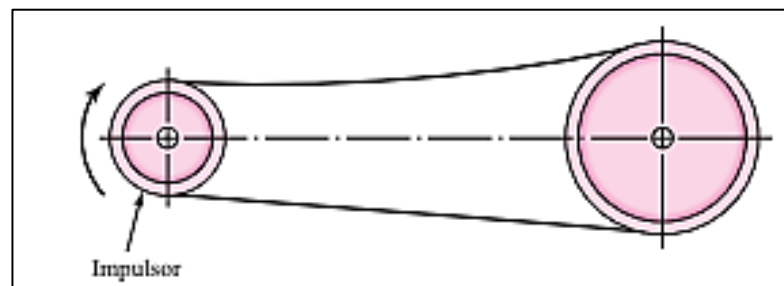


Figura 2.4 Sistema de transmisión de banda y poleas.

Fuente: Shigley, 2008.

- Material del núcleo de bobinas.
Se tomó en consideración para el núcleo de las bobinas del estator y rotor, a la chapa magnética como primera alternativa. Es un acero aleado a base de silicio al 3%. El silicio tiene la finalidad de reducir las pérdidas por histéresis y elevar la cantidad de resistividad del acero (Ras, 1994).
- Conexión del circuito eléctrico.
Se consideró para la conexión eléctrica del prototipo, al devanado del rotor conectado en serie con las bobinas del estator de la máquina eléctrica como se observa en la figura 2.5.

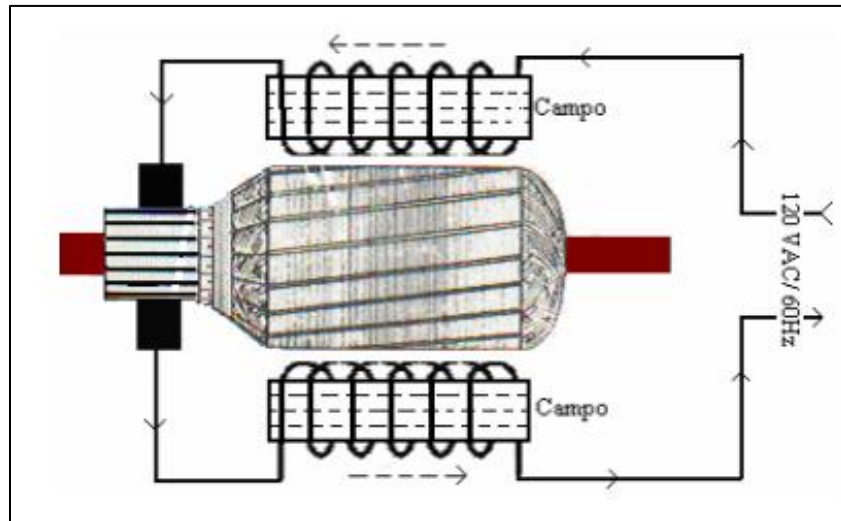


Figura 2.5 Bobinas del estator y rotor conectados en serie.

Fuente: Autores.

- Material eje del rotor.
Acero SAE 1045, posee buena tenacidad, aplicado para la elaboración de partes simples de máquinas (Ivan Bohman, 2019)

Alternativa 2

- Entrada mecánica del generador eléctrico.
En la segunda alternativa de diseño se implementó una manivela conectada a una primera polea, para transmitir el movimiento mediante una banda, hacia una segunda polea acoplada al eje del rotor de la máquina eléctrica operando como generador.
- Sistema de Transmisión
Se utilizará un sistema de banda y poleas para la transmisión de movimiento entre las dos poleas del sistema.
- Material del núcleo de bobinas.
Se consideró para el núcleo de las bobinas, al hierro negro, debido a su alta permeabilidad magnética (Bastian, 2001).
- Conexión del circuito eléctrico.
El devanado del rotor conectado en serie, con las bobinas del estator.

- Material eje del rotor.
Acero AISI 1020, utilizado para elaborar piezas pequeñas, exigidas al desgaste (Dipac, 2018)

Alternativa 3

- Entrada mecánica del generador eléctrico.
Para la máquina eléctrica operando como generador, se implementó un sistema de engranes accionados por un motor eléctrico que transmitirá el movimiento rotacional al eje del rotor.
- Sistema de Transmisión
Se utilizará un sistema de engranes para transmitir el movimiento, entre el motor eléctrico y el prototipo diseñado.
- Material del núcleo de bobinas.
Se consideró al acero inoxidable AISI 430, al ser un metal blando, posee una curva de histéresis delgada, desmagnetizándose fácilmente al dejar de interactuar con un campo magnético externo (Cheng, 1993).
- Conexión del circuito eléctrico.
Se ha propuesto como tercera alternativa para la conexión de la máquina eléctrica, al devanado del rotor conectado en paralelo con las bobinas de campo del motor-generador como se observa en la figura 2.6.

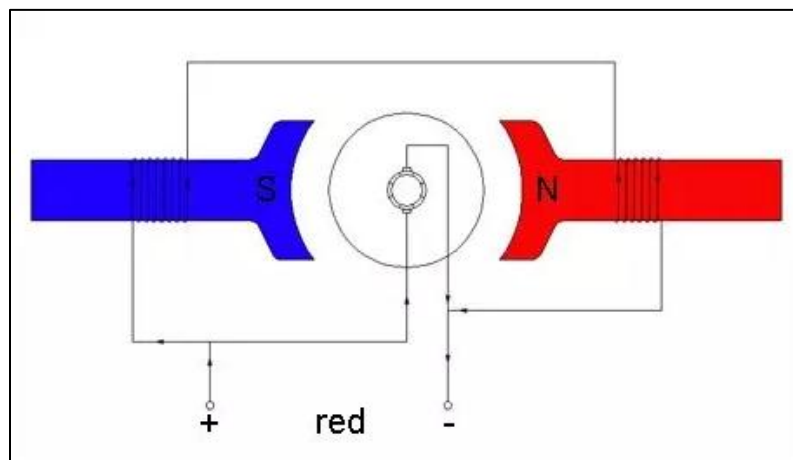


Figura 2.6 Motor universal conectado en paralelo.

Fuente: Autores.

- Material eje del rotor.
Acero AISI 4340, utilizado para elaborar partes de maquinaria sometidos a grandes esfuerzos (Dipac, 2016).

2.3 Caja transparente

Se realizó un esquema que muestra las transformaciones e interacciones necesarias que se producen dentro del sistema, convirtiendo las variables de entrada a variables de salida.

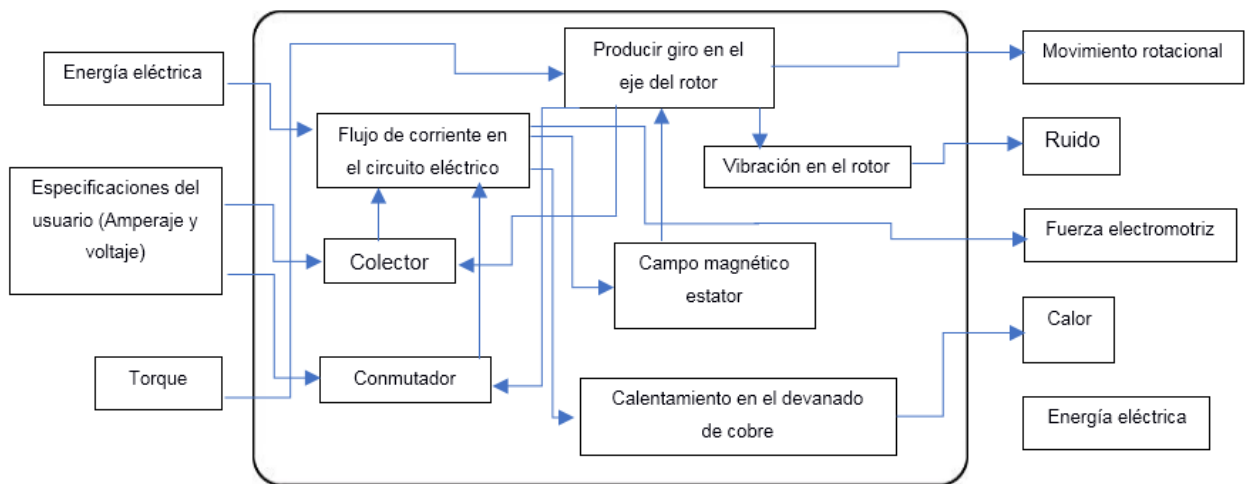


Figura 2.7 Caja transparente del motor-generador AC-DC.

Fuente: Autores.

La figura 2.7 muestra el flujo de los procesos internos del sistema motor-generador, necesarios para conseguir los requerimientos de diseño. La caja transparente fue construida con la ayuda de la tabla 2.1.

2.4 Selección de la mejor alternativa

Se eligió la mejor alternativa con la ayuda de un cuadro de ponderación que medirá cuantitativamente los atributos y características de las distintas alternativas de diseño, según los criterios seleccionados para la evaluación, llamada matriz de decisión.

2.4.1 Comparación por pares

Antes de construir la matriz de decisión, se obtuvo la ponderación de los criterios utilizados para la evaluación de las alternativas; con la ayuda de una comparación por pares de los criterios como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Método comparación por pares.

Fuente: Autores.

| Criterios | Costo de producción | Instalación | Mantenimiento | Repuestos accesibles | Tiempo de fabricación | Rendimiento magnético | Innovación | Factibilidad técnica | Factibilidad operativa | Total | Peso relativo |
|------------------------|---------------------|-------------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------|------------------------|-------|---------------|
| Costo de producción | | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 | 4 | 22 | 19.42% |
| Instalación | 0.25 | | 0.5 | 0.5 | 2 | 0.5 | 2 | 0.5 | 0.2 | 6.45 | 5.69% |
| Mantenimiento | 0.5 | 2 | | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 16.5 | 14.56% |
| Repuestos accesibles | 0.5 | 2 | 0.5 | | 4 | 0.5 | 3 | 2 | 0.2 | 12.7 | 11.21% |
| Tiempo de fabricación | 0.5 | 0.5 | 0.33 | 0.25 | | 0.2 | 2 | 0.25 | 0.2 | 4.23 | 3.73% |
| Rendimiento magnético | 0.5 | 2 | 0.5 | 2 | 4 | | 4 | 0.25 | 0.5 | 13.8 | 12.14% |
| Innovación | 0.25 | 0.5 | 0.33 | 0.33 | 0.5 | 0.25 | | 0.5 | 0.25 | 2.91 | 2.57% |
| Factibilidad técnica | 0.5 | 2 | 0.5 | 0.5 | 4 | 4 | 2 | | 0.5 | 14 | 12.36% |
| Factibilidad operativa | 0.25 | 4 | 0.5 | 4 | 4 | 2 | 4 | 2 | | 20.8 | 18.32% |
| Total | | | | | | | | | | 113 | |

Los criterios para la matriz de decisión serán los siguientes:

- Costo de producción: Se evalúa el precio de adquisición o fabricación del elemento. Representa el 19.42%.
- Instalación: Se estima la dificultad de montaje e instalación de las piezas del prototipo. Representa el 5.69%.
- Mantenimiento: Se estima el costo de mantenimiento. Representa el 14.56%.
- Repuestos accesibles: Se evalúa la facilidad de obtención de elementos para repuestos. Representa el 11.21%.
- Tiempo de fabricación: Se estima la duración de construcción del prototipo. Representa el 3.731%.

- Rendimiento magnético: Se pondera la eficiencia magnética del artefacto según las piezas magnéticas escogidas. Representa el 12.14%.
- Innovación: Se estima la implementación de elementos para mejorar el diseño de un motor-generator. Representa el 2.57%.
- Factibilidad técnica: Estima si se dispone de las habilidades y conocimientos técnicos en el desarrollo y construcción del prototipo. Representa el 12.36%.
- Factibilidad operativa: Estima la disposición del personal requerido para el desarrollo y construcción del prototipo. Representa el 18.32%.

Para la estimación de las alternativas en la matriz de decisión, tendremos las siguientes calificaciones:

- Conformidad baja= 1
- Conformidad intermedia= 5
- Conformidad alta= 10

2.4.2 Matriz de Decisión

A continuación, se muestra en la tabla 2.3 la selección de la mejor alternativa de diseño.

Tabla 2.3 Matriz de decisión de la mejor alternativa.

Fuente: Autores.

| Criterios | Peso % | Alternativas de diseño | | | | | |
|-------------------------------|--------|------------------------|----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | | Alternativa 1 | | Alternativa 2 | | Alternativa 3 | |
| | | Calificación | Subtotal | Calificación | Subtotal | Calificación | Subtotal |
| Costo de producción | 19.42% | 1 | 0.194192 | 5 | 0.970959 | 1 | 0.194192 |
| Instalación | 5.69% | 5 | 0.284668 | 5 | 0.284668 | 1 | 0.056934 |
| Mantenimiento | 14.56% | 5 | 0.72822 | 5 | 0.72822 | 10 | 1.456439 |
| Repuestos accesibles | 11.21% | 5 | 0.560508 | 10 | 1.121017 | 5 | 0.560508 |
| Tiempo de fabricación | 3.73% | 5 | 0.186689 | 10 | 0.373378 | 1 | 0.037338 |
| Rendimiento magnético | 12.14% | 10 | 1.213699 | 5 | 0.60685 | 1 | 0.12137 |
| Innovación | 2.57% | 10 | 0.256863 | 5 | 0.128431 | 10 | 0.256863 |
| Factibilidad técnica | 12.36% | 5 | 0.617883 | 10 | 1.235767 | 5 | 0.617883 |
| Factibilidad operativa | 18.32% | 1 | 0.183158 | 5 | 0.915791 | 1 | 0.183158 |
| Total | | | 4.22588 | | 6.365081 | | 3.484685 |

La alternativa escogida fue la opción número 2, debido al mayor puntaje que obtuvo en la tabla 2.3. La figura 2.8 muestra la alternativa de diseño ganadora para la construcción de una armadura modular fija de un motor-generador de corriente continua y alterna para prácticas de Electrotecnia.

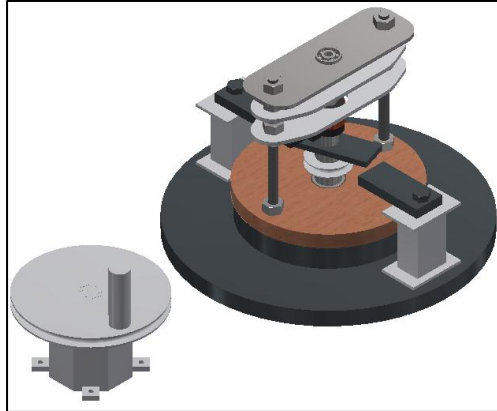


Figura 2.8 Alternativa 2 del motor-generador AC-DC.

Fuente: Autores.

2.5 Diseño del motor-generador eléctrico.

2.5.1 Núcleo del inductor e inducido

Para la construcción del núcleo de las bobinas del inductor e inducido en este tipo de aplicaciones, están constituidos de materiales magnéticos blandos, donde las pérdidas por histéresis son menores por su curva de histéresis altas y estrechas (Cheng, 1993). En el mercado local, adquirir una aleación de hierro al silicio, con las mejores características magnéticas como se observa en la figura 2.9, resulta difícil de conseguirlo en el mercado local.

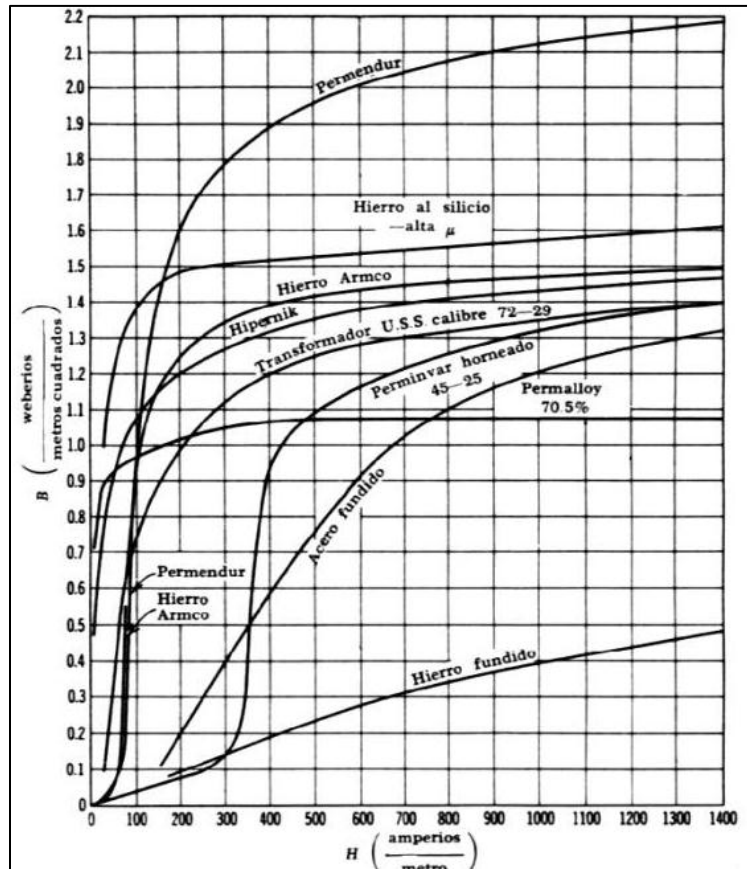


Figura 2.9 Intensidad de flujo magnético vs campo magnético de materiales

Fuente: Bakshi 2009.

Para la selección del material de las bobinas magnéticas, se consideraron materiales fáciles de magnetizar al momento de inducir un campo magnético pequeño sobre ellas y fáciles de desmagnetizar al eliminar el campo magnético externo (Cheng, 1993).

Para la construcción del motor y generador se escogió el hierro negro, que se obtiene al fundir hierro. La composición química del material se observa en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Porcentaje de la composición química del hierro negro.

Fuente: Sumindu.

| Rango de composición química | | | | | |
|------------------------------|--------|---------|-----------|-------|-----------|
| Carbono | Azufre | Fósforo | Manganeso | Cromo | Silicio |
| 0.10-0.26 | 0.05 | 0.04 | 0.8-1.2 | 0.2 | 0.15-0.30 |

2.5.2 Aislante

El material del aislante deberá resistir las temperaturas producidas por el devanado, al momento de circular corriente eléctrica a través de las espiras.

Tabla 2.5 Propiedades mecánicas y térmicas del PLA.

Fuente: Ultimaker.

| <u>Propiedades mecánicas (*)</u> | <u>Moldeo por inyección</u> | | <u>Impresión 3D</u> | |
|--|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | <u>Valor típico</u> | <u>Método de ensayo</u> | <u>Valor típico</u> | <u>Método de ensayo</u> |
| Módulo de elasticidad a la tracción | - | - | 2346,5 MPa | ISO 527 (1 mm/min) |
| Esfuerzo de tracción a la deformación | - | - | 49,5 MPa | ISO 527 (50 mm/min) |
| Esfuerzo de tracción a la rotura | - | - | 45,6 MPa | ISO 527 (50 mm/min) |
| Alargamiento a la deformación | - | - | 3,3 % | ISO 527 (50 mm/min) |
| Alargamiento a la rotura | - | - | 5,2 % | ISO 527 (50 mm/min) |
| Resistencia a la flexión | - | - | 103,0 MPa | ISO 178 |
| Módulo de flexión | - | - | 3150,0 MPa | ISO 178 |
| Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C) | - | - | 5,1 kJ/m ² | ISO 180 |
| Resistencia a la prueba de impacto Charpy (a 23 °C) | - | - | - | - |
| Dureza | - | - | 83 (Shore D) | Durómetro |
| <u>Propiedades térmicas</u> | | <u>Valor típico</u> | <u>Método de ensayo</u> | |
| Índice de fluidez (MFR) | | 6,09 g/10 min | ISO 1133 (210 °C, 2,16 kg) | |
| Deformación térmica (HDT) a 0,455 MPa | | - | - | |
| Deformación térmica (HDT) a 1,82 MPa | | - | - | |
| Transición vítrea | | -60 °C | ISO 11357 | |
| Coefficiente de expansión térmica | | - | - | |
| Temperatura de fusión | | 145-160 °C | ISO 11357 | |
| Contracción térmica | | - | - | |

El aislante de las bobinas magnéticas del estator y del rotor estarán conformadas por una capa de seda, cartón o un carrete de PLA, impreso en 3d. En la tabla 2.5 se muestran las propiedades mecánicas y térmicas del polímero PLA, donde indica que el material no se podrá exponer a temperaturas mayores a 70 °C, debido a su punto de fusión de 145-160 °C.

2.5.3 Devanado

Para seleccionar el devanado de las bobinas inductoras e inducidas, se basó en las normas IEC 60317-38 Y ASTM B258-14. Se seleccionó un alambre de cobre de calibre 24 AWG, para poder soportar hasta 2 amperios (ASTM, 1996). El cable seleccionado será capaz de hacer circular un flujo de corriente que cumpla con

los requerimientos de diseño, para la operación del sistema electromagnético del motor-generador AC-DC.

2.5.4 Armadura

Para que el diseño del prototipo sea de bajo costo, se escogió para la armadura modular fija del motor-generador, un disco de freno de automóvil. La función de la armadura será transportar el flujo magnético producido por las bobinas inductoras y mantener un comportamiento magnético eficiente.

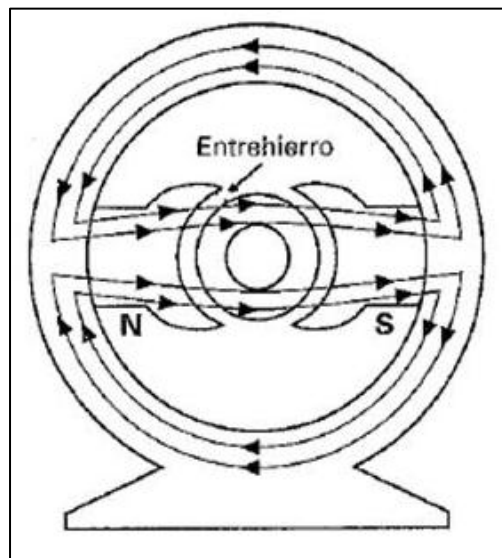


Figura 2.10 Flujo magnético a través de la armadura de un motor universal.

Fuente: Autores.

El material del que está compuesto el disco de freno es de fundición gris nodular de grafito laminar, siendo un material ferromagnético blando (Metelli Group, 2019). Esto permitirá que gran parte del flujo magnético producido por los polos inductores permanezca en los núcleos del estator y del rotor.

2.5.5 Diseño del eje

Para el diseño del eje del motor-generador, se tomó en consideración el peso del núcleo, el devanado del rotor, las fuerzas de rozamiento y contacto de los conmutadores para conexiones AC y DC.

El material que se utilizó para este componente fue el acero de transmisión de potencia AISI 1020. Fue escogido por sus propiedades mecánicas, su

disponibilidad en el mercado y su bajo costo. Las propiedades mecánicas se encuentran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Propiedades mecánicas de la aleación de acero y carbono 1018.

Fuente: Fundamental of Machine Component Design, Juvinall (5ta. Edición).

Appendix C-2 Tensile Properties of Some Metals

| Material | Ultimate Strength, S_u | | Yield Strength, S_y | | σ_0^a | | m^a | ϵ_{Tf}^a |
|-------------------------|--------------------------|------|-----------------------|-----|--------------|------|-------|-------------------|
| | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa | | |
| Carbon and alloy steels | | | | | | | | |
| 1002 A ^b | 42 | 290 | 19 | 131 | 78 | 538 | 0.27 | 1.25 |
| 1010 A | 44 | 303 | 29 | 200 | 82 | 565 | 0.23 | 1.20 |
| 1018 A | 49.5 | 341 | 32 | 221 | 90 | 621 | 0.25 | 1.05 |
| 1020 HR | 66 | 455 | 42 | 290 | 115 | 793 | 0.22 | 0.92 |
| 1045 HR | 92.5 | 638 | 60 | 414 | 140 | 965 | 0.14 | 0.58 |
| 1212 HR | 61.5 | 424 | 28 | 193 | 110 | 758 | 0.24 | 0.85 |
| 4340 HR | 151 | 1041 | 132 | 910 | 210 | 1448 | 0.09 | 0.45 |
| 52100 A | 167 | 1151 | 131 | 903 | 210 | 1448 | 0.07 | 0.40 |
| Stainless steels | | | | | | | | |
| 302 A | 92 | 634 | 34 | 234 | 210 | 1448 | 0.48 | 1.20 |
| 303 A | 87 | 600 | 35 | 241 | 205 | 1413 | 0.51 | 1.16 |
| 304 A | 83 | 572 | 40 | 276 | 185 | 1276 | 0.45 | 1.67 |
| 440C A | 117 | 807 | 67 | 462 | 180 | 1241 | 0.14 | 0.12 |
| Aluminum alloys | | | | | | | | |
| 1100-0 | 12 | 83 | 4.5 | 31 | 22 | 152 | 0.25 | 2.30 |
| 2024-T4 | 65 | 448 | 43 | 296 | 100 | 690 | 0.15 | 0.18 |
| 7075-0 | 34 | 234 | 14.3 | 99 | 61 | 421 | 0.22 | 0.53 |
| 7075-T6 | 86 | 593 | 78 | 538 | 128 | 883 | 0.13 | 0.18 |
| Magnesium alloys | | | | | | | | |
| HK31XA-0 | 25.5 | 176 | 19 | 131 | 49.5 | 341 | 0.22 | 0.33 |
| HK31XA-H24 | 36.2 | 250 | 31 | 214 | 48 | 331 | 0.08 | 0.20 |
| Copper alloys | | | | | | | | |
| 90-10 Brass A | 36.4 | 251 | 8.4 | 58 | 83 | 572 | 0.46 | — |
| 80-20 Brass A | 35.8 | 247 | 7.2 | 50 | 84 | 579 | 0.48 | — |
| 70-30 Brass A | 44 | 303 | 10.5 | 72 | 105 | 724 | 0.52 | 1.55 |
| Naval Brass A | 54.5 | 376 | 17 | 117 | 125 | 862 | 0.48 | 1.00 |

Se necesitó un rodamiento axial para que el eje descansa en la parte inferior, debido a que soportará toda la fuerza gravitatoria producto de la masa del conjunto, y en la parte superior se colocará un rodamiento radial que permita mantener el eje alineado verticalmente durante su funcionamiento y contrarreste las fuerzas laterales ocasionadas por los carbones AC.

Se inició con la identificación de todas las fuerzas aplicadas en el eje en su aplicación más crítica, el cual es cuando se usa como generación de energía AC; por el uso de la transmisión manual mediante banda y poleas se producirá fuerzas de flexión y de torsión en el eje. Además, el uso de los porta carbones AC ejercieron una fuerza en una sola dirección al eje provocando flexión y torsión, producto de las fuerzas de rozamiento y de contacto.

Por lo tanto, se utilizaron las ecuaciones de estática elementales:

$$\sum F = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2.2)$$

Se realizó el diagrama de fuerza cortante y momento flector del eje, para determinar el momento máximo al que estarán sometidas cada sección; y proceder a usar la ecuación de GOODMAN para el dimensionamiento de cada sección del eje.

$$d = \left[\frac{32N_f}{\pi} \left(\frac{\sqrt{(k_f M_a)^2 + \frac{3}{4}(k_{fs} T_a)^2}}{S_f} + \frac{\sqrt{(k_{fm} M_m)^2 + \frac{3}{4}(k_{fsm} T_m)^2}}{S_{ut}} \right) \right]^{1/3} \quad (2.3)$$

Donde:

d : Diámetro recomendado en la sección analizada del eje

N_f : Factor de seguridad

k_f : Factor de concentración de esfuerzos de flexión por fatiga para la componente alternante

k_{fm} : Factor de concentración de esfuerzos de flexión por fatiga para la componente media

k_{fs} : Factor de concentración de esfuerzos de torsión por fatiga para la componente alternante

k_{fsm} : Factor de concentración de esfuerzos de torsión por fatiga para la componente media

M_a : Momento alternante

M_m : Momento medio

T_a : Torque alternante

T_m : Torque medio

S_f : Límite de resistencia corregida a la fatiga

S_{ut} : Resistencia última a la tensión del material

$$S_f = C_{CA} C_{SU} C_{TA} C_{TE} C_R [0.5 S_{ut}] \quad (2.4)$$

Donde:

C_{CA} : Factor de carga

C_{SU} : Factor de superficie

C_{TA} : Factor de tamaño

C_{TE} : Factor de temperatura

C_R : Factor de confiabilidad

Para obtener los factores de esfuerzos geométricos a la fatiga se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \text{ Flexión} \quad (2.5)$$

$$k_{fs} = 1 + q_s(k_{ts} - 1) \text{ Torsión} \quad (2.6)$$

Donde:

k_t : Factor de concentración de esfuerzo geométrico a flexión

k_{ts} : Factor de concentración de esfuerzo geométrico a torsión

2.5.6 Selección de banda y polea

En este apartado se seleccionó la banda para transmitir movimiento de rotación en un sistema de dos poleas, para la máquina eléctrica operando como generador eléctrico. Se utilizó una banda de polícord termo soldable por sus características elásticas, alta calidad y flexibilidad. Las bandas de polícord permiten una fácil instalación y mantenimiento, ofreciendo una larga vida útil (Habasit, 2020).

Las poleas serán fabricadas mediante impresión 3D, ya que las cargas que produce la banda tensada no son considerablemente altas y no requieren mayor análisis el diseño.

Se escogió una relación de velocidad entre poleas de 4 a 1, por lo tanto, se obtuvo una polea con una circunferencia 4 veces mayor a la polea acoplada al eje.

2.5.7 Selección de rodamiento

Para la selección del rodamiento, se basaron los cálculos con respecto a la información del catálogo de la marca NTN. Se determinó el tipo de rodamiento adecuado para la aplicación, con respecto al diámetro obtenido en el apartado del diseño del eje. Por la posición vertical y la interacción de las fuerzas axiales que superan a las fuerzas radiales en el eje, se realizaron los cálculos para este tipo de rodamientos con la siguiente formula:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left[\frac{C_a}{P_a} \right]^p \quad (2.7)$$

Donde:

L_{10h} : Vida nominal básica 10^6 revoluciones

n : Velocidad de rotación, RPM

C_a : Capacidad básica de carga dinámica para rodamiento axial, N

P_a : Carga dinámica equivalente, N

p : Influencia de la carga, (3, rodamiento de bolas), (10/3, rodamiento de rodillos)

De aquí, despejamos C_a y buscamos en el catálogo NTN el rodamiento que se ajuste a las necesidades de carga y diámetros requeridos.

2.5.8 Diseño electromagnético

Para realizar el diseño electromagnético se definieron parámetros de diseño, como se muestra en la tabla 2.7.

Parámetros del motor

Tabla 2.7 Parámetros de diseño del motor.

Fuente: Autores.

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| NÚMERO DE POLOS | 2 |
| VOLTAJE BOBINAS DE CAMPO | 12 V |
| VOLTAJE FUENTE DC | 24 V |
| ENTRE HIERRO | 5 mm |
| MATERIALES DE NÚCLEOS | ASTM A 36 |
| DIÁMETRO DEL ROTOR | 91 mm |
| LONGITUD DE LA MÁQUINA | 131 mm |
| DIÁMETRO NOMINAL DEL ALAMBRE | 0.5106 mm |
| ALTURA NÚCLEO DEL ESTATOR | 63 mm |

Cálculos previos

- Densidad del entrehierro

Para obtener la densidad en el entrehierro se utilizó el software Femm (Finite Element Method Magnetics) versión 4.2, utilizado para realizar simulaciones de problemas magnéticos, electrostático, de flujo de calor y flujo de corriente (Finite Element Method Magnetics, 2019). El procedimiento utilizado para obtener la densidad magnético en el entrehierro se encuentra en la sección de Anexos, Apéndice B.

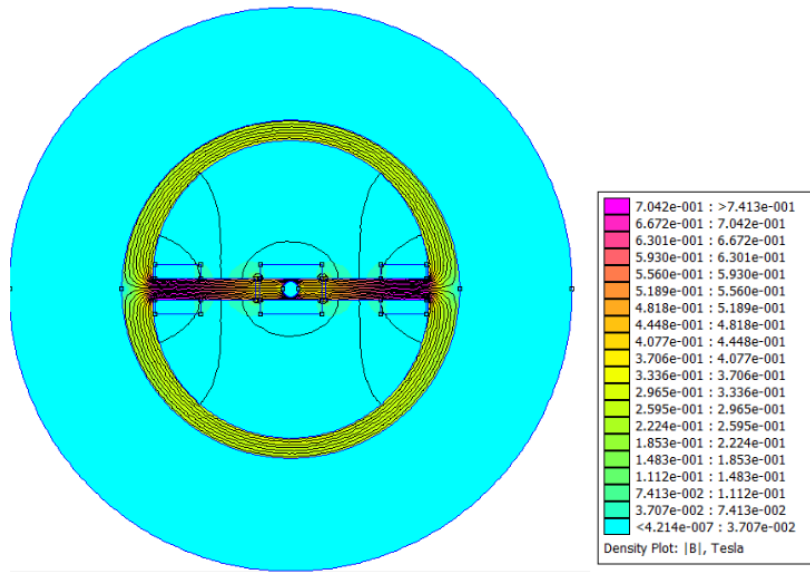


Figura 2.11 Inducción en el entrehierro obtenido en software FEMM.

Fuente: Autores.

- Densidad en el entrehierro

Según la gráfica 2.11, el campo magnético en el entre hierro es de:

$$g = 0.42 \text{ T}$$

- Fuerza magnetomotriz necesaria

$$F_{mm} = \frac{gxB}{\mu_0} \quad (2.8)$$

Donde:

F_{mm} =Fuerza magnetomotriz [A-v]

g =Densidad del entrehierro [T]

μ_0 =permeabilidad magnética [rad/s]

$$Fmm = \frac{5 \times 10^{-3} m \times 0.42}{4\pi \times 10^{-7}} = 1671 Av$$

- Número de espiras en el inducido

$$Fmm = NI \quad (2.9)$$

Donde:

N=Número de vueltas

I=Intensidad de corriente [A]

- Área transversal

Se calculó el área transversal del núcleo de la bobina inducida de sección transversal escogida de 6x30 mm.

$$A = l_1 \times l_2 \quad (2.10)$$

Donde:

A=Área de sección transversal [m²]

l₁=Lado 1 [m]

l₂=Lado 2 [m]

$$A = 6 \times 10^{-3} m \times 30 \times 10^{-3} m = 1.8 \times 10^{-4} m^2$$

- Flujo magnético en el inducido

$$\varphi = N \times B \times A \quad (2.11)$$

Donde:

φ=Flujo magnético en el inducido [wb]

B=Campo magnético en el entrehierro [T]

$$\varphi = 693 \times 0.42 T \times 1.8 \times 10^{-4} m^2$$

$$\varphi = 0.052 wb$$

Devanado bobinas de campo y armadura.

Para poder dimensionar el carrete de PLA para el devanado, se calculó el grosor y altura del devanado. Esto se realizó una vez seleccionado el alambre de cobre según el amperaje de operación. Se utilizó cable de cobre AWG 24 para las bobinas de campo y la bobina de armadura.

- Diámetro nominal incluido el aislamiento.

$$D_i = D \times \text{factor de esmaltado} \quad (2.12)$$

Donde:

D = diámetro del conductor (AWG 24) [mm]

D_i = diámetro nominal incluido el aislamiento [mm]

- Vueltas por capa

$$\text{Vueltas por capa} = \text{Altura del carrete} / D_i \quad (2.13)$$

- Número de Capas

$$\text{Números de capas} = \text{Número de vueltas} / \text{vueltas por capa} \quad (2.14)$$

- Espesor de la bobina

$$\text{Espesor bobina} = \text{Número de capas} / D_i \quad (2.15)$$

- Perímetro del núcleo

$$P = 2L_1 + 2L_2 \quad (2.16)$$

Donde

L₁=Lado 1

L₂=Lado 2

- Longitud de cable

$$L_T = \text{Perímetro} * \text{Vueltas por capa} * \text{Número de capas} \quad (2.17)$$

Donde

L_T=Longitud total del cable [m]

- Área del cable conductor

$$S = \pi D^2 / 4 \quad (2.18)$$

Donde

S =Área del cable conductor [mm²]

D =Diámetro del cable [mm]

- Resistencia de bobinas de campo

$$R_{BC} = \rho \cdot L / S \quad (2.19)$$

Donde

R_{BC} =Resistencia bobina de campo [Ω]

ρ =Constante de resistividad del cobre [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]

L =Longitud del cable en la bobina [m]

Devanado bobina de armadura.

Para el devanado de la bobina del rotor se establecieron 700 vueltas, donde se aisló el núcleo ferromagnético con cinta de papel. La longitud total del diámetro del núcleo es de 91 mm, pero la longitud útil para el devanado por la interferencia del eje es de 64 mm.

- Vueltas por capa

Longitud útil del núcleo = 64 mm

$$\text{Vueltas por capa} = \text{Longitud útil del núcleo} / D_i \quad (2.20)$$

- Número de Capas

Para calcular el número de capas se utilizó la ecuación 2.14, con las características del devanado de la bobina de armadura.

- Espesor de la bobina de armadura

Para obtener el espesor de la bobina de la armadura de capas se utilizó la ecuación 2.15.

- Voltaje de Entrada

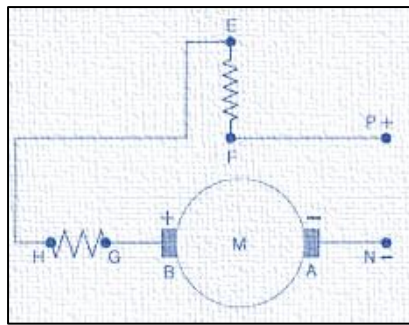


Figura 2.12 Circuito eléctrico de motor universal.

Fuente: Roldán, 2014.

Se utilizó la Ley de voltaje de Kirchoff para obtener el voltaje de la fuente necesaria.

$$V_{PN} - V_{FE} - V_{HG} - V_{BA} - \varepsilon = 0 \quad (2.21)$$

Donde

V_{PN} =Voltaje de Fuente [V]

V_{FE} =Voltaje Bobina de campo 1 [V]

V_{HG} =Voltaje Bobina de campo 2 [V]

V_{BA} =Voltaje de la armadura [V]

$$V_{PN} - i \cdot R_{FE} - i \cdot R_{HG} - i \cdot R_{BA} - \varepsilon = 0 \quad (2.22)$$

Donde

R_{FE} =Resistencia eléctrica Bobina 1 [Ω]

R_{HG} =Resistencia eléctrica Bobina 2 [Ω]

R_{BA} =Resistencia de la armadura [Ω]

- Voltaje de Armadura

$$V_{BA} = i \cdot R_{BA} \quad (2.23)$$

- Velocidad angular del motor

$$\omega = E_b C / \varphi Z P \quad (2.24)$$

Donde:

E_b =Voltaje en la armadura [V]

Z =Número de conductores

ω =Velocidad angular del motor [rad/s]

P =Número de Polos en la armadura

C =Número de caminos

- Potencia absorbida

$$P = V_{PN} * i \quad (2.25)$$

- Pérdidas por contacto de escobillas.

Se utilizó la fuerza de contacto de las escobillas más crítica.

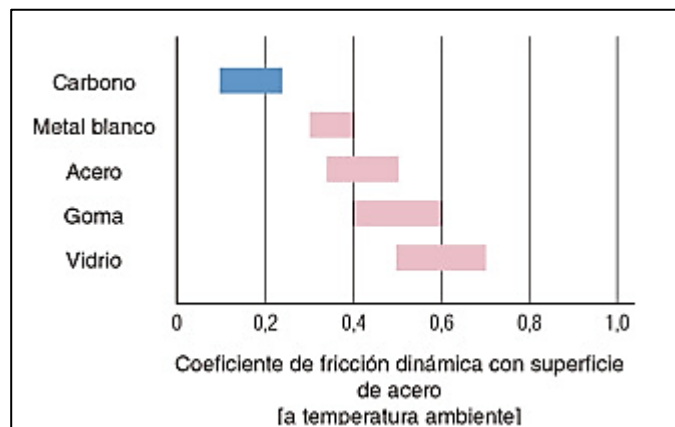


Figura 2.13 Coeficiente de fricción dinámica de porta carbones.

Fuente: Toyo Tanso, 2018.

$$F_c = N_e * \mu_k \quad (2.26)$$

Donde:

F_c =Fuerza de contacto de las escobillas AC [N]

μ_k =coeficiente de fricción dinámica de carbones

$$\tau_c = F_c * r \quad (2.27)$$

Donde:

τ_c =Torque por fuerza de fricción [Nm]

r =Radio o brazo de palanca [m]

$$P_c = \tau_c * \omega \quad (2.28)$$

Donde:

P_c =Potencia perdida por contacto [Watts]

- Pérdidas en el cobre

$$P_{cu} = i \cdot R_{FE} + i \cdot R_{HG} \quad (2.29)$$

Donde

P_{cu} =Potencia perdida en el devanado

- Potencia útil de la máquina

$$P_u = P - P_c - P_{cu} \quad (2.30)$$

Donde:

P_u =Potencia útil [Watts]

- Rendimiento del motor

$$\eta = P_u/P \quad (2.31)$$

Donde

η =Rendimiento del motor

- Par de la máquina

$$T_m = \frac{P_u}{\omega} \quad (2.32)$$

Donde:

T_m =Par de la máquina [Nm]

Parámetros del generador

Tabla 2.8 Parámetros de diseño del generador.

Fuente: Autores.

| | |
|--|-----------|
| NÚMERO DE POLOS | 2 |
| RANGO DE TENSIÓN ENTRE HIERRO | 2-12V |
| MATERIALES DE NÚCLEOS | 5 mm |
| DIÁMETRO DEL ROTOR | ASTM A 36 |
| LONGITUD DE LA MÁQUINA | 90 mm |
| DIÁMETRO NOMINAL DEL ALAMBRE | 131 mm |
| VELOCIDAD MÁXIMA DE GIRO | 0.5106 mm |
| POTENCIA ÚTIL DEL GENERADOR | 50 rpm |
| CAMPO MAGNÉTICO EN EL ENTREHIERRO | 20 W |
| | 0.42 T |

- Par producido

$$T_g = \frac{P_{ug}}{\omega_g} \quad (2.33)$$

Donde:

T_g =Par producido [Nm]

P_{ug} =Potencia útil del generador [W]

ω_g =Velocidad máxima de giro [rad/s]

- Fuerza electromotriz máxima

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (2.34)$$

$$\varepsilon = NBS_A\omega_g \text{sen}(\omega_g t) \quad (2.35)$$

Donde:

ε =Fuerza electromotriz en el rotor [V]

N =Número de espiras en el rotor

B =Campo magnético en el entrehierro [B]

S_A =Sección transversal del núcleo del rotor [m²]

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis estructural del prototipo

3.1.1 Análisis de esfuerzo del eje

En el análisis realizado en el software CAD Inventor 2019 se pudo comprobar que los esfuerzos a los que estuvo sometido el eje del motor no son significativos, debido a que no hay carga motriz que se requiera, por su funcionalidad didáctica.

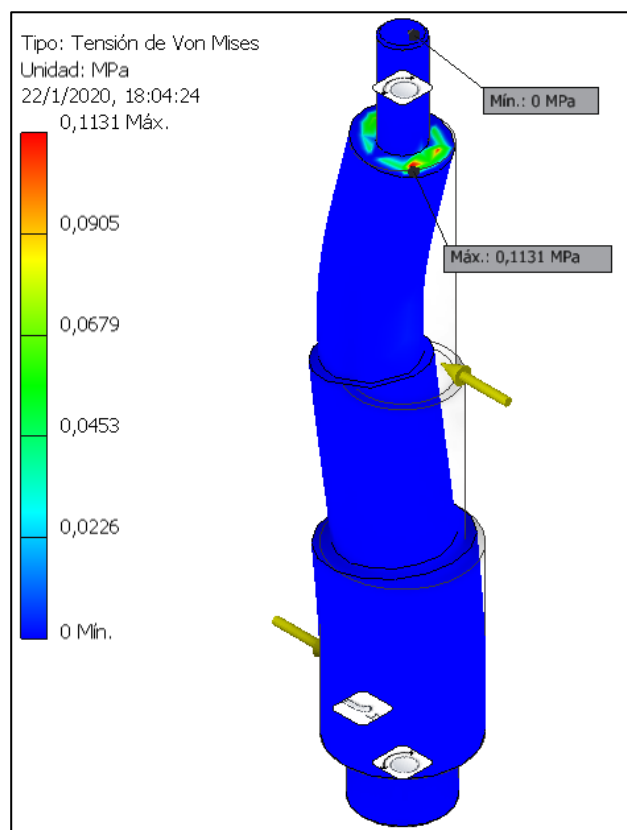


Figura 3.1 Tensión de Von Mises en el eje del rotor.

Fuente: Autores.

Por tal motivo, se analizó la situación más crítica a la que estuvo sometido el eje; que es la máquina operando como generador de corriente alterna. En esta modalidad, en el eje existe una fuerza de flexión producto de la tensión producida por la banda en la polea acoplada al eje; además de la presencia de fuerzas de flexión producidas por los resortes de los porta carbones AC, como se muestra en

la figura 3.1. En la misma ilustración se apreció una concentración de esfuerzos mínima en la parte superior del eje, porque es la sección del elemento con menos material y además de tener un hombro pronunciado; a pesar de esto, sigue dentro de los límites de resistencia del material. Las demás secciones del eje mostraron esfuerzos cercanos a cero, esto nos indicó que el eje está sobredimensionado.

3.1.2 Análisis de deformación del eje

En cuanto a las deformaciones mostradas en la figura 3.2, se observó que el mayor desplazamiento se produjo en la sección donde los porta carbones de corriente alterna ejercen una fuerza de contacto debido a la acción de sus resortes, esto nos indicó que no fue preocupante para el diseño, debido que el máximo desplazamiento está en el orden de los 10^{-6} mm.

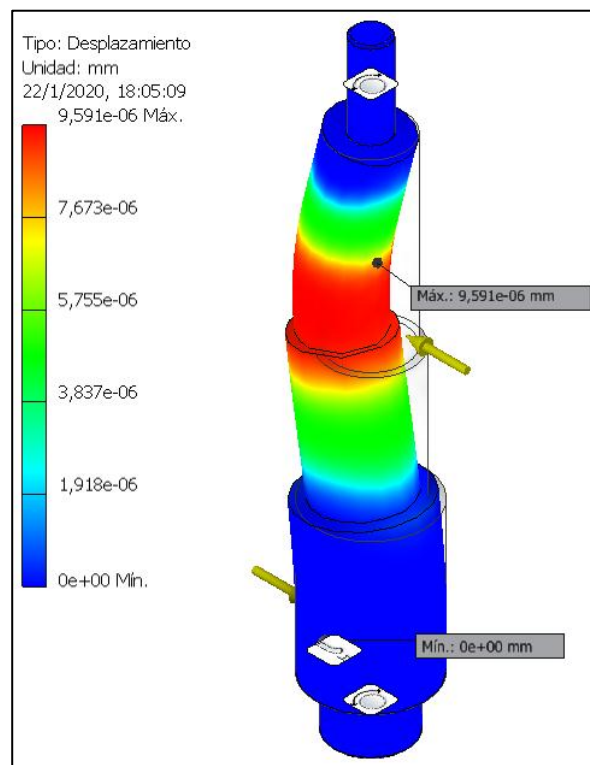


Figura 3.2 Deformación del eje del rotor.

Fuente: Autores.

3.1.1 Factor de seguridad del eje

El sobredimensionamiento del eje vino de la mano con el diseño eléctrico, y con los elementos usados; ya que se reutilizaron los anillos deslizantes que tienen una medida preestablecida de fábrica.

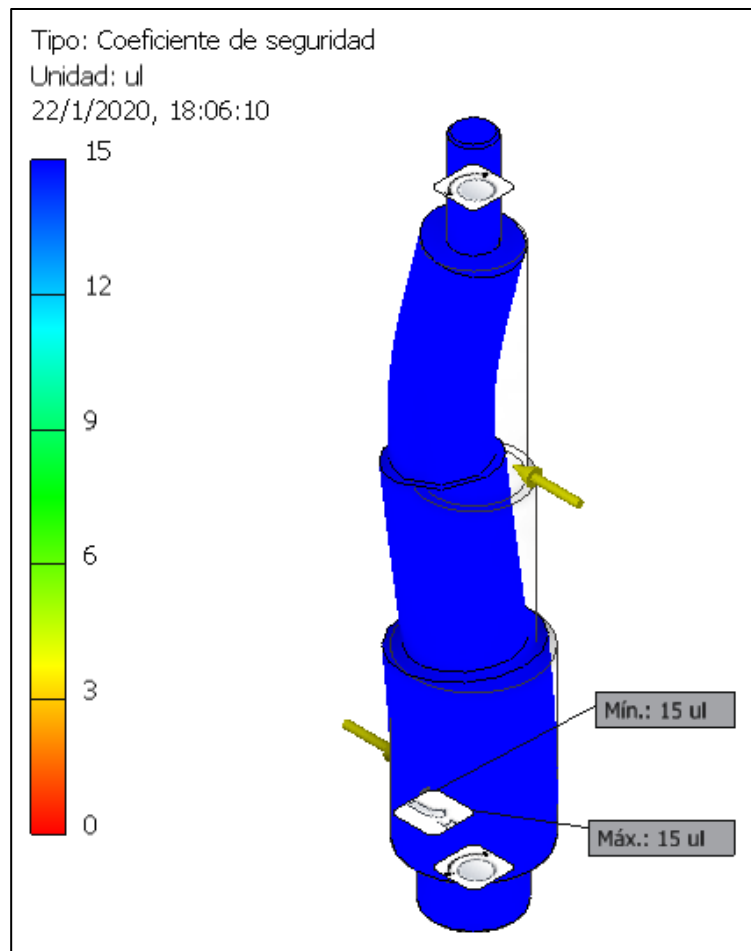


Figura 3.3 Factor de seguridad en el eje del rotor.

Fuente: Autores.

Además, la figura 3.3 nos indicó que el factor de seguridad está por encima de 15 unidades.

3.1.2 Análisis de esfuerzo del sistema motriz

Con respecto al sistema motriz del rotor para la configuración de generador eléctrico, se observó en la figura 3.4 que los esfuerzos de tensión están dentro del rango aceptable de trabajo, con ciertos puntos potenciales de concentración de

esfuerzos ubicados en el acople de la polea con la base fija; esto se debe a que le acople tiene cambios de secciones no suavizados con redondeos o chaflanes.

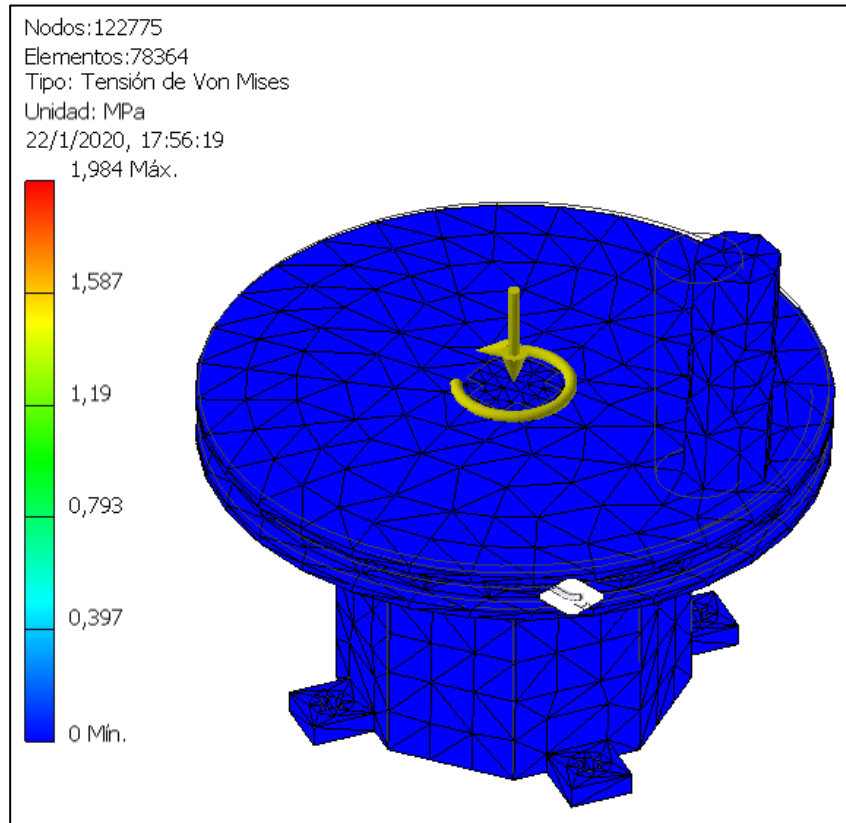


Figura 3.4 Tensión de Von Mises del sistema motriz del rotor.

Fuente: Autores.

3.1.3 Análisis deformación del sistema motriz

En la figura 3.5 muestra las deformaciones del sistema motriz, donde se observó que las máximas deformaciones se dan en el contorno de la polea, el cual soporta las fuerzas de tensión de la banda en ambos lados.

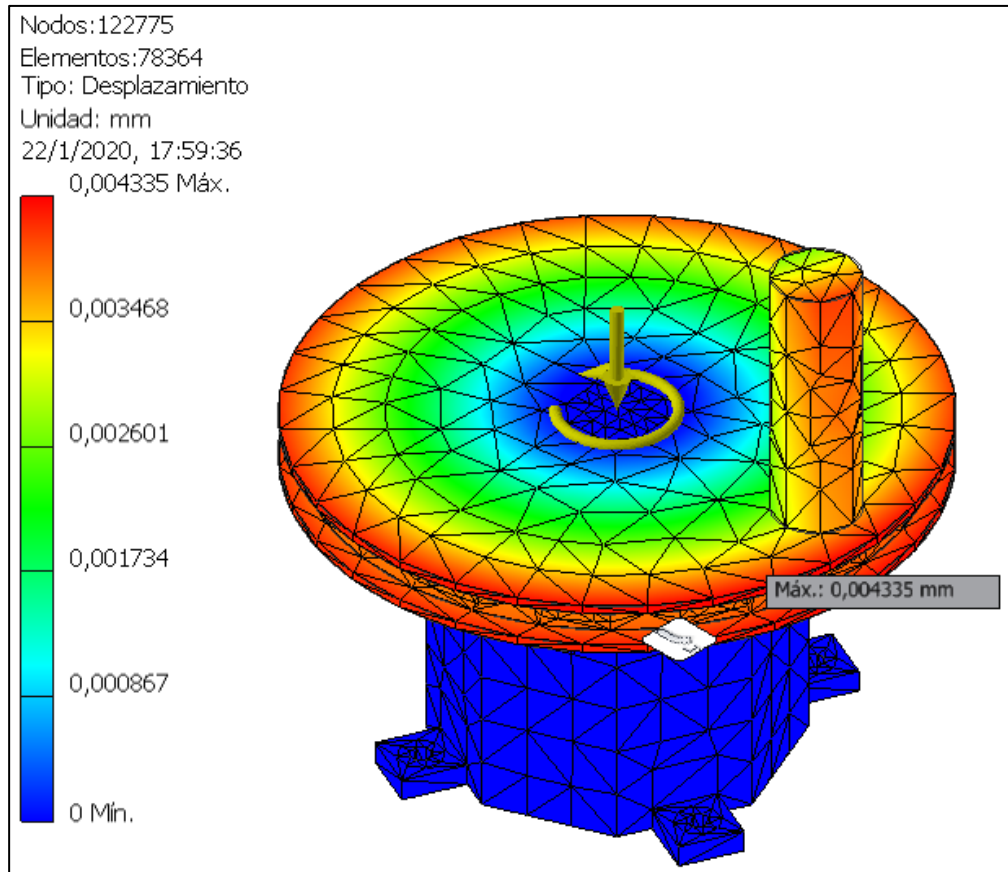


Figura 3.5 Deformación del sistema motriz del rotor.

Fuente: Autores.

Estas deformaciones máximas están en el orden de 10^{-3} mm, por lo tanto, son imperceptibles y demuestra que el sistema motriz puede soportar cargas mucho más grandes de las existentes.

3.1.4 Análisis factor de seguridad del sistema motriz

En la figura 3.6 que muestra el factor de seguridad del sistema motriz, nos indicó que el sistema podrá soportar las fuerzas de trabajo requeridas para la operación del generador eléctrico AC o DC, donde el factor de seguridad está por encima de las 15 unidades en toda la estructura.

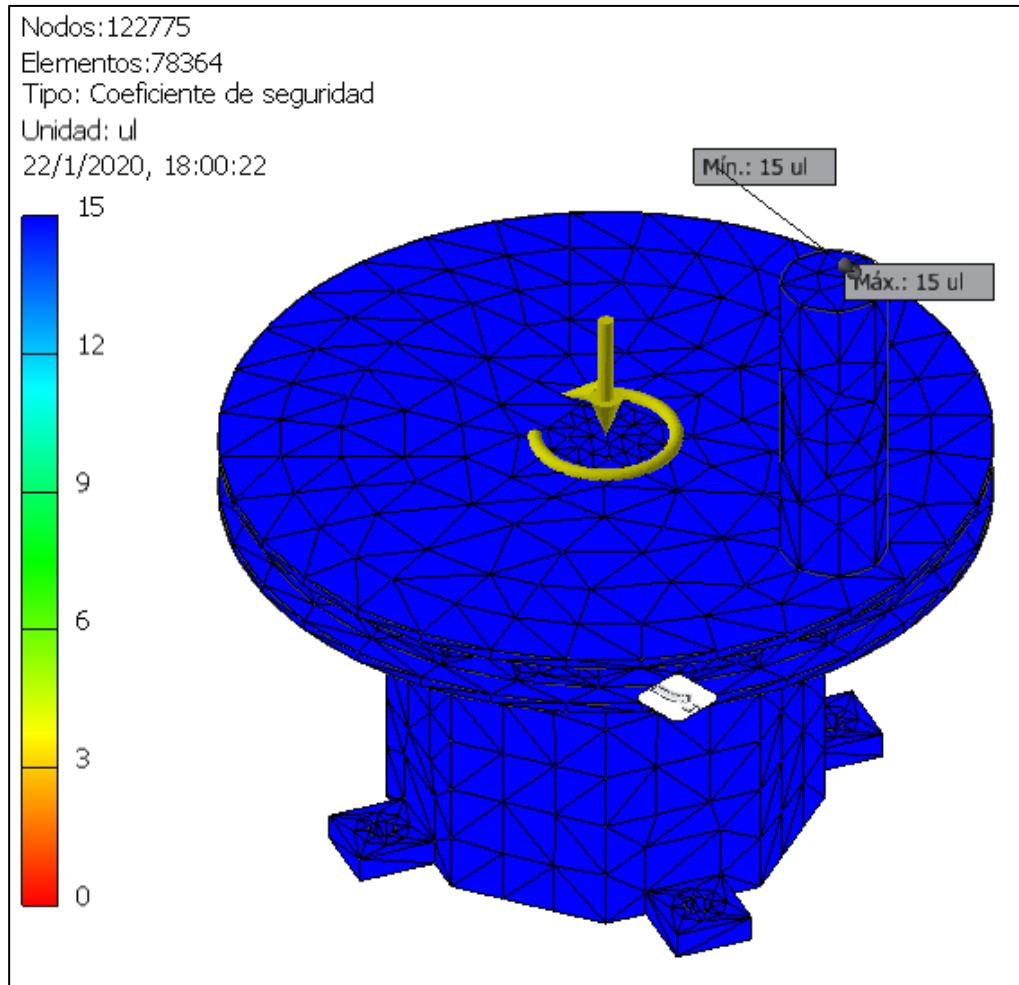


Figura 3.6 Factor de seguridad del sistema motriz del rotor.

Fuente: Autores.

3.2 Análisis del generador de corriente alterna

3.2.1 Resultados con osciloscopio del generador AC.

Se procedió a medir el voltaje inducido conectando los terminales de un osciloscopio analógico, con los terminales de los anillos deslizantes. Se conectaron las bobinas de campo en serie, alimentadas a una fuente DC con 24 V. Los resultados se muestran a continuación en la figura 3.7.

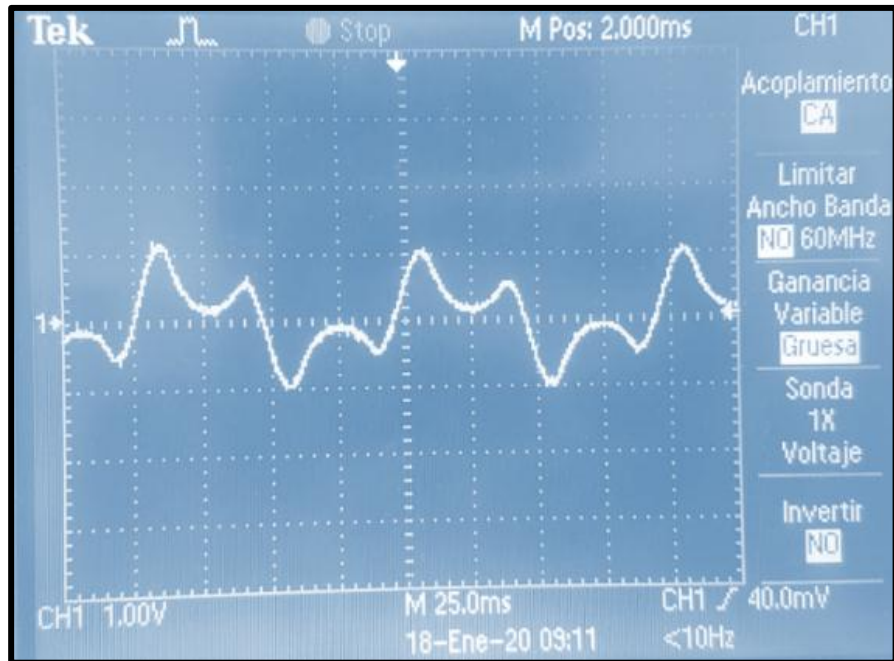


Figura 3.7 Voltaje AC en la armadura [V] vs tiempo[s] del generador.

Fuente: Autores.

Se obtuvo un voltaje pico de 1.2 V y un voltaje RMS de 0.8 V. Para poner en funcionamiento a la máquina eléctrica operando como generador AC, se tuvo como entrada en la polea motriz una velocidad media de 200 rpm por parte del operador.

3.2.2 Resultados con multímetro digital del generador AC.

Se realizó con la ayuda de un multímetro digital, la medición del voltaje de armadura que se generó con la misma conexión en serie y procedimiento experimental, utilizado en las pruebas del generador eléctrico AC con el osciloscopio analógico. Se registró la intensidad de voltaje, corriente de la fuente DC y el voltaje en la armadura como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Pruebas con multímetro digital del generador AC.

Fuente: Autores

| <i>Pruebas con multímetro digital</i> | | |
|---------------------------------------|------------------------------|---|
| Voltaje Fuente [V] | Voltaje Armadura [mV] | Intensidad de corriente de la fuente [A] |
| 2.5 | 145.5 | 0.1 |
| 3 | 178.5 | 0.2 |
| 5 | 237.2 | 0.3 |
| 6 | 290.7 | 0.4 |
| 9 | 364.6 | 0.5 |
| 10 | 472.2 | 0.6 |
| 12 | 477.6 | 0.7 |
| 14 | 681.1 | 0.8 |
| 15 | 701.3 | 0.95 |
| 16 | 753.4 | 1 |
| 17 | 869.7 | 1.05 |
| 18 | 896.3 | 1.1 |
| 20 | 907.8 | 1.3 |
| 23 | 1111.1 | 1.35 |
| 24 | 1324.4 | 1.35 |
| 25.5 | 1415.1 | 1.37 |
| 26 | 1423.4 | 1.37 |
| 26.5 | 1475.2 | 1.4 |
| 27 | 1498.6 | 1.41 |
| 27.5 | 1510.3 | 1.42 |
| 28 | 1525.4 | 1.43 |
| 28.5 | 1541.2 | 1.43 |
| 29 | 1563.3 | 1.44 |
| 29.5 | 1571.7 | 1.44 |
| 30 | 1589.1 | 1.45 |
| 30.5 | 1593.2 | 1.46 |
| 31 | 1597.3 | 1.46 |
| 31.5 | 1608.5 | 1.46 |
| 32 | 1612 | 1.46 |

Se procedió a realizar gráficas del voltaje AC generado, frente al voltaje que se alimentó a las bobinas de campo y la intensidad de corriente de la fuente DC, como se observa a continuación en las figuras 3.8 y 3.9 respectivamente.

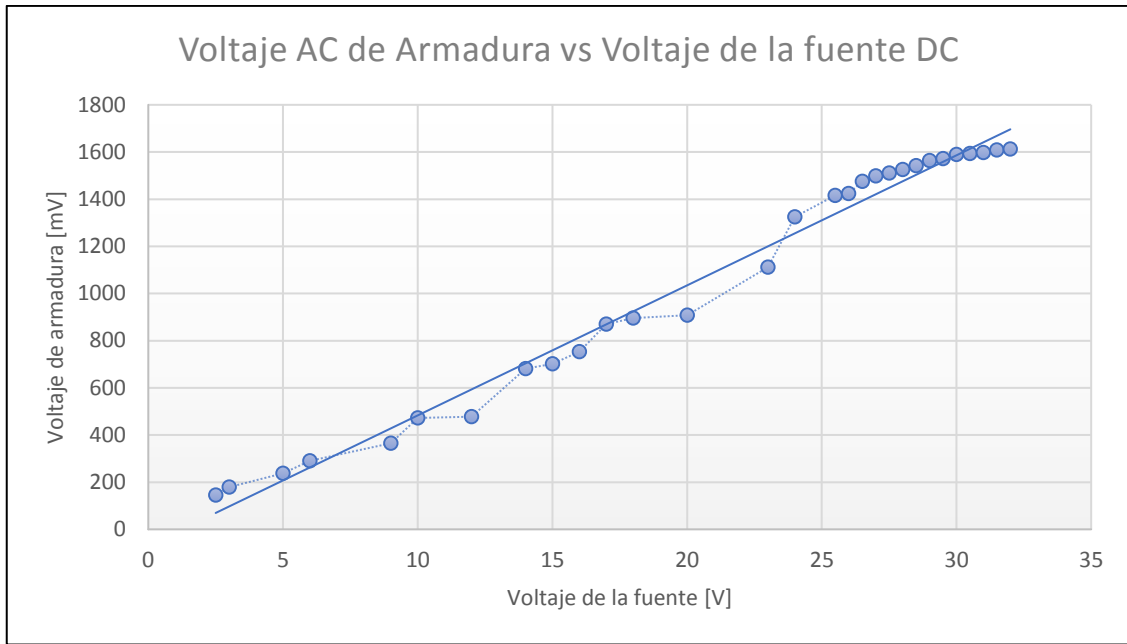


Figura 3.8 Voltaje AC de armadura vs Voltaje de la fuente del generador.

Fuente: Autores

Se registró un voltaje pico de 1.6 V con una velocidad media angular de entrada en la polea motriz de 200 rpm.

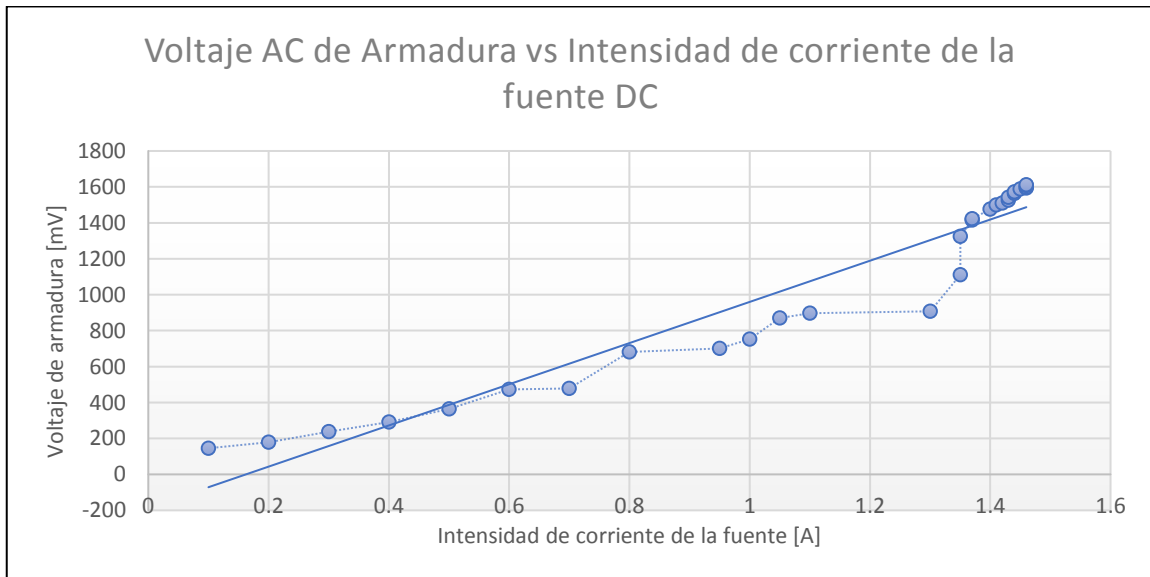


Figura 3.9 Voltaje AC de Armadura vs Intensidad de corriente de la fuente.

Fuente: Autores

En las gráficas se ha observado una misma tendencia, donde el voltaje AC en la armadura generado por la máquina eléctrica, es directamente proporcional al

voltaje e intensidad de corriente suministrada a las bobinas de campo por la fuente DC.

3.3 Análisis del generador de corriente directa

3.3.1 Resultados con osciloscopio del generador DC.

Para obtener voltaje DC, se conectaron las escobillas en las delgas de cobre del rotor. Se obtuvo un voltaje RMS de 478 mV y un voltaje pico de 1.1 V aproximadamente como se observa en la figura 3.10 que se muestra a continuación.

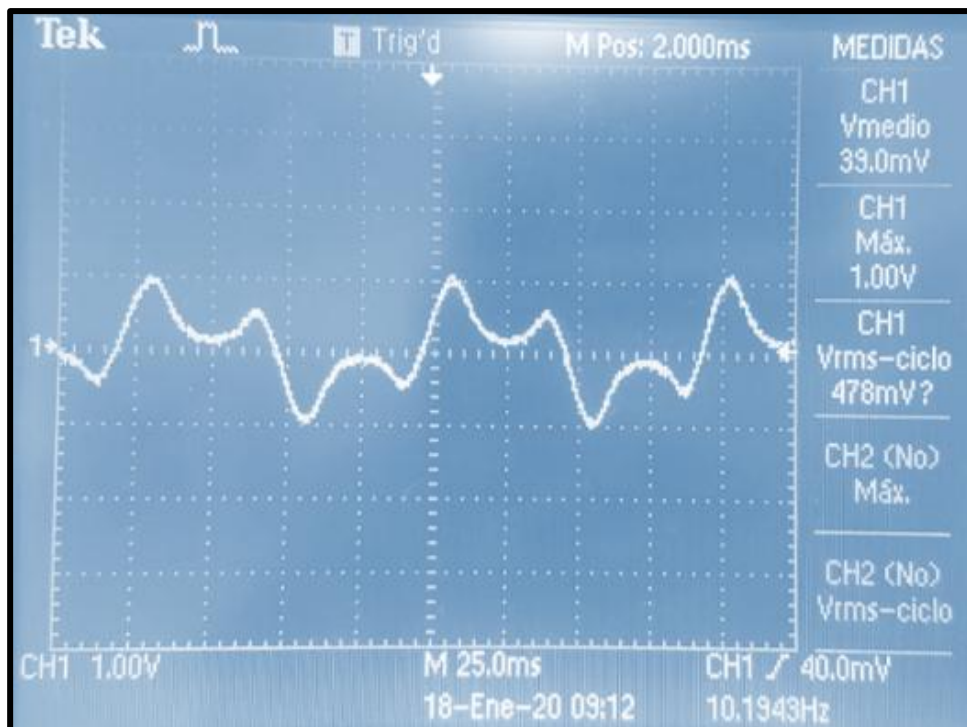


Figura 3.10 Voltaje DC en la armadura [V] vs tiempo[s] del generador.

Fuente: Autores

Se conectaron las bobinas de campo en serie con una fuente de voltaje DC y se registró una velocidad media en la polea motriz de 196 rpm.

3.3.2 Resultados con multímetro digital del generador DC.

Se realizaron pruebas al prototipo actuando como generador DC, donde se registró el voltaje de la fuente DC, el voltaje de la armadura y la intensidad de

corriente de la fuente DC. Las bobinas del estator se conectaron en serie con la fuente y los terminales de las escobillas DC se las colocaron en los bornes del multímetro digital para las pruebas experimentales.

Tabla 3.2 Pruebas con multímetro digital del generador DC.

Fuente: Autores

| <i>Pruebas con multímetro digital</i> | | |
|---------------------------------------|------------------------------|---|
| Voltaje Fuente [V] | Voltaje Armadura [mv] | Intensidad de corriente de la fuente [A] |
| 3 | 127 | 0.2 |
| 6 | 154 | 0.3 |
| 8 | 309 | 0.3 |
| 10 | 418 | 0.4 |
| 11 | 475 | 0.45 |
| 12 | 524 | 0.5 |
| 13 | 565 | 0.51 |
| 14 | 612 | 0.55 |
| 15 | 727 | 0.6 |
| 16 | 768 | 0.65 |
| 17 | 803 | 0.7 |
| 18 | 905 | 0.75 |
| 19 | 1050 | 0.8 |
| 20 | 1173 | 0.85 |
| 21 | 1207 | 0.9 |
| 22 | 1266 | 0.91 |
| 23 | 1207 | 0.95 |
| 24 | 1229 | 0.98 |
| 25 | 1271 | 1 |
| 26 | 1286 | 1.11 |
| 27 | 1291 | 1.15 |
| 28 | 1305 | 1.19 |
| 29 | 1338 | 1.2 |
| 30 | 1410 | 1.22 |
| 32 | 1453 | 1.23 |

Se observa en la figura 3.11 el mayor voltaje DC registrado de 1.4 V, con un voltaje en las bobinas del estator 32 V y una intensidad de corriente a través del circuito eléctrico de 1.2 A aproximadamente.

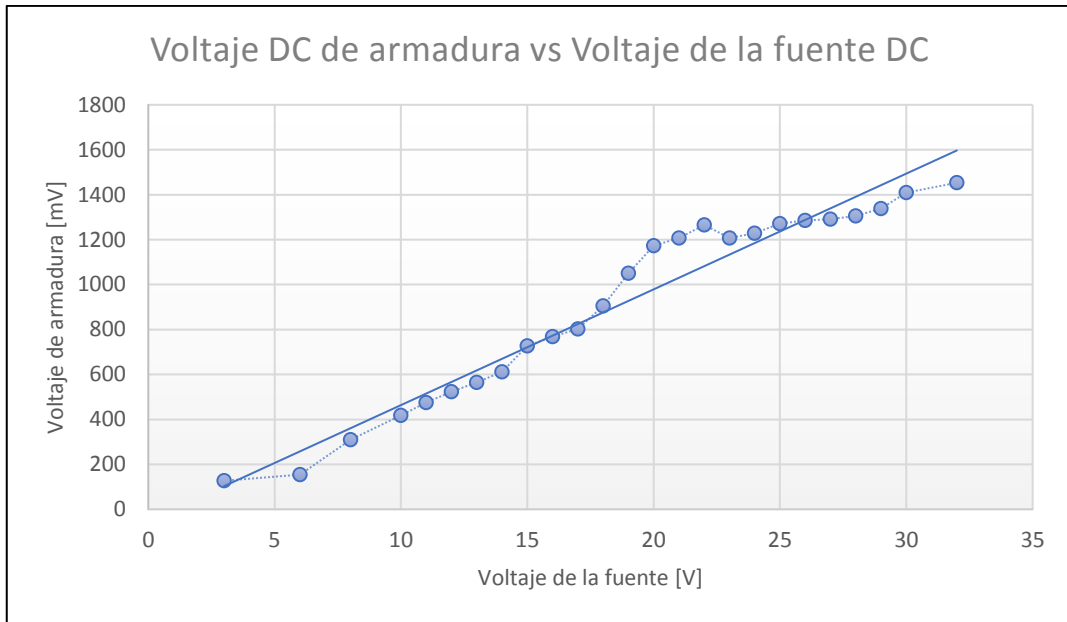


Figura 3.11 Voltaje DC de armadura vs Voltaje de la fuente del generador.

Fuente: Autores

En las figuras 3.11 y 3.12 se observa el mismo comportamiento ascendente, debido que a medida que se aumenta el voltaje y la intensidad de corriente suministrada, se registró un aumento del voltaje inducido en la armadura.

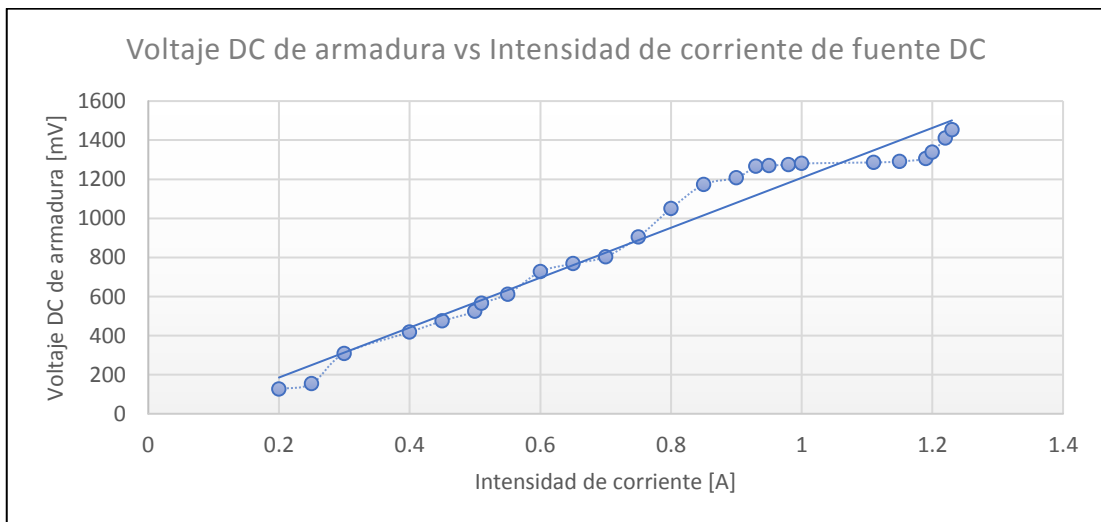


Figura 3.12 Voltaje DC de Armadura vs Intensidad de corriente de la fuente DC.

Fuente: Autores

3.4 Análisis del motor de corriente directa

3.4.1 Resultados con multímetro digital DC

Para realizar las pruebas de la máquina eléctrica actuando como motor eléctrico, se conectaron las bobinas de campo y armadura en serie con una fuente DC, para generar un campo magnético constante en el circuito magnético comprendido por dos polos en el estator y en el rotor.

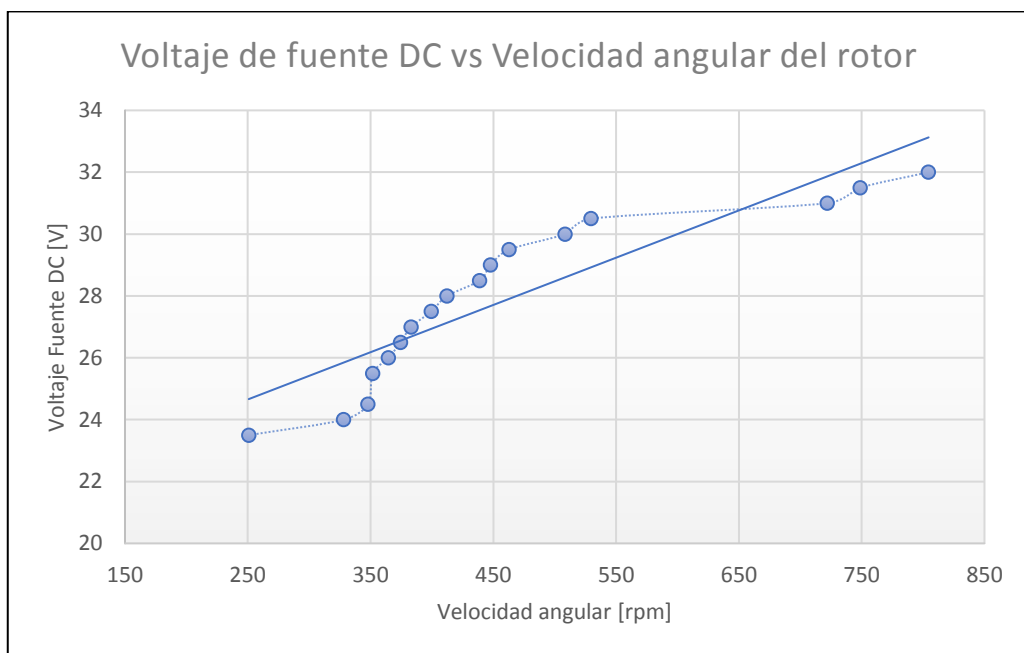


Figura 3.13 Voltaje de fuente DC vs Velocidad angular del rotor.

Fuente: Autores

En la figura 3.13 se puede observar como la velocidad angular del rotor, es directamente proporcional al voltaje DC de la fuente, donde la máxima velocidad angular del motor fue de 800 rpm aproximadamente, registrada por un tacómetro digital.

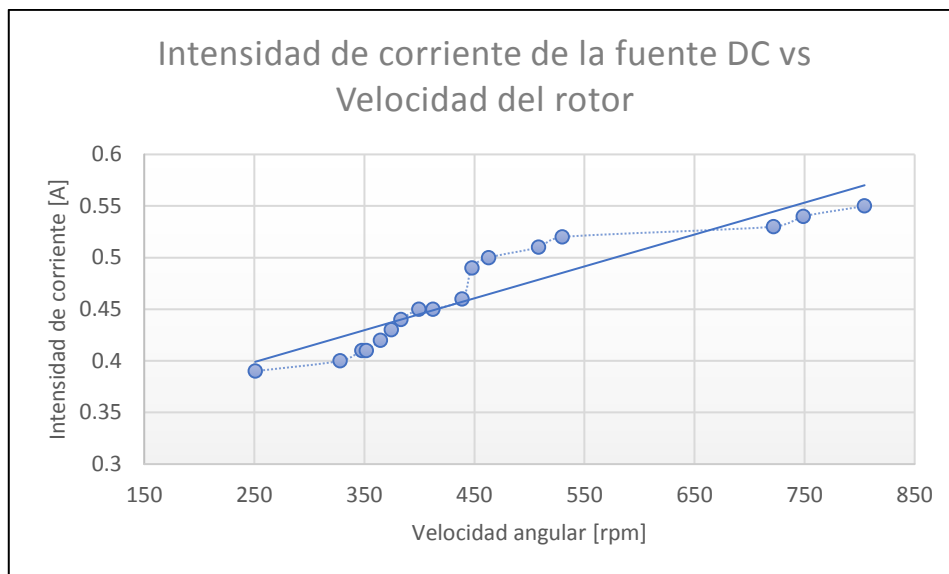


Figura 3.14 Intensidad de corriente de la fuente DC vs Velocidad angular del rotor.

Fuente: Autores

La figura 3.14 posee una tendencia ascendente que indica como la velocidad del motor aumenta, al momento de elevar la intensidad de corriente en el circuito eléctrico del sistema.

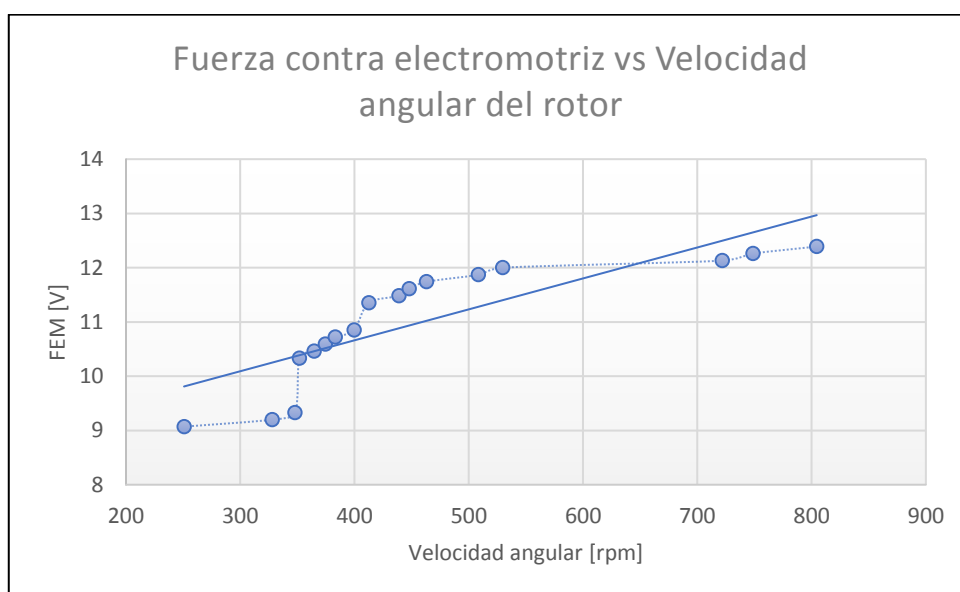


Figura 3.15 Fuerza contra electromotriz del motor vs velocidad angular.

Fuente: Autores

En la figura 3.15 se observa que la fuerza contra electromotriz generado en la armadura es directamente proporcional a la velocidad angular del motor DC.

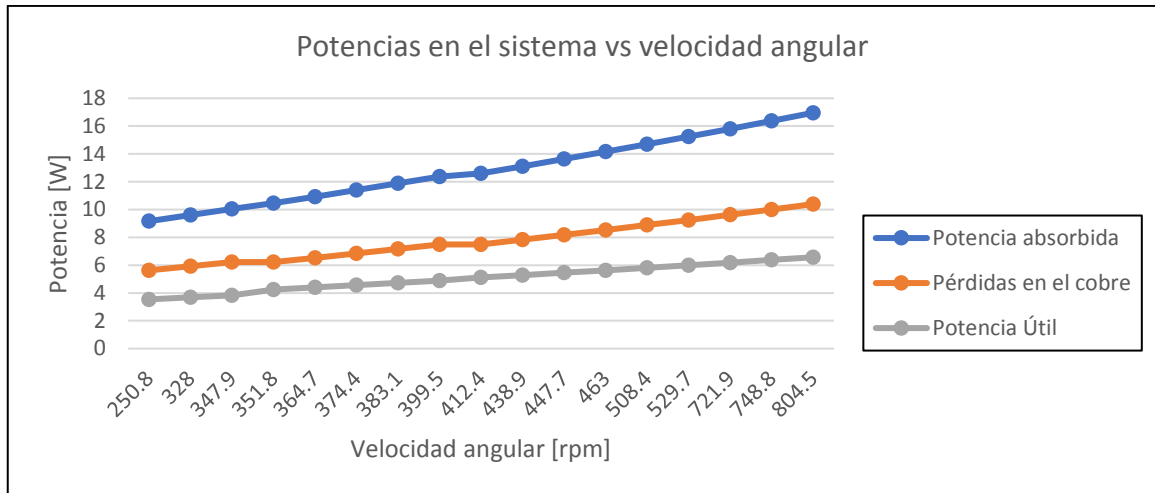


Figura 3.16 Potencia absorbida, útil y pérdidas vs Velocidad angular.

Fuente: Autores

En la figura 3.16 muestra las pérdidas del sistema en el devanado de cobre en las bobinas de campo y de armadura, además de mostrar la potencia útil del motor DC comparado con la velocidad del rotor. Se obtuvo la potencia máxima de consumo por la máquina de 16.5 W, operando a 800 rpm.

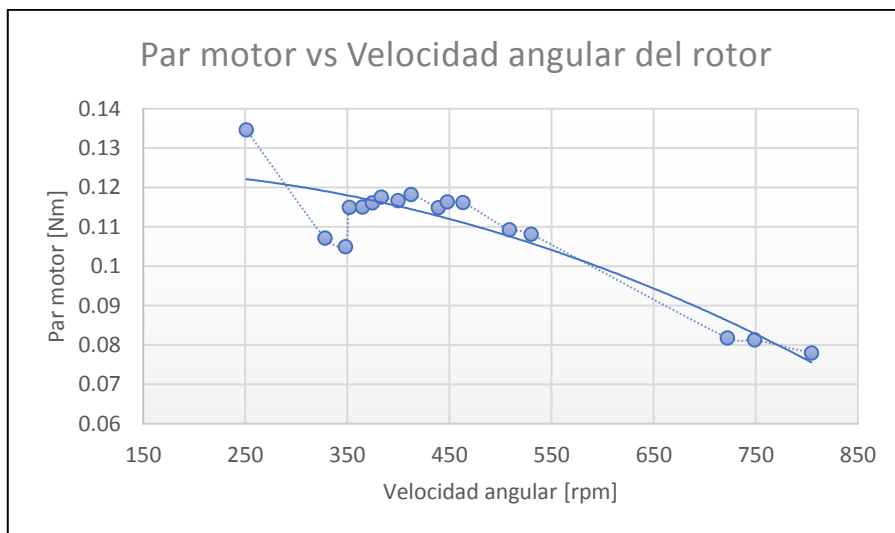


Figura 3.17 Par motor vs velocidad angular.

Fuente: Autores

Se obtuvo el torque máximo con una velocidad de 375 rpm aproximadamente, como se observa en la figura 3.17. El par motor de la máquina es inversamente proporcional a su velocidad angular, donde su menor torque aparece en su máxima rapidez.

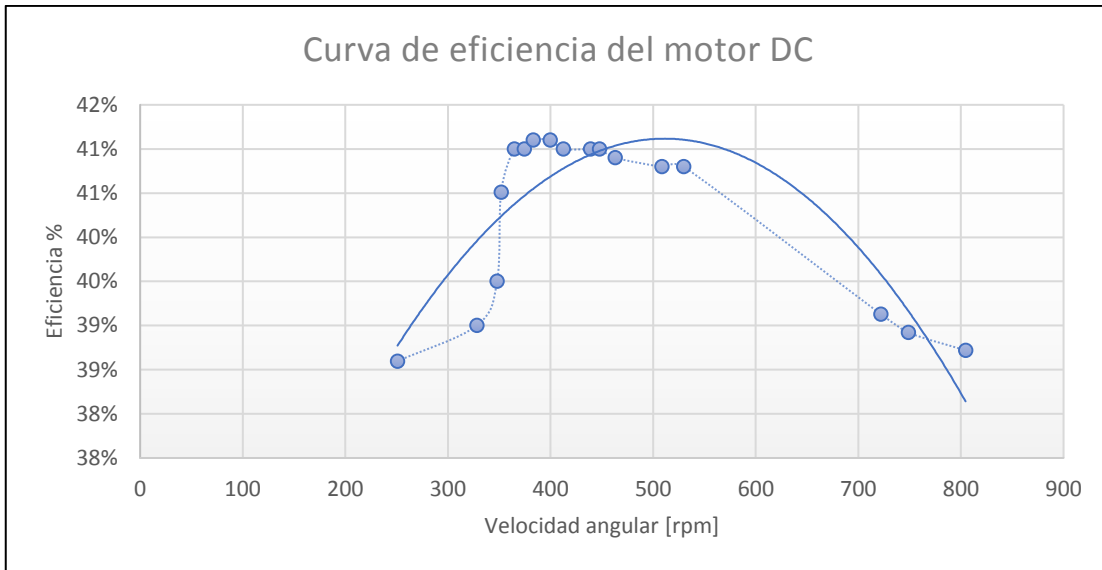


Figura 3.18 Curva de eficiencia del motor DC

Fuente: Autores

En la figura 3.18 observamos una curva de eficiencia con un comportamiento ascendente desde los 250 rpm hasta 450 rpm aproximadamente, y una curva exponencial negativa hasta los 800 rpm. La máxima eficiencia se obtiene operando al motor DC a 450 rpm, con un voltaje suministrado de 28.2 V y una intensidad de corriente de 0.5 A.

3.5 Análisis de costo

En el proceso de diseño que se encuentra en el Capítulo 2, se realizó la selección y cotización de los materiales necesarios para la construcción del prototipo diseñado. El diseño del eje se encontró limitado por el diámetro interior de los anillos deslizantes para generador y motor AC, debido que se reutilizó este componente de un alternador de un automóvil.

Tabla 3.3 Costos de materiales.

Fuente: Autores

| Materiales | Descripción | Cantidad | Costo U. | Costo T. |
|-----------------------------------|---------------------------------|----------|--------------|-----------------|
| Pintura | Pintura anticorrosiva gris mate | 1 | \$ 5.50 | \$ 5.50 |
| Perno acero inoxidable | 3/8 in | 2 | \$ 0.12 | \$ 0.24 |
| Placa Acero Negro A36 | 30x60x2 mm | 7 | \$ 0.75 | \$ 5.25 |
| Tuerca acero inoxidable | 3/8 in | 8 | \$ 0.08 | \$ 0.64 |
| Placa de acero inoxidable | Acero 304 40x3x150 mm | 1 | \$ 2.50 | \$ 2.50 |
| Disco de freno | Disco de freno auto | 1 | \$ 5.00 | \$ 5.00 |
| Láminas de cobre | 10x10x1 mm | 2 | \$ 0.05 | \$ 0.10 |
| Bobina de hilo de cobre esmaltado | Rollo AWG 24 | 2 | \$ 8.00 | \$ 16.00 |
| Anillos de presión | 3/8 in | 4 | \$ 0.03 | \$ 0.12 |
| Cable Flex | 3 Metros de cable 14 AWG | 3 | \$ 0.75 | \$ 2.25 |
| Conectores banana macho | Conectores banana negro y rojo | 10 | \$ 0.25 | \$ 2.50 |
| Conectores banana hembra | Conectores banana negro y rojo | 10 | \$ 0.20 | \$ 2.00 |
| Banda polycord | Banda redonda TPU | 1 | \$ 3.00 | \$ 3.00 |
| Base de madera | Aglomerado 15 mm x 20 mm ø | 1 | \$ 2.50 | \$ 2.50 |
| Multímetro | Digital | 1 | \$ 6.00 | \$ 6.00 |
| Espárragos | 1/2 in | 1 | \$ 3.50 | \$ 3.50 |
| Cilindro acero 304 | 150 mm x 25 mm ø | 1 | \$ 3.00 | \$ 3.00 |
| Rodamiento radial | NTN 6006lu | 1 | \$ 1.50 | \$ 1.50 |
| Rodamiento axial | NTN 51103 | 1 | \$ 9.50 | \$ 9.50 |
| | | | Total | \$ 71.10 |

Los carbones de una licuadora fueron reutilizados para las escobillas del generador y motor de corriente continua. La fase de cotización y selección de los materiales duró 2 semanas.

Tabla 3.4 Costo de construcción del prototipo.

Fuente: Autores

| Proceso | Descripción del proceso | Cantidad | Costo U. | Costo T. |
|--------------------|--|----------|--------------|------------------|
| Machueado | Machueado en el disco de freno | 4 | \$ 8.00 | \$ 32.00 |
| Mecanizado del eje | Torneado, refrentado y cilindrado | 1 | \$ 25.00 | \$ 25.00 |
| Soldadura | Soldadura de placas de núcleos de estator y rotor | 5 | \$ 3.00 | \$ 15.00 |
| Taladrado | Agujeros en disco de freno y placas de la estructura | 6 | \$ 2.00 | \$ 12.00 |
| Impresión en 3D | Impresión de porta carbones AC Y DC, carretes y poleas | 4 | \$ 5.00 | \$ 20.00 |
| | | | Total | \$ 104.00 |

La construcción y ensamble del prototipo tuvo una duración de dos semanas, donde se trató de economizar para cumplir el requerimiento del cliente de diseñar un prototipo de bajo costo.

3.6 Análisis de disponibilidad

En la sección de investigación Benchmarking de motores eléctricos didácticos en el Capítulo 1, los precios de venta de los productos rondan los \$300. En la sección de análisis de costo se puede observar que se necesitan \$175 de inversión para implementar el prototipo en el laboratorio de Electrotecnia, siendo un precio viable y competitivo, frente a máquinas importadas del mercado internacional.

3.7 Objetivos de desarrollo sostenible

El prototipo está orientado a cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible como se observa en la figura 3.19, de Acción por el clima y Energía asequible y no contaminante. Cumple con el cuarto y décimo tercer objetivo de los ODS, debido a que se diseñó un artefacto capaz de utilizar energía limpia para su funcionamiento, además de que ciertos elementos usados en su construcción fueron reutilizados, contribuyendo al cuidado del medio ambiente.



Figura 3.19 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Fuente: Organización de las Naciones Unidas

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El análisis de elementos finitos en Inventor nos indica que el eje y la pequeña estructura de transmisión dinámica están sobredimensionadas para las aplicaciones didácticas del motor, debido a que sus factores de seguridad mínimos sobrepasan la unidad.
- El sistema de transmisión dinámica implementado cumple con su objetivo de multiplicador de velocidad, debido a que la velocidad que se produce en el rotor es 4 veces mayor a la velocidad angular de la polea motriz, es decir, la generación de voltaje AC o DC, no toma mucho esfuerzo físico por parte del operador. El voltaje generado AC y DC es bajo, debido a la longitud del entrehierro escogido.
- La estructura del estator seleccionada ayudó a evitar las excesivas vibraciones que generan este tipo de máquinas, teniendo sólo pérdidas de potencia en el sistema considerables por disipación de calor en las bobinas, por la existencia de fricción de los anillos deslizantes y delgas DC con los carbones como se observa cuantificado en el Apéndice A.
- Para la fácil manipulación de operación del prototipo, se diseñó el rotor de tal forma que sea capaz de poseer en simultáneo, anillos deslizantes para operar con corriente alterna y delgas para el funcionamiento de la máquina con corriente directa.
- Los porta carbones y bornes eléctricos se fabricaron con la finalidad de su fácil intercambio, para transformar de motor eléctrico a generador eléctrico. Además, el prototipo diseñado cuenta con la facilidad de conectar las bobinas de campo y armadura en serie o paralelo.

4.2 Recomendaciones

- Los diámetros de las secciones del eje se pueden ajustar a diámetros más pequeños, siempre y cuando los elementos acoplados permitan dicha reducción. Esto reduciría la cantidad de material e inercia del rotor, permitiendo un mejor arranque.
- Se pueden fabricar los elementos de porta carbones, colector de delgas y anillos deslizantes de modo que se ajusten a la reducción de los diámetros establecidos en el eje del rotor.
- Se recomienda utilizar chapa magnética para la construcción de los núcleos de las bobinas de campo y armadura para eliminar las corrientes de Foucault, evitando la generación de calentamiento en los núcleos.
- Es necesario reducir el entrehierro de 1 a 2 mm para elevar la inducción magnética en la armadura, con la finalidad de mejorar la eficiencia de la máquina operando como generador AC o DC.
- El motor eléctrico DC tendrá velocidades considerables para un rápido desgaste en el rodamiento axial y radial, por lo que se recomienda aceitar estos elementos antes de que entre en funcionamiento.
- Para aumentar la eficiencia del generador DC y AC diseñado, se recomienda implementar un motor de 1200 rpm conectada a la polea motriz, debido a que el voltaje inducido es directamente proporcional a la velocidad angular de la armadura.
- Se recomienda colocar los porta carbones AC en dirección contraria a la fuerza de tensión de la banda policord al momento de operar la máquina como generador AC.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrado Rodrigo, J. (2011). *El generador de Inducción Autoexcitado*. Barcelona : Marcombo.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. McGraw-Hill.
- C.A., I. B. (11 de Noviembre de 2019). *AISI 1045*. Obtenido de <https://www.ivanbohman.com.ec/product-detail/760-c45-aisi-1045/>
- Chapman, S. (2012). *Máquinas eléctricas quinta edición*. McGrawHill.
- Cheng, D. (1993). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería* . Pearson .
- Dipac. (10 de Noviembre de 2019). *Eje AISI 1018 transmisión*. Obtenido de <http://www.dipacmanta.com/aisi-1018-transmision>
- Group, M. (2018). *PIEZAS DEL FRENO: FRICCIÓN* . Cologne .
- Harper, E. (2006). *El ABC de las máquinas eléctricas*. Ciudad de México: Limusa.
- Hornermann, M. (1984). *Electrotecnia de Potencia* . Reverté.
- Juvinall, R., & Marshek, K. (2006). *Fundamentals of Machine Component Design*. John Wiley & Sons.
- Kley, F., Lerch, C., & Dallinger, D. (2011). New business models for electric cars—A holistic approach. *Energy Policy*, 1.
- License, A. F. (2019 de Abril de 21). *Finite Element Method Magnetics*. Obtenido de <http://www.femm.info/wiki/Download>
- Manzano, J. (2007). *Electricidad I. Teoría Básica y Prácticas*. Marcombo .
- NTN. (2017). *Catálogo General*. Obtenido de https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-04/ntn-snr_-_general_list_-_technical_characteristics_es.pdf
- S.A, T. E. (20 de Octubre de 2013). *Sistema para enseñanza de constitución y funcionamiento de máquinas eléctricas rotativas (a muy baja tensión) LD - LD VE1.2.4 y accesorios*. Obtenido de <https://tecnoedu.com/Electrotecnia/LDVE124yaccesorios.php#LD56322>
- Senner, A. (1992). *Principios de Electrotecnia* . Reverte.
- TANSO, T. (13 de Enero de 2020). *Escobilla de carbón*. Obtenido de https://www.toyotanso.com/mx/es/Products/Electrical_carbon/

Technology, M. I. (s.f.). *Circuitos magnéticos y transformadores*. Massachusetts :
Reverté.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Cálculos

❖ Diseño mecánico

▪ Diseño del eje

Parámetros de entrada:

- **Material:** Acero AISI 1020 Rolado en frío; $S_{ut}=455\text{MPa}$, $S_y=290\text{MPa}$
- **Temperatura de trabajo:** Ambiente
- **Superficie:** Maquinado
- **Tipo de carga:** Flexión y torsión
- **Radio mínimo:** 10mm
- **Radio máximo:** 25mm
- **Confiabilidad:** 90%

Para calcular los diámetros recomendados en las secciones del eje, primero se realizó un diagrama de cuerpo libre de este con todas las fuerzas aplicadas sobre el en la funcionalidad más crítica, generación de energía AC.

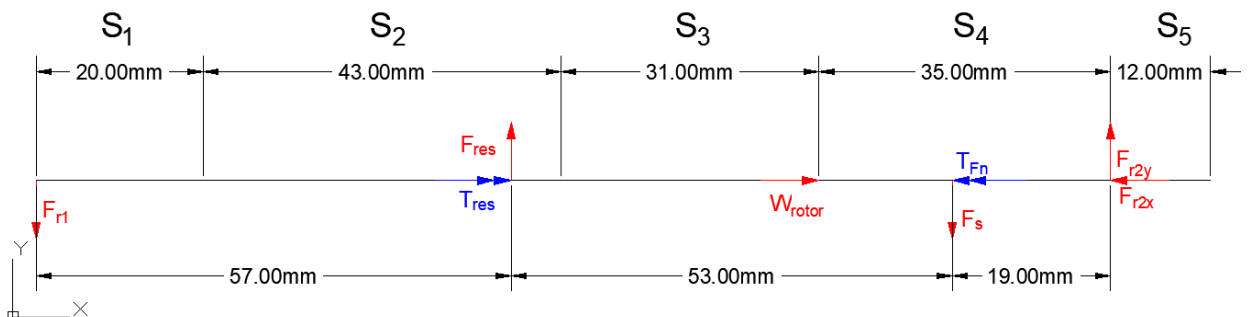


Figura A1. Diagrama de cuerpo libre del eje en AutoCAD.

Fuente: Autores.

Las fuerzas en la polea por recomendación de fabricantes nos dicen que la tensión en la parte tensada de esta es 5 veces mayor que la tensión en la parte floja, por lo tanto, con esto se determinó la fuerza que provoca flexión en el eje y a su vez la torsión como se muestra a continuación.

$$F_n = F_1 - F_2$$

$$F_s = F_1 + F_2$$

$$\text{Si, } F_{templada} = 5F_{suelta}$$

$$F_s = 1.5F_n$$

$$T = F_n \frac{d_{polea}}{2}$$

$$\sum M_{r1} = 0$$

$$F_{res} \left(\frac{57}{1000} \right) - F_s \left(\frac{110}{1000} \right) + F_{r2y} \left(\frac{129}{1000} \right) = 0$$

$$0.057F_{res} - 0.11F_s + 0.129F_{r2y} = 0$$

$$F_{r2y} = \frac{0.11F_s - 0.057F_{res}}{0.129}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{res} - F_s + F_{r2y} - F_{r1y} = 0$$

$$F_{r1y} = F_{res} - F_s + \frac{0.11F_s - 0.057F_{res}}{0.129}$$

$$F_{r1y} = \frac{0.072F_{res} - 0.019F_s}{0.129}$$

Si, la fuerza de los resortes del conmutador AC es $F_{res} = 1.2N$ debido a que su constante k es $0.12 N/mm$, y la medida de compresión de diseño es de $5mm$; mientras que $F_s = 3N$ corresponde a la fuerza flectora que provoca la acción de la banda en la polea, medida mediante un dinamómetro.

Por lo tanto, las fuerzas en los apoyos del eje son:

$$F_{r2y} = 2.02N$$

$$F_{r1y} = 0.23N$$

De lo cual, se obtienen los gráficos de cortante y momento flector.

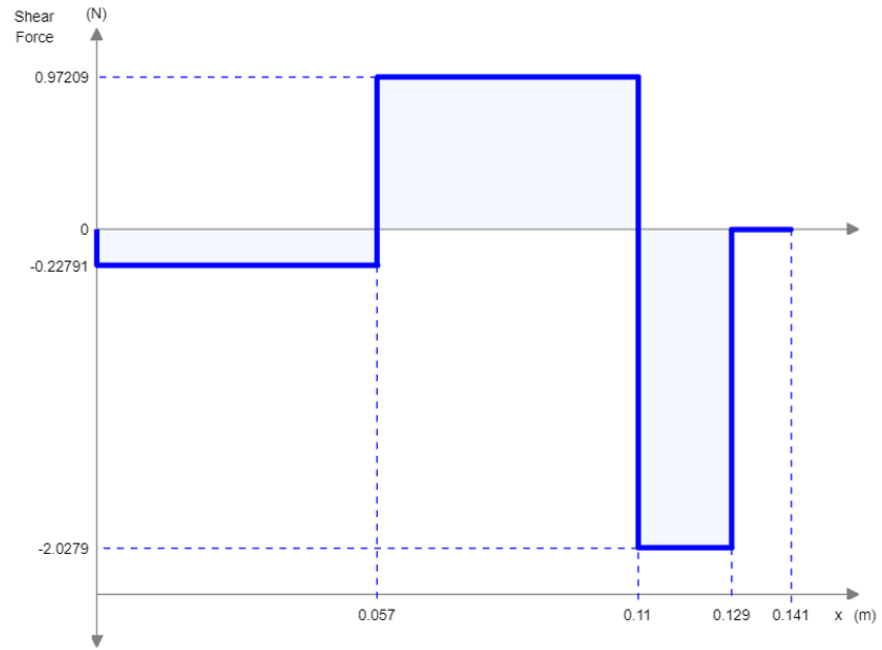


Figura A2. Diagrama de fuerza cortante del eje.

Fuente: Autores.

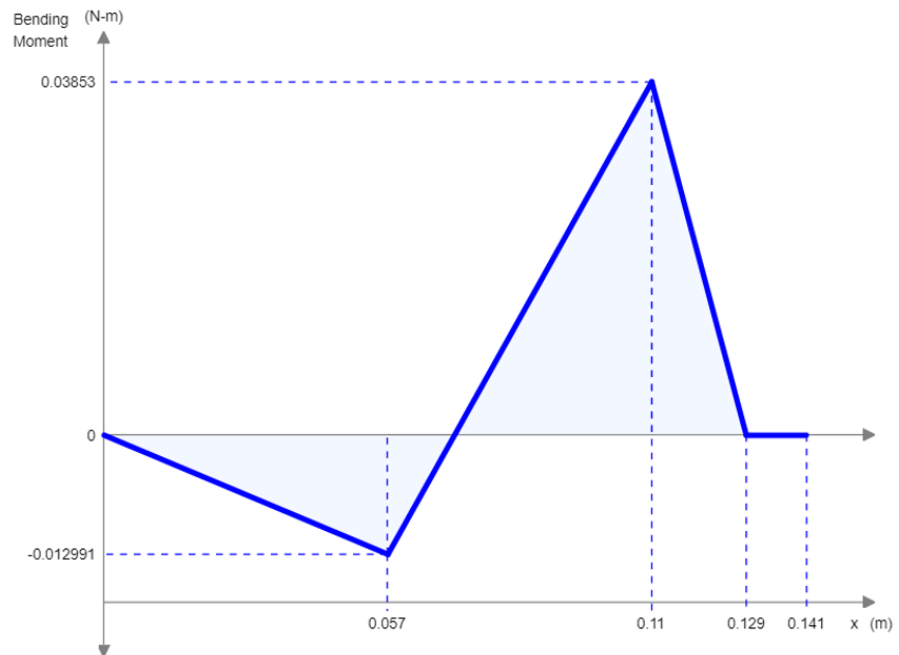


Figura A3. Diagrama momento flector del eje.

Fuente: Autores.

Luego se procedió a obtener todos los factores necesarios para usar la fórmula de Goodman y así obtener los diámetros correspondientes a cada sección.

$$S_f = C_{CA} C_{SU} C_{TA} C_{TE} C_R [0.5 S_{ut}]$$

El factor de carga es 1, debido a la combinación de cargas de flexión y torsión en el eje; el factor de superficie es 0.79 según la gráfica 4-26 (Norton, 2011); el factor de tamaño es 1 al iniciar el cálculo, de ser necesario será corregido luego con el diámetro obtenido; el factor de temperatura es de 1 de acuerdo con la Ec. 4.7f (Norton, 2011) y por último el factor de confiabilidad para 90% es 0.897 de acuerdo a la tabla 4-4 (Norton, 2011).

Por lo tanto,

$$S_f = (1)(0.79)(1)(1)(0.897)[0.5(455MPa)]$$

$$S_f = 161.2MPa$$

Para el cálculo de los coeficientes de concentración de esfuerzos por recomendación el k_t y el k_{ts} serán de 3,5 y 2 respectivamente para el caso de hombros en ejes, por lo tanto, los concentradores de esfuerzo para fatiga se determinan con las siguientes formulas:

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \text{ Flexión}$$

$$k_{fs} = 1 + q_s(k_{ts} - 1) \text{ Torsión}$$

Con la ayuda de la figura 4-36 (Norton, 2011) se puede determinar el parámetro q , donde necesitamos la resistencia ultima a la tensión del material y radio de muesca, que para el caso de hombros es de 0.01", de donde se obtiene $q = 0.5$ y $q_s = 0.57$ entonces $k_f = 2.25$ y $k_{fs} = 1.57$

Por último, se requiere el coeficiente de concentración de esfuerzo medio para torsión k_{fsm} , el cual según la ecuación 4.17 (Norton, 2011) es igual al k_{fs} debido a que $\sigma_{m\acute{a}x} < S_y$.

$$d = \left[\frac{32N_f}{\pi} \left(\frac{\sqrt{(k_f M_a)^2 + \frac{3}{4}(k_{fs} T_a)^2}}{S_f} + \frac{\sqrt{(k_{fm} M_m)^2 + \frac{3}{4}(k_{fsm} T_m)^2}}{S_{ut}} \right) \right]^{1/3}$$

Diámetro S1

$$d = \left[\frac{32 * 2.5}{\pi} \left(\frac{\sqrt{(2.25 * 4.6 * 10^{-3})^2}}{161.2 * 10^6} + \frac{\sqrt{\frac{3}{4} (1.57 * 0.033)^2}}{290 * 10^6} \right) \right]^{1/3}$$
$$d = 1.77mm$$

Diámetro S2

$$d = \left[\frac{32 * 2.5}{\pi} \left(\frac{\sqrt{(2.25 * 0.013)^2}}{161.2 * 10^6} + \frac{\sqrt{\frac{3}{4} (1.57 * 0.033)^2}}{290 * 10^6} \right) \right]^{1/3}$$
$$d = 2.05mm$$

Diámetro S3

$$d = \left[\frac{32 * 2.5}{\pi} \left(\frac{\sqrt{(2.25 * 0.023)^2}}{161.2 * 10^6} + \frac{\sqrt{\frac{3}{4} (1.57 * 0.033)^2}}{290 * 10^6} \right) \right]^{1/3}$$
$$d = 2.29mm$$

Diámetro S4

$$d = \left[\frac{32 * 2.5}{\pi} \left(\frac{\sqrt{(2.25 * 0.04)^2}}{161.2 * 10^6} + \frac{\sqrt{\frac{3}{4} (1.57 * 0.033)^2}}{290 * 10^6} \right) \right]^{1/3}$$
$$d = 2.63mm$$

Diámetro S5

$$d = \left[\frac{32 * 2.5}{\pi} \left(\frac{\sqrt{(2.25 * 0)^2}}{161.2 * 10^6} + \frac{\sqrt{\frac{3}{4} (1.57 * 0.033)^2}}{290 * 10^6} \right) \right]^{1/3}$$
$$d = 1.58mm$$

Una vez obtenidos los diámetros recomendados con un factor de seguridad de 2.5, nuestro diseño se basará en diámetros superiores a estos con lo cual el factor de seguridad será mucho más alto al planteado.

- **Selección del rodamiento**

Peso del eje: 0.3 kg Inventor

Peso del rotor: 0.11 kg Inventor

Peso del alambre:

La densidad lineal del alambre calibre 24 AWG es de 1,82g/m; La densidad lineal del alambre calibre 24 AWG es de 1,82g/m; en el rotor se realizaron 700 vueltas lo cual es alrededor de 49m de alambre, por lo tanto, el peso correspondiente a este es de 0,09 kg aproximadamente.

$$\sum F_x = 0$$

$$W_{total/eje} - F_{normal/rod} = 0$$

$$F_{normal/rod} = 9.8(0.3 + 0.11 + 0.09) = 4.9N$$

Por lo tanto,

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left[\frac{C_a}{P_a} \right]^p$$

$$C_a = \left[\frac{60 * 2000 * 4000}{10^6} \right]^{1/3} * 4.9$$

$$C_a = 38.4 N$$

Con este resultado utilizamos el catálogo NTN en el apartado de rodamientos axiales y tomando en consideración el diámetro de la sección donde se ubicará el rodamiento, seleccionamos el que soporte dicha carga.

Por lo tanto, el rodamiento seleccionado es axial con denominación NTN 51103.

Este rodamiento cumple con las necesidades de trabajo del rotor del motor, de hecho, tiene una capacidad mucho mayor, ya que están diseñados para motores industriales.

- ❖ **Diseño Electromagnético**

- Densidad en el entrehierro

$$g = 0.42 T$$

- Fuerza magnetomotriz necesaria

$$F_{mm} = \frac{gxB}{\mu_0}$$

$$F_{mm} = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0.42 \text{ T}}{4\pi \times 10^{-7}} = 1671 \text{ Av}$$

- Número de espiras en el inducido

$$F_{mm} = NI$$

$$N = \frac{1671 \text{ Av}}{2(1.06 \text{ A})} \approx 780 \text{ vueltas}$$

- Área transversal

Se calculó el área transversal del núcleo de la bobina inducida de sección transversal escogida de 6x30 mm.

$$A = l_1 \times l_2$$

$$A = 6 \times 10^{-3} \text{ m} \times 30 \times 10^{-3} \text{ m} = 1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

- Flujo magnético en el inducido

$$\varphi = NxBxA$$

$$\varphi = 780 \times 0.42 \text{ T} \times 1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\varphi = 0.052 \text{ wb}$$

Devanado bobinas de campo.

Número de vueltas= 700

- Diámetro nominal incluido el aislamiento.

$$D_i = D \times \text{factor de esmaltado}$$

$$D_i = 0.5106 \times 1.1 = 0.5616 \text{ mm}$$

- Vueltas por capa

Altura del carrete = 63 mm

$$\text{Vueltas por capa} = \text{Altura del carrete} / D_i$$

$$\text{Vueltas por capa} = \frac{63}{0.5616} \approx 112$$

- Número de Capas

$$\text{Números de capas} = \text{Número de vueltas} / \text{vueltas por capa}$$

$$\text{Número de capas} = \frac{700}{112} = 6.25 \approx 6$$

- Espesor de la bobina

$$\text{Espesor bobina} = \text{Número de capas} / D_i$$

$$\text{Espesor bobina} = 6 \times 0.5616 \text{ mm} = 3.3696 \text{ mm}$$

- Perímetro del núcleo

$$P = 2L_1 + 2L_2$$

$$P = 2(20 \times 10^{-3}) + 2(30 \times 10^{-3}) = 0.1$$

- Longitud de cable

$$L_T = \text{Perímetro} * \text{Vueltas por capa} * \text{Número de capas}$$

$$L_T = 0.1 * 112 * 6 = 67.2 \text{ m}$$

- Área del cable conductor

$$S = \pi D^2 / 4$$

$$S = \pi (0.5106)^2 / 4 = 0.205 \text{ mm}^2$$

- Resistencia de bobinas de campo

$$R_{BC} = \rho \cdot L/S$$

$$R_{BC} = 0.0172 \Omega \text{mm}^2/\text{m} \cdot \frac{67.2\text{m}}{0.205\text{mm}^2} = 5.63\Omega$$

Devanado bobina de armadura.

- Vueltas por capa

Longitud útil del núcleo = 64 mm

$$\text{Vueltas por capa} = \text{Longitud útil del núcleo}/D_i$$

$$\text{Vueltas por capa} = \frac{64}{0.5616} \approx 114$$

- Número de Capas

$$\text{Número de capas} = \frac{700}{114} = 6.14 \approx 6$$

- Espesor de la bobina

$$\text{Espesor bobina} = 6 \times 0.5616 \text{ mm} = 3.3696 \text{ mm}$$

- Perímetro del núcleo de armadura

$$P = 2(6 \times 10^{-3}) + 2(30 \times 10^{-3}) = 0.072 \text{ m}$$

- Longitud de cable

$$L_T = \text{Perímetro} * \text{Vueltas por capa} * \text{Número de capas}$$

$$L_T = 0.072 * 114 * 6 = 49 \text{ m}$$

- Resistencia bobina de armadura

$$R_{BA} = 0.0172 \Omega \text{mm}^2/\text{m} \cdot \frac{49 \text{ m}}{0.205\text{mm}^2} = 4.11 \Omega$$

- Intensidad de corriente del sistema

$$i = \frac{V_{FE}}{R_{FE}} = \frac{12V}{11.26} = 1.06 A$$

- Fuerza contra electromotriz

Ley de voltaje de Kirchoff

$$V_{PN} - V_{FE} - V_{HG} - V_{BA} - \varepsilon = 0$$

$$V_{PN} - i \cdot R_{FE} - i \cdot R_{HG} - i \cdot R_{BA} - \varepsilon = 0$$

$$\varepsilon = 24V - [1.06 A * 5.63 \Omega] + [1.06 A * 5.63 \Omega] + [1.06 A * 4.11 \Omega]$$

$$\varepsilon = 24 V - 16.29 V = 7.74 V$$

- Voltaje de Armadura

$$V_{BA} = i \cdot R_{BA}$$

$$V_{BA} = 1.06 A * 4.11 \Omega = 4.35 V$$

- Velocidad angular del motor

$$\omega = E_b C / \varphi Z P$$

$$\omega = 4.35 V \times 1 / 0.052 \times 2 \times 1$$

$$\omega = 41.82 \frac{rad}{s} \times \frac{1 rev}{2\pi rad} \times \frac{60 s}{1 min} = 399 rpm$$

- Potencia absorbida

$$P = V_{PN} * i$$

$$P = 24 V * 1.06 A = 25.44 Watts$$

- Pérdidas por contacto de escobillas.

$$F_c = N_e * \mu_k$$

$$F_c = 1.2N * 0.2 = 0.24 N$$

$$\tau_c = F_c * r$$

$$\tau_c = 0.24 \text{ N} * 10 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.4 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

$$P_c = \tau_c * \omega$$

$$P_c = 2.4 \times 10^{-3} \text{ Nm} * 79.038 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0.18 \text{ Watts}$$

- Pérdidas en el cobre

$$P_{cu} = i^2 \cdot R_{FE} + i^2 \cdot R_{HG}$$

$$P_{cu} = 1.06^2 \cdot 4.11 + 1.06^2 \cdot 5.63$$

$$P_{cu} = 17.26 \text{ W}$$

- Potencia útil de la máquina

$$P_u = P - P_c - P_{cu}$$

$$P_u = 25.44 \text{ W} - 0.18 \text{ W} - 17.26 \text{ W} = 8.18 \text{ W}$$

- Rendimiento del motor

$$\eta = \frac{P_u}{P}$$

$$\eta = \frac{8.18 \text{ W}}{25.44 \text{ W}} \times 100 = 32 \%$$

- Par de la máquina

$$T_m = \frac{P_u}{\omega}$$

$$T_m = \frac{8.18 \text{ Watts}}{41.82 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 0.19 \text{ Nm}$$

Parámetros del generador

- Par producido

$$T_g = \frac{P_{ug}}{\omega_g}$$

$$T_g = \frac{20 \text{ W}}{50 \text{ rpm} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}} = 3.81 \text{ Nm}$$

- Fuerza electromotriz máxima

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

$$\varepsilon = NBS_A\omega_g \text{ sen}(\omega_g t)$$

$$\varepsilon = 700 * 0.42\text{T} * 1.8 \times 10^{-3} * 5.236 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 1$$

$$\varepsilon = 2.77 \text{ V}$$

APÉNDICE B

Simulación Magnética

Campo magnético en el entre hierro

Para el análisis del campo magnético producido por las bobinas inductoras en el entre hierro, se utilizó el software Femm (Finite Element Method Magnetics) versión 4.2, donde se escogió el material del estator, los núcleos de las bobinas inductoras, el material del núcleo de la bobina inducida, el amperaje de operación y se especificó calibre del alambre.

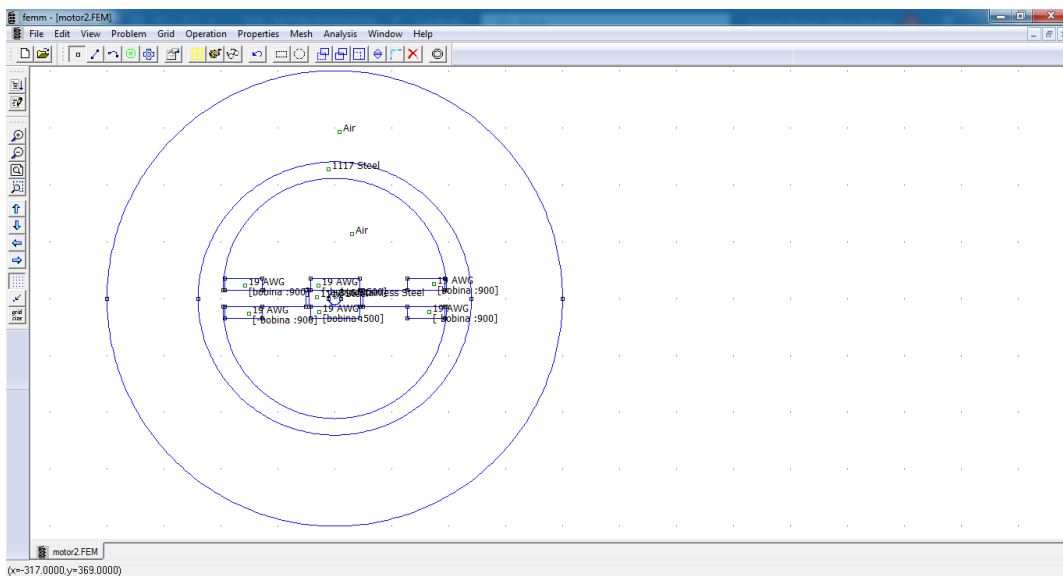


Figura B1. Esquema magnético del motor-generator en software Femm.

Fuente: Autores.

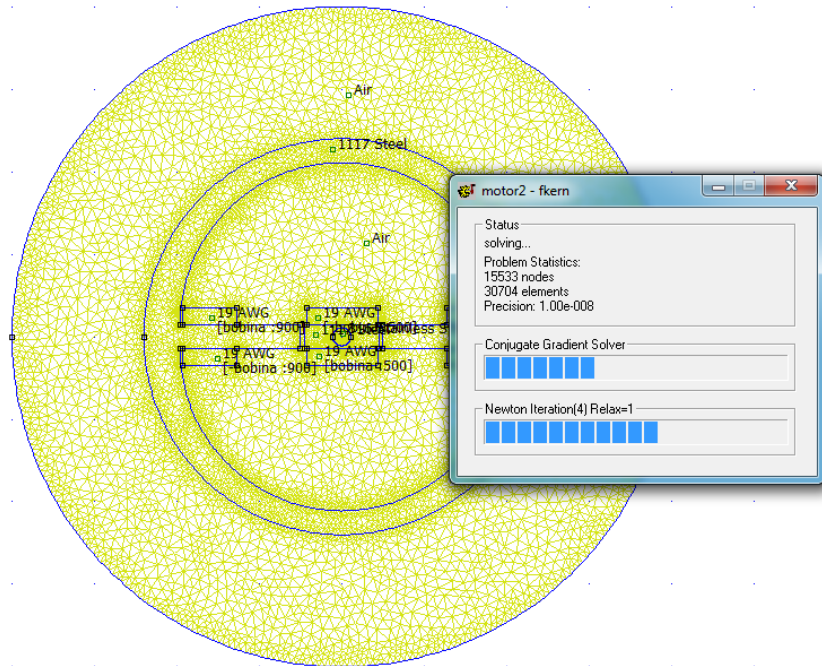


Figura B2. Simulación del sistema magnético del motor-generator en software Femm.

Fuente: Autores.

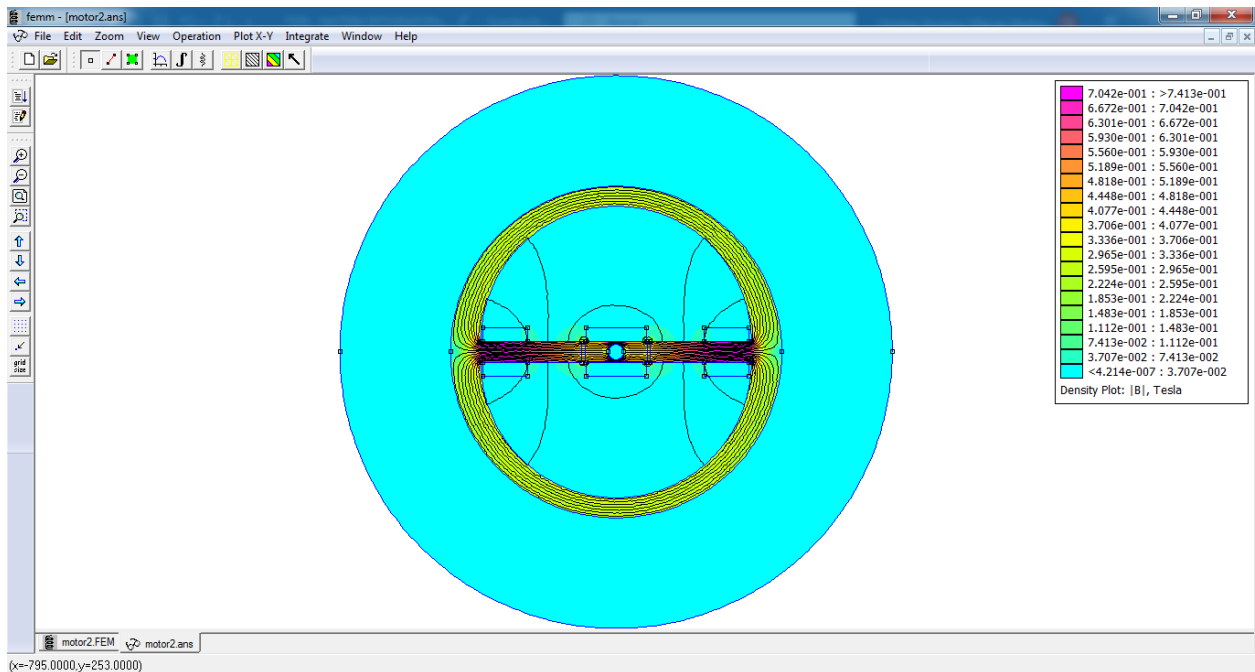


Figura B3. Resultados de simulación.

Fuente: Autores.

Se obtuvo un mallado de 15533 nodos y se ejecutó el análisis electromagnético para proceder a observar los resultados. Se seleccionó el diagrama de densidad para adquirir

un tabla y gráfica de escala de colores del campo magnético del sistema en estudio.
Donde se obtuvo un campo magnético en el entrehierro de 0.42 T.

APÉNDICE C

Construcción y pruebas del prototipo

Proceso de construcción del equipo

A continuación, se muestra las imágenes de la construcción del prototipo.

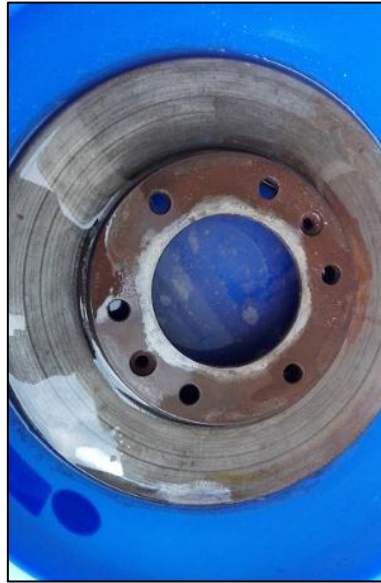


Figura C1. Eliminación de óxido para la reutilización del disco de freno.

Fuente: Autores.



Figura C2. Taladrado para ensamble de los núcleos del estator.

Fuente: Autores.



Figura C3. Corte de núcleos del estator y rotor.

Fuente: Autores.



Figura C4. Machueleadado del estator.

Fuente: Autores.



Figura C5. Ensamble del prototipo.

Fuente: Autores.

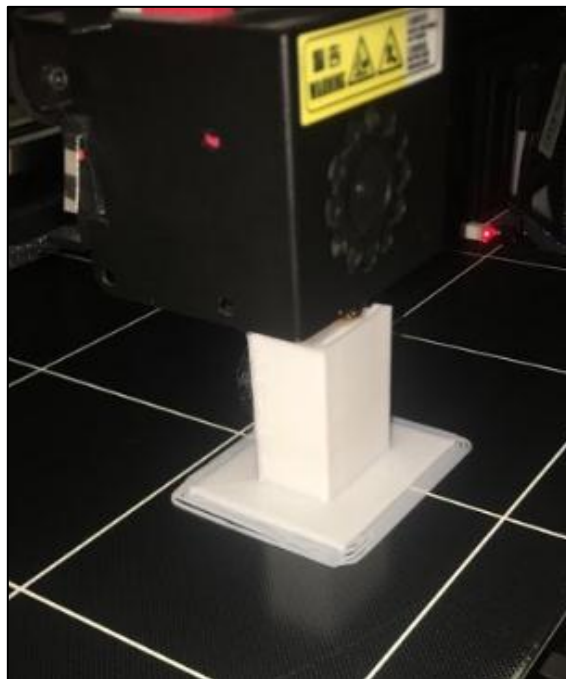


Figura C6. Impresión en 3D del carrete para las bobinas de campo.

Fuente: Autores.



Figura C7. Impresión en 3D de poleas y soporte para el generador eléctrico.

Fuente: Autores.



Figura C8. Devanado de las bobinas de campo.

Fuente: Autores.



Figura C9. Devanado completo de las bobinas de campo.

Fuente: Autores.



Figura C10. Devanado del rotor.

Fuente: Autores.



Figura C11. Devanado completo del rotor.

Fuente: Autores.



Figura C12. Instalación de delgas en el rotor.

Fuente: Autores.

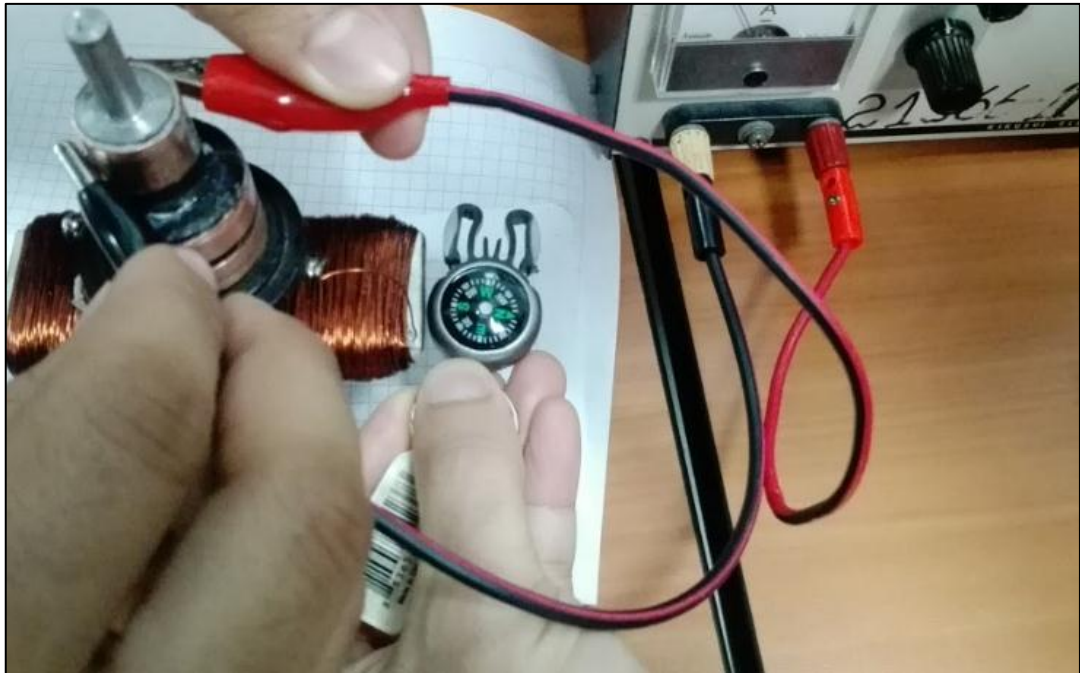


Figura C13. Prueba de magnetismo de las bobinas del rotor.

Fuente: Autores.



Figura C14. Instalación de poleas y banda para el generador eléctrico.

Fuente: Autores.



Figura C15. Pruebas del prototipo con osciloscopio.

Fuente: Autores.



Figura C16. Medición de velocidad angular del motor DC

Fuente: Autores.

APÉNDICE D

Planos y renderizado del prototipo

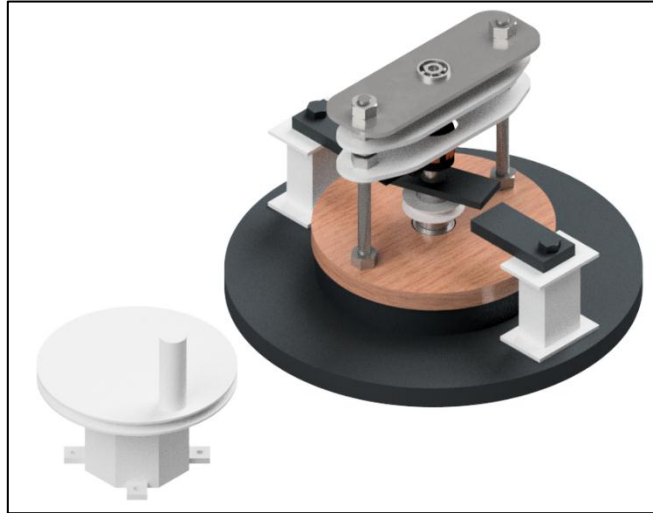


Figura D1. Renderizado de vista isométrica del prototipo

Fuente: Autores.

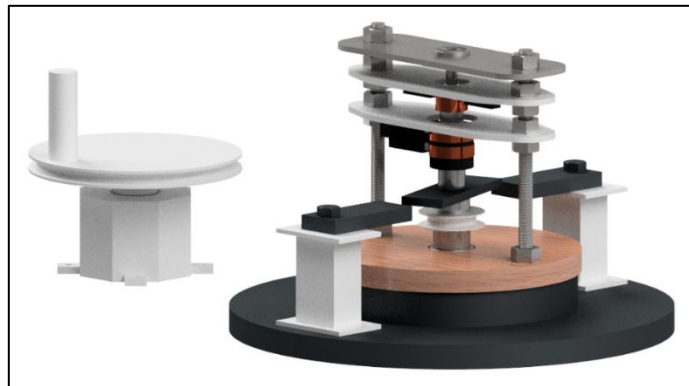
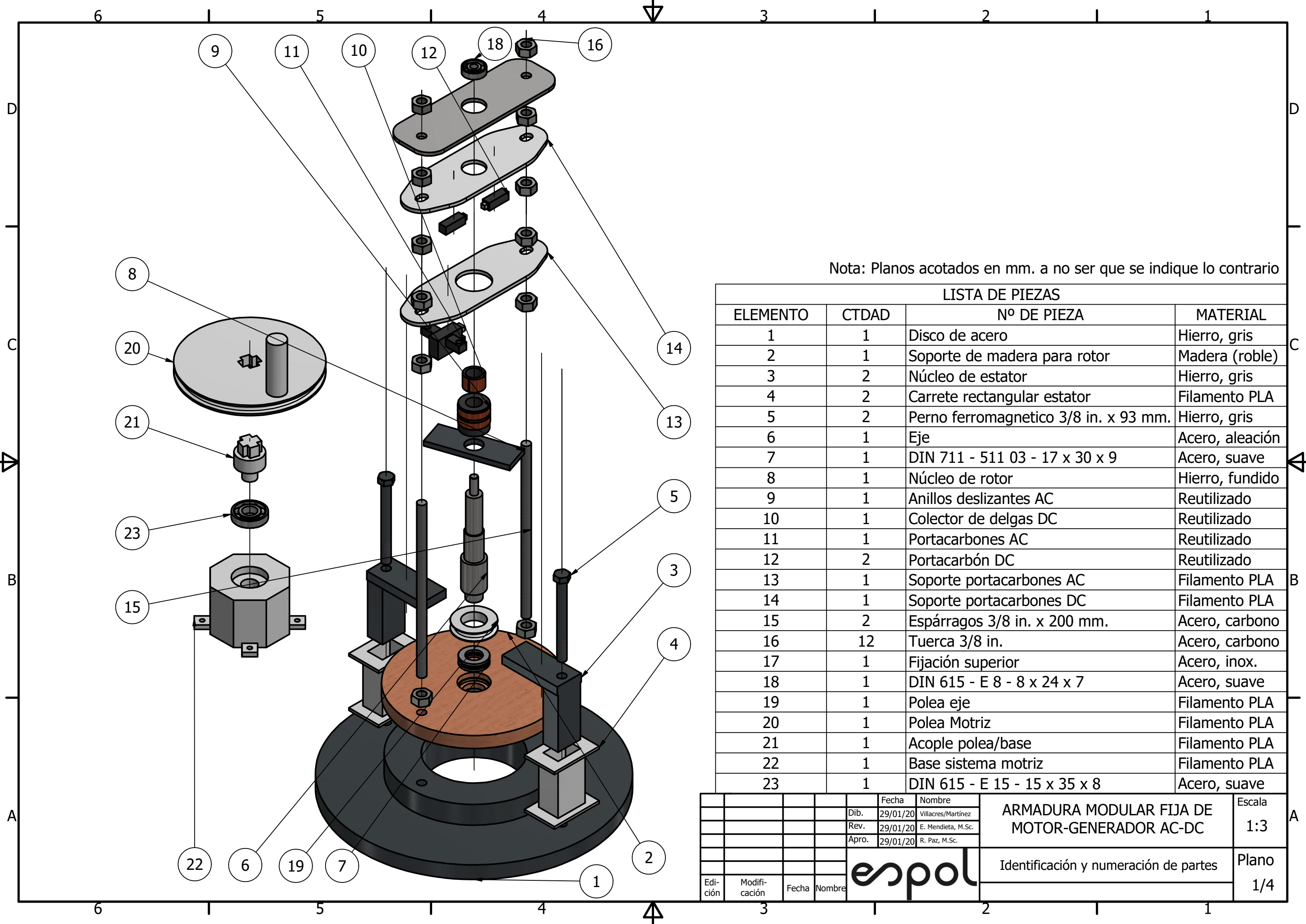


Figura D2. Renderizado del prototipo visto desde otro Ángulo

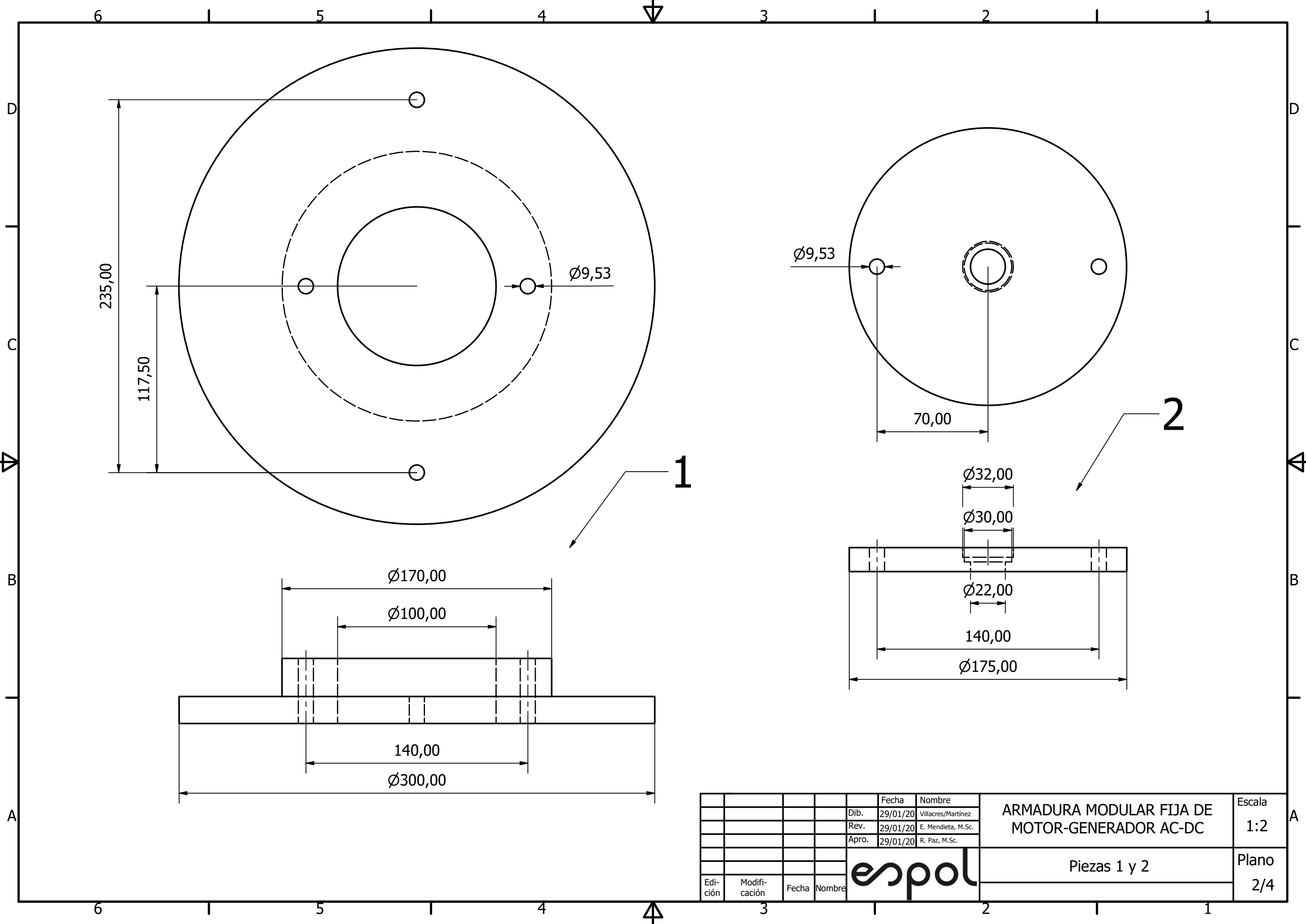
Fuente: Autores.



Nota: Planos acotados en mm. a no ser que se indique lo contrario

| LISTA DE PIEZAS | | | |
|-----------------|-------|---------------------------------------|-----------------|
| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA | MATERIAL |
| 1 | 1 | Disco de acero | Hierro, gris |
| 2 | 1 | Soporte de madera para rotor | Madera (roble) |
| 3 | 2 | Núcleo de estator | Hierro, gris |
| 4 | 2 | Carrete rectangular estator | Filamento PLA |
| 5 | 2 | Perno ferromagnetico 3/8 in. x 93 mm. | Hierro, gris |
| 6 | 1 | Eje | Acero, aleación |
| 7 | 1 | DIN 711 - 511 03 - 17 x 30 x 9 | Acero, suave |
| 8 | 1 | Núcleo de rotor | Hierro, fundido |
| 9 | 1 | Anillos deslizantes AC | Reutilizado |
| 10 | 1 | Colector de delgas DC | Reutilizado |
| 11 | 1 | Portacarbones AC | Reutilizado |
| 12 | 2 | Portacarbón DC | Reutilizado |
| 13 | 1 | Soporte portacarbones AC | Filamento PLA |
| 14 | 1 | Soporte portacarbones DC | Filamento PLA |
| 15 | 2 | Espárragos 3/8 in. x 200 mm. | Acero, carbono |
| 16 | 12 | Tuerca 3/8 in. | Acero, carbono |
| 17 | 1 | Fijación superior | Acero, inox. |
| 18 | 1 | DIN 615 - E 8 - 8 x 24 x 7 | Acero, suave |
| 19 | 1 | Polea eje | Filamento PLA |
| 20 | 1 | Polea Motriz | Filamento PLA |
| 21 | 1 | Acople polea/base | Filamento PLA |
| 22 | 1 | Base sistema motriz | Filamento PLA |
| 23 | 1 | DIN 615 - E 15 - 15 x 35 x 8 | Acero, suave |

| | | | | | | | | |
|--------------|-------------------|-------|--------|-------|----------|--|---------------|--------------------|
| | | | | Fecha | Nombre | ARMADURA MODULAR FIJA DE MOTOR-GENERADOR AC-DC | Escala 1:3 | |
| | | | | Dib. | 29/01/20 | | | Villacres/Martínez |
| | | | | Rev. | 29/01/20 | | | E. Mendieta, M.Sc. |
| | | | | Apro. | 29/01/20 | | | R. Paz, M.Sc. |
| Edi- ción | Modifi- cación | Fecha | Nombre | | | Identificación y numeración de partes | Plano 1/4 | |
| | | | | | | | | |



235,00

117,50

Ø9,53

1

Ø9,53

70,00

2

Ø170,00

Ø100,00

Ø32,00

Ø30,00

Ø22,00

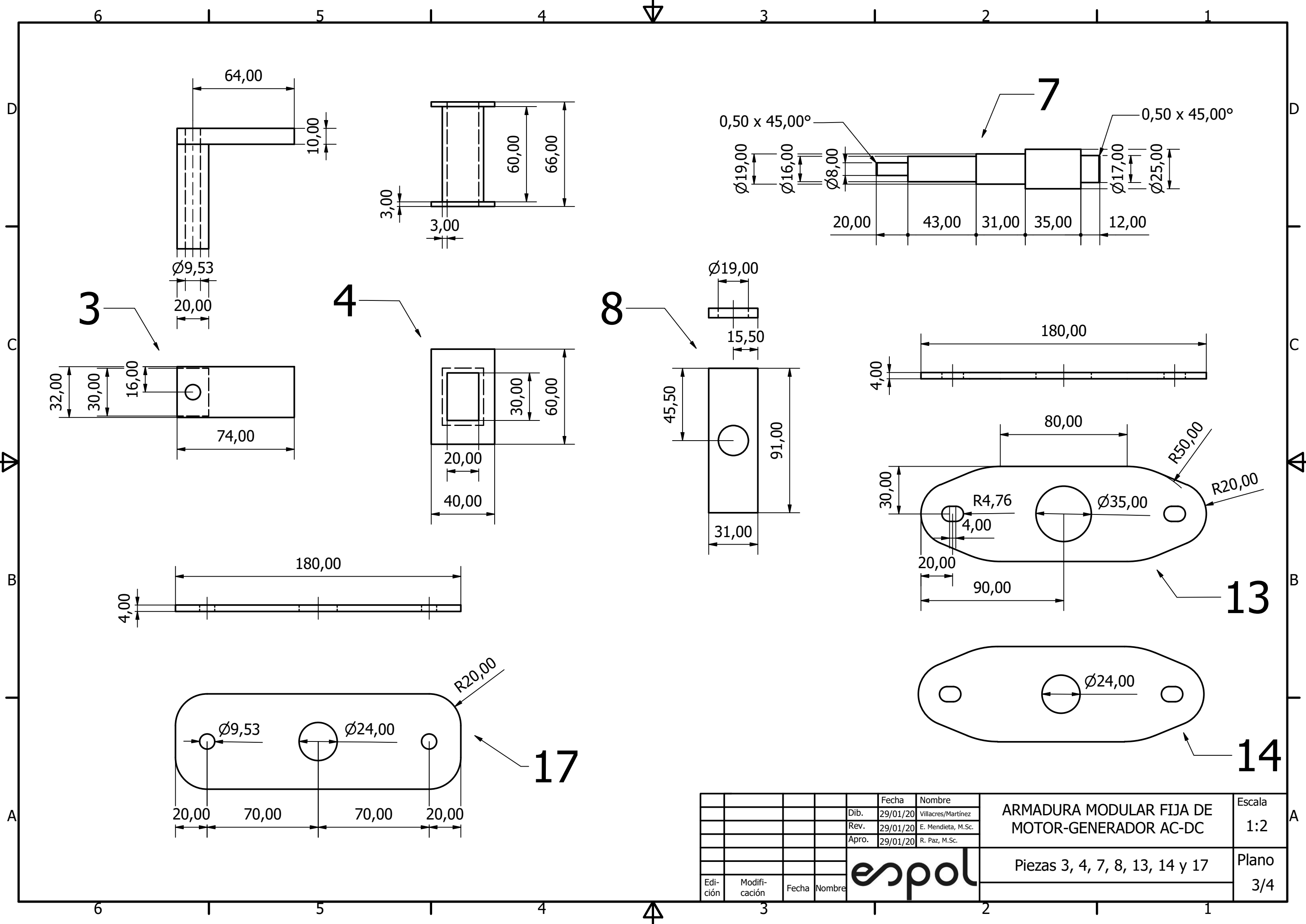
140,00

Ø175,00

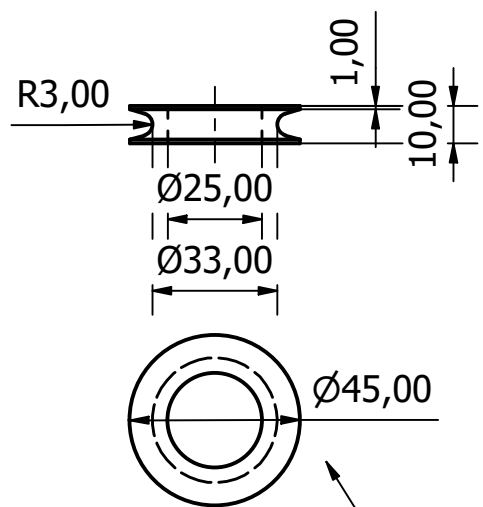
140,00

Ø300,00

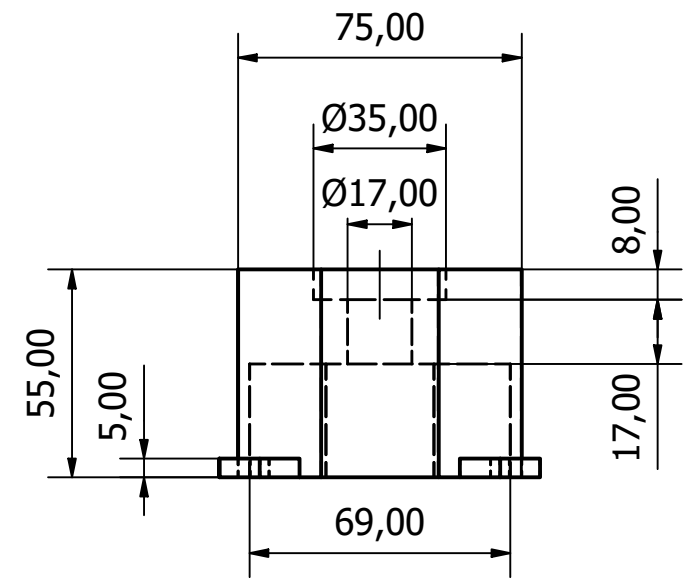
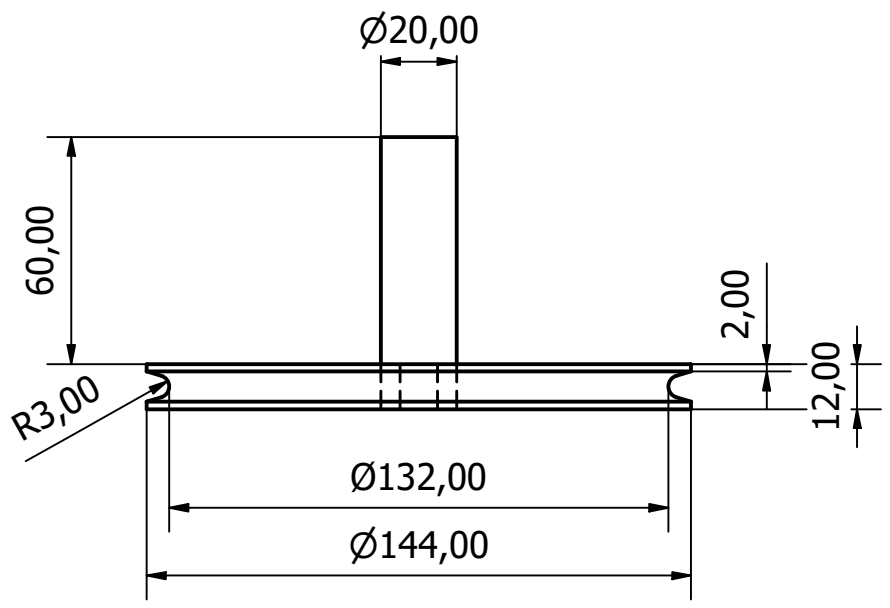
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | Fecha | Nombre | ARMADURA MODULAR FIJA DE MOTOR-GENERADOR AC-DC | Escala | |
|---------|--------------|-------|--------|--------------|----------|--|--------------------|--------------|
| | | | | Dib. | 29/01/20 | | Villacres/Martínez | 1:2 |
| | | | | Rev. | 29/01/20 | | E. Mendieta, M.Sc. | Plano 2/4 |
| | | | | Apro. | 29/01/20 | | R. Paz, M.Sc. | |
| | | | | Piezas 1 y 2 | | | | |



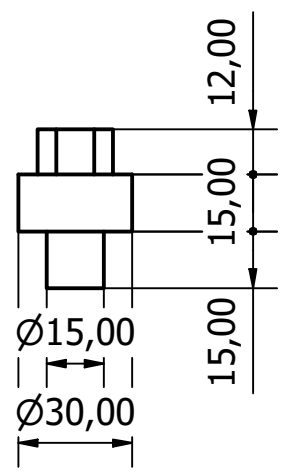
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | Fecha | Nombre | ARMADURA MODULAR FIJA DE MOTOR-GENERADOR AC-DC | Escala 1:2 | |
|---------|--------------|-------|--------|--------------|----------|--|---------------|--------------------|
| | | | | Dib. | 29/01/20 | | | Villacres/Martínez |
| | | | | Rev. | 29/01/20 | | | E. Mendieta, M.Sc. |
| | | | | Apro. | 29/01/20 | R. Paz, M.Sc. | | |
| | | | | espol | | Piezas 3, 4, 7, 8, 13, 14 y 17 | Plano 3/4 | |



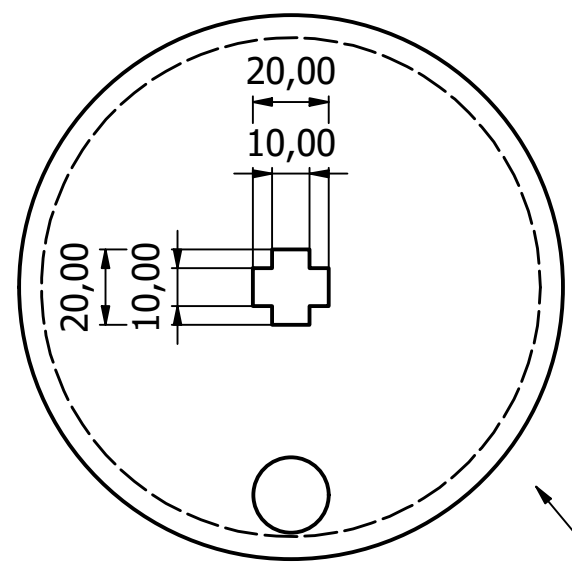
19



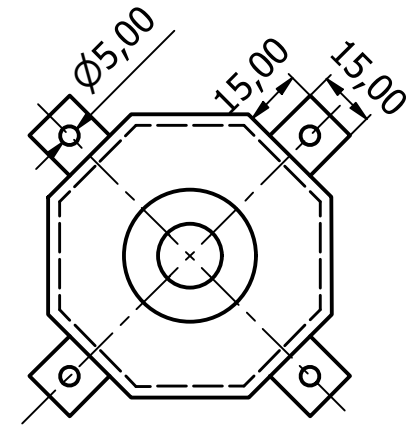
21



22



20



| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | Fecha | Nombre | ARMADURA MODULAR FIJA DE MOTOR-GENERADOR AC-DC | Escala 1:2 | |
|---------|--------------|-------|--------|--------------|----------|--|---------------|--------------------|
| | | | | Dib. | 29/01/20 | | | Villacres/Martínez |
| | | | | Rev. | 29/01/20 | | | E. Mendieta, M.Sc. |
| | | | | Apro. | 29/01/20 | R. Paz, M.Sc. | | |
| | | | | espol | | Piezas 19, 20, 21 y 22 | Plano 4/4 | |



FIMCP
Facultad de Ingeniería en Mecánica
y Ciencias de la Producción

Materia Integradora de Ingeniería Mecánica MECG1026, 2019 - Termino II
Registro de Reuniones del Proyecto

Paralelo: 4

Profesor Coordinador: M.Sc. Rodolfo Paz

Proyecto: Motor - Generador AC-DC

| Reunión No. | Fecha | Estudiante | Profesor Tutor | Retroalimentación del Tutor |
|-------------|------------|---|----------------|--|
| 1 | 30/09/2019 | Christian Villacres Steven Martinez | | Introducción al tema del proyecto |
| 2 | 9/10/2019 | Christian Villacres Steven Martinez | | Diseño de forma. |
| 3 | 15/10/2019 | Christian Villacres Steven Martinez | | teoría electromagnética. |
| 4 | 28/10/2019 | Christian Villacres Steven Martinez | | Diseño Detallado. |
| 5 | 11/11/2019 | Christian Villacres Steven Martinez | | Discusión de software Fmm para calculos de Inducción magnética del estator del motor. |
| 6 | 18/11/2019 | Christian Villacres Steven Martinez | | Revisión del modelo del motor - generador en su estructura y soportes. |



FIMCP
Facultad de Ingeniería en Mecánica
y Ciencias de la Producción

Materia Integradora de Ingeniería Mecánica MECG1026, 2019 - Termino II
Registro de Reuniones del Proyecto

Paralelo: 4
Profesor Coordinador: Msc. Rodolfo Paz
Proyecto: Motor-Generador AC-DC

| Reunión No. | Fecha | Estudiante | Profesor Tutor | Retroalimentación del Tutor |
|-------------|------------|--|---------------------------------|---|
| 7 | Viernes 13 | Christian Villacres Steven Martínez | Profesor Rodolfo Paz | - Entrehierro estator-rotor (+ entrehierros - Flujo Magnético) - curvatura del rotor y del estator - herrajes para la sujeción de los partes. |
| 8 | Lunes 16 | Christian Villacres Steven Martínez | Profesor Rodolfo Paz | - Repulacuni de la albrua de la porta carbon para conexión AC y DC |
| 9 | Martes 21 | Christian Villacres Steven Martínez | Profesor Rodolfo Paz | - Pruebas de funcionamiento del prototipo en el laboratorio de Mecatrónica |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |



FIMCP
Facultad de Ingeniería en Mecánica
y Ciencias de la Producción

Materia Integradora de Ingeniería Mecánica MECG1026, 2019 - Termino II
Registro de Entrevistas con Contactos Externos

Paralelo: 4

Profesor Coordinador: Msc. Rodolfo Paz

Proyecto: Motor - Generador AC - DC

| Reunión No. | Fecha | Estudiante | Nombre del Contacto | Email / teléfono de Contacto |
|--|------------|---|---------------------|------------------------------|
| 1 | 7/11/2019 | Steeven Martínez Christian Vilacres | Mario Pazmiño | 098 5763910 |
| Descripción del Contacto: <u>técnico mecánico</u> | | | | |
| Comentarios: <u>Se realizó consulta de materiales de núcleos magnéticos. Consultado de proveedores.</u> | | | | |
| 2 | 14/11/2019 | Steeven Martínez Christian Vilacres | Mario Pazmiño | 098 5763910 |
| Descripción del Contacto: <u>técnico Mecánico.</u> | | | | |
| Comentarios: <u>Se realizó consulta de ensamble para la construcción del Prototipo.</u> | | | | |
| 3 | 23/11/2019 | Steeven Martínez Christian Vilacres | Mario Pazmiño | 098 5763910 |
| Descripción del Contacto: <u>técnico Mecánico</u> | | | | |
| Comentarios: <u>Se realizó consulta de lugares para ensamblar el prototipo. Se consultó tolerancias del diseño mecánico.</u> | | | | |
| 4 | 16/12/2019 | Steeven Martínez Christian Vilacres | Danielo Eras | 0990176275 |
| Descripción del Contacto: | | | | |
| Comentarios: <u>Se consultó materiales para impresión en 3D</u> | | | | |
| 5 | 3/01/2020 | Steeven Martínez Christian Vilacres | Danielo Eras | 0990176275 |
| Descripción del Contacto: | | | | |
| Comentarios: <u>Se obtuvo asesoramiento para realizar la impresión en 3D de piezas del prototipo.</u> | | | | |