

**Prototipo de Motor con Rotor Compuesto por Fluido Magnetorreológico**

**Jenny Vannesa Bonilla Delgado**

**Daniel Fernando Pulido Espinosa**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de: Ingeniero Electricista**

**Director**

**Hermann Raúl Vargas Torres**

**Doctor en Ingeniería Eléctrica**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas**

**Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones**

**Bucaramanga**

**2017**

## Dedicatoria

*Este trabajo de grado está dedicado a mis padres, Luis Alberto y Myriam*

*que se han esforzado porque sea profesional, a mis hermanas Eliana y Luisa y a mi abuela*

*Blanca Leonor*

*que siempre se ha preocupado por mí.*

*Daniel.*

*A Dios por brindarme la sabiduría que me permitió llegar aquí.*

*A mi madre, por ser la fortuna más grande de mi vida, a quien admiro profundamente por su tenacidad y valor. Gracias por creer en mí, por brindarme la motivación para culminar esta importante etapa, pero que nada gracias por su inefable cariño y amor.*

*A mi padre por ser el mejor ejemplo de perseverancia, constancia y superación; valores que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.*

*A mi tía Rosa por ser una segunda madre, brindarme apoyo, cariño y comprensión en cada etapa de mi vida.*

*Jenny V.*

### Agradecimientos

*Quiero agradecer a Dios, a mis padres Alberto y Myriam, al Dr. Hermann Raúl Vargas Torres por dirigir trabajo de grado, a mis amigos, Jaime “master”, Andrés “morado” y Nicolás “the rock” por su apoyo incondicional, al Ing. Guillermo Galindez por su constante orientación y a todos los que confiaron en mí.*

*Daniel.*

*Agradezco principalmente a Dios por brindarme fortaleza en cada momento de mi vida,  
a mis padres quienes son mi principal motivación. A mi familia por su constante apoyo en cada  
etapa de mi carrera.  
A mis amigos a Silvia Afanador y Thomas Medina por su sincera amistad y apoyo incondicional.*

*Al Dr. Hermann Raúl Vargas Torres por su apoyo y conocimiento en la realización de este  
trabajo de grado, al Ing. Guillermo Galindez por su comprensión y constante apoyo,  
a mi compañero Daniel por todo su esfuerzo y dedicación en el presente trabajo.*

**Jenny V.**

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	16
1. Generalidades .....	17
1.1 Planteamiento del Problema .....	17
1.2 Motivación y Justificación .....	17
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos Especificos.....	18
1.4 Alcance .....	19
1.5 Organización del Documento .....	19
2. Fluidos magnetorreológicos y alternadores.....	20
2.1 Fluidos magnetorreológicos .....	20
2.1.1 Antecedentes .....	21
2.1.1.1 Fluidos magnetorreológicos y su uso en amortiguadores para el control de vibración... 21	21
2.1.1.2 Fluidos magnéticos .....	21
2.1.1.3 Amortiguador reológico – prótesis de rodilla .....	22
2.2 Alternador .....	22
3. Aspectos Constructivos .....	24
3.1 Adecuación del estator.....	24

3.2 Adecuación del soporte para el rotor. ....	25
3.3 Diseño para el rotor .....	28
3.4 Preparación del fluido magnetorreológico. ....	29
3.5 Ensamble final .....	32
4. Pruebas de Laboratorio .....	33
4.1 Montaje .....	33
4.2 Prueba de Vacío .....	34
4.3 Prueba DC para determinar la resistencia del estator .....	38
4.4 Prueba de rotor bloqueado .....	39
5 Análisis de datos .....	42
5.1 Circuito equivalente .....	42
5.2 Variación de los parámetros del circuito equivalente con respecto a la frecuencia de alimentación y la corriente de excitación del generador. ....	43
5.2.1 Variación de frecuencia .....	43
5.2.1.1 Tabulación de datos para la muestra C .....	44
5.2.1.2 Tabulación de datos para la muestra F .....	45
5.2.2 Variación de corriente. ....	46
5.2.2.1 Tabulación de datos para la muestra C .....	47
5.2.2.2 Tabulación de datos para la muestra F .....	48
5.3 Datos de placa y eficiencia .....	48
5.3.1 Eficiencia .....	48
6. Observaciones y conclusiones .....	50
6.1 Observaciones.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

6.2 Conclusiones ..... 51

Referencias Bibliográficas..... 53

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Despiece del alternador. ....	23
Figura 2. Alternador Original. ....	23
Figura 3. Estatores. ....	24
Figura 4. Rodamiento de acción axial.....	25
Figura 5. Soporte de PVC. ....	26
Figura 6. Soporte de PVC modificado.....	26
Figura 7. Tornillos. ....	27
Figura 8. Carcasa del alternador modificada. ....	27
Figura 9. Diseño de rotor en Solidworks .....	28
Figura 10. Recipiente alternativo.....	29
Figura 11. Material magnético.....	29
Figura 12. Lavado de material .....	30
Figura 13. Disposición final del material.....	30
Figura 14. Concentraciones de fluido magnetorreológico en aceite.....	31
Figura 15. Concentraciones de fluido magnetorreológico en Agua/Jabón. ....	32
Figura 16. Ensamble final.....	32
Figura 17. Montaje de laboratorio. ....	33
Figura 18. Elementos de medición.....	34

Figura 19. Circuito equivalente para el prototipo. ....	42
Figura 20. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,29 A - Muestra C.....	44
Figura 21. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,39 A - Muestra C.....	44
Figura 22. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,52 A - Muestra C.....	45
Figura 23. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,29 A - Muestra F. ....	45
Figura 24. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,39 A - Muestra F.....	46
Figura 25. Parámetros del circuito Vs equivalente frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,52 A - Muestra F.....	46
Figura 26. Parámetros del circuito equivalente Vs corriente de excitación. Para frecuencia constante de 222 Hz - Muestra C.....	47
Figura 27. Parámetros del circuito equivalente Vs corriente de excitación. Para frecuencia constante de 222 Hz - Muestra F. ....	48

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Parámetros de alimentación del circuito de excitación.....	35
Tabla 2. Prueba de vacío para la muestra C y parámetros de excitatriz grupo 3.....	36
Tabla 3. Prueba de vacío para la muestra F y parámetros de excitatriz grupo 3.....	36
Tabla 4. Prueba de vacío para la muestra B y parámetros de excitatriz grupo 3.....	36
Tabla 5. Prueba de vacío para la muestra E y parámetros de excitatriz grupo 3.....	37
Tabla 6. Impedancia equivalente de entrada en ohms.....	37
Tabla 7. Datos de la prueba DC.....	38
Tabla 8. Cálculo de la resistencia del estator, en ohms por fase.....	38
Tabla 9. Prueba de rotor bloqueado para la muestra C y parámetros de excitatriz grupo 3.....	39
Tabla 10. Prueba de rotor bloqueado para la muestra B y parámetros de excitatriz grupo 3.....	39
Tabla 11. Prueba de rotor bloqueado para la muestra F y parámetros de excitatriz grupo 3.....	40
Tabla 12. Prueba de rotor bloqueado para la muestra E y parámetros de excitatriz grupo 3.....	40
Tabla 13. Parámetros de rotor bloqueado en ohms.....	41
Tabla 14. Parámetros para los circuitos equivalentes de cada motor.....	42
Tabla 15. Datos de placa moteres C y F.....	49

## Resumen

**Título:** Prototipo de Motor con Rotor Compuesto por Fluido Magnetorreológico\*.

**Autores:** Jenny Vannesa Bonilla Delgado, Daniel Fernando Pulido Espinosa.\*\*

**Palabras Clave:** Prototipo, Alternador, Estator, Rotor, fluido magnetorreológico.

### Descripción:

En este trabajo se presenta la construcción de un prototipo de motor con rotor compuesto por fluido magnetorreológico. Se realizarán pruebas de rotor bloqueado y vacío en el prototipo de motor a diversas concentraciones del fluido magnetorreológico y con diferentes medios diluyentes, para determinar un modelo circuital del mismo basados en el modelo de un motor de inducción. Se diseñaron y elaboraron las pruebas de vacío y rotor bloqueado con valores fijos de corriente y tensión en la excitatriz del generador, variando la frecuencia de alimentación del prototipo, logrando obtener valores de corrientes y tensión de línea, velocidad y temperatura del estator en el prototipo con los diferentes rotores. Los fluidos para el rotor se obtuvieron de partículas de hierro ferromagnético diluidos en medios como aceite y agua jabón.

El rotor de un motor constituye la parte móvil, es el elemento de transferencia mecánica, ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a mecánica. En el actual trabajo de grado se presentará la aplicación de los fluidos magnetorreológicos, estos fluidos tienen propiedades reológicas que se ven alteradas en presencia de un campo magnético, de ahí su habilidad para proveer una rápida respuesta en la interface para sistemas mecánicos.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Director: Hermann Raúl Vargas Torres

## Abstract

**Title:** Motor prototype with rotor composed of magnetorheological fluid\*.

**Authors:** Jenny Vanessa Bonilla Delgado, Daniel Fernando Pulido Espinosa\*\*.

**Keywords:** Prototype, alternator, stator, rotor, magnetorheological fluid.

### Description:

In this work, the construction of a prototype rotor motor composed of magnetorheological fluid is presented. Blocked rotor and vacuum tests will be carried out on the engine prototype at different concentrations of the magnetorheological fluid and with different diluting media, to determine a circuit model based on the model of an induction motor. The tests of vacuum and locked rotor with fixed values of current and voltage in the exciter of the generator were designed and elaborated, varying the frequency of feeding of the prototype, obtaining to obtain values of currents and voltage of line, speed and temperature of the stator in the prototype with the different rotors. The fluids for the rotor were obtained from ferromagnetic iron particles diluted in media such as oil and soap water. The rotor of an engine constitutes the moving part, it is the mechanical transfer element, since it depends on the conversion of electrical to mechanical energy. In the current degree work the application of the magnetorheological fluids will be presented, these fluids have rheological properties that are altered in the presence of a magnetic field, hence their ability to provide a rapid response in the interface for mechanical systems. Fluid magnetorheological

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Engineering Physical Mechanical School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering  
. Director: Hermann Raúl Vargas Torres

## Introducción

En este trabajo de grado se presenta el diseño y la construcción de un prototipo de motor eléctrico de inducción con rotor compuesto por fluido magnetorreológico, en diferentes etapas, para el estudio de su comportamiento por medio de pruebas de laboratorio. Para la caracterización de este motor se busca obtener un modelo circuital por medio de las pruebas de rotor bloqueado y vacío las cuales se describen más adelante en el desarrollo del documento.

Lo que se espera al sustituir un rotor convencional por un rotor alternativo es que se desempeñe de la misma manera, conservando la funcionalidad de la máquina. El rotor que se desea implementar consta de un fluido magnetorreológico y un recipiente giratorio de un material no magnético.

## 1. Generalidades

### 1.1 Planteamiento del Problema

En la actualidad no se ha presentado el uso de materiales magnetorreológicos en la construcción de motores eléctricos, siendo los motores una parte fundamental en la formación profesional de la ingeniería eléctrica, razón por la cual los autores de este trabajo de grado deciden sustituir el rotor convencional de un motor, por un rotor compuesto por fluido magnetorreológico.

El grupo de investigación Gisel y la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, no cuenta con un motor de este tipo, es por ello que este primer modelo estará disponible para todo tipo de estudios de pregrado y posgrado.

### 1.2 Motivación y Justificación

Experimentar la posibilidad de usar un fluido magnetorreológico en el rotor de un motor de inducción sustituyendo el rotor devanado convencional por uno que contenga este fluido. Para esto es necesario un proceso de construcción y caracterización del prototipo. Un aspecto importante es observar el desempeño de este rotor en pruebas de laboratorio para analizar la funcionalidad y rendimiento del prototipo de motor.

### 1.3 Objetivos

**1.3.1 Objetivo General.** Construir un prototipo de motor eléctrico de inducción con rotor compuesto de fluido magne- torreológico.

#### 1.3.2 Objetivos Especificos

1. Ensamblar y adaptar el estator del prototipo del motor, a través de la unión de dos inducidos, de alternadores para automóvil; usando el proceso de rebobinado para, juntar los dos núcleos, conservando todas las propiedades eléctricas.

2. Realizar pruebas de continuidad y calentamiento en el laboratorio del estator del prototipo.

3. Elaborar el fluido magnetorreológico del estator del prototipo, usando concentraciones de 25 %, 50 % y 75 % de limadura de hierro, previamente seleccionada y mezclándola con aceite dieléctrico que impida la corrosión del material magnético.

4. Realizar la prueba de rotor bloqueado del prototipo usando las diferentes concentraciones.

La prueba se desarrolla por medio de dos etapas:

- Evitar el movimiento del fluido ante la presencia del campo magnético por medio de una rejilla.
- En la segunda etapa se mantendrá el fluido sin rejilla permitiendo total libertad del fluido ante la presencia del campo magnético.

5. Realizar la prueba de vacío del prototipo, suspendiendo el estator por medio de una base que permita su giro libremente. De igual forma la prueba se hará mediante dos procedimientos, la

primera parte con la rejilla que bloquea el movimiento del fluido del rotor y una segunda parte sin dicha rejilla, permitiendo así el libre movimiento del fluido.

Los dos últimos ítems se repetirán para cada una de las concentraciones.

#### **1.4 Alcance**

Para llevar a cabo la construcción del prototipo, se ha estructurado el trabajo en diferentes etapas.

Cada etapa del proyecto se explica a continuación:

- Construcción de un prototipo de motor eléctrico de inducción con rotor compuesto por fluido magnetorreológico.
- Informe de los resultados obtenidos a través de las pruebas de rotor bloqueado y de vacío, incluyendo las muestras de las diferentes concentraciones del fluido magnetorreológico.
- Implementar un modelo circuital equivalente del prototipo de motor.

#### **1.5 Organización del Documento**

El documento está conformado por seis capítulos:

1. En el capítulo 2, se tratan los conceptos de alternador, fluidos magnetorreológicos y sus aplicaciones.
2. En el capítulo 3, aquí se describe todo el proceso de construcción del prototipo.
3. En el capítulo 4, se hace la descripción del montaje de laboratorio y la realización de las pruebas correspondientes a rotor bloqueado, vacío y DC.
4. En el capítulo 5, se realiza el análisis de datos recopilados en las pruebas de laboratorio.

5. En el capítulo 6, se hacen las observaciones y conclusiones del desarrollo de este trabajo de grado.

## 2. Fluidos magnetorreológicos y alternadores

### 2.1 Fluidos magnetorreológicos

”Un fluido magnetorreológico, es un líquido aceitoso que exhibe una densidad aproximada- mente tres veces mayor que la del agua. A este fluido se le puede cambiar de un estado aceitoso a uno cuasi-sólido en fracciones de segundo cuando es expuesto a una densidad de campo magnético. Su construcción típica está compuesta por tres elementos. El primer elemento es un material aceitoso, usualmente derivado de un hidrocarburo, que sirve de soporte a un gran número de micro partículas ferrosas. El segundo elemento usualmente es hierro carbonilo de alta pureza, con una granulometría promedio entre 3 y 5  $\mu m$ , adicionado en proporciones del 20 al 40 % en masa. El tercer elemento es un aditivo anti gravitacional cuya función es tanto inhibir el efecto de la fuerza gravitacional sobre las partículas de hierro para mantenerlas en suspensión, como mejorar las propiedades lubricantes del fluido y reducir el desgaste generado por los cambios de la viscosidad del material aceitoso”Ardila et al. [2013]Mesquida and Lässig [2012]

### 2.1.1 Antecedentes

#### *2.1.1.1 Fluidos magnetorreológicos y su uso en amortiguadores para el control de vibración.*

Los amortiguadores magnetorreológicos son dispositivos que utilizan fluidos magnéticos que pueden cambiar sus propiedades mediante un estímulo magnético, lo cual puede ser aprovechado para proveer una rápida respuesta en el control de vibraciones. Como aplicaciones directas tenemos, la suspensión de asientos para vehículos de trabajo pesado, amortiguadores de vibraciones en aplicaciones industriales y control de vibraciones sísmicas en estructuras. Cúpich Rodríguez and Elizondo Garza [1998]

*2.1.1.2 Fluidos magnéticos.* Cuando se aplica un campo magnético a un ferrofluido, se desarrollan fuerzas internas en el líquido. Se llama fuerza interna a la que experimenta un volumen dado de fluido (aunque la magnitud y dirección de la fuerza no sea necesariamente la misma en todas partes). Para observar los efectos de fuerzas magnéticas internas, basta con dejar correr libremente un ferrofluido entre dos polos de un imán con forma de herradura. El campo generado por el imán, que actúa sobre todas las partículas de volumen del fluido que está próximo en cada instante a los polos del imán desvía la corriente de fluido de su trayectoria vertical. Las primeras aplicaciones de estos fluidos fueron en:

- Cierres herméticos sin fricción para ejes rotatorios, formándose un anillo de ferrofluido alrededor del eje por un campo magnético de alta intensidad, los cierres herméticos evitan el goteo o mezcla de gases.
- Cierres o sellos de capas múltiples, soportan diferencias de presión de hasta 50 atmósferas por cada 10 centímetros de longitud del eje.

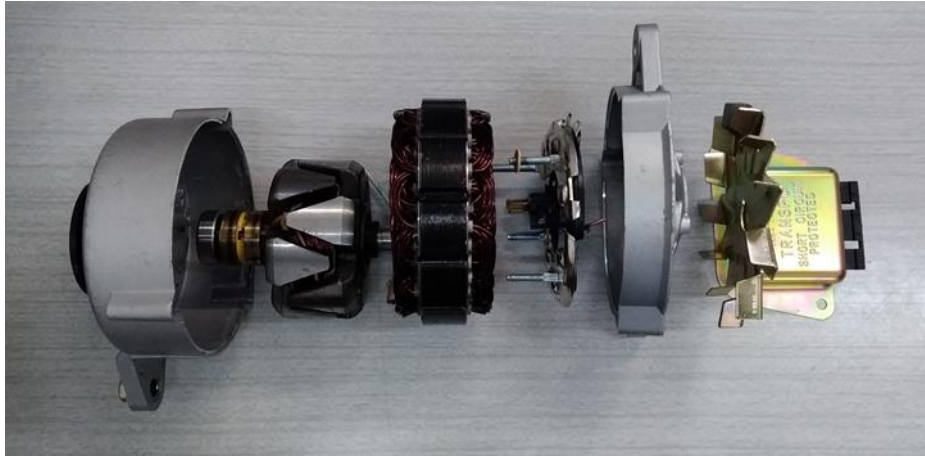
- Amortiguador de oscilaciones en sistemas de máquinas controladas numéricamente, como registradores gráficos, donde se necesitan movimientos muy pequeños y de forma muy precisa. El amortiguamiento se consigue a través de una masa inercial constituida por imanes que auto levitan en un ferrofluido encerrando en una cámara que gira con el eje.
- En altavoces, se mantiene el ferrofluido por el imán en forma de anillo que rodea al cono. El ferrofluido aumenta la capacidad de potencia y hace más plana la respuesta en frecuencia del altavoz (universidad tecnológica nacional – fluidos magnéticos)

**2.1.1.3 Amortiguador reológico – prótesis de rodilla** Es un amortiguador hidráulico que contiene un aceite especial (fluido magnetorreológico), este fluido actúa ante tensiones eléctricas provocando una deformación en sus moléculas haciéndolo rígido o suave dependiendo del valor de la tensión sobre dicho fluido. LÓPEZ DÍAZ et al. [2015]

## 2.2 Alternador

El alternador Figura 2.1 es una máquina eléctrica, capaz de generar corriente alterna mediante inducción electromagnética, transformando la energía mecánica que recibe en su eje en energía eléctrica. Gualtieri [1996] El alternador está constituido por los siguientes elementos:

- Conjunto inductor que forman el rotor, la parte móvil del alternador.
- Conjunto inducido que forman el estator, la parte fija del alternador.
- Puente rectificador de diodos.
- Carcasas, ventilador y demás elementos complementarios del alternador.



*Figura 1.* Despiece del alternador.

Para este trabajo de grado se dispuso inicialmente de dos alternadores de automóvil, como el de la Figura 2.2.



*Figura 2.* Alternador Original.

### 3. Aspectos Constructivos

#### 3.1 Adecuación del estator

El estator es la parte fija del prototipo, no tiene movimiento y es donde se encuentran alojadas las bobinas inducidas, que generan la corriente eléctrica. Para el proceso de adecuación del estator del prototipo, se extrajeron los núcleos de cada alternador Figura 3.1a y se retiró cada bobinado.



(a) Estator sin modificar



(b) Estator modificado

*Figura 3.* Estatores.

El propósito es unificar los núcleos Figura 3.1b, mediante el proceso de bobinado, para lograr obtener un estator de mayor área capaz de generar más densidad de flujo magnético. Esto se puede observar más claramente con la expresión de flujo magnético ecuación (3.1), que conserva una proporción inversa con respecto a la reluctancia  $R$ , ecuación (3.2), que a su vez depende de la longitud media  $l$ , el área de la sección transversal del núcleo magnético  $S$  y la permeabilidad

magnética  $\mu$ . Entonces al aumentar el área trasnversal del estator del prototipo, se está reduciendo la reluctancia ocasionando que el flujo magnético aumente. [Sadiku, 2003].

$$\phi_m = \frac{\mathcal{F}_{mm}}{R} [Wb] \tag{3.1}$$

$$R = \frac{l}{\mu S} \left[ \frac{A - vuelta}{Wb} \right] \tag{3.2}$$

**3.2 Adecuación del soporte para el rotor.**

La principal función del soporte es permitir la libre rotación de los diferentes recipientes que contienen el fluido magnetorreológico. Para la construcción del soporte fue necesario: un rodamiento de bolas de acción axial Figura 3.2, una reducción para tubería PVC de 4 a 2 pulgadas Figura 3.3 y algunas partes de la carcasa del alternador.



(a) Vista superior      (b) Despiece del rodamiento

Figura 4. Rodamiento de acción axial.

Para la pieza de PVC modificada, Figura 3.4, se recorta y se invierte la sección que se usa para reducir el diámetro de la tubería, para lograr ubicar el rodamiento sobre esta superficie. Estas dos piezas se usaron para crear un soporte giratorio, donde se aloja el recipiente que contiene el fluido magnetorreológico. Adicionalmente se hicieron tres perforaciones, equidistantes en los costados de la base de PVC, para insertar los tornillos reformados con el fin de centrar el rotor respecto del estator.



(a) Vista superior



(b) Vista lateral

Figura 5. Soporte de PVC.



(a) Vista lateral



(b) Vista superior

Figura 6. Soporte de PVC modificado.

Los tornillos reformados Figura 3.5 se construyeron con segmentos de una varilla roscada galvanizada de 3/8 de pulgada y un rodamiento de acción lateral incrustada en un extremo, para que funcionen como “puntas rodantes” con el contorno del rotor y a su vez permitan mantener la simetría del estator y el rotor.



(a) Vista superior



(b) Vista lateral

Figura 7. Tornillos.

Además de los estatores de los alternadores, también se hizo uso de algunas partes de la carcasa, como son la tapa del lado del colector y la tapa del lado de accionamiento, las cuales se recortaron para construir el soporte principal de la base del motor Figura 3.6.



(a) Vista lateral

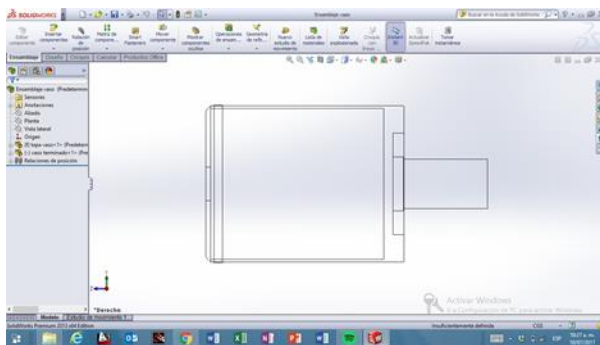


(b) Vista superior

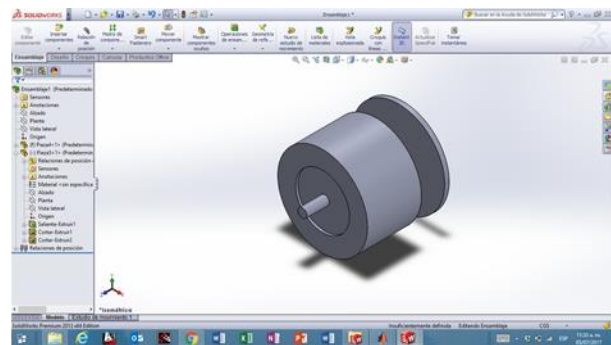
Figura 8. Carcasa del alternador modificada.

### 3.3 Diseño para el rotor

Teniendo en cuenta las adecuaciones realizadas para el soporte, se diseñó un modelo de rotor Figura 3.7, capaz de contener el fluido magnetorreológico, con ayuda del software Solidworks. El propósito del diseño es imprimirlo en 3D. Por factores económicos y el acceso limitado de materiales adecuados para contener fluidos derivados de hidrocarburos, no se pudo materializar esta idea, por tal motivo se realizaron las pruebas de laboratorio con recipientes alternativos, Figura 3.8, que se ajustan a los parámetros de la base.



(a) Vista lateral



(b) Vista isométrica.

Figura 9. Diseño de rotor en Solidworks



Figura 10. Recipiente alternativo.

### 3.4 Preparación del fluido magnetorreológico.

Para la preparación del fluido en este caso en particular, se utilizó aceite para motor referencia 15W40 sin usar y partículas de hierro previamente seleccionadas mediante tres ciclos de tamizaje Figura 3.9a, posteriormente se sometió el material magnético a un proceso de lavado con thinner para eliminar cualquier tipo de impureza, Figuras 3.10 y 3.11.



(a) Proceso de tamizaje 2

(b) Proceso de tamizaje 3

Figura 11. Material magnético



*Figura 12.* Lavado de material



(a) Material con impurezas



(b) Material limpio.

*Figura 13.* Disposición final del material

Se dispuso de tres concentraciones diferentes en las pruebas de laboratorio, correspondientes al 25 %, 50 % y 75 % de volumen de material magnético, Figura 3.12, en relación al volumen en el interior del estator, donde típicamente se encuentra el rotor convencional. El volumen de referencia para la preparación de las mezclas corresponde a 400 ml.

- La muestra A constaría de un 25 % (100 ml) de material magnético y 75 % (300 ml) de aceite.
- La muestra B constaría de un 50 % (200 ml) de material magnético y 50 % (200 ml) de aceite.
- La muestra C constaría de un 75 % (300 ml) de material magnético y 25 % (100ml) de aceite.

Se usaron recipientes de vidrio para almacenar las diferentes concentraciones de fluido magneto- reológico.



*Figura 14.* Concentraciones de fluido magnetorreológico en aceite.

Por recomendación del director del trabajo de grado se sustituye el medio aceitoso por una mezcla compuesta por agua-jabón Figura 3.13, para comparar los resultados y se obtuvieron las siguientes muestras:

- La muestra D constaría de un 25 % (100 ml) de material magnético y 75 % (300 ml) de agua jabón.
- La muestra E constaría de un 50 % (200 ml) de material magnético y 50 % (200 ml) de agua jabón.
- La muestra F constaría de un 75 % (300 ml) de material magnético y 25 % (100ml) de agua jabón.



*Figura 15.* Concentraciones de fluido magnetorreológico en Agua/Jabón.

### 3.5 Ensamble final

Con todos los elementos modificados se obtuvo el siguiente ensamble.



*Figura 16.* Ensamble final

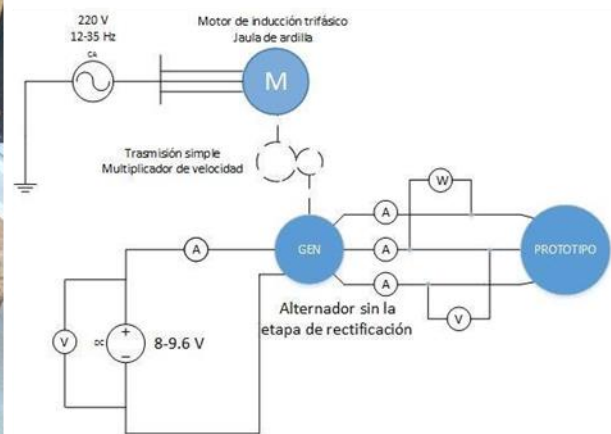
### 4. Pruebas de Laboratorio

#### 4.1 Montaje

Para alimentar el motor se usó el sistema mostrado en la Figura 4.1, que consta de un variador de frecuencia, el cual alimenta un motor de inducción jaula de ardilla, su función es actuar como primotor para el generador. El generador, que para esta práctica es un alternador de automóvil como el de la Figura 2.2, que no cuenta con la etapa de rectificación. El motor de inducción y el generador, están acoplados por medio de un mecanismo multiplicador de velocidad de transmisión simple, conformado por poleas en sus ejes y acopladas por una correa.



(a) Circuito físico.



(b) Circuito esquemático.

Figura 17. Montaje de laboratorio.

Para el proceso de medición y toma de datos se usaron los equipos mencionados en la Figura 4.2.

Elementos de medición usado en las pruebas					
Elemento de medida	Referencia	Rango	Resolución	Exactitud	Observaciones
Pinza amperimetrica	AMPROBE ACD-52 NAV	61 a 400		± 2% + 5 dgts	Elemento usado para sensar valores de corrientes de línea en el prototipo.
Pinza amperimetrica	AMPROBE AMP-320	60 [A] en DC		± 2,0% + 5 dgts	Elemento usado para sensar valores de corriente de campo en la excitatriz.
Pinza amperimetrica	AMPROBE AMP-320	10 a 1000 [kW]		± 2,5 % + 5 dgts	Elemento usado para sensar valores de potencia en la entrada al prototipo.
Termocupla tipo K (pinza amperimetrica)	AMPROBE AMP-230	> 10 a 99,9° [°C]		± 1% + 0,8 °C	Elemento usado para sensar valores de temperatura en el estator del prototipo.
Multímetro	FLUKE 117-THRUE RMS MULTIMETER	60 [V]	0,01 [V]	± 0,5% + 2 dgts	Elemento usado para sensar valores de tension de campo en la excitatriz.
Multímetro	FLUKE 117-THRUE RMS MULTIMETER	45 a 500 [Hz] a 6 [V]	0,001 [V]	± 1% + 3 dgts	Elemento usado para sensar valores de tension de línea del prototipo.
		45 a 500 [Hz] a 60 [V]	0,01 [V]	± 1% + 3 dgts	
Multímetro	FLUKE 117-THRUE RMS MULTIMETER	999,9 [Hz]	0,1 [Hz]	± 0,1% + 2 dgts	Elemento usado para sensar valores de frecuencia de alimentacion del prototipo.
Tacómetro	UNI-T UT372	10 a 99,999 [rpm]	0,001 [rpm]	± 0,04% + 2 dgts	Elemento usado para sensar valores de velocidad de rotación del rotor del prototipo.
		100 a 999,99 [rpm]	0,01 [rpm]	± 0,04% + 2 dgts	

Figura 18. Elementos de medición.

#### 4.2 Prueba de Vacío

Para la realización de la prueba de vacío se toma como base la prueba descrita en [Chapman et al., 2012]. Se fijaron tres grupos de valores de tensión y corrientes en la excitatriz del generador, Tabla 4.1, a su vez se varió la frecuencia de alimentación del motor de inducción, en un rango de 12 a 35 Hertz y para el prototipo unas frecuencias equivalentes a 222 y 407 Hertz. Bajo las condiciones anteriores de alimentación y sin carga, se midieron valores de tensión de línea, corrientes de línea, velocidad, frecuencia de alimentación y temperatura en el estator.

El movimiento relativo entre el campo magnético del estator y la velocidad del rotor, más conocida como velocidad de deslizamiento en por unidad está dada por la ecuación (4.1).

$$S = \frac{N_{sinc} - N_{rot}}{N_{sinc}} \times 100\% \tag{4.1}$$

Donde  $N_{rot}$  y  $N_{sinc}$  son la velocidad del rotor y de sincronismo en r.p.m. respectivamente. A su vez la velocidad de sincronismo está dada por la ecuación (4.2), y  $f$  es la frecuencia de la red.

$$N_{sinc} = \frac{120f}{Polos} \tag{4.2}$$

En las Tablas 4.2 a 4.5, presentan algunos de los datos obtenidos para un rango de frecuencias entre 222 a 407Hz en la alimentación del prototipo, para diferentes medios de solución y concentraciones.

Tabla 1.

*Parámetros de alimentación del circuito de excitación.*

Parametros de Excitatriz		
Grupo	Tensión [V]	Corriente [A]
1	8	1,29
2	8,7	1,39
3	9,6	1,52

Tabla 2.

*Prueba de vacío para la muestra C y parámetros de excitatriz grupo 3.*

<i>fred</i>	<i>Vecx</i>	<i>Iexc</i>	<i>fprototipo</i>	<i>Vl</i>	<i>IL1</i>	<i>IL2</i>	<i>IL3</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>T</i>
[Hz]	[V]	[A]	[Hz]	[V]	[A]	[A]	[A]	[r.p.m.]	%	[°C]
20	9,59	1,53	222,3	8,23	12,96	12,64	12,89	207	81,068	35,9
25	9,6	1,52	284,4	10,24	12,94	12,67	12,95	238	85,935	39
30	9,6	1,5	346	12,3	13	12,75	13,03	253	88,891	41
35	9,63	1,5	407	14,37	13	12,83	13,14	277	89,401	44

Tabla 3.

*Prueba de vacío para la muestra F y parámetros de excitatriz grupo 3.*

<i>fred</i>	<i>Vecx</i>	<i>Iexc</i>	<i>fprototipo</i>	<i>Vl</i>	<i>IL1</i>	<i>IL2</i>	<i>IL3</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>T</i>
[Hz]	[V]	[A]	[Hz]	[V]	[A]	[A]	[A]	[r.p.m.]	%	[°C]
20	9,6	1,53	222	8,34	13,19	13,1	13,66	221	90,045	41,9
25	9,59	1,52	285	10,29	13,07	12,9	13,5	205	92,807	45
30	9,59	1,5	246	12,1	13,06	12,84	13,33	185	92,479	45,5
35	9,58	1,5	406	14,6	13,4	13,27	13,81	185	95,443	44,5

Tabla 4.

*Prueba de vacío para la muestra B y parámetros de excitatriz grupo 3.*

<i>fred</i>	<i>Vecx</i>	<i>Iexc</i>	<i>fprototipo</i>	<i>Vl</i>	<i>IL1</i>	<i>IL2</i>	<i>IL3</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>T</i>
[Hz]	[V]	[A]	[Hz]	[V]	[A]	[A]	[A]	[r.p.m.]	%	[°C]
20	9,62	1,53	220	8,18	13,65	13,58	13,71	37	98,318	40,1
25	9,59	1,52	283	10,25	13,82	13,75	13,88	40	98,586	40,1
30	9,58	1,5	345	12,33	13,96	13,87	14,01	44	98,724	40,7
35	9,6	1,5	407	13,87	13,51	13,43	13,58	40	99,017	41,9

Tabla 5.

Prueba de vacío para la muestra E y parámetros de excitatriz grupo 3.

$f_{red}$ [Hz]	$V_{exc}$ [V]	$I_{exc}$ [A]	$f_{prototipo}$ [Hz]	$V_l$ [V]	$I_{L1}$ [A]	$I_{L2}$ [A]	$I_{L3}$ [A]	$N$ [r.p.m.]	$S$ %	$T$ [°C]
20	9,6	1,53	224	7,9	12,8	12,97	13,11	235	81,068	39,1
25	9,6	1,52	286	10,07	13,18	13,16	13,32	227	85,935	39,5
30	9,6	1,5	346	12,16	13,42	13,37	13,51	220	88,891	39,6
35	9,6	1,5	407	13,39	13,19	12,91	13,13	225	89,401	40,5

Con la información, se calculó la magnitud de la impedancia equivalente de entrada  $Z_{eq}$ , con la ecuación (4.3):

$$Z_{eq} = \frac{V_{\phi}}{I_{promedio}} \simeq X_1 + X_M \tag{4.3}$$

Debido a que se tomaron medidas de tensiones y corrientes de línea a diferentes frecuencias, se calcula la magnitud de la impedancia de entrada, Tabla 4.6, para la frecuencia respectiva y posteriormente se cambio a una frecuencia base, correspondiente a 20 Hz en la alimentación del motor de inducción, que es aproximadamente es 225 Hz en la alimentación del prototipo, para promediarlas y hallar la magnitud de  $Z_{eq}$ .

Tabla 6.

Impedancia equivalente de entrada en ohms.

Magnitud	muestra C	muestra B	muestra F	muestra E
$Z_{eq}$	0,361709727	0,332774018	0,371158101	0,350761298

**4.3 Prueba DC para determinar la resistencia del estator**

“La prueba consiste en aplicar un tensión DC a los devanados del estator del motor. La corriente medida, es la que fluye a través de dos de los devanados, de modo que la resistencia total en el camino de la corriente es  $2R_1$ . Para cada par de devanados se realizaron tres medidas de tensión y corriente, Tabla 4.7 y se tomó como resultado el promedio por cada fase, Tabla 4.8. Para el cálculo de la resistencia del estator se uso la ecuación (4.4).”[Chapman et al.,2012].

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \tag{4.4}$$

Tabla 7.

*Datos de la prueba DC*

Devanado fases 1		Devanados fases 1 y		Fases 2 y 3	
I[A]	V [V]	I[A]	V[V]	I [A]	V [V]
0,76	0,153	0,68	0,148	0,72	0,145
1,1	0,214	1,72	0,376	2,21	0,47
2,1	0,445	2,95	0,62	2,8	0,591

Tabla 8. *Cálculo de la resistencia del estator, en ohms por fase.*

Devanados de fases	R promedio
1 y 2	0,101294334
1y 3	0,107736867
2 y 3	0,104188333

Finalmente se obtiene un valor de resistencia por fase del estator de  $R_1 = 0, 10441 \text{ } [\Omega]$

**4.4 Prueba de rotor bloqueado**

Para la realización de la prueba de rotor bloqueado se tomo como base la prueba descrita en Chapman et al. [2012]. Se fijó los mismos tres grupos de valores de tensión y corrientes en la excitatriz del generador,Tabla 4.1, a su vez se varió la frecuencia de alimentación del motor de inducción, en un rango de 20 a 35 Hertz. Bajo las condiciones anteriores de alimentación e impidiendo el giro del rotor, se midieron valores de tensión de línea, corrientes de línea, potencia de entrada, velocidad, frecuencia de alimentación. En las Tablas 4.9 a 4.12 se presentan algunos de los datos obtenidos.

Tabla 9.

*Prueba de rotor bloqueado para la muestra C y parámetros de excitatriz grupo 3.*

<i><b>f<sub>red</sub></b></i> [Hz]	<i><b>f<sub>prototipo</sub></b></i> [Hz]	<i><b>V<sub>l</sub></b></i> [V]	<i><b>I<sub>L1</sub></b></i> [A]	<i><b>I<sub>L2</sub></b></i> [A]	<i><b>I<sub>L3</sub></b></i> [A]	<i><b>P</b></i> [W]
<b>20</b>	222	8,23	13,15	13,07	13,31	113,64
<b>25</b>	285	10,24	13,36	13,26	13,52	157,49
<b>30</b>	345	12,3	13,48	13,37	13,59	155,29
<b>35</b>	406	14,37	13,58	13,47	13,64	216,56

Tabla 10.

*Prueba de rotor bloqueado para la muestra B y parámetros de excitatriz grupo 3.*

<i><b>f<sub>red</sub></b></i> [Hz]	<i><b>f<sub>prototipo</sub></b></i> [Hz]	<i><b>V<sub>l</sub></b></i> [V]	<i><b>I<sub>L1</sub></b></i> [A]	<i><b>I<sub>L2</sub></b></i> [A]	<i><b>I<sub>L3</sub></b></i> [A]	<i><b>P</b></i> [W]
<b>20</b>	220	8,18	13,58	13,52	13,66	119,16
<b>25</b>	283	10,25	13,77	13,69	13,83	166,42
<b>30</b>	345	12,33	13,86	13,78	13,95	219,05
<b>35</b>	407	13,87	13,6	13,41	13,55	196,75

Tabla 11.

Prueba de rotor bloqueado para la muestra F y parámetros de excitatriz grupo 3.

$f_{red}$ [Hz]	$f_{prototipo}$ [Hz]	$V_l$ [V]	$I_{L1}$ [A]	$I_{L2}$ [A]	$I_{L3}$ [A]	$P$ [W]
20	222	8,34	13,5	13,42	13,7	134,58
25	285	10,29	13,77	13,65	13,9	159,37
30	246	12,1	13,91	13,79	14	194,48
35	406	14,6	13,99	13,86	14,05	272,9

Tabla 12.

Prueba de rotor bloqueado para la muestra E y parámetros de excitatriz grupo 3.

$f_{red}$ [Hz]	$f_{prototipo}$ [Hz]	$V_l$ [V]	$I_{L1}$ [A]	$I_{L2}$ [A]	$I_{L3}$ [A]	$P$ [W]
20	224	7,9	12,96	12,97	13,09	121,43
25	286	10,07	13,27	13,19	13,33	150,03
30	346	12,16	13,53	13,47	13,61	197,87
35	407	13,39	13,26	13,24	13,28	225,05

Con los datos recopilados y haciendo uso de las siguientes ecuaciones se determina el valor de factor de potencia  $fp$  ecuación (4.5), la magnitud total de la impedancia del motor  $Z_{LR}$  ecuación (4.6), reactancia y resistencia de rotor bloqueado  $X_{LR}$  ecuación (4.8),  $R_{LR}$  ecuación (4.7) respectivamente, resistencia del rotor  $R_2$  ecuación (4.9) y reactancias, del estator  $X_1$  ecuación (4.10), rotor,  $X_2$  ecuación (4.10) y de la rama de magnetización  $X_M$  ecuación (4.11). Los resultados se muestran en la Tabla 4.13. Las siguientes ecuaciones fueron tomadas de [Chapman et al., 2012].

$$fp = \cos \theta = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_L} \tag{4.5}$$

$$Z_{LR} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L} \tag{4.6}$$

$$R_{LR} = Z_{LR} \cos \theta \tag{4.7}$$

$$X_{LR} = Z_{LR} \sin \theta \tag{4.8}$$

$$R_2 = R_{LR} - R_1 \tag{4.9}$$

$$X_1 = X_2 = 0,5X_{LR} \tag{4.10}$$

$$X_M = Z_{eq} - X_1 \tag{4.11}$$

Tabla 13.

*Parámetros de rotor bloqueado en ohms.*

	<b>muestra C</b>	<b>muestra B</b>	<b>muestra F</b>	<b>muestra E</b>
<b><i>f<sub>p</sub></i></b>	0,674512	0,693209	0,812195	0,727293
<b><i>Z<sub>L</sub></i></b>	0,507159	0,469969	0,503038	0,516094
<b><i>R<sub>L</sub></i></b>	0,342084	0,325787	0,408565	0,375352
<b><i>X<sub>L</sub></i></b>	0,374417	0,338723	0,293465	0,354208
<b><i>R<sub>2</sub></i></b>	0,237675	0,221377	0,304155	0,270942
<b><i>X<sub>1</sub></i></b>	0,187208	0,169361	0,146732	0,177104
<b><i>X<sub>2</sub></i></b>	0,187208	0,169361	0,146732	0,177104
<b><i>X<sub>M</sub></i></b>	0,174501	0,163412	0,224425	0,173657

### 5 Análisis de datos

#### 5.1 Circuito equivalente

Para la obtención del circuito equivalente se tuvo en cuenta el modelo desarrollado para motores de inducción y obtención de parámetros de Chapman et al. [2012], Figura 5.1. Cada conjunto de parámetros de reactancias y resistencias corresponde a un modelo diferente ya que se encontraron específicamente para cada rotor, Tabla 5.1.

Tabla 14.

*Parámetros para los circuitos equivalentes de cada motor.*

Muestra	$X_1$ [ $\Omega$ ]	$X_2$ [ $\Omega$ ]	$X_M$ [ $\Omega$ ]	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$R_2$ [ $\Omega$ ]
<b>C</b>	0,187208	0,187208	0,174501	0,10441	0,237675
<b>B</b>	0,169361	0,169361	0,163412	0,10441	0,221377
<b>F</b>	0,146732	0,146732	0,224425	0,10441	0,304155
<b>E</b>	0,177104	0,177104	0,173657	0,10441	0,270942

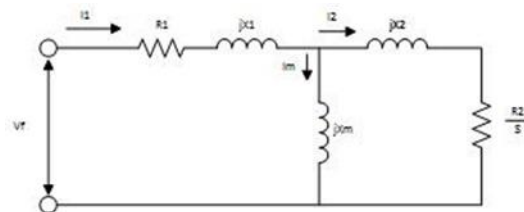


Figura 19. Circuito equivalente para el prototipo.

Es importante resaltar, que no fue necesario impedir el movimiento del fluido con una rejilla como se había propuesto en el diseño de las pruebas de laboratorio, ya que el fluido y el recipiente rotaron como un solo elemento, más no individualmente.

## **5.2 Variación de los parámetros del circuito equivalente con respecto a la frecuencia de alimentación y la corriente de excitación del generador.**

En el desarrollo de las pruebas de laboratorio se fijaron grupos de tensión y corriente para la alimentación del circuito de excitación del generador mientras que se variaba la frecuencia de alimentación del prototipo. Por esta razón se desea observar cómo se ven afectados los parámetros de circuito equivalente al efectuar estas variaciones.

**5.2.1 Variación de frecuencia** Para esta primera tabulación de datos se fijaron los valores de corriente de excitación en 1,29 A, 1,39 y 1,52 Amperios, mientras que se variaba la frecuencia de alimentación del prototipo, en un rango de 222 a 407 Hz para las muestras C y F debido a que estas presentaron un mejor desempeño en las pruebas de laboratorio.

Se pudo apreciar en las Figuras 5.2 a 5.7 que los incrementos de frecuencia afecta la magnitud de todos los parámetros del circuito equivalente de las dos muestras analizadas, con excepción de la resistencia del estator, ya que para determinar este parámetro es necesario realizar la prueba de DC la cual no se ve afectada con las variaciones de frecuencia. Se puede decir que los parámetros de los circuitos equivalentes se ven afectados de forma lineal. Uno de los parámetros que presento más fluctuaciones con los cambios de frecuencia fue la reactancia de magnetización por otro lado la resistencia del rotor fue la que menos variaciones en su magnitud presento.

5.2.1.1 Tabulación de datos para la muestra C

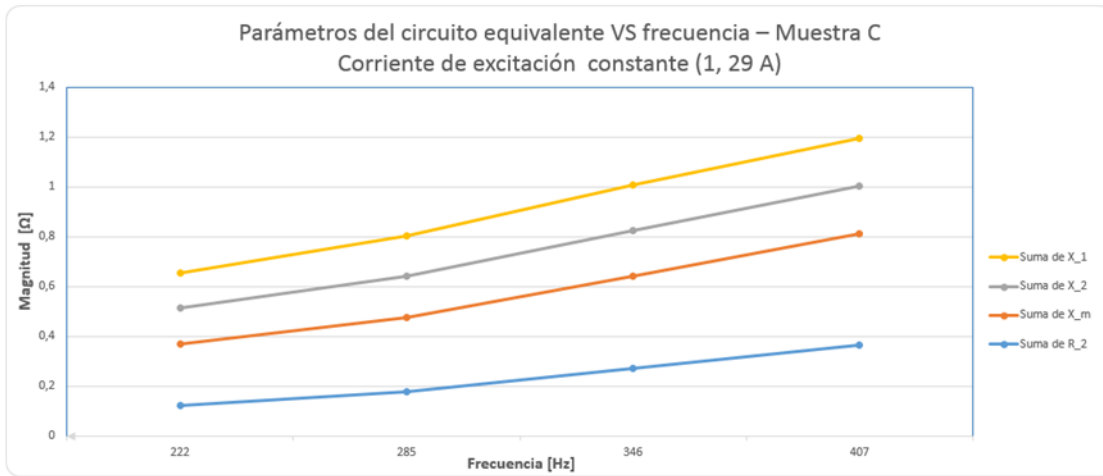


Figura 20. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,29 A - Muestra C

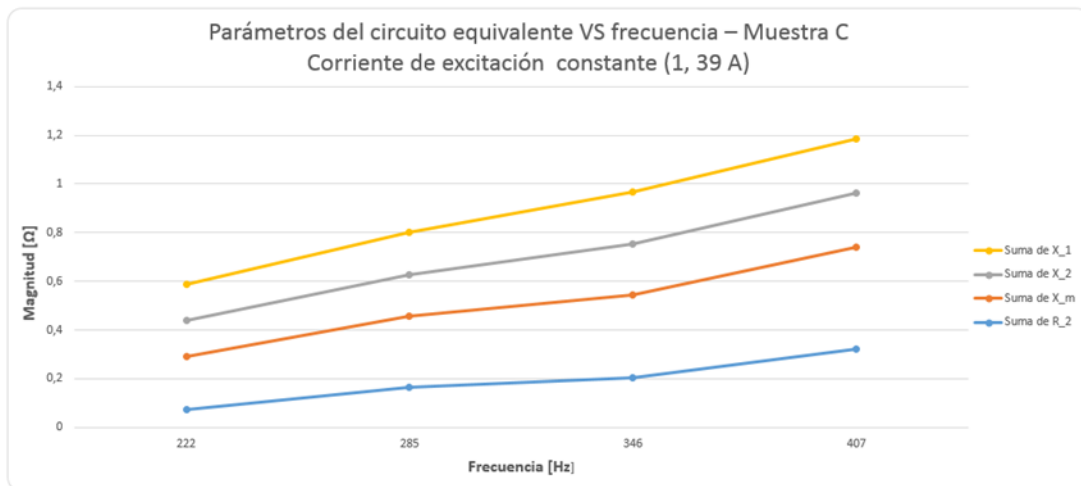


Figura 21. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,39 A - Muestra C

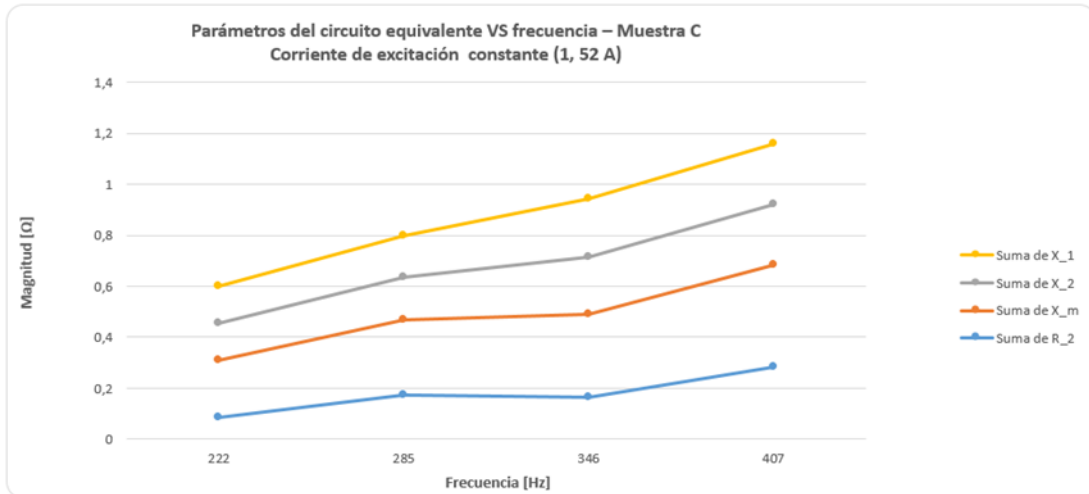


Figura 22. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,52 A - Muestra C

5.2.1.2 Tabulación de datos para la muestra F

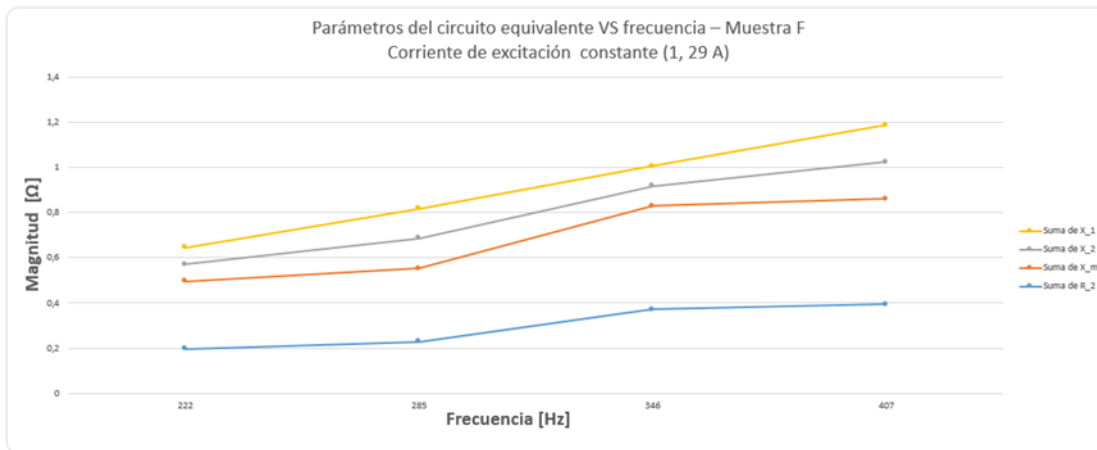


Figura 23. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,29 A - Muestra F.

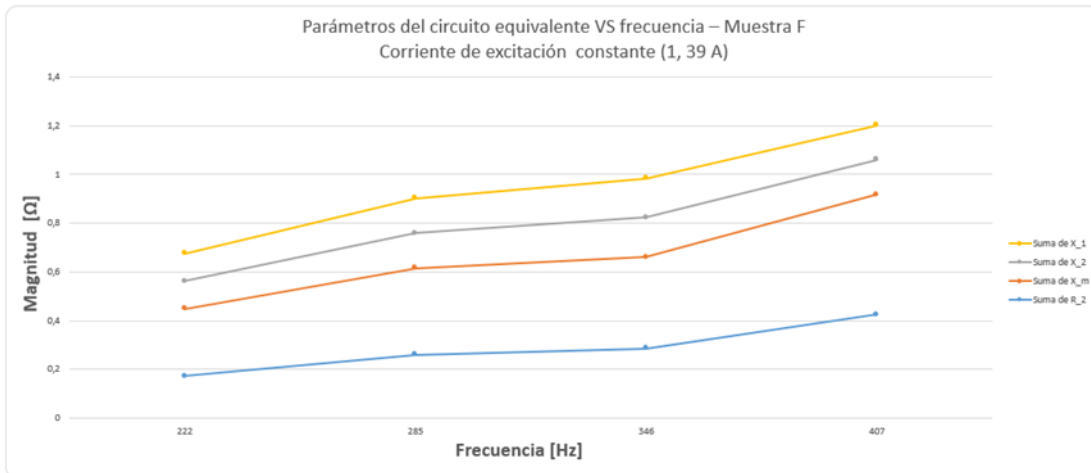


Figura 24. Parámetros del circuito equivalente Vs frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,39 A - Muestra F

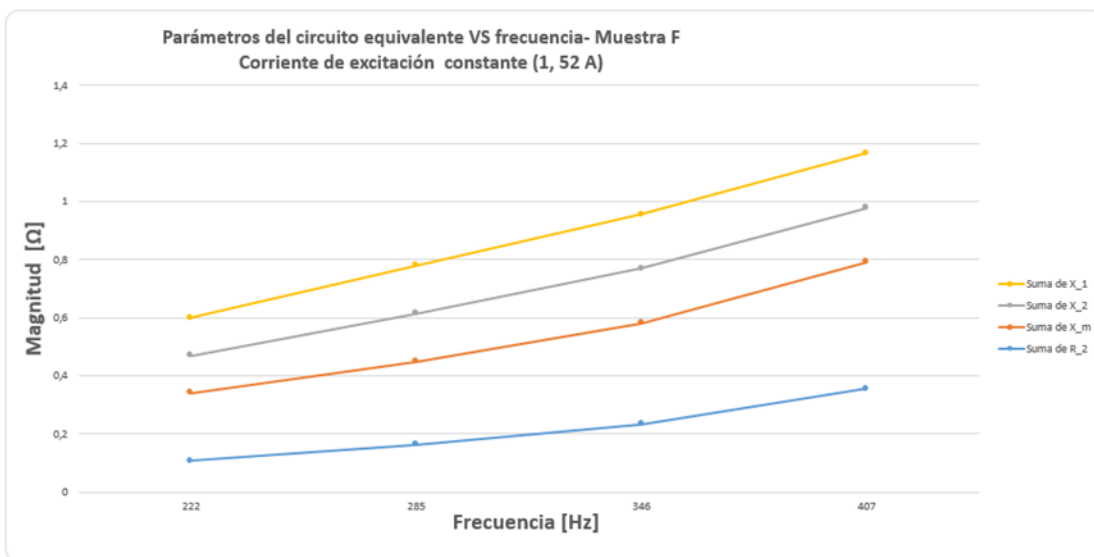


Figura 25. Parámetros del circuito Vs equivalente frecuencia. Para corriente de excitación constante de 1,52 A - Muestra F

**5.2.2 Variación de corriente.** Para este segundo caso se fijó el valor de la frecuencia de alimentación del prototipo en un valor de 222 Hz, mientras que se variaba la corriente de excitación del generador, para las muestras C y F.

5.2.2.1 Tabulación de datos para la muestra C

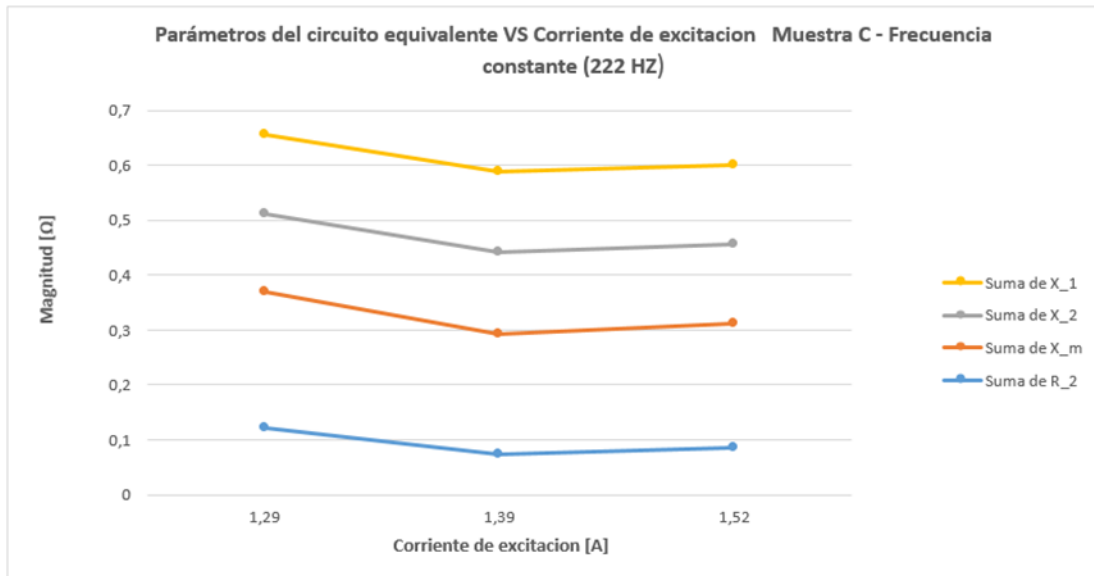


Figura 26. Parámetros del circuito equivalente Vs corriente de excitación. Para frecuencia constante de 222 Hz - Muestra C.

En este caso la variación de corriente de excitación del generador también afecta los mismos parámetros del circuito equivalente por fase del prototipo, pero a diferencia del anterior caso en que las dos muestras C y F presentaban comportamientos similares aquí sucede algo distinto para cada muestra. En la Figura 5.8 se observa un pequeño decremento en todos los parámetros y posteriormente una estabilización en el rango de pruebas, mientras que el comportamiento apreciado en la Figura 5.9 se ve un pequeño incremento en la magnitud en las reactancias del rotor y del estator y posteriormente un decremento notorio en todos los parámetros.

5.2.2.2 Tabulación de datos para la muestra F

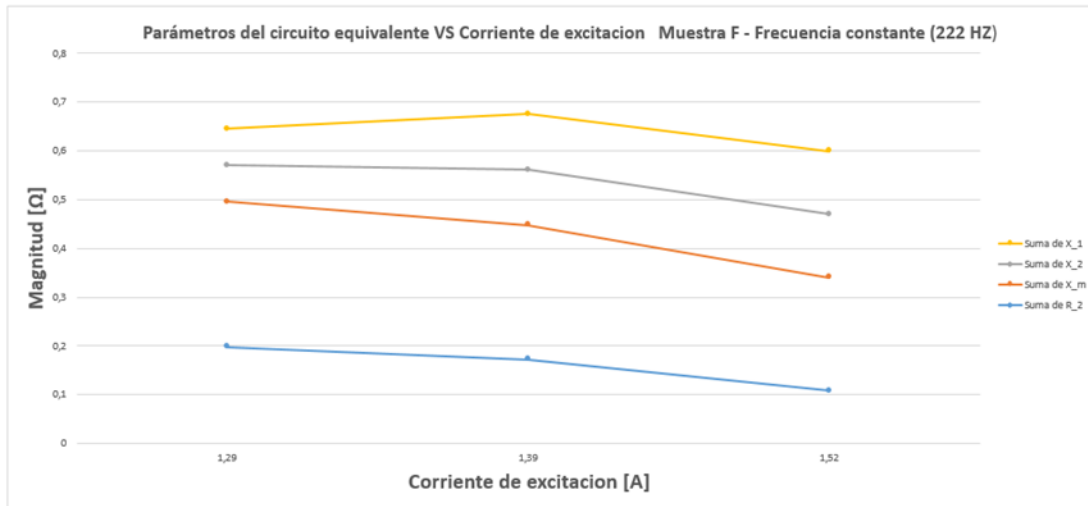


Figura 27. Parámetros del circuito equivalente Vs corriente de excitación. Para frecuencia constante de 222 Hz - Muestra F.

5.3 Datos de placa y eficiencia

Los datos de placa de un motor son los que indican a qué condiciones opera la máquina. Para la asignación de los datos de placa del prototipo correspondiente a las muestras que presentaron mejores rendimientos, C y F se tomó como base la frecuencia de 222 Hz, a partir de este valor se fijaron los valores de tensión, potencia, factor de potencia y velocidad.

**5.3.1 Eficiencia.** En las maquinas eléctricas, como en cualquier otro dispositivo de transformación de energía, existen perdidas, de tal forma que solamente se entrega a la salida una parte de la energía absorbida en la entrada. El rendimiento o eficiencia se define como el cociente entre la potencia útil y la potencia absorbida o total de acuerdo con la ecuación (5.1).Mora[2008]

$$\eta = \frac{\textit{Potencia útil}}{\textit{Potencia total}} \times 100\% \tag{5.1}$$

El cálculo de la potencia útil para el prototipo se realizó tomando la potencia total consumida por el motor de la red a la cual se le descontó la potencia de pérdidas que se registró en las pruebas de laboratorio. Con la potencia de entrada o total y la potencia útil aplico la ecuación (5.1) para el cálculo del rendimiento para las muestras C y F.

En la Tabla 5.2 se muestran los datos de placa para los motores con muestras C y F además de su rendimiento.

Tabla 15.

*Datos de placa moteres C y F*

<b>Muestra</b>	<b>Potencia</b> [w]	<b>Tensión</b> [V]	<b>Frecuencia</b> [Hz]	<b>Velocidad</b> [rpm]	<b>fp</b>	<b>Eficiencia</b> %
<b>C</b>	128	8,3	222	207	0,6213	37,5722
<b>F</b>	192	8,3	222	221	0,6996	40,7878

## 6. Observaciones

Durante el desarrollo de pruebas fue necesario mantener la temperatura entre 30 y 40° c para lograr un mejor desempeño del prototipo. Para cumplir con dichas condiciones fue necesario un sistema de ventilación.

En el diseño de las pruebas de laboratorio se planteó que el fluido magnetorreológico iba a girar independientemente del recipiente que lo contenía, por esta razón se implementó el uso una rejilla durante las pruebas, para bloquear el movimiento del fluido y analizar su comportamiento, pero esta situación no se presentó ya que la rotación del fluido y el recipiente es unificada. Por tal motivo no hubo necesidad de realizar la prueba como se había planteado inicialmente.

Con los datos obtenidos en las pruebas se pudo observar que con la máxima corriente de excitación, mayor fue la velocidad alcanzada por el rotor del prototipo.

Para las muestras B y E con los parámetros de excitación del grupo uno fue necesario aplicar un par de arranque.

Mejorar el sistema mecánico de rotación del prototipo para adquirir un mejor rendimiento en un rango más alto de frecuencias y alcanzar velocidades más altas.

## 7. Conclusiones

Se implementó un prototipo de motor compuesto por fluido magnetorreológico al que se le realizaron prueba de vacío y rotor bloqueado para su caracterización. Durante la construcción del prototipo de motor se experimentaron fallas en el diseño inicial, como lo fue el del rotor o recipiente para el fluido y la ubicación del material magnético dentro del estator las cuales se solucionaron durante del proceso alternativamente de modo que se ajustara a las características de funcionamiento un motor de inducción con rotor compuesto por fluido magnetorreológico.

Actualmente el prototipo es ineficiente sin aplicaciones inmediatas, por tanto se recomienda realizar pruebas con frecuencias de alimentación superiores a las que se aplicaron en este trabajo de grado, mejorar el sistema mecánico de rotación, materializar la impresión en 3D del rotor con materiales adecuados, obteniendo un mejor acople al soporte, sustituir el fluido magnetorreológico del rotor por un ferrofluido para lograr una mejor respuesta ante la presencia de un campo magnético. Las muestras A y D resultaron ineficientes, debido a que su contenido de no permitió generar la suficiente fuerza para hacer girar el rotor bajo las condiciones en la excitatriz del generador y el rango de frecuencias de alimentación fijadas en el laboratorio durante las pruebas.

En el desarrollo de las prueba de vacío, se alcanzó una mayor velocidad del rotor a una frecuencia que ronda los 225 Hz y tensión de 8 V, en la alimentación del prototipo y grupo 3 en los parámetros de la excitatriz. Se pudo observar que tenía relación con la corriente de excitación, entre mayor fuera su magnitud, se alcanzaban mayores velocidades en el rotor.

Los mejores resultados en la prueba de vacío se obtuvieron a los valores de frecuencia y tensión antes mencionados, ya que no fue posible hacer pruebas a frecuencias por encima de 407 Hz porque el montaje de laboratorio generaba vibraciones excesivas a partir de esta frecuencia. Entre las frecuencias de 286 y 350 Hz el sistema mecánico del rotor alcanzaba velocidades que generaban roces con el estator.

Las soluciones en aceite rompían la inercia a menores frecuencias y menor tensión de alimentación en el prototipo, que las soluciones de agua/jabón, pero alcanzaban menor velocidad. Esto se debe que al ser más densa y pesada las concentraciones en aceite es más difícil alcanzar altas velocidades. Con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio fue posible determinar los parámetros de los circuitos equivalentes basados en el modelo de un motor de inducción, de las muestras B, C, E y F.

Debido a que se varió la frecuencia de alimentación en el prototipo en un rango de 225 a 407 Hz se obtuvieron velocidades de sincronismo relativamente altas ya que esta depende de la frecuencia de alimentación, además las velocidades que alcanzo el rotor no fueron las mejores debido a problemas mecánicos ya mencionados. En base a estas características de funcionamiento se presentaron deslizamientos del orden de 90%.

Las variaciones de frecuencia afectan de forma directa a los parámetros del circuito equivalente de cada prototipo generando un incremento en su magnitud.

### Referencias Bibliográficas

Ardila, M. A . Torres, E. Triviño P. R, and Molina C. P. Obtención de ferrofluidos a partir de magnetita mineral y determinación del efecto del tipo de fluido de transporte y la concentración de magnetita sobre la densidad. *In Vestigium Ire*, 3(1), 2013.

Fraile Mora J. *Máquinas eléctricas*, volume 5. McGraw-Hill, 2008.

López Díaz, A. Meza González, J. C., TAPIA P. , and Eliseo

Matthew NO Sadiku. *Elementos de electromagnetismo*. Oxford University Press,, 2003.

Mesquida C.D and Lässig J. L. Introducción a los fluidos magnetoreológicos con aplicaciones en ingeniería. 2012.

Miguel Cúpich Rodríguez and Fernando Javier Elizondo Garza. Amortiguadores magnetoreológicos. *Ingenierías*, 1(2):50–54, 1998.

Pablo JorgeP ablo Jorge Gualtieri Gualtieri. *Sistemas eléctricos del automóvil: 303 ilustraciones*. 1996.

SORIANO. Instrumentación de una prótesis de miembro inferior a nivel transfemoral. 2015.

Stephen J Stephen J Chapman, George J WILCOX Thaler, MILTON L George J Thaler, Milton L Wilcox, Bhag S HIZIROGLU Guru, HUSEYIN R Bhag S Guru, Hüseyin R Hiziroglu, Jean-PaulBORNARD Barret, PIERRE MEYER, BRUNOJ-P Barret, et al. *Máquinas eléctricas*. Number 621.313. McGraw-Hill,, 2012.