



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

TÍTULO:

Análisis e Implementación de un Sistema de Accionamiento Utilizando Tecnología de Reluctancia Híbrida HRM (Hybrid Reluctance Motor)

AUTOR: Bravo Castro Joel

FECHA DE PRESENTACIÓN: Febrero, 2024

APELLIDOS: BRAVO CASTRO	NOMBRES: JOEL LEON
TITULACIÓN: Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas Automáticos y Electrónica Industrial	
PLAN: 2023	
DIRECTOR: Balduino, Blanquee Molina	
DEPARTAMENTO: Ingeniería Eléctrica	

CALIFICACIÓN DEL TFM

<u>TRIBUNAL</u>		
PRESIDENTE	SECRETARIO	VOCAL
FECHA DE LECTURA:		

Este proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales: Sí No

RESUMEN

El análisis de la viabilidad para implementar la tecnología de motores híbridos de reluctancia variable (HRM) en contactores, realizado mediante el método de análisis de elementos finitos magnéticos con FEMM junto con MATLAB, reveló hallazgos significativos al evaluar los efectos de introducir un imán permanente y ajustar parámetros como el espesor del imán y las dimensiones de la armadura. La presencia del imán generó un aumento adicional de la fuerza, destacando incrementos del 117% en condiciones específicas. La optimización del contactor con imán condujo a reducciones en el consumo eléctrico, alcanzando un 8.84% en el primer modelo y hasta un 17.76% en el segundo, evidenciando la eficacia de la tecnología en eficiencia energética. Al aplicar estos hallazgos en motores HRM, se lograron mejoras, incluyendo un aumento de 0.75 Nm en el torque estático mediante ajustes geométricos específicos. Este enfoque no solo mejora el rendimiento del contactor, sino también aumenta el torque en motores HRM, respaldando la aplicabilidad de la tecnología HRM y abriendo la puerta a futuras investigaciones donde se enfatice la exploración de aspectos térmicos y de mecánica dinámica para una comprensión más completa del rendimiento con miras a aplicaciones industriales.

Palabras clave:

Motor Híbrido reluctancia variable	Contactores	Elementos finitos magnéticos	FEMM
Matlab	Imán permanente	Eficiencia energética	

ABSTRACT

The viability analysis for implementing Hybrid Variable Reluctance Motors (HRM) technology in contactors, conducted through the method of magnetic finite element analysis using FEMM along with MATLAB, revealed significant findings when assessing the effects of introducing a permanent magnet and adjusting parameters such as magnet thickness and armature dimensions. The presence of the magnet resulted in an additional force increase, highlighting increments of 117% under specific conditions. Optimizing the contactor with a magnet led to reductions in electrical consumption, reaching 8.84% in the first model and up to 17.76% in the second, demonstrating the effectiveness of the technology in energy efficiency. Applying these findings to HRM motors achieved improvements, including a 0.75 Nm increase in static torque through specific geometric adjustments. This approach not only enhances the contactor's performance but also boosts torque in HRM motors, supporting the applicability of HRM technology and paving the way for future research emphasizing the exploration of thermal and dynamic mechanical aspects for a more comprehensive understanding of performance with a focus on industrial applications.

Keywords:

Hybrid Variable Reluctance Motors	Contactors	Magnetic Finite Element	FEMM
Matlab	Permanent Magnet	Energy Efficiency	

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 ANTECEDENTES	10
1.2 MOTIVACIÓN	10
1.3 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	11
1.4 ALCANCE	12
1.5 RECURSOS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DEL TFM	12
1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO	13
2. ESTADO DEL ARTE	14
2.1 CONTACTORES EN LA ACTUALIDAD	14
2.2 TECNOLOGÍA HRM EN LA ACTUALIDAD	15
3. MODELADO Y SIMULACIÓN DE CONTACTOR CON TECNOLOGÍA HRM	18
3.1 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DEL CONTACTOR	19
3.2 SIMULACIÓN ESTÁTICA DEL CONTACTOR	19
4. MODELADO Y SIMULACIÓN EN MOTORES HRM	22
4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE MOTOR HRM	22
4.2 SIMULACIÓN ESTÁTICA DEL MOTOR HRM	23
5. RESULTADOS	25
5.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR LA TECNOLOGÍA HRM EN CONTACTORES.	25
5.1.1 FUERZA VS CORRIENTE & GAP	25
5.1.2 EFECTOS DEL ESPESOR DEL IMÁN	29
5.1.3 PRIMERA APROXIMACIÓN DE CONTACTOR CON IMÁN	30
5.1.4 EFECTOS DE MODIFICAR EL ESPESOR DE LAS PATAS DE LA ARMADURA	33
5.1.5 EFECTOS DE MODIFICAR EL LARGO DE LAS PATAS DE LA ARMADURA	33
5.1.6 SEGUNDA APROXIMACIÓN DE CONTACTOR CON IMÁN	34
5.2 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE HALLAZGOS EN CONTACTORES	

APLICADOS EN MOTOR HRM	36
5.2.1 RESULTADOS DEL MOTOR HRM-12/10	36
5.2.2 RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN DE HALLAZGOS DE CONTACTORES A MOTOR HRM-12/10	39
6. CONCLUSIONES	41
6.1 CONCLUSIONES DE CONTACTORES APLICADA TECNOLOGÍA HRM.	41
6.2 CONCLUSIONES DE CONTACTORES APLICADA TECNOLOGÍA HRM.	42
7. APLICACIONES EN LÍNEAS FUTURAS	43
8. BIBLIOGRAFIA	44
ANEXOS	44

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ENSAYO REALIZADO A MOTOR HRM EN INSTALACIONES EPSEVG	10
FIGURA 2. CONTACTOR CON TECNOLOGÍA HRM PROPUESTO POR ROLANDO ÁVILA	15
FIGURA 3. NUEVO MOTOR SR CON IMÁN PERMANENTE ENTRE LAS PUNTAS DE LOS POLOS DEL ESTATOR	16
FIGURA 4. MÁQUINAS HÍBRIDAS DE RELUCTANCIA CON ELECTROIMANES EN FORMA DE U E IMANES PERMANENTES	16
FIGURA 5. CONFIGURACIÓN DE MOTOR HSRM PROPUESTO POR JINGWEI ZHU ET AL	17
FIGURA 6. MODELO DE MOTOR DE RELUCTANCIA CON IMANES PERMANENTES (PM-SRM)	17
FIGURA 7. MODELO DE MOTOR DE RELUCTANCIA CON IMANES PERMANENTES Y NÚCLEO TIPO C	18
FIGURA 8. ESQUEMA DE CONTACTOR	19
FIGURA 9. BOSQUEJO EN FEM (A) CONTACTOR CON IMÁN Y (B) CONTACTOR SIN IMÁN	20
FIGURA 10. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS MAGNÉTICOS EN FEM	21
FIGURA 11. ALGORITMO PRINCIPAL PARA EXTRACCIÓN DE RESULTADOS MAGNÉTICOS DE CONTACTORES	21
FIGURA 12. ALGORITMO DE ITERACIÓN UTILIZADO EN EL PROGRAMA	22
FIGURA 13. DIMENSIONES DEL MOTOR	23
FIGURA 14. DIBUJO DE UN MOTOR HRM 12/10 EN FEMM	24
FIGURA 15. CURVAS DE FUERZA VS GAP Y CORRIENTE	26
FIGURA 16. AUMENTO PORCENTUAL DE LA FUERZA RESPECTO A GAP Y CORRIENTE	26
FIGURA 17. MÁXIMO AUMENTO DE FUERZA OBTENIDO	27
FIGURA 18. FUERZA VS CORRIENTE DE CONTACTOR CON Y SIN IMÁN PARA GAP DE 1.60MM	27
FIGURA 19. FUERZA VS POTENCIA CONSUMIDA DE CONTACTOR CON Y SIN IMÁN PARA GAP DE 1.60MM	28
FIGURA 20. FLUJO MAGNÉTICO EN EXTREMO DE LA ARMADURA FIJA VS CORRIENTE DE CONTACTOR CON Y SIN IMÁN PARA GAP DE 1.60MM	28
FIGURA 21. FUERZA VS CORRIENTE CON DIFERENTES ESPESORES DE IMÁN	29
FIGURA 22. FLUJO MAGNÉTICO EN EXTREMO DE LA ARMADURA FIJA VS CORRIENTE CON DIFERENTES ESPESORES DE IMÁN	29
FIGURA 23. FUERZA VS POTENCIA CONSUMIDA DE CONTACTOR CON DIFERENTES ESPESORES DE IMÁN	30
FIGURA 24. FUERZA VS CORRIENTE DE CONTACTOR SIN IMÁN CON GAP DE 1.60 MM	31
FIGURA 25. FUERZA VS POTENCIA CONSUMIDA CONTACTOR SIN IMÁN CON GAP DE 1.60 MM	31
FIGURA 26. FUERZA VS CORRIENTE DE CONTACTOR SON Y SIN IMÁN CON GAP DE 1.60 MM	32
FIGURA 27. FUERZA VS POTENCIA CONSUMIDA DE CONTACTOR SON Y SIN IMÁN CON GAP DE 1.60 MM	32
FIGURA 28. FUERZA VS CORRIENTE DE CONTACTOR CONVENCIONAL Y CONTACTOR MODIFICADO ESPESOR DE PATAS	33
FIGURA 29. FUERZA VS CORRIENTE DE CONTACTOR CONVENCIONAL Y CONTACTOR MODIFICADO LONGITUD DE PATAS	34
FIGURA 30. FUERZA VS CORRIENTE DE CONTACTOR CONVENCIONAL Y CONTACTOR CON IMÁN MODIFICADO PARÁMETROS DE DIMENSIÓN	35
FIGURA 31. FUERZA VS POTENCIA CONSUMIDA DE CONTACTOR CONVENCIONAL Y CONTACTOR CON IMÁN MODIFICADO PARÁMETROS DE DIMENSIÓN	35
FIGURA 32. CURVAS DE MAGNETIZACIÓN DE HRM-12/10	37
FIGURA 33. FLUJO EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN ANGULAR Y EL VALOR DE CORRIENTE DE FASE DEL MOTOR HRM-12/10	38
FIGURA 34. VALOR DEL PAR EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN ANGULAR Y EL VALOR DE CORRIENTE DE FASE DEL MOTOR HRM 12/10	39
FIGURA 35. CURVAS DE MAGNETIZACIÓN DE HRM-12/10 MODIFICADO	40
FIGURA 36. FLUJO EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN ANGULAR Y EL VALOR DE CORRIENTE DE FASE DEL MOTOR HRM-12/10 MODIFICADO	40
FIGURA 37. VALOR DEL PAR EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN ANGULAR Y EL VALOR DE CORRIENTE DE FASE DEL MOTOR HRM 12/10 MODIFICADO	41
FIGURA 38. FOTOS DE CONTACTOR SPRECHER+SCHUH CA 3-9-10	53

FIGURA 39. OBTENCIÓN DE ESPESOR DE ALAMBRE DE LA BOBINA	53
FIGURA 40. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL CONTACTOR	54

GLOSARIO DE SIGNOS, SÍMBOLOS, ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y TÉRMINOS

a	Sección transversal del contactor
BLDCM	Motor de Corriente Continua Sin Escobillas
BP	Ancho del brazo del yugo
BS	Ancho del polo del rotor
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
d _{al}	Diámetro de alambre de bobina
dG	Derivada del GAP
di	Derivada de la corriente
dρ	Derivada de la permeancia
EB	Longitud de bobina
EI	Espesor del imán
EP	Espesor de patas
EY	Espesor de Yugo
FEMM	método de elementos finitos magnéticos
Fm	Fuerza generada por el contactor
GAP o G	Separación máxima entre armadura fija y móvil o Entrehierro
GAPMIN	Separación mínima entre armadura fija y móvil
HM	Altura del imán permanente
HRM o HSRM	Motor Híbrido de reluctancia variable
HY	Altura del yugo
i	Corriente
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
I _{max}	Intensidad máxima que circula por la bobina
I _{min}	Intensidad mínima que circula por la bobina
K	Factor multiplicador de bobinas por fase
L	Inductancia
l	Longitud media del circuito magnético
LB	Espesor de bobina
LM	Ancho del imán
LP	Longitud de patas de armadura
LW	Profundidad del contactor / motor
LW	Profundidad del motor
LY	Longitud del yugo
M	Número de fases
M-19 Steel	Material de la armadura en programa FEMM
N _{IT}	Numero de iteraciones de corriente
N _{ITE}	Numero de iteraciones del GAP
NdFeB32MGOe	Material del imán permanente en programa FEMM
NO	Material ferromagnético del motor
PM-SRM	Imán permanente con Motor de reluctancia variable
PWM	Modulación por Ancho de Pulso
RG	Radio externo del rotor
RY	Radio externo del yugo
SRM	Motor de reluctancia variable
TURNNS o N	Número de espiras de bobina
W _{mec}	Energía mecánica
θ	Posición angular
μ ₀	Permeabilidad en vacío
μ _r	Permeabilidad relativa
ρ	Permeancia
ψ	Flujo magnético

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG) ha establecido acuerdos de investigación en colaboración con RAC Technologies. Estos convenios buscan explorar y aprovechar la tecnología HRM, y tras el estudio y puesta en marcha de varios modelos de motores HRM con diversas especificaciones técnicas, se han realizado descubrimientos significativos. Como resultado de estas colaboraciones, se ha logrado la creación de un modelo mejorado que ha sido objeto de una patente registrada bajo el nombre "Hybrid electric reluctance machine". [1].

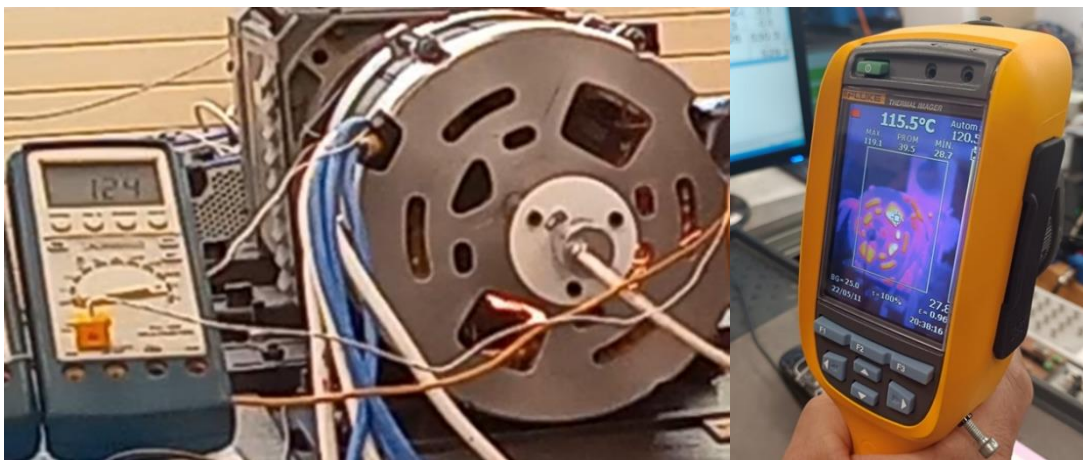


Figura 1. Ensayo realizado a motor HRM en instalaciones EPSEVG

A pesar de los avances obtenidos, es relevante señalar que el conocimiento en torno a esta tecnología sigue siendo amplio, y existen áreas que demandan una mayor exploración e investigación. Este trabajo de fin de estudio se fundamenta en estos antecedentes, centrándose en una comprensión profunda de la tecnología HRM y sus aplicaciones por medio de un análisis semi-estático. El objetivo primordial es abordar y resolver cuestiones aún no exploradas, contribuyendo así al avance y la expansión del conocimiento en este campo específico.

1.2 MOTIVACIÓN

La motivación detrás de esta iniciativa radica en el deseo de adquirir conocimientos para diseñar máquinas electromagnéticas de alto rendimiento, aplicando las habilidades obtenidas durante el máster en materias como diseño de máquinas eléctricas, gestión de la energía y el estudio de conceptos fundamentales como circuitos electromagnéticos, análisis de elementos finitos y la utilización de diversos softwares especializados.

Esta aportación podría marcar un avance significativo al proporcionar al mundo no solo contactores más eficientes, sino también motores destinados a vehículos eléctricos con un rendimiento notablemente mejorado. Estos desarrollos no solo tienen implicaciones prácticas inmediatas para la eficiencia energética y la movilidad sostenible, sino que también contribuyen al progreso tecnológico en el campo de la electromovilidad.

1.3 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El crecimiento constante de la presencia de contactores en vehículos híbridos y eléctricos subraya la necesidad continua de estudiar estos componentes. En un contexto donde la eficiencia energética se revela como crucial para abordar los retos contemporáneos, la aplicación de la tecnología de motores híbridos de reluctancia variable (HRM), en desarrollo, emerge como una oportunidad estratégica para potenciar el rendimiento de los contactores. Dado que esta tecnología se encuentra en fases evolutivas, se requiere una investigación exhaustiva para comprender a fondo sus implicaciones y posibilidades. Por este motivo, se desarrolla esta investigación con los siguientes objetivos:

Investigar los Actuales Accionamientos y la Tecnología HRM:

- Explorar detalladamente los accionamientos existentes, sus usos y aplicaciones, así como la tecnología de motores híbridos de reluctancia variable (HRM). Se busca comprender cómo se implementan en sistemas contemporáneos, con un énfasis especial en su aplicación en contactores.

Evaluar Ventajas y Desventajas de los Contactores y la Tecnología HRM:

- Explorar la evolución histórica de los contactores y la tecnología HRM, destacando avances significativos en ambas áreas.

Proporcionar Propuestas de Accionamientos con Tecnología HRM:

- Formular propuestas innovadoras de accionamientos que utilicen la tecnología HRM para mejorar el rendimiento de los contactores. Factores como eficiencia, consumo y generación de fuerza serán considerados en la conceptualización de estas propuestas.

Realizar Simulaciones Electromagnéticas en Contactores:

- Desarrollar simulaciones detalladas centradas en el aspecto magnético de los contactores con tecnología HRM.
- Emplear técnicas de elementos finitos con el software FEMM para comprender el comportamiento y la generación de fuerzas y torque en los contactores.

Implementar Hallazgos en un Motor HRM para Mejorar sus Prestaciones:

- Integrar los resultados obtenidos en la investigación de los contactores en la tecnología HRM a un motor HRM. Se realizarán simulaciones en elementos finitos electromagnéticos con FEMM para obtener el torque generado por el motor, aplicando así los hallazgos para mejorar tanto el rendimiento como la eficiencia del motor.

Comparar y Analizar los Resultados Obtenidos en Contactores y Motores HRM:

- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos de las simulaciones y pruebas experimentales en contactores y motores con tecnología HRM. Este análisis permitirá extraer conclusiones específicas para estos componentes esenciales en sistemas electromecánicos y considerando la eficiencia.

Elaborar una Documentación Completa que Registre los Descubrimientos en Contactores y Motores HRM:

- Compilar y presentar de manera detallada todos los descubrimientos, análisis y conclusiones específicas para los contactores y motores con tecnología HRM en una documentación completa. Esta documentación proporcionará una referencia clara para futuras investigaciones y desarrollos en este campo específico,

abarcando tanto los contactores como los motores HRM.

Estos objetivos se alinean con la visión integral de mejorar la eficiencia y sostenibilidad en sistemas electromecánicos, aportando conocimientos valiosos y soluciones innovadoras en el campo de los contactores y motores híbridos de reluctancia variable, con un enfoque particular en la transferencia de avances desde los contactores hacia la mejora de prestaciones en motores HRM en desarrollo.

1.4 ALCANCE

Este proyecto se enfocará en investigar a fondo los accionamientos aplicados a la tecnología de Motores Híbridos de Reluctancia Variable (HRM) en el contexto de su implementación en contactores. Se llevará a cabo un análisis exhaustivo de las ventajas y desventajas de estas tecnologías en términos de eficiencia energética. Se formularán propuestas innovadoras de accionamientos y las simulaciones se centrarán en aspectos electromagnéticos, proporcionando una comprensión detallada del comportamiento de los contactores con tecnología HRM. La comparación y análisis de resultados, junto con la elaboración de una documentación detallada, contribuirán a proporcionar una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en este campo específico de sistemas electromecánicos.

1.5 RECURSOS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DEL TFM

Recursos Humanos:

Tutor - Universidad Balduí Blanquee Molina: El tutor actuará como asesor clave durante todo el desarrollo del proyecto, brindando orientación experta y apoyo en la investigación, análisis de resultados y conclusiones. Su experiencia será fundamental para garantizar la calidad y relevancia del trabajo.

Recursos Físicos:

Programa de Matlab (Licencias): Se utilizará el programa Matlab con licencias proporcionadas por el centro educativo para llevar a cabo simulaciones detalladas, análisis de datos y modelado matemático necesario para los objetivos del proyecto.

Programa FEMM: El uso del programa FEMM permitirá realizar simulaciones electromagnéticas, contribuyendo a la comprensión del comportamiento electromagnético de los contactores con tecnología HRM.

Modelos de Contactores en la Industria: Se accederá a modelos de contactores utilizados en la industria, proporcionando datos y parámetros esenciales para las simulaciones y comparaciones.

Modelo de motor HRM: El profesor proporcionará un modelo de motor utilizado en trabajos previos, el cual se ajustará conforme a los hallazgos de la investigación. Este recurso facilitará la implementación y validación de los resultados en la simulación del motor HRM, permitiendo una conexión directa

con investigaciones anteriores.

Acceso a Instrumentos de Medición: El centro educativo facilitará el acceso a instrumentos de medición necesarios para llevar a cabo pruebas experimentales, garantizando la validez de los resultados obtenidos.

Estos recursos garantizarán la ejecución efectiva y precisa de las investigaciones, simulaciones y pruebas experimentales, asegurando la calidad y relevancia de los descubrimientos en el marco del proyecto.

1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo inicial, se proporcionará una visión integral del trabajo, abordando los antecedentes que lo preceden, la motivación que impulsa la investigación, la justificación que respalda su relevancia, los objetivos planteados, el alcance del estudio, así como los recursos humanos y físicos empleados.

Capítulo 2: Estado de Arte

Se lleva a cabo una exhaustiva revisión del estado del arte en el ámbito de la implementación de la tecnología HRM en contactores y motores. Este análisis abarca antecedentes, desarrollos previos y estudios relevantes, evaluando la eficiencia y aplicabilidad de la tecnología en cuestión. La revisión se centra en comprender las tecnologías existentes en contactores y motores, destacando limitaciones y avances.

Capítulo 3: Modelado y Simulación Contactores con tecnología HRM

Se proporcionará una explicación del funcionamiento del software, junto con una introducción al código utilizado en el proceso. Se explica los parámetros específicos empleados en las simulaciones, detallando su función. Asimismo, se explicarán las gráficas resultantes de la simulación, incluyendo la relación entre la fuerza y la posición, el impacto de la corriente en el bobinado en la fuerza, y la correlación entre la fuerza generada y el consumo energético del contactor. Por último, se proporcionará una descripción del algoritmo empleado para llevar a cabo las simulaciones magnéticas mediante elementos finitos utilizando FEMM.

Capítulo 4: Modelado y Simulación en Motores HRM

Se ofrecerá una explicación sobre el funcionamiento del software, junto con una introducción al código utilizado durante el proceso. Se detallarán los parámetros específicos utilizados en las simulaciones, proporcionando una explicación detallada de sus funciones. Además, se abordarán las gráficas resultantes de la simulación, como la relación entre el torque y la posición, el efecto de la corriente en el bobinado en el torque, y la conexión entre el flujo magnético generado y la posición del rotor. Finalmente, se brindará una descripción del algoritmo empleado para realizar las simulaciones magnéticas mediante elementos finitos utilizando FEMM.

Capítulo 5: Resultados

Se expondrán los descubrimientos derivados de la aplicación de la tecnología HRM a

contactores y motores, abordando las simulaciones magnéticas realizadas con FEMM. Se analizarán detalladamente los cambios en eficiencia, fuerza generada y rendimiento general al implementar la tecnología HRM en comparación con los sistemas convencionales, presentando gráficos, tablas y datos relevantes. La interpretación de estos resultados se estructurará según el orden de las investigaciones, detallando el paso a paso de la obtención de la simulación hasta la interpretación de la información recopilada.

Capítulo 6: Conclusiones

En este apartado, se resumirán las conclusiones más significativas derivadas del trabajo de investigación. Estas conclusiones se extraerán directamente de los capítulos anteriores y se complementarán con reflexiones propias del autor, obtenidas tras una cuidadosa consideración al culminar el proyecto.

Capítulo 7: Propuestas para Futuras Líneas de Trabajo

Tras la realización de este estudio, se identifican áreas de mejora que podrían ser abordadas mediante la introducción de dos conceptos distintos pero interrelacionados. En este capítulo, se propondrán ideas para futuras investigaciones, delineando posibles direcciones que podrían ampliar y enriquecer el presente trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 CONTACTORES EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad, la historia de los contactores, fundamentales en sistemas electromecánicos, se entrelaza con innovaciones que buscan mejorar la eficiencia y sostenibilidad. Un ejemplo de esta evolución es la patente US 2009/0167470 A1 de julio 2, 2009, presentada por Oscar Rolando Ávila Cusicanqui y José Carlos Tinoco Soares. Este documento describe un interruptor eléctrico que fusiona bobinas activadas con corriente alterna o rectificadas, junto con imanes permanentes, para potenciar significativamente la fuerza de atracción, Figura 2. Este avance contemporáneo se enfoca en optimizar la eficiencia y reducir las dimensiones físicas, representando un hito en la actualidad de la evolución de los contactores.

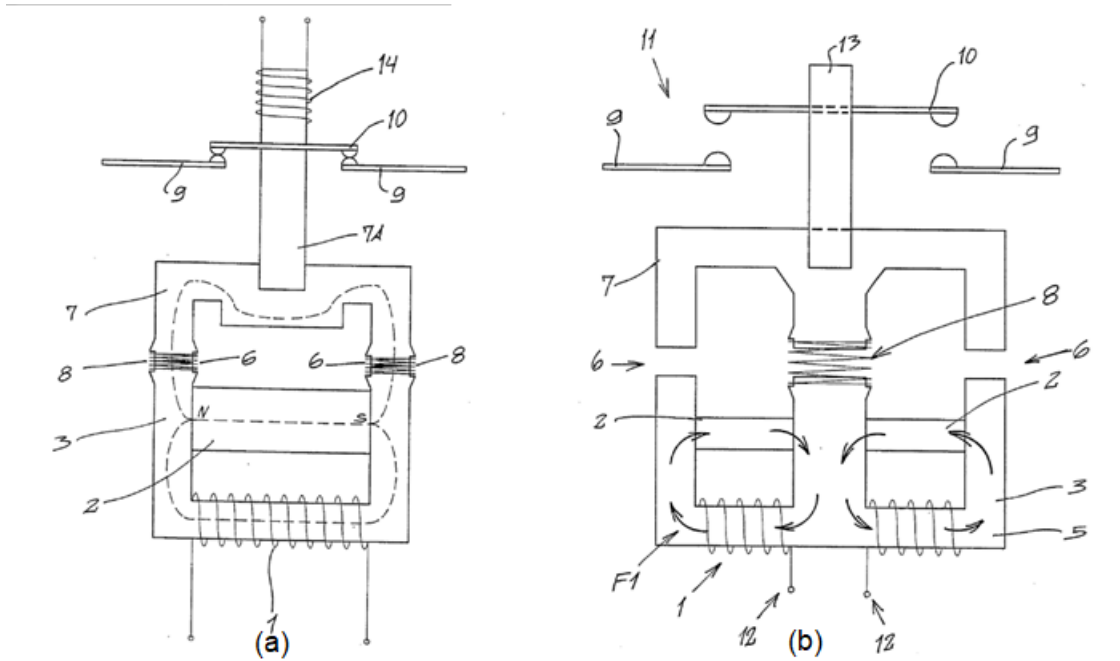


Figura 2. Contactor con tecnología HRM propuesto por Rolando Ávila

La integración de tecnologías innovadoras refleja la constante búsqueda de soluciones más eficientes y sostenibles en el ámbito de sistemas electromecánicos, delineando un futuro prometedor para estos componentes esenciales.[2] Este trasfondo histórico y tecnológico proporciona el contexto necesario para comprender la evolución de los contactores y su integración en sistemas electromecánicos modernos.

2.2 TECNOLOGÍA HRM EN LA ACTUALIDAD

A partir del desarrollo de esta tecnología, se han propuesto diferentes topologías en el diseño estructural de los motores híbridos de reluctancia variable, presentando beneficios frente a los modelos convencionales (SRM), como se presentan a continuación.

En 2007, Nakamura, Murota y Ichinokura describieron un novedoso motor de reluctancia conmutada que incorpora imanes permanentes entre las puntas del estator. Este motor propuesto muestra un gran par y alta eficiencia en comparación con los convencionales. Se demostró mediante el método de elementos finitos que la presencia de imanes permanentes amplía el área de trabajo del motor. Experimentos confirmaron un aumento del 20% en el par máximo y una mejora notable en la eficiencia bajo carga completa. Con estas mejoras, el motor de reluctancia variable propuesto se considera adecuado para la propulsión de vehículos eléctricos y vehículos híbridos eléctricos. [3]

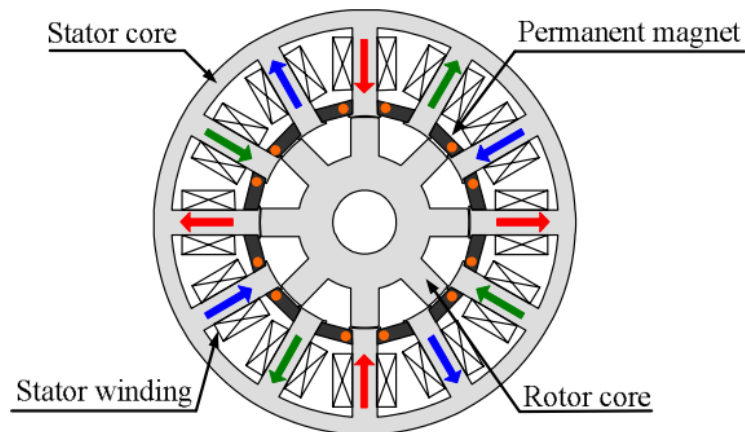


Figura 3. Nuevo motor SR con imán permanente entre las puntas de los polos del estator

El 13 de abril de 2015, Andrada, Blanque, Martínez, Torrent, Ávila, Gomila y Adelantado presentaron una nueva clase de máquinas de reluctancia híbrida que incorporan electromagnetos en forma de U con imanes permanentes ubicados entre sus brazos. Estas máquinas se diseñan para construir diferentes tipos de motores y generadores eléctricos, ya sea rotativos o lineales. Se destaca que han demostrado un rendimiento excepcional tanto en simulaciones como en resultados experimentales. Esta investigación fue respaldada por Fundació Equilibri. [4]

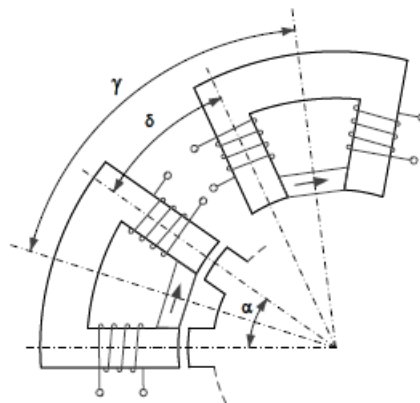


Figura 4. Máquinas híbridas de reluctancia con electroimanes en forma de U e imanes permanentes

En 2018 Jingwei Zhu, Ka Wai Eric Cheng y Xiangdang Xue proponen un nuevo motor híbrido de reluctancia conmutada 6/10 con imanes permanentes entre polos estáticos divididos, reduciendo la saturación magnética y aumentando significativamente el par de salida. Se utiliza un circuito magnético equivalente para analizar la distribución del flujo magnético y se optimiza la topología mediante algoritmos genéticos para obtener un rendimiento óptimo en cuanto al par. Comparado con motores convencionales, el HSRM exhibe una alta densidad de par y eficiencia en la utilización de imanes permanentes.

Realizaron consideraciones de diseño y análisis de rendimiento, ajustando parámetros como el grosor de los imanes y la profundidad de las ranuras internas para lograr un rendimiento óptimo y un menor costo. Compararon el HSRM optimizado con otros motores mediante simulaciones de elementos finitos, demostrando un rendimiento superior en términos de par y reducción significativa de la ondulación de par en

comparación con SRM convencionales. Comparaciones adicionales con motores BLDCM de dimensiones similares respaldan la superioridad del HSRM en la utilización eficiente de imanes permanentes. La construcción de un prototipo validó experimentalmente los resultados teóricos y de simulación, destacando el potencial del HSRM para aplicaciones industriales con alta densidad de par. [5]

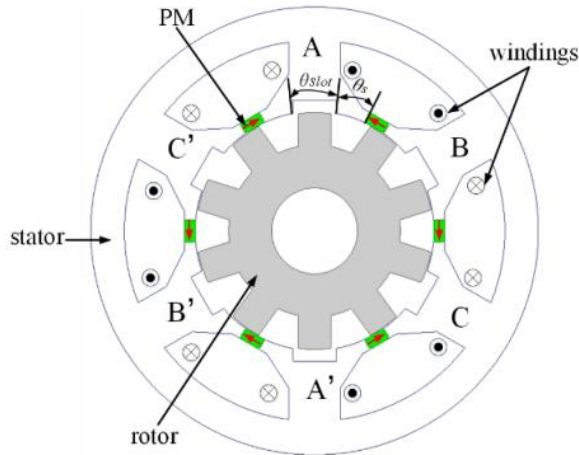


Figura 5. Configuración de motor HSRM propuesto por Jingwei Zhu et al

Otra propuesta de configuración que fue comprobada con base a la misma tecnología fue el Motor de reluctancia con par de imanes permanentes (PM-SRM) incrustado dentro del yugo del estator y los dientes finales del módulo vecino, del artículo publicado en junio, 2020 [6]. En el modelo mencionado las características son comparadas con el clásico 12/8 y 6/5 SRM y motores de reluctancia híbridos (HRM) en términos de torque estático y promedio y torque promedio por volumen de imanes permanentes.

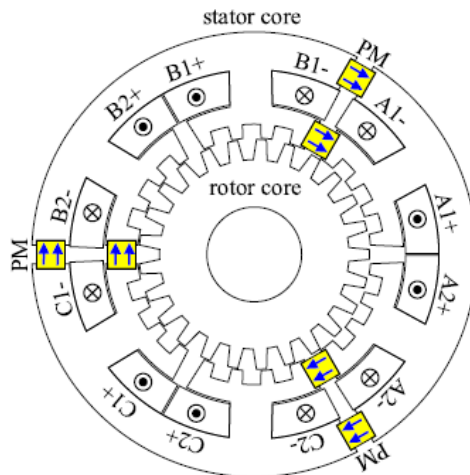


Figura 6. Modelo de Motor de reluctancia con imanes permanentes (PM-SRM)

Se realizó pruebas simuladas mediante el software Ansys/Maxwell y Simplorer a 900 rpm, evidenciándose que el par de salida del PM-SRM aumentó en un 97,6% en comparación con el SRM sin imanes permanentes, lo que representa una mejora drástica en la generación de par. Es importante destacar que esta mejora se logró mediante el uso de una cantidad reducida de materiales magnéticos permanentes y a un costo bajo. Concluyendo que el rendimiento del PM-SRM es considerablemente superior al del SRM convencional de 12/8 y al del 6/5 en términos de par, potencia y

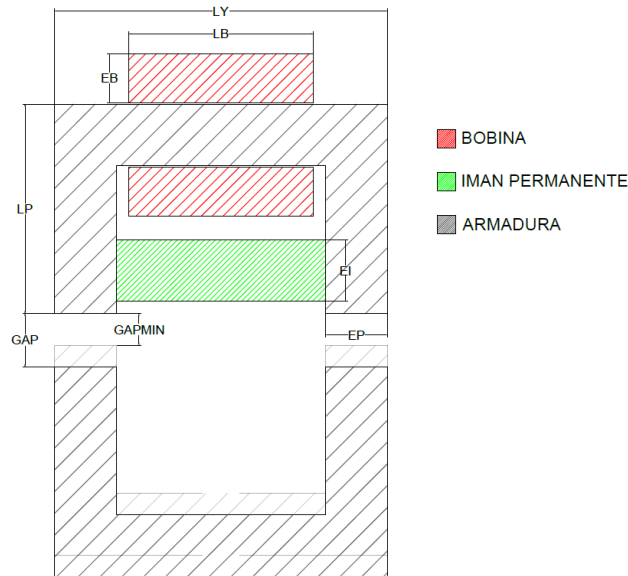


Figura 8. Esquema de contactor

3.1 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DEL CONTACTOR

Partiendo del análisis del Contactor SPRECHER+SCHUH CA 3-9-10 con armadura tipo E, se llevaron a cabo mediciones experimentales cruciales. En condiciones de corriente alterna (CA) y una tensión de 220V, se obtuvieron los siguientes datos: una corriente alterna (I_{ac}) de 0.31A, 4780 espiras totales en la bobina y un espesor de alambre de 0.125mm.

Adicionalmente, el mismo modelo de contactor fue sometido a corriente continua (CC), resultando en una tensión de 37V y una corriente continua (I_{dc}) de 0.44A. Estos descubrimientos ofrecen una perspectiva integral sobre cómo el contactor responde a variadas condiciones de alimentación eléctrica, proporcionando información necesaria para su aplicación y diseño.

Mediante los instrumentos de medida, se lograron obtener con precisión las dimensiones de la armadura. Además, se llevó a cabo una aproximación a la configuración tipo U de la armadura, integrando información proveniente de la patente US2009/0167470A1 de Oscar Rolando Ávila Cusicanqui. Este enfoque nos da más detalles sobre cómo está diseñado y cómo se desempeña el contactor. Así obtenemos una visión más completa de lo que puede hacer y cómo se comporta en diferentes situaciones eléctricas.

3.2 SIMULACIÓN ESTÁTICA DEL CONTACTOR

En la fase inicial, se llevará a cabo una simulación estática empleando un análisis magnético de elementos finitos mediante el programa Finite Element Method Magnetics (FEMM) utilizando Matlab. El propósito es calcular las curvas que relacionan la fuerza generada con respecto al espacio de aire (GAP), la fuerza generada frente a la corriente, y la fuerza generada frente al consumo eléctrico tanto para los contactores convencionales como para aquellos que incorporan la tecnología HRM.

El inicio del proceso implica la creación de la geometría del contactor en el software FEMM. Esta etapa puede realizarse manualmente dentro del programa o en cualquier

software de dibujo CAD. No obstante, se ha diseñado un programa en Matlab que utiliza la interfaz de programación de aplicaciones (API) de FEMM para facilitar el dibujo del contactor a partir de los siguientes parámetros.

Tabla 1. Parámetros de la simulación del contactor

VARIABLE	DESCRIPCION
LP	Longitud de patas de armadura
EP	Espesor de patas
LY	Longitud del yugo
EY	Espesor de Yugo
LB	Espesor de bobina
EB	Longitud de bobina
EI	Espesor del imán
GAP	Separación máxima entre armadura fija y móvil
GAPMIN	Separación mínima entre armadura fija y móvil
LW	Profundidad del contactor
N_ITE	Numero de iteraciones del GAP
N_IT	Numero de iteraciones de corriente
d_al	Diámetro de alambre de bobina
Imin	Intensidad mínima que circula por la bobina
Imax	Intensidad máxima que circula por la bobina
MATERIAL DE LA ARMADURA	
MATERIAL DEL IMÁN PERMANENTE	

Utilizando los parámetros mencionados, se genera automáticamente el dibujo del contactor mediante un script de Matlab.

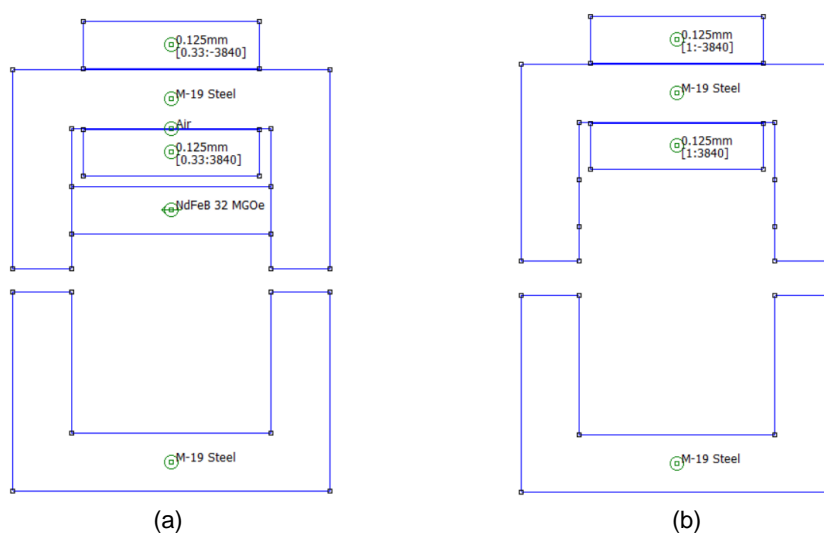


Figura 9. Bosquejo en FEM (a) contactor con imán y (b) contactor sin imán

Una vez se ha generado el diseño del contactor, se procede a la configuración de la simulación de elementos finitos. Como se ha explicado anteriormente, la simulación se

efectúa en un entorno estático con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo magnético y el par en respuesta a variadas corrientes de alimentación aplicadas a las bobinas, considerando además distintas posiciones entre las armaduras.

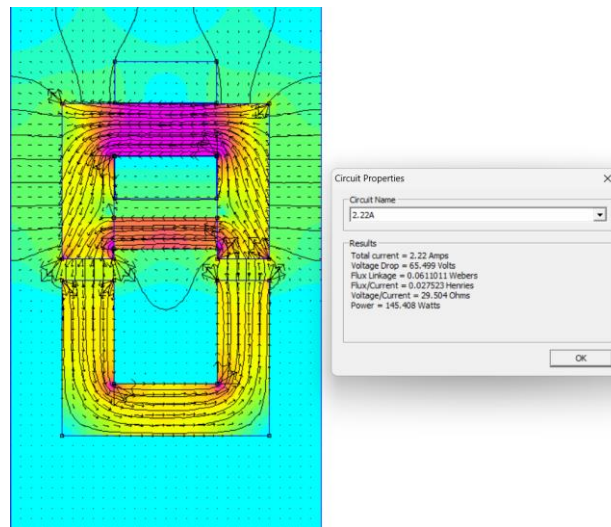


Figura 10. Análisis de elementos finitos magnéticos en FEM

La simulación proporciona los datos esenciales para crear gráficas que representan la relación entre la fuerza y la posición, la fuerza y la corriente en el bobinado, así como la fuerza y el consumo del contactor. Estas representaciones visuales son fundamentales para visualizar los resultados obtenidos y llegar a conclusiones sobre la viabilidad de aplicar la tecnología HRM a contactores. Permitirán identificar en qué puntos específicos la tecnología HRM podría ser más beneficiosa o si su aplicación es viable en general.

Los diagramas de flujo siguientes proporcionan una descripción detallada del código implementado en MATLAB en combinación con la herramienta FEMM, delineando el proceso completo de simulación y obtención de resultados.

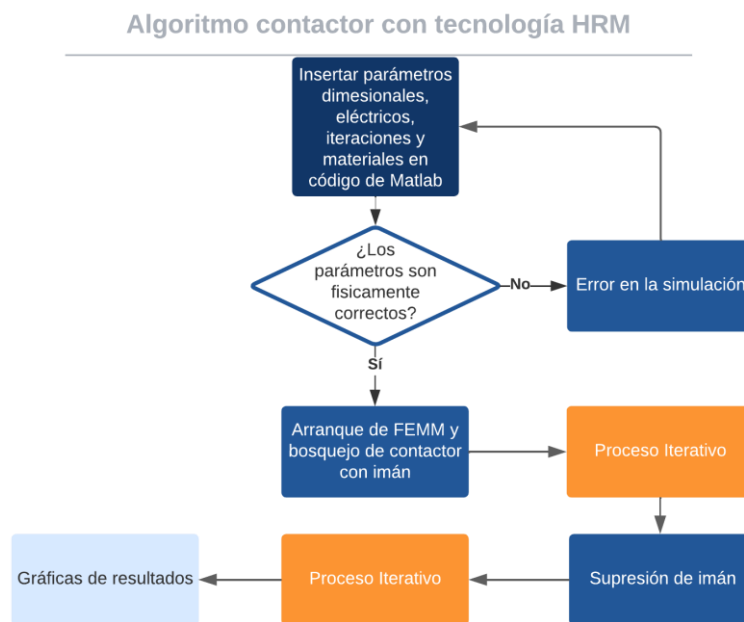


Figura 11. Algoritmo principal para extracción de resultados magnéticos de contactores

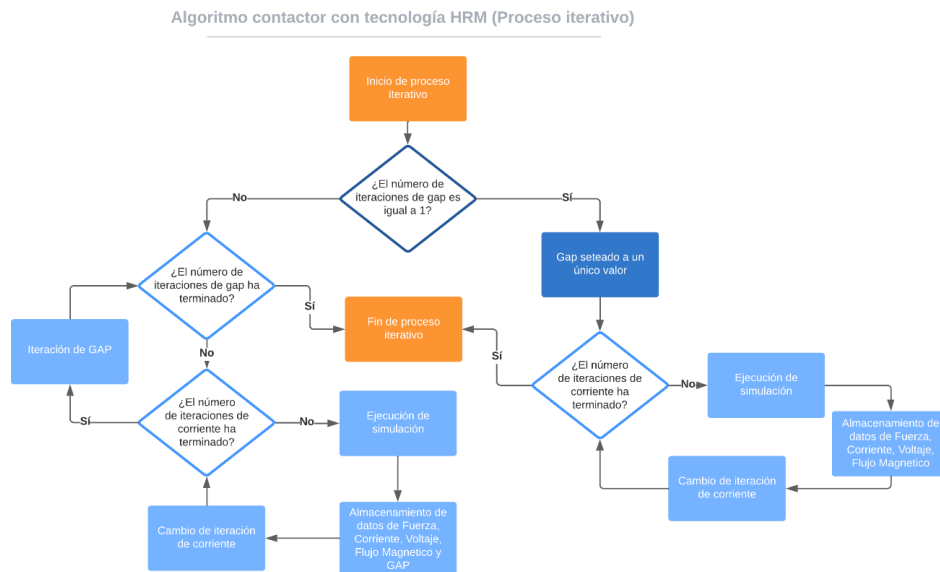


Figura 12. Algoritmo de iteración utilizado en el programa

4. MODELADO Y SIMULACIÓN EN MOTORES HRM

A partir del modelo de motor HRM proporcionado del trabajo de Josué Duarte “Automatización del sistema de obtención de las curvas par velocidad en motores de reluctancia autoconmutados (SRM) e híbridos”, [8], se procederá a implementar los hallazgos obtenidos de la investigación de contactores con tecnología HRM.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE MOTOR HRM

En esta parte, se detallará el procedimiento de modelado y simulación de motores de reluctancia variable e híbridos, basándonos en el conocimiento previo de los materiales a emplear y las dimensiones específicas del motor Figura 13. Estas dimensiones incluyen:

- Altura del yugo (h_y)
- Altura del imán (h_m)
- Ancho del polo rotórico (b_s)
- Ancho del brazo del yugo (b_p)
- Radio externo del rotor (R_g)
- Radio externo del yugo (R_y).

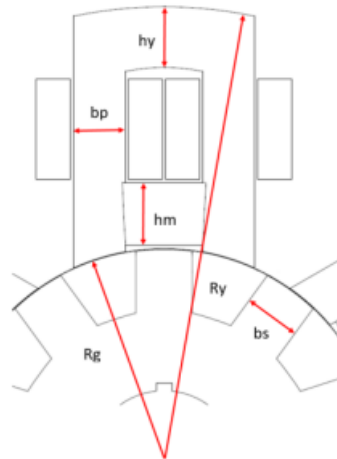


Figura 13. Dimensiones del motor

4.2 SIMULACIÓN ESTÁTICA DEL MOTOR HRM

La etapa inicial involucra la ejecución de una simulación estática a través de un análisis magnético de elementos finitos mediante el software Finite Element Method Magnetics (FEMM). El propósito primordial de este proceso es calcular las curvas relativas al flujo magnético, par y densidad de flujo.

El primer paso consiste en construir la geometría del motor en el programa FEMM. En este contexto, se utiliza un programa desarrollado en Matlab, mencionado al principio de este capítulo, que hace uso de la API de FEMM para diseñar motores SRM y HRM con una estructura 12/10. Este programa se basa en los parámetros siguientes.

Tabla 2. Parámetros de la simulación del motor HRM

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
HM	Altura del imán permanente
HY	Altura del yugo
BS	Ancho del polo del rotor
BP	Ancho del brazo del yugo
RG	Radio externo del rotor
RY	Radio externo del yugo
M	Número de fases
K	factor multiplicador de bobinas por fase
LM	Ancho del imán
G	Entrehierro
LW	Profundidad del motor
TURNS	Número de espiras de bobina
MATERIAL FERROMAGNÉTICO	
MATERIAL DEL IMÁN PERMANENTE	

Con base en estos parámetros, se automatiza el dibujo del motor a través de un script de Matlab. La Figura 14 ilustra el diseño de un motor HRM 12/10 en FEMM generado mediante Matlab. Una vez obtenido el diseño, se procede a la configuración de la simulación de elementos finitos. La simulación es estática y tiene como objetivo

comprender el comportamiento del flujo magnético y el par frente a diversas corrientes de alimentación en las bobinas y con el rotor en distintas posiciones.

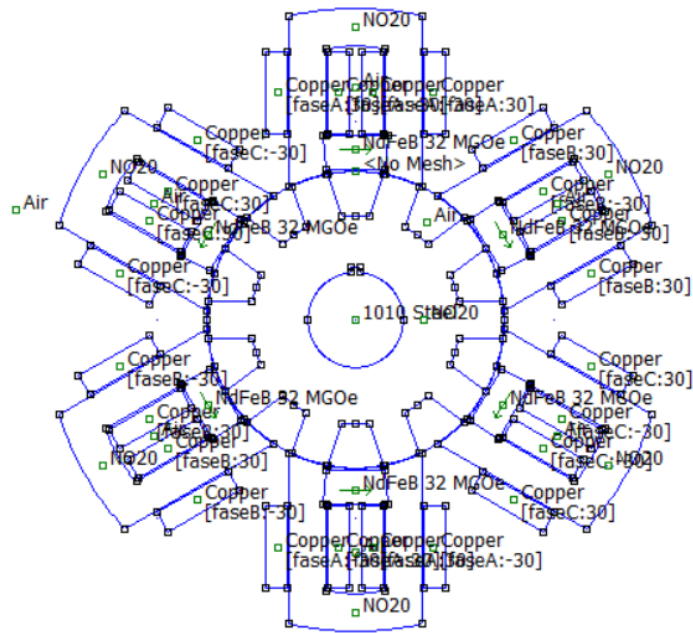


Figura 14. Dibujo de un motor HRM 12/10 en FEMM

5. RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR LA TECNOLOGÍA HRM EN CONTACTORES.

Se realiza un análisis de sensibilidad del contactor, donde se examinarán los impactos de la corriente, las dimensiones de la armadura, las dimensiones del imán permanente y la distancia entre los yugos. El objetivo es obtener datos que permitan realizar una o varias adaptaciones del contactor convencional a uno con tecnología HRM.

Los parámetros iniciales fueron los siguientes:

Tabla 3. Parámetros iniciales de la simulación del contactor

VARIABLE	DESCRIPCION
LP	17 mm
EP	5 mm
LY	27 mm
EY	5 mm
LB	15 mm
EB	4 mm
EI	5 mm
GAP	1.6 mm
GAPMIN	1 mm
LW	15 mm
N_ITE	1
N_IT	11
d_al	0.125 mm
Imin	0 A
Imax	1.07 A
MATERIAL DE LA ARMADURA	M-19 Steel
MATERIAL DEL IMAN PERMANENTE	NdFeB32MGOe

5.1.1 FUERZA VS CORRIENTE & GAP

En la primera investigación, se examina cómo varía la fuerza generada por el contactor convencional y el contactor con imán en relación con un rango de corrientes, considerando diversas distancias de separación entre la armadura fija y la armadura móvil (GAP). La Figura 15 ilustra la relación entre la fuerza, el GAP y la corriente, del contactor con tecnología HRM (a) y del contactor convencional (b).

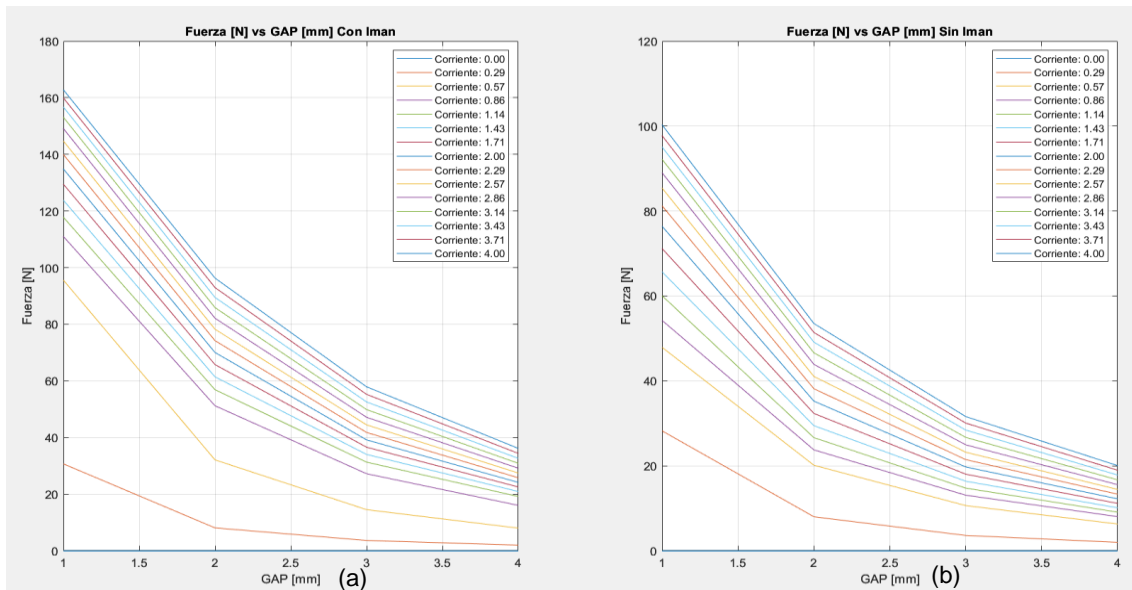


Figura 15. Curvas de fuerza vs GAP y corriente

Como primer detalle, se observa que al añadir un imán permanente se crea una fuerza de atracción a la parte móvil del contactor, la cual es del orden de las milésimas de Newtons. También se puede apreciar en la siguiente en la gráfica del contactor con imán (Figura 15 (a)) que para valores de corrientes pequeñas no existe un aumento significativo en la fuerza generada por el electroimán del contactor.

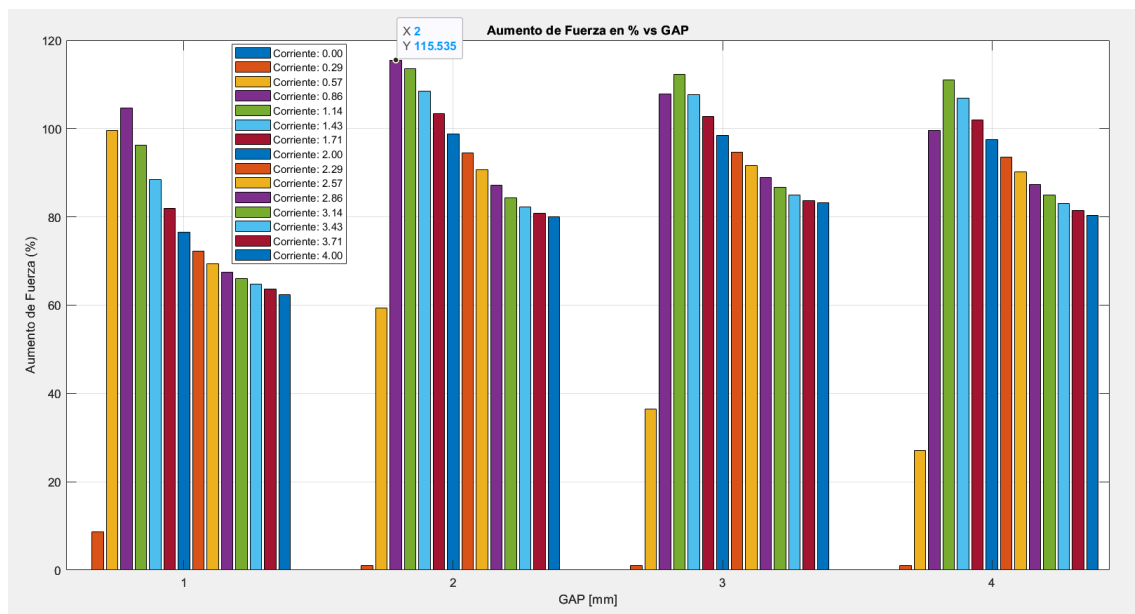


Figura 16. Aumento porcentual de la fuerza respecto a GAP y corriente

De la Figura 16 se obtiene el máximo aumento de fuerza en porcentaje, con un valor de 115% para la corriente de 0.86A con un GAP de 2mm, mientras que para valores mayores y menores de GAP la fuerza va decreciendo.

Esta primera aproximación nos da una idea previa del punto donde se genera un aumento de fuerza con el contactor de imán, que es aproximadamente 2mm. A continuación, realizamos el mismo estudio para un GAP entre 1mm y 2.5mm con 6 iteraciones y para corrientes de 0 a 1.5 A (debido que el aumento porcentual va disminuyendo a corrientes altas) para determinar el punto con mayor aumento de fuerza

debido al efecto del imán permanente.

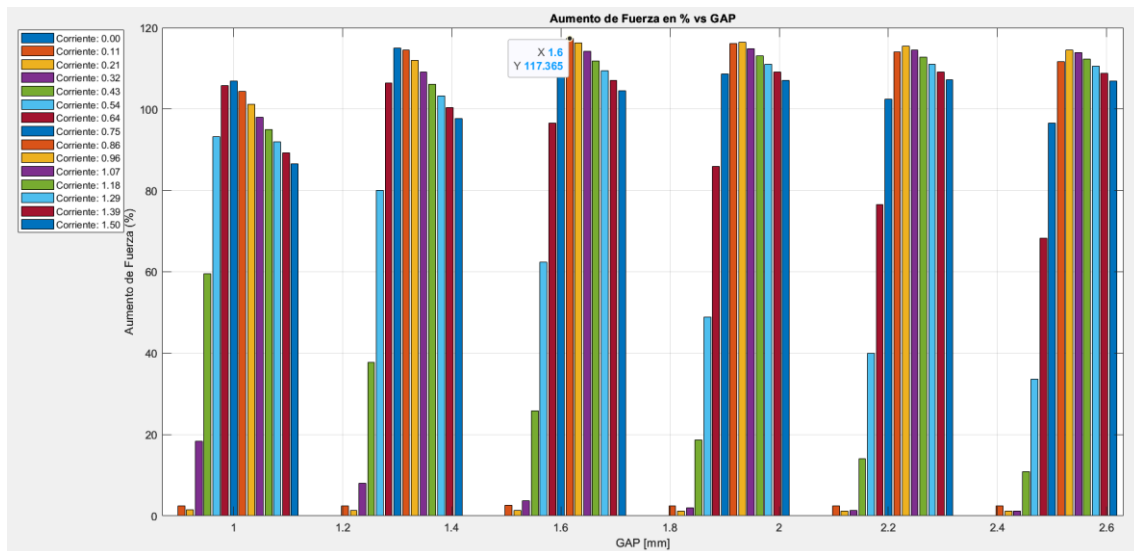


Figura 17. Máximo aumento de fuerza obtenido

De la Figura 17 se observa que para cada valor de GAP existe una corriente la cual aporta específica en la cual se obtiene el mayor aumento porcentual de la fuerza. De la misma gráfica se obtiene como punto de mayor incremento de fuerza en el GAP de 1.6 mm con una corriente de 0.86A con un aumento de la fuerza de 117.36%. A partir de ahora el GAP de 1.6 mm se tomará como referencia con el fin de evitar realizar varias simulaciones, ya que lo que se obtenga en este punto, se puede extrapolar para los demás puntos, observando su comportamiento, ya que este es el punto más sensible.

Se realizará el estudio la fuerza generada y consumo energético cuando el contactor posee un GAP de 1.6mm.

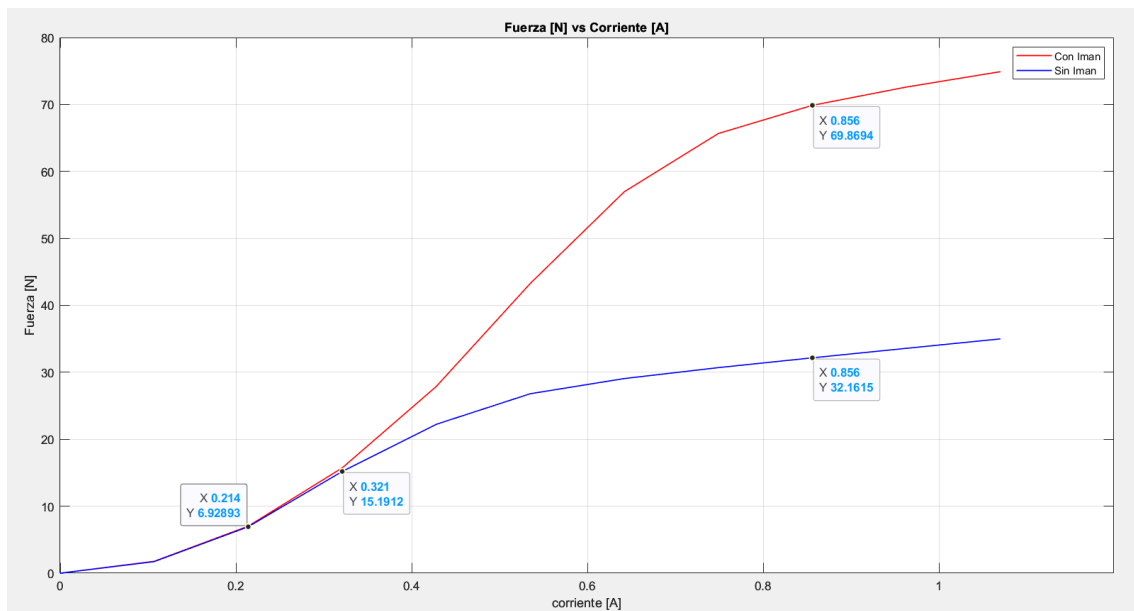


Figura 18. Fuerza vs corriente de contactor con y sin imán para GAP de 1.60mm

La Figura describe el comportamiento de la fuerza generada por el contactor a lo largo de un barrido de corriente de 0 a 1.07A para el GAP de 1.60mm, se puede destacar que, a partir de una corriente de 0,321A, se observa un cambio significativo en la fuerza generada por el contactor convencional (Azul) y el contactor con la tecnología de motor

híbrido de reluctancia variable (rojo), siendo 0.86A el punto donde se obtiene el mayor incremento de fuerza posible (117%, 69N).

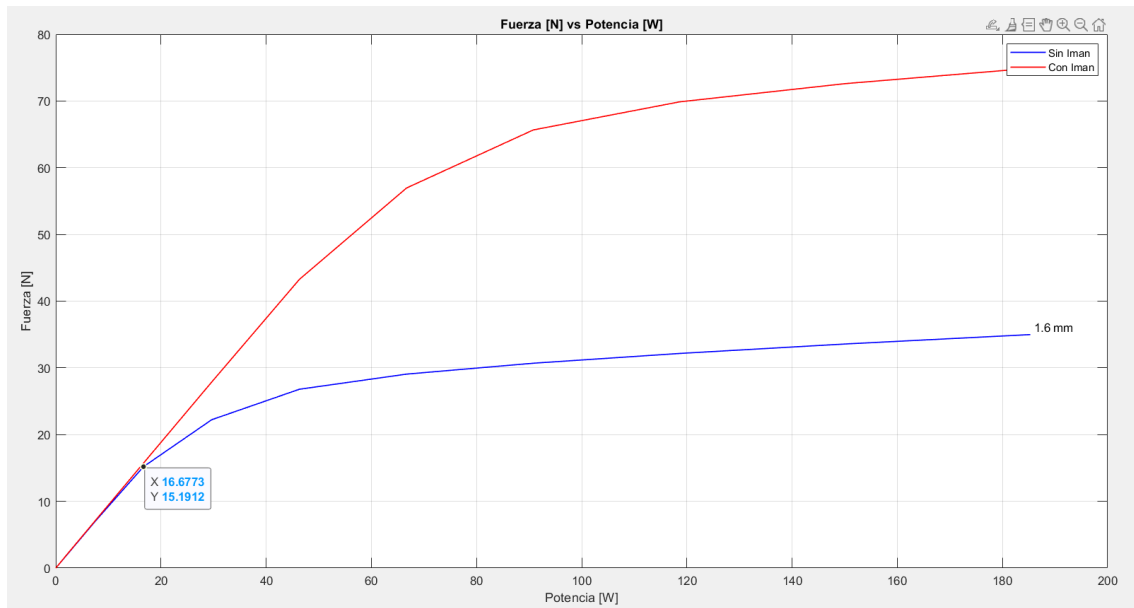


Figura 19. Fuerza vs potencia consumida de contactor con y sin imán para GAP de 1.60mm

La Figura 19 muestra que es posible obtener un aumento significativo de la fuerza generada por un contactor convencional al añadir un imán permanente y utilizando el mismo consumo eléctrico.

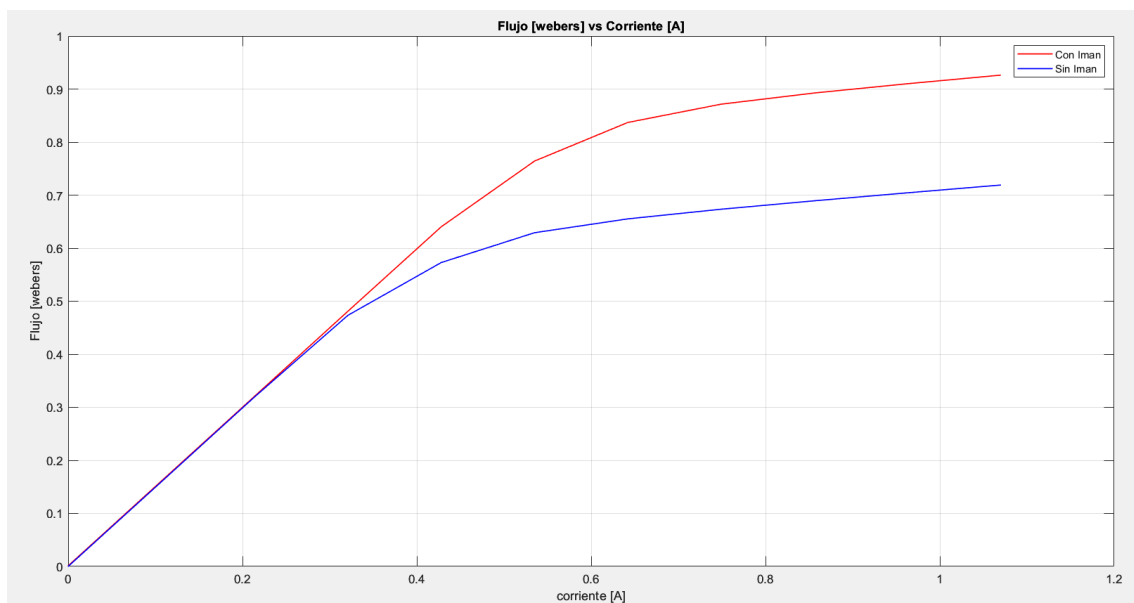


Figura 20. Flujo magnético en extremo de la armadura fija vs corriente de contactor con y sin imán para GAP de 1.60mm

En la Figura 20, se muestra el patrón del flujo magnético en el extremo del contactor, justo antes de que las líneas de campo se dispersen y se abomben en el entrehierro. De esta representación gráfica, se puede deducir que hay una saturación en el flujo magnético, ya que, a corrientes elevadas, el incremento en el flujo magnético es mínimo.

5.1.2 EFECTOS DEL ESPESOR DEL IMÁN

A continuación, examinaremos los impactos generados en el contactor al alterar las dimensiones del imán en un GAP de 1.60mm.

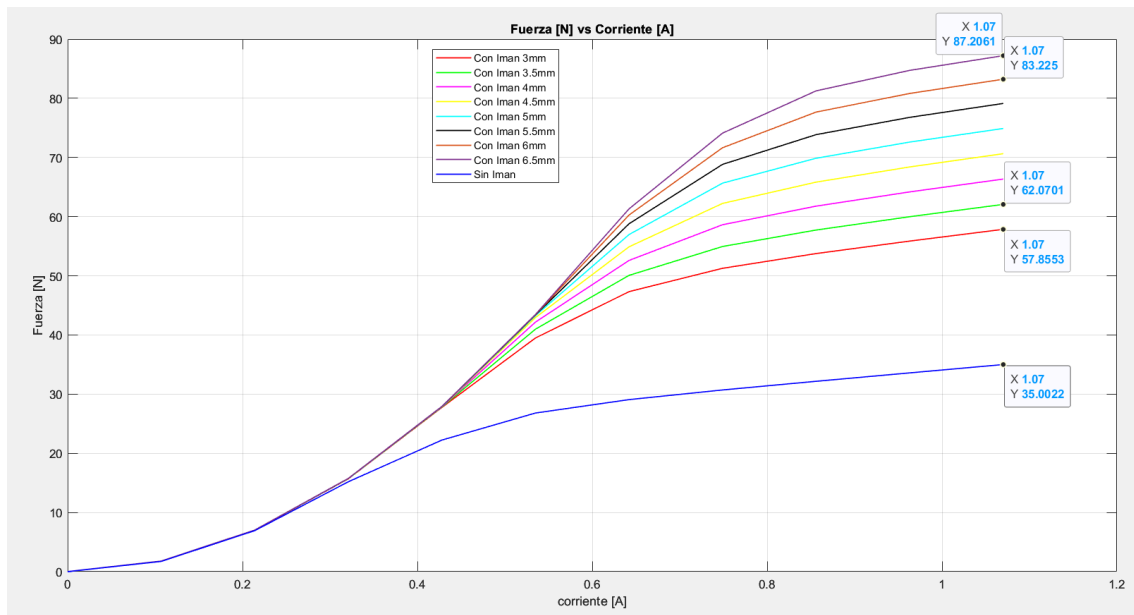


Figura 21. Fuerza vs corriente con diferentes espesores de imán

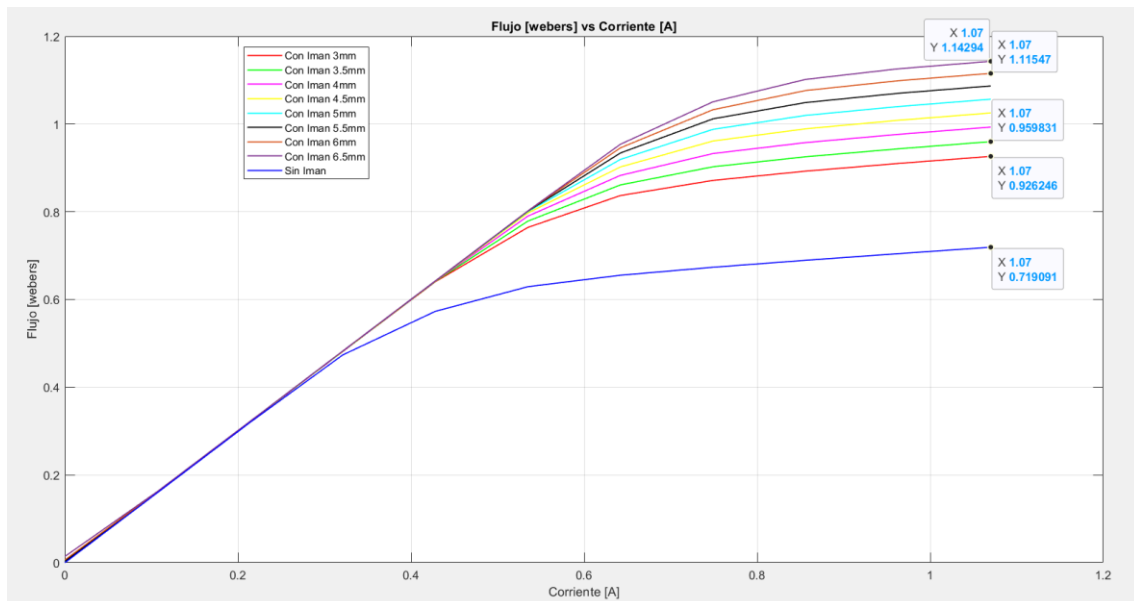


Figura 22. Flujo magnético en extremo de la armadura fija vs corriente con diferentes espesores de imán

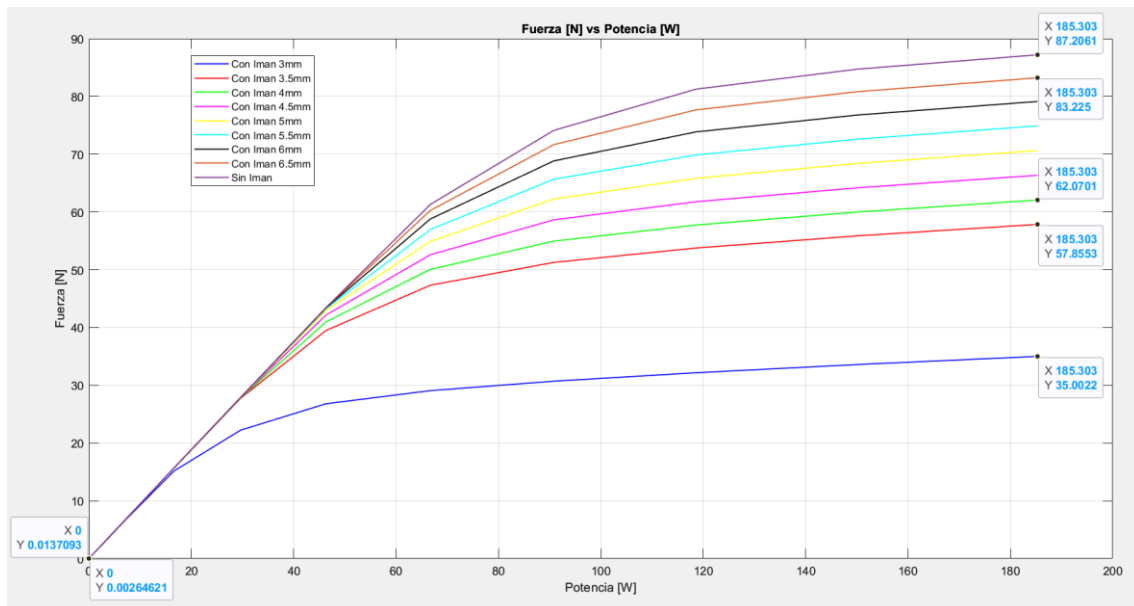


Figura 23. Fuerza vs potencia consumida de contactor con diferentes espesores de imán

Cuando la corriente circula por el bobinado del contactor sin imán, se genera un campo magnético alrededor de la bobina debido al flujo de corriente. Este campo magnético es responsable de ejercer una fuerza sobre la armadura del contactor, lo que permite su movimiento para abrir o cerrar el circuito eléctrico.

En un contactor con imán permanente, además del campo magnético generado por el flujo de corriente en el bobinado, se suma el campo magnético constante producido por el imán permanente. Esta adición de campo magnético permanente contribuye a aumentar la fuerza total ejercida sobre la armadura del contactor cuando la corriente circula por el bobinado.

Sin embargo, existe un punto máximo en el cual la fuerza resultante deja de aumentar de manera significativa (Figura 21), incluso cuando se incrementa la corriente o el número de espiras en la bobina. Este fenómeno se debe a la saturación magnética presente en los materiales empleados en el contactor. Al alcanzar este punto, no se observa un incremento en las líneas de flujo que atraviesan el material ferromagnético de la armadura, lo que impide que la fuerza continúe aumentando (Figura 22).

En la Figura 23, se resaltan dos aspectos importantes. En primer lugar, se destaca que, en una bobina sin corriente, existe una fuerza inicial inducida por el campo magnético generado por un imán permanente. Esta fuerza inicial varía en función de la intensidad del campo magnético, aumentando conforme esta intensidad se incrementa. En segundo lugar, se ilustra la posibilidad de lograr un aumento significativo en la fuerza generada por un contactor convencional al agregar un imán permanente, todo ello manteniendo el mismo consumo eléctrico.

5.1.3 PRIMERA APROXIMACIÓN DE CONTACTOR CON IMÁN

Considerando el efecto del espesor del imán se procede a buscar una alternativa variando los parámetros del imán y número de espiras de bobinado para obtener resultados semejantes a los del diseño inicial del contactor sin imán, recordando que los datos obtenidos fueron los siguientes:

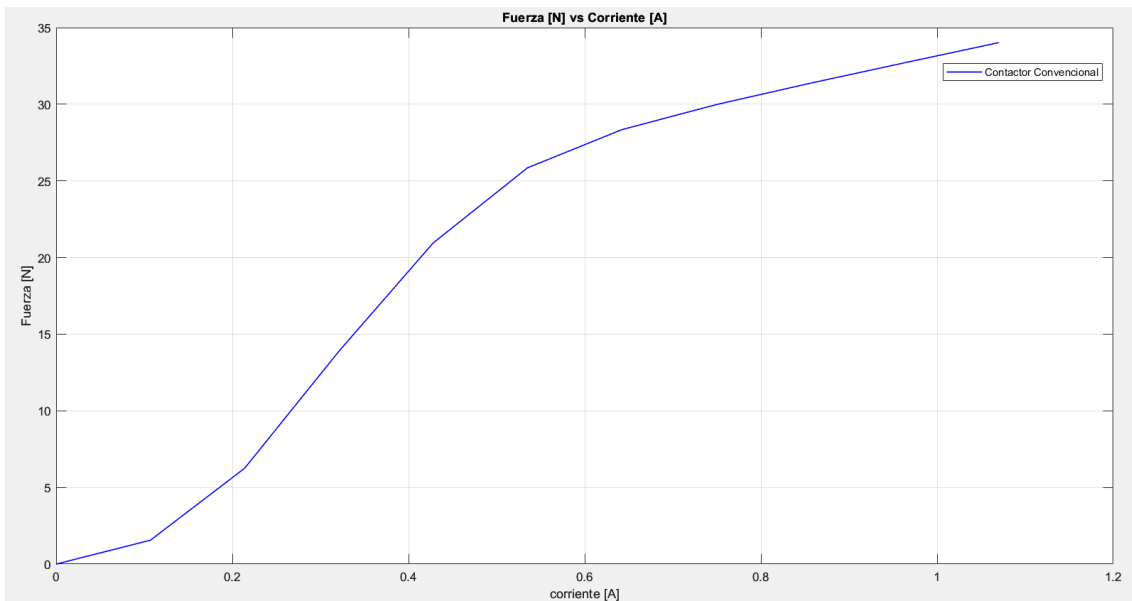


Figura 24. Fuerza vs corriente de contactor sin imán con GAP de 1.60 mm

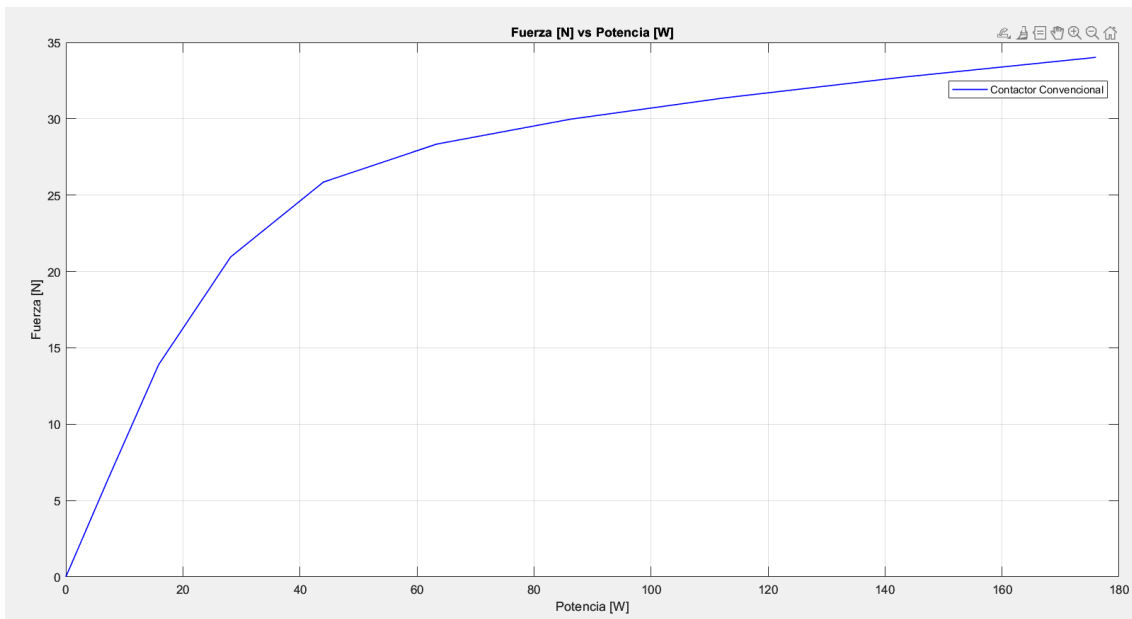


Figura 25. Fuerza vs potencia consumida contactor sin imán con GAP de 1.60 mm

Teniendo en consideración que el punto de operación de la bobina es a 0.44A, se busca un diseño de contactor con imán, el cual proporcione la misma fuerza a la misma corriente.

Para esto, se utiliza un imán de 5mm de espesor y reduciendo el número de espiras a 3500 se obtiene los siguientes resultados

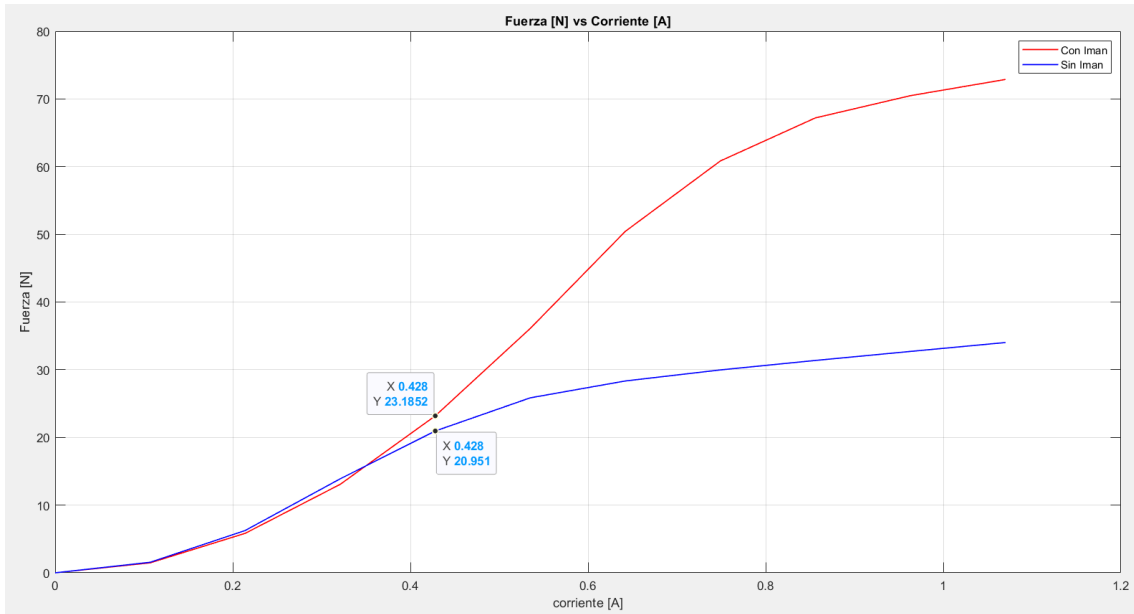


Figura 26. Fuerza vs corriente de contactor son y sin imán con GAP de 1.60 mm

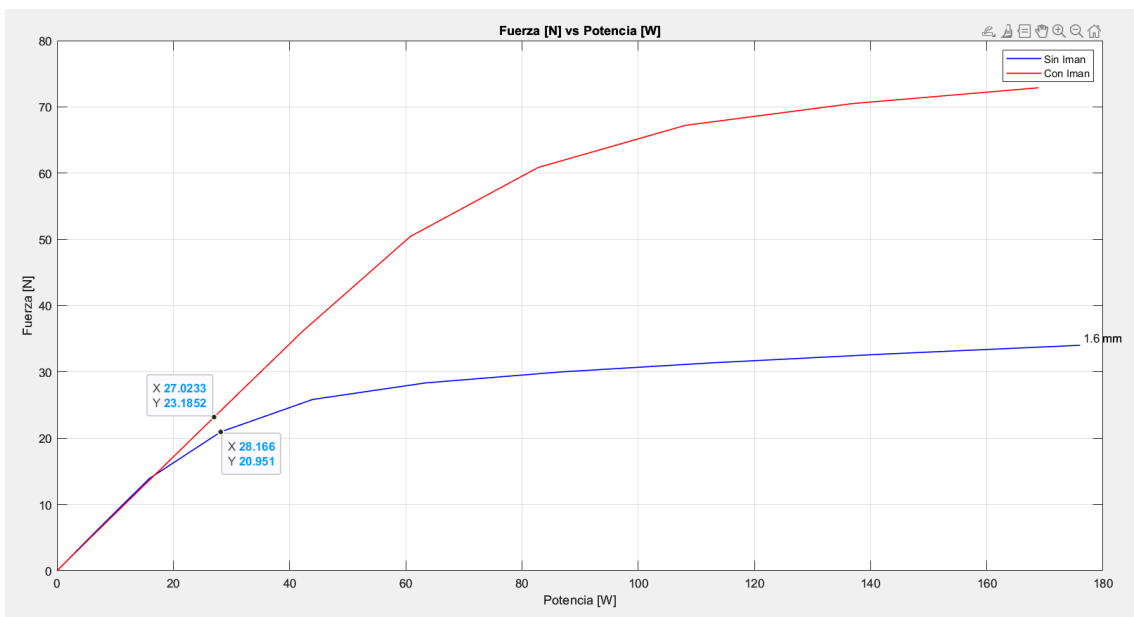


Figura 27. Fuerza vs potencia consumida de contactor son y sin imán con GAP de 1.60 mm

En la Figura 26, se muestra cómo es posible obtener una fuerza comparable a la de un contactor convencional mediante el uso de un contactor con imán y al reducir el número de espiras.

La disminución en el número de espiras conlleva una reducción en el consumo de potencia del contactor con imán, como se evidencia en la Figura 27. Para generar la misma fuerza, se requieren 3.71 vatios menos aproximadamente. Este ahorro de energía representa un 8.84% de eficiencia, destacando así la viabilidad y eficacia de la implementación del contactor con imán en términos de eficiencia energética.

5.1.4 EFECTOS DE MODIFICAR EL ESPESOR DE LAS PATAS DE LA ARMADURA

Comparamos ahora los efectos producidos por el aumento del espesor de las patas de la estructura, para este caso aumentaremos el espesor a 10mm, obteniendo el siguiente resultado.

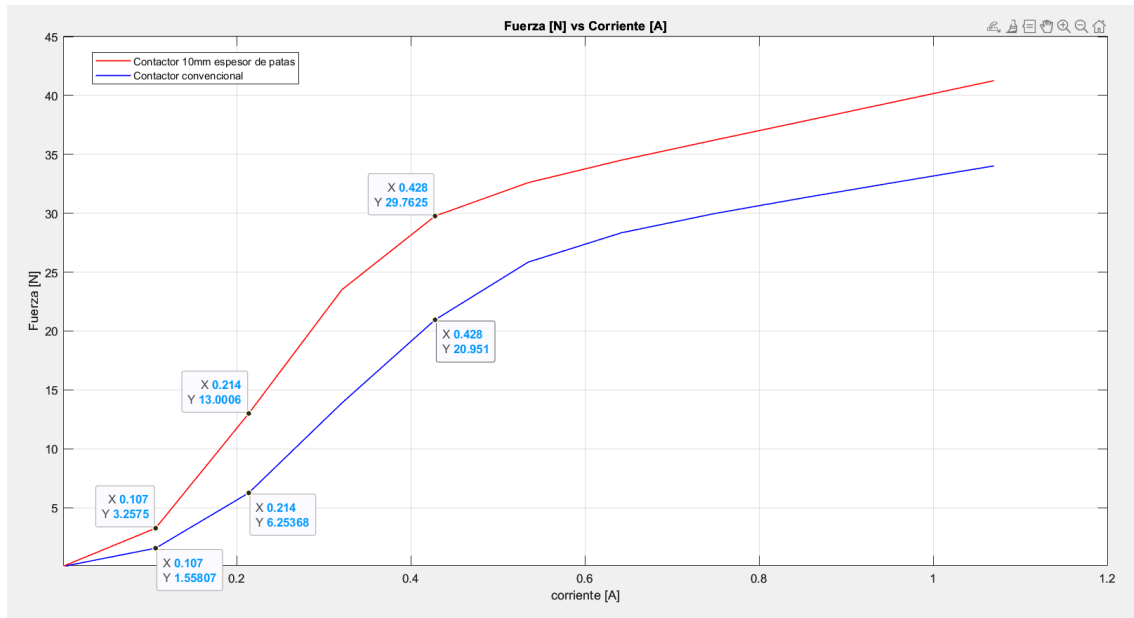


Figura 28. Fuerza vs corriente de contactor convencional y contactor modificado espesor de patas

Partiendo del diseño inicial, se observa en la Figura 28 un incremento en la fuerza generada a medida que se aumenta el espesor de las patas. Este aumento se debe a la relación directa entre el flujo magnético, el campo magnético y la sección transversal en un circuito magnético. Sin embargo, este crecimiento encuentra restricciones físicas, como la saturación del material. La saturación representa el límite de la cantidad de flujo magnético que el material puede soportar. A medida que el material se acerca a la saturación magnética, el aumento en la sección transversal ya no resulta en un incremento proporcional del flujo magnético.

5.1.5 EFECTOS DE MODIFICAR EL LARGO DE LAS PATAS DE LA ARMADURA

Al cambiar la longitud de las patas de la armadura a 27mm y conservando las demás dimensiones, se obtienen los siguientes resultados.

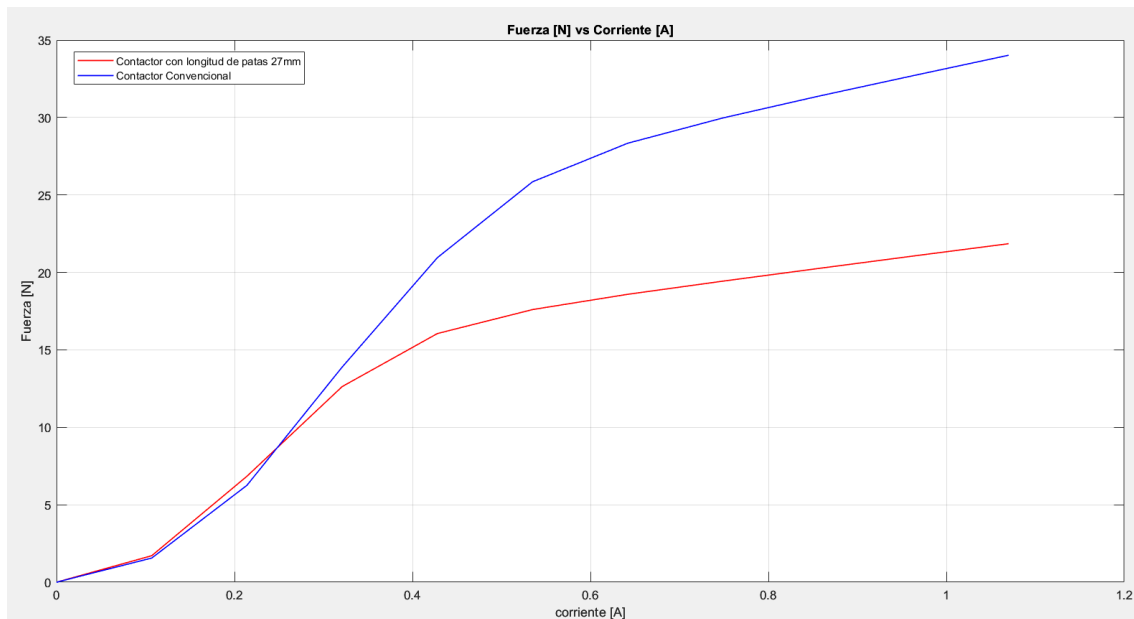


Figura 29. Fuerza vs corriente de contactor convencional y contactor modificado longitud de patas

Se percibe una reducción en la generación de fuerza de atracción en el diseño original en comparación con contactor al extender la longitud de las patas. Este aumento en la extensión del camino magnético resulta en un incremento de la reluctancia del circuito magnético, que es la medida de la resistencia de un material a la formación de flujo magnético. Esta reluctancia adicional provoca una disminución en el flujo magnético, traduciéndose directamente en una reducción de la fuerza producida por el electroimán.

5.1.6 SEGUNDA APROXIMACIÓN DE CONTACTOR CON IMÁN

En esta segunda fase de análisis, se llevarán a cabo ajustes en la configuración del contactor con el objetivo de alcanzar un rendimiento equivalente al de un contactor comercial utilizando una cantidad reducida de material. Esta optimización busca no solo mantener, sino mejorar las prestaciones del dispositivo, lo que, a su vez, se traduciría en una disminución en el costo de la materia prima necesaria para su fabricación.

Al reducir los parámetros de longitud de patas a 16mm, aumentar la longitud de unión a 30mm, número de espiras a 3000, aumentar el espesor de patas a 6mm y colocar un imán de 5mm se obtienen resultados similares al diseño del contactor inicial.

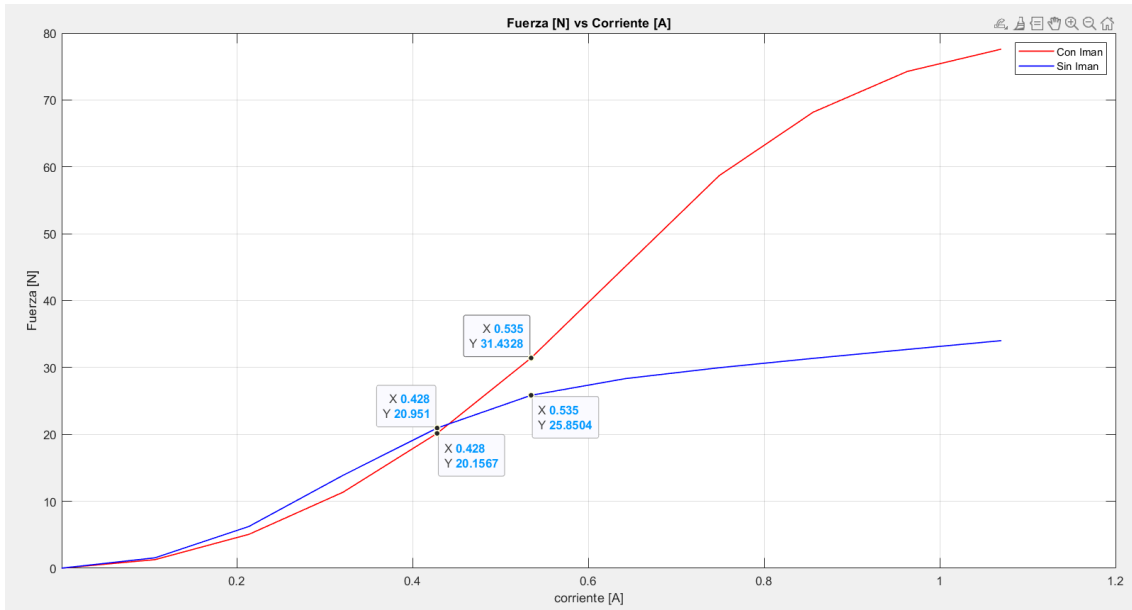


Figura 30. Fuerza vs corriente de contactor convencional y contactor con imán modificado parámetros de dimensión

En la Figura 30, se muestra cómo es posible obtener una fuerza comparable a la de un contactor convencional mediante el uso de un contactor con imán, reduciendo el número de espiras, y modificando parámetros dimensionales de la armadura tipo U.

En la fase inicial de la gráfica, se evidencia que la fuerza generada por el contactor con imán permanente es inferior a la del contactor convencional. Este fenómeno se atribuye a la menor cantidad de espiras en la bobina del primero, lo que resulta en una menor intensidad de campo magnético y, por ende, en una fuerza reducida. La contribución de las líneas de campo del imán comienza una vez que se alcanza un umbral específico de intensidad de campo magnético lo suficientemente alto para superar la coercitividad del imán permanente y desviar sus líneas de campo magnético, logrando así un notable aumento en la fuerza.

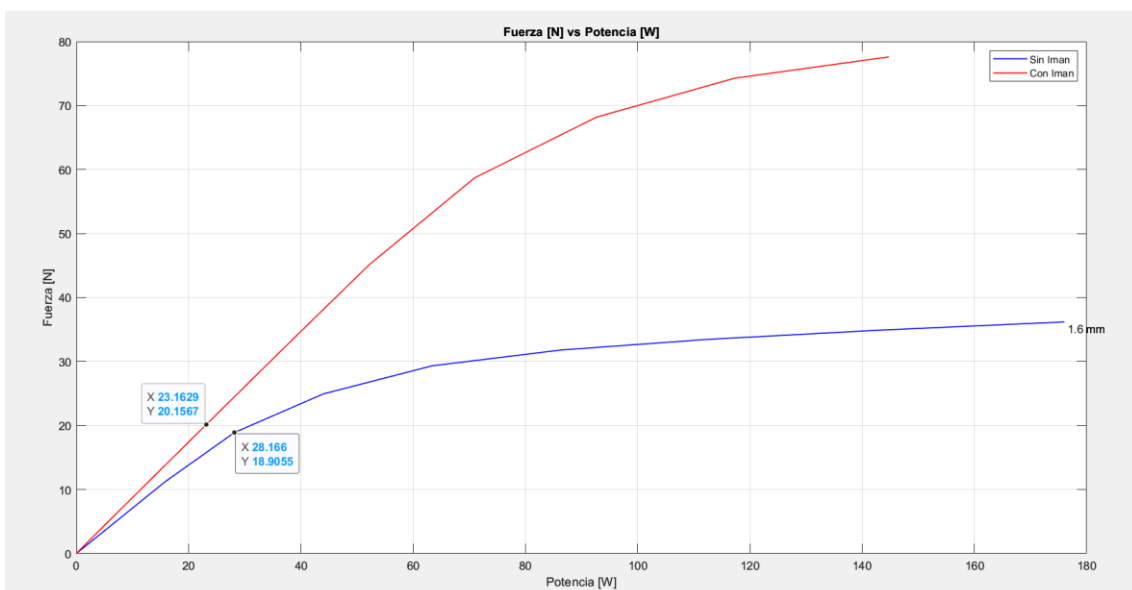


Figura 31. Fuerza vs potencia consumida de contactor convencional y contactor con imán modificado parámetros de dimensión

La disminución en el número de espiras aporta a la reducción del consumo de potencia del contactor con imán al disminuir la resistencia del bobinado, otro aspecto que contribuye al aumento de fuerza generada es la reducción en la longitud de las patas que contribuye a disminuir el camino reluctante, reduciendo las pérdidas de flujo. Además, el aumento en el espesor de las patas facilita una mayor circulación de flujo, lo que optimiza la generación de fuerza, como se ilustra claramente en la Figura 31. Para lograr la misma fuerza, se requieren 5.003 vatios menos. Este ahorro de energía representa una eficiencia del 17.76%, subrayando la viabilidad y eficacia de la implementación del contactor con imán en términos de eficiencia energética.

5.2 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE HALLAZGOS EN CONTACTORES APLICADOS EN MOTOR HRM

5.2.1 RESULTADOS DEL MOTOR HRM-12/10

A continuación, aplicamos los hallazgos obtenidos al aplicar la tecnología HRM al contactor a un motor HRM. En primer lugar, obtenemos las dimensiones del motor híbrido de reluctancia variable 12/10.

Tabla 4. Parámetros iniciales de la simulación del motor HRM

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
HM	17 mm
HY	20 mm
BS	18.3 mm
BP	18.5 mm
RG	75 mm
RY	157 mm
M	3
K	1
LM	Calculado acorde a geometría
G	1 mm
LW	15 mm
TURNS	30
MATERIAL FERROMAGNETICO	NO
MATERIAL DEL IMAN PERMANENTE	NdFeB32MGOe

Se realiza la simulación para los ángulos de posición de 0° a 18° en intervalos de 3° a corrientes en el bobinado de 0 a 20A, obteniendo los siguientes resultados:

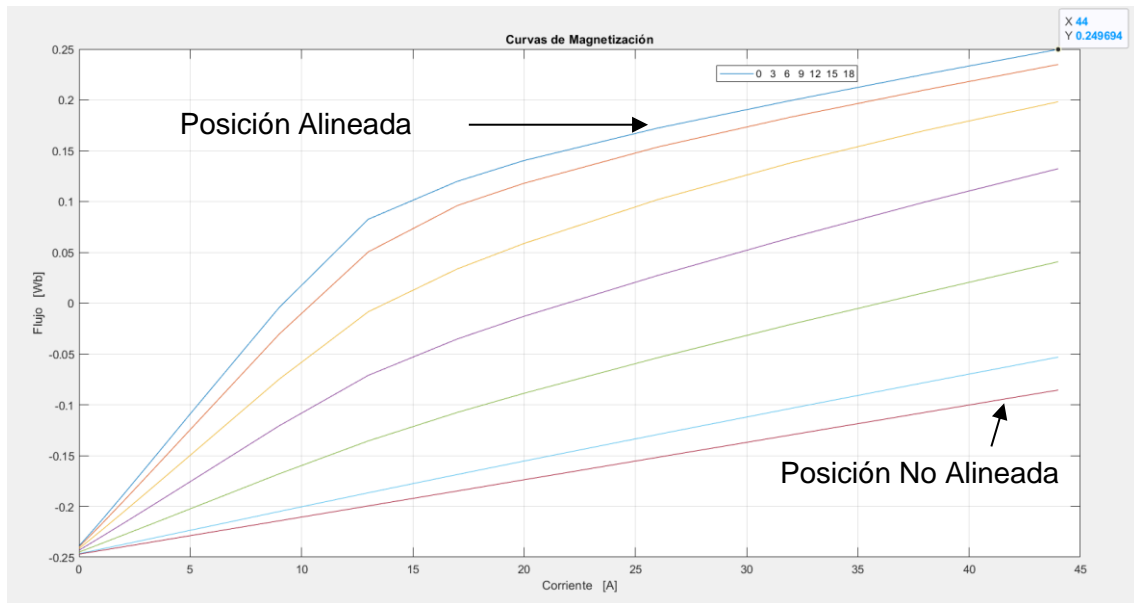


Figura 32. Curvas de magnetización de HRM-12/10

En la Figura 32, se nota que el flujo concatenado resultante puede ser negativo en ciertas corrientes y posiciones angulares debido a la influencia del imán en el circuito. La cantidad de energía mecánica convertida durante un ciclo de stroke se representa mediante el área entre la línea de corriente de trabajo y las líneas de posición alineada y no alineada. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$W_{mec} = \int_0^i \Psi(\theta, i) di$$

Esta fórmula indica que a medida que aumenta el área entre las posiciones alineada y no alineada, se incrementa la energía mecánica disponible en el sistema. En el caso específico del imán permanente, al comenzar con un valor de flujo negativo, se logra ampliar esta área, permitiendo así generar más par en el sistema.

La influencia del imán permanente introduce una región de trabajo donde el flujo concatenado es negativo, indicando una zona que contribuirá con un par negativo. Bajas corrientes de excitación en posiciones rotóricas no alineadas pueden generar un par negativo, lo cual resulta desfavorable si la máquina está diseñada para operar como motor.

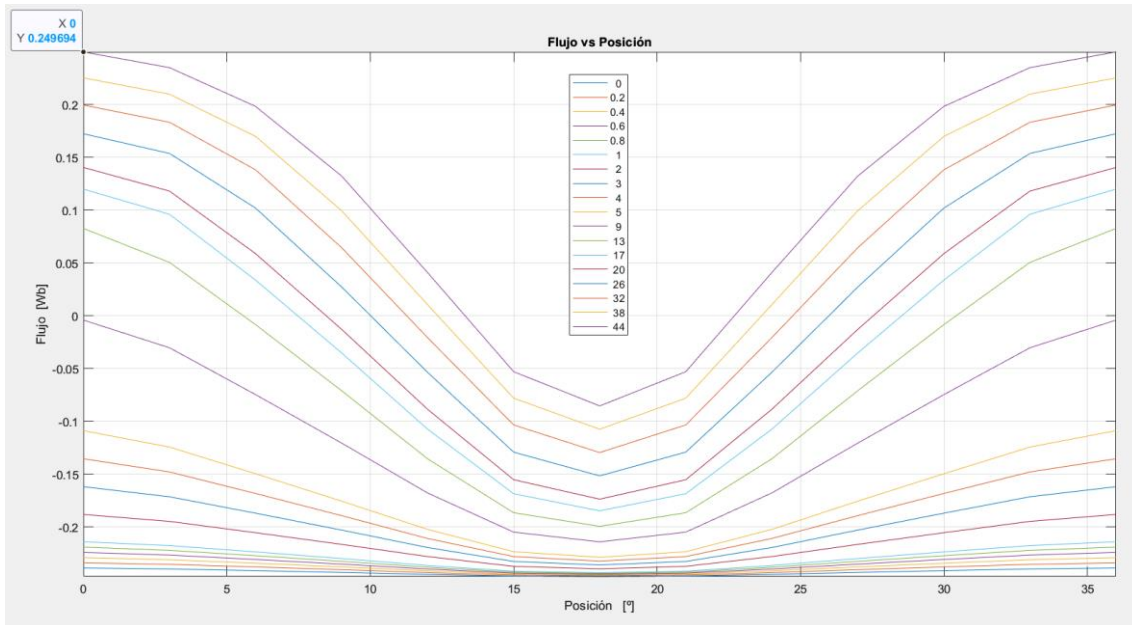


Figura 33. Flujo en función de la posición angular y el valor de corriente de fase del motor HRM-12/10

La Figura 33 muestra la relación entre el flujo, la posición angular y la corriente, con una corriente máxima de 44 A. A partir de 13 A, el flujo deja de ser lineal y se satura, lo que significa que se necesita más flujo para mayores corrientes, pero ya no de manera proporcional.

La relación entre inductancia y flujo se rige por la expresión:

$$L = \frac{d\Psi(\theta, i)}{di}$$

A medida que la corriente aumenta, el flujo lo hace proporcionalmente, pero la inductancia disminuye. Para un rendimiento óptimo, es recomendable operar cerca de la región lineal, permitiendo así ampliar los ángulos de conducción. En contraste, trabajar con corrientes que saturan la máquina puede proporcionar máxima potencia, a costa de reducir el rendimiento.

Se destaca el flujo negativo para corrientes pequeñas en la zona de no alineación, debido al efecto del imán permanente en el circuito magnético. Esto establece un umbral mínimo de corriente en la bobina para la participación del imán en la generación de flujo concatenado positivo.

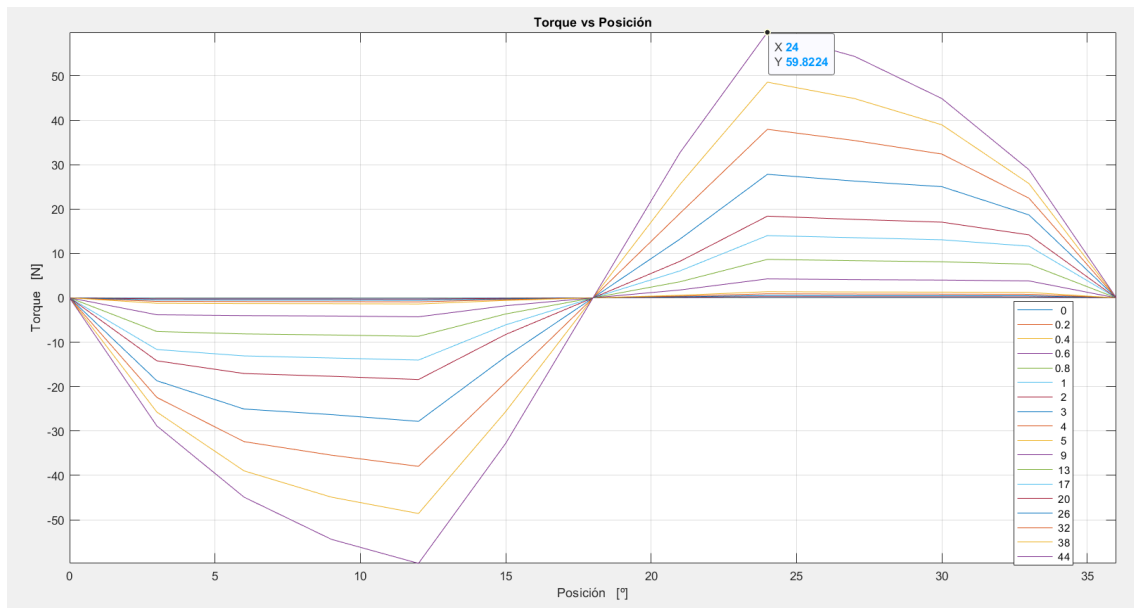


Figura 34. Valor del par en función de la posición angular y el valor de corriente de fase del motor HRM 12/10

La capacidad de generar par en la máquina está directamente ligada a la energía mecánica que puede producir. Para maximizar la producción de par, es deseable que la inductancia en la posición NO alineada sea lo más pequeña posible, mientras que el flujo debe incrementarse de manera rápida con la corriente y alcanzar una saturación con un valor elevado de flujo.

En la Figura 34 se representa la variación del par estático en relación con la posición angular y la corriente de fase. Se destaca que, para corrientes bajas, el par se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el periodo de conducción. Sin embargo, para corrientes más elevadas, la no linealidad ocasiona la aparición de un pico de par significativo al inicio de la conducción, seguido por una disminución gradual en forma de rampa negativa. Esta característica resulta menos favorable cuando se busca minimizar el rizado de par, pero puede ser beneficiosa cuando se requiere una aportación adicional de potencia mecánica. De esta gráfica se obtiene una producción de torque estático de 59.82N a una corriente de 44A.

5.2.2 RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN DE HALLAZGOS DE CONTACTORES A MOTOR HRM-12/10

A continuación, se realizan pequeños cambios con el fin de conseguir un aumento en el torque estático generado del motor HRM, al aumentar la altura del yugo (hy) a 20mm, el ancho del brazo (bp) a 20mm y el ancho del polo (bs) a 18.5mm.

Se obtiene los siguientes resultados:

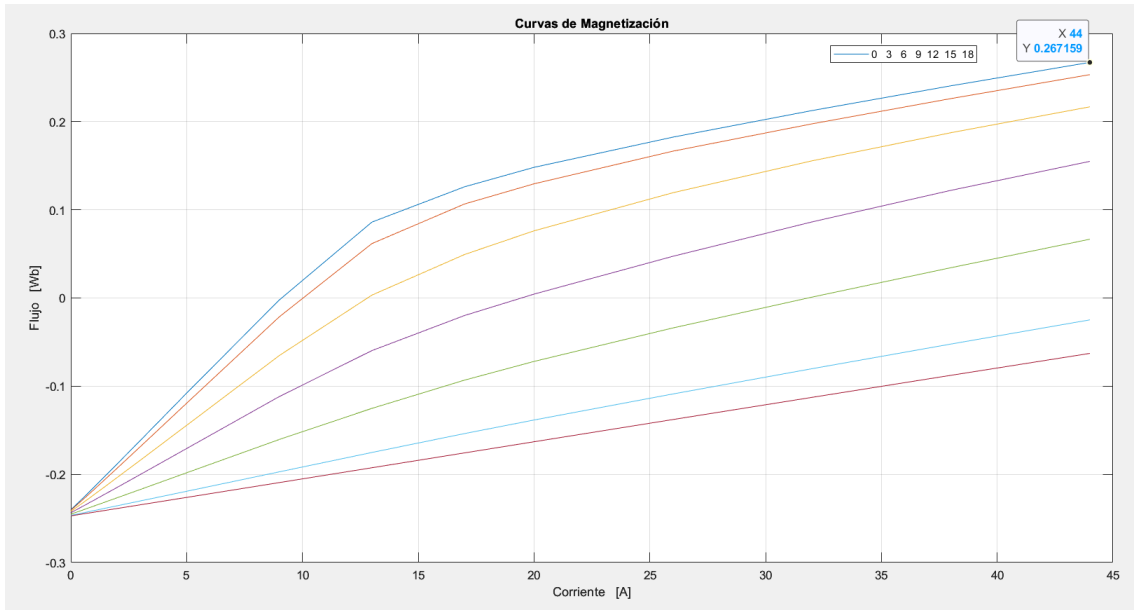


Figura 35. Curvas de magnetización de HRM-12/10 modificado

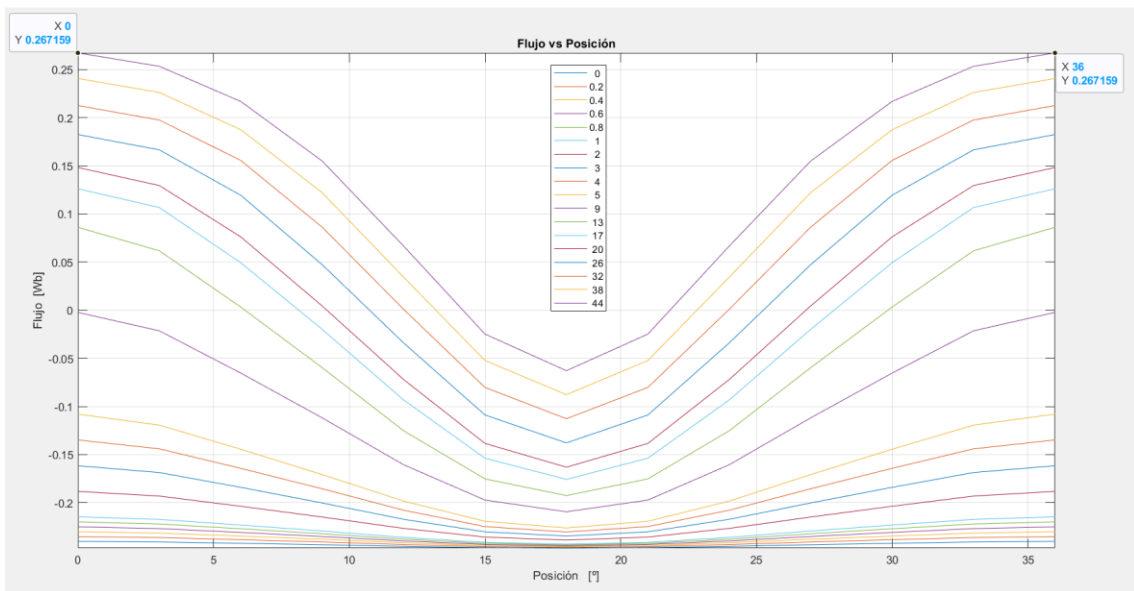


Figura 36. Flujo en función de la posición angular y el valor de corriente de fase del motor HRM-12/10 modificado

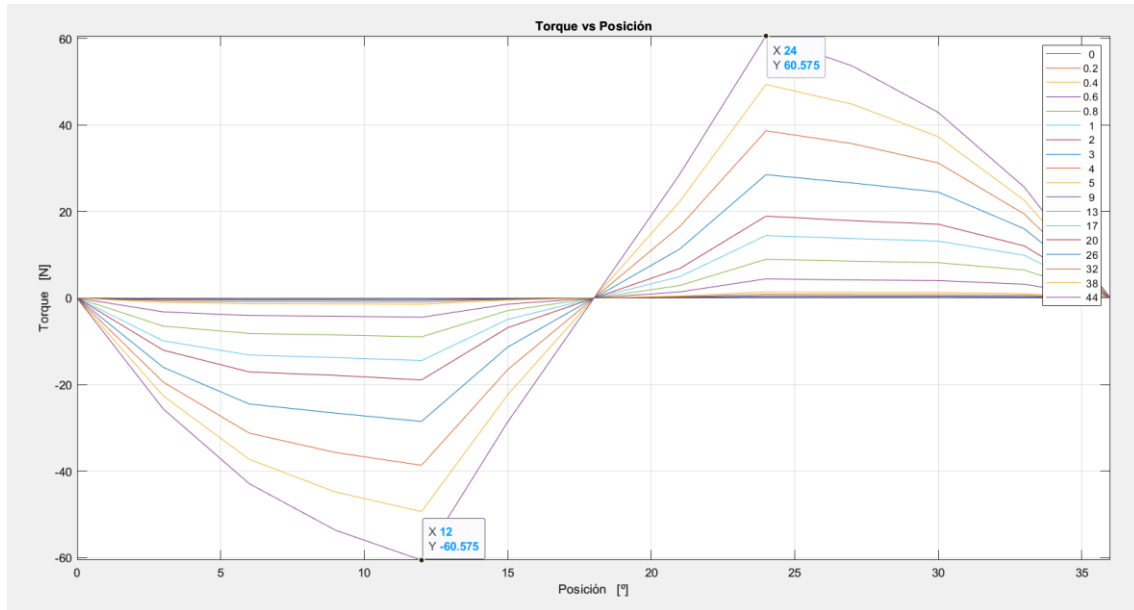


Figura 37. Valor del par en función de la posición angular y el valor de corriente de fase del motor HRM 12/10 modificado

Las modificaciones menores en la configuración del motor HRM 12/10 han posibilitado un incremento en el flujo magnético producido en relación con la posición angular y la corriente, como se ilustra en las Figuras 35 y 36. Este ligero aumento en las curvas de magnetización se traduce en un incremento proporcional en el torque generado, evidenciado por un pequeño aumento en el par estático del motor, como se observa en la Figura 37, logrando un aumento de 0.75 N aproximadamente.

6. CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES DE CONTACTORES APLICADA TECNOLOGÍA HRM.

Para que la tecnología HRM en un contactor funcione adecuadamente es importante tener en cuenta tanto la coercitividad del imán permanente como la saturación magnética del material ferromagnético de la armadura. La coercitividad afecta la capacidad del material para retener su magnetización, mientras mayor sea esta, se necesitará mayor intensidad de campo magnético para desviar las líneas de campo del imán permanente, mientras que, la saturación magnética de la armadura limita la cantidad máxima de líneas de flujo magnético que pueden circular a través del material ferromagnético, ya que la saturación indica que el material ha alcanzado su capacidad máxima de magnetización. Al aumentar el espesor del imán se requiere mayor intensidad de campo magnético, para aprovechar al máximo las líneas de campo de este (posee mayor coercitividad). Para adquirir mayor intensidad de campo, se debe proporcionar mayor cantidad de corriente a la bobina (para imán de 5mm se requirió 0.86A para obtener la ganancia de fuerza máxima, mientras que para el imán de 6.5mm se requirió 1A) Figura 21, otra posible solución es el aumentar el número de espiras de la bobina.

La presencia del imán permanente en el contactor ocasiona una fuerza en la armadura móvil incluso cuando no hay corriente circulando por la bobina, y dicha fuerza cambia

en intensidad en función del tamaño del imán. En resumen, a mayor tamaño del imán, se ejerce una fuerza mayor.

La generación de fuerza en un contactor está influenciada por las dimensiones de la armadura. Un incremento en la sección de patas de la armadura puede resultar en una fuerza magnética más intensa, ya que esta expansión en la sección transversal permite que más líneas de campo magnético atraviesen la armadura, contribuyendo así a una generación de fuerza más significativa en el contactor. En contraste, un aumento en la longitud de la armadura afecta inversamente la fuerza producida por el contactor. Esto se debe a que el camino reluctante promedio aumenta, incrementando la oposición al paso del flujo magnético. Este fenómeno puede ser verificado mediante la siguiente ecuación:

$$F_m = -\frac{1}{2}(Ni)^2 \frac{d\rho}{dG} \quad [9]$$

La permeancia es una medida de la facilidad con la que el flujo magnético puede establecerse en un material o a través de un componente en un circuito magnético la cual es directamente a la sección transversal e inversamente proporcional a la longitud media del circuito magnético.

$$\rho = \frac{a\mu_0\mu_r}{l}$$

6.2 CONCLUSIONES DE CONTACTORES APLICADA TECNOLOGÍA HRM.

Para conseguir un diseño óptimo de un motor HRM, se sugiere comenzar evaluando la potencia necesaria para realizar la tarea deseada. Luego, considerando las limitaciones dimensionales, se busca la combinación adecuada de parámetros, como el espesor del yugo, el radio del rotor, el radio del estator, el espesor del imán, el número de bobinas y el material de los elementos, mediante un análisis de sensibilidad.

Este enfoque permite mejorar las características del motor, logrando un rendimiento y eficiencia superiores. Al optimizar estos parámetros en función de las necesidades específicas y las restricciones del sistema, se obtiene un diseño que maximiza la eficiencia y el rendimiento del motor HRM, cumpliendo eficazmente con los requisitos de la tarea a realizar.

Durante el desarrollo de este trabajo final, se inició con el modelo de un motor preexistente. Mediante la modificación exclusiva de parámetros geométricos del estator y rotor, se logró un aumento de 0.75 Nm en el torque estático. Aunque este incremento puede parecer pequeño a primera vista, representa una oportunidad para la optimización de los modelos existentes.

7. APLICACIONES EN LÍNEAS FUTURAS

Llevar a cabo la construcción de prototipos reales como una fase esencial para validar la exactitud y la eficacia de las simulaciones realizadas. Esta etapa implicará la materialización física de los modelos concebidos, permitiendo así una comparación detallada y directa con los resultados obtenidos a través de experimentos prácticos.

Creación de software automatizado que posibilite el modelado integral de motores HRM, abarcando aspectos dinámicos, térmicos, mecánicos y eléctricos. Con el objetivo de proporcionar una herramienta versátil y completa que facilite la representación detallada y precisa de todos los componentes y fenómenos involucrados en los motores híbridos de reluctancia variable, permitiendo el desarrollo de nuevas simulaciones con ensayos de sensibilidad.

Explorar los aspectos beneficiosos para mejorar el rendimiento mediante la consideración de diversas chapas magnéticas y la implementación de constructivas formas trapezoidales en el rotor, así como la evaluación de máquinas multietapa. Esto implica realizar análisis de sensibilidad y encontrar un equilibrio entre el rizado de par y el rendimiento.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] P. Andrada, O. Rolando Avila, B. Blanqué, E. Martínez, M. Torrent, J. Adelantado. Hybrid electric reluctance machine. European Patent Application EP 2693613 A1.

[2] Rolando Ávila. "ELECTRIC SWITCH". Patent US2009/0167470A1, 2009

[3] Kenji Nakamura, Kohei Murota ,Osamu Ichinokura. "Characteristics of a novel switched reluctance motor having permanent magnets between the stator pole-tips." Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on DOI : 0.1109/EPE.2007.4417298.

[4] P.Andrada, B.Blanqué, E.Martínez, M.Torrent, O.Rolando Ávila, M.Gomila, X.Adelantado. "Hybrid Reluctance Machines with U-Shaped Electromagnets and Permanet Magnets". International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREP'15). ISSN 2172-038 X, nº.13, April 2015.

[5] Design and Analysis of a New Enhanced Torque Hybrid Switched Reluctance Motor Jingwei Zhu, Ka Wai Eric Cheng, Xiangdang Xue, IEEE Transactions on Energy Conversion. DOI 10.1109/TEC.2018.2876306.

[6] Mohammad Amin Jalali Kondelaji, Ehsan Farmahini Farahani, Mojtaba Mirsalim. "Performance Analysis of a New Switched Reluctance Motor With Two Sets of Embedded Permanent Magnets", IEEE Transactions on Energy Conversion, No 2, June, 2020.

[7] Gholamreza Davarpanah, Jawad Faiz, Hossein Shirzad. "A C-Core Connected Two-Phase Switched Reluctance Motor With Embedded Permanent Magnets for Developed Torque Enhancement", IEEE Transactions on Industrial Elctronics, No 3, March, 2024.

[8] Duarte Mejía, J. N. (2021). Automatización del sistema de obtención de las curvas par-velocidad en motores de reluctancia auto conmutados (SRM) e híbridos (HRM) (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

[9] Hyink, R. (1960). An analysis of the dynamics of an electromechanical system. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry, 79(4), 267-271.

ANEXOS

ANEXO A. CODIGO DE MATLAB UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DEL CONTACTOR CONVENCIONAL Y CON TECNOLOGÍA HRM APLICADA

Contenidos

- Contactor convencional Vs contactor con tecnología HRM
- Creación de la geometría del contactor
- Proceso iterativo

- Gráfica de resultados

CONTACTOR CONVENCIONAL VS CONTACTOR CON TECNOLOGÍA HRM

```
clear;
clc;
openfemm;
newdocument(0);
mi_saveas('temp.fem');
mi_hidegrid();
main_maximize;
mi_zoomnatural;
Lw = 15;           % Espesor de la armadura

% Configuración del modelo en FEMM

mi_probdef(0,'millimeters','planar',1E-8,(Lw),(30),(0));
mi_zoom(-70,-70,70,70);mi_clearselected();

% Dimensiones del contactor

a=1;
b=1;
LP = 17;         % Longitud de patas de armadura
EP = 5;         % Espesor de patas
LY = 27;        % Longitud del yugo
EY = 5;         % Espesor de Yugo
EB = 4;         % Espesor de bobina
LB = 15;        % Longitud de bobina
EI = 5;         % Espesor del iman
SIY = 1;        % Separacion entre iman y borde del yugo
GAP=1.6;        % GAP
GAPMIN=1;       % GAP minimo
N_ite=1;        % Numero de iteraciones de gap
                % (si es 1 se ajusta la distancia entre armaduras al gap
                % maximo o GAP)
SB = 0.1;       % Separacion entre la bobina y la armadura
BF = 1.5;       % Factor de multiplicacion para determinar el boundary
d_al=0.125;     % Diametro del alambre
Imin=0;         % Corriente minima
Imax=1.07;     % Corriente Maxima
N_it=11;        % Numero de iteraciones de corriente
pos=[];         % Vector de posiciones del contactor HRM
f=[];           % Vector de fuerza resultante del contactor HRM
cor=[];         % Vector de corrientes del contactor HRM
flux_=[];       % Vector de flujo magnetico del contactor HRM
pos_si=[];      % Vector de posicion del contactor convencional
f_si=[];        % Vector de fuerza resultante del contactor convencional
cor_si=[];      % Vector de corrientes del contactor convencional
flux_si=[];     % Vector de flujo magnetico del contactor convencional
x=(LY/2)-(EP/2);% Coordenada en x de analisis de flujo magnetico
y=0;           % Coordenada en y de analisis de flujo magnetico

% Adecuacion de medidas

if LB >= (LY-EP*2)
    LB=(LY-EP*2)-2*SB;
```

```
end
if EB >= (LP-EY-SIY-EI)
    EB =LP-EY-SIY-EI-2*SB;
end

% Calculo o seleccion de numero de espiras en bobina

turn= (EB/d_al)*(LB/d_al) % Calcula el # de espiras de acuerdo al espesor
y longitud de bobina
%turn=3000; % Setea el numero de espiras en la bobina

turn =

    3840
```

CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL CONTACTOR

Crear las "U"

```
mi_seteditmode('nodes');
mi_addnode(LY/2,-LP);mi_addnode(-LY/2,-LP);
mi_addnode(LY/2,0);mi_addnode(-LY/2,0);
mi_addnode(LY/2-EP,0);mi_addnode(-LY/2+EP,0);
mi_addnode(LY/2-EP,-LP+EY);mi_addnode(-LY/2+EP,-LP+EY);

mi_seteditmode('segments');
mi_addsegment(LY/2,-LP,-LY/2,-LP);
mi_addsegment(LY/2,0,LY/2,-LP);
mi_addsegment(-LY/2,0,-LY/2,-LP);
mi_addsegment(LY/2,0,LY/2-EP,0);
mi_addsegment(-LY/2,0,-LY/2+EP,0);
mi_addsegment(LY/2-EP,-LP+EY,LY/2-EP,0);
mi_addsegment(-LY/2+EP,-LP+EY,-LY/2+EP,0);
mi_addsegment(LY/2-EP,-LP+EY,-LY/2+EP,-LP+EY);

mi_selectsegment(LY/2,-LP);mi_selectsegment(-LY/2,-LP);
mi_selectsegment(LY/2,0);mi_selectsegment(-LY/2,0);
mi_selectsegment(LY/2-EP,0);mi_selectsegment(-LY/2+EP,0);
mi_selectsegment(LY/2-EP,-LP+EY);mi_selectsegment(-LY/2+EP,-LP+EY);
mi_selectsegment(LY/2-0.1,-LP);
mi_selectsegment(LY/2-EP-0.1,-LP+EY);mi_selectsegment(-LY/2+EP+0.1,-LP+EY);
mi_selectsegment(0,-LP+EY);
mi_setgroup(111);mi_clearselected();

mi_selectgroup(111);
mi_mirror(0,GAP/2,100,GAP/2);mi_clearselected();
mi_seteditmode('segments');

mi_selectsegment(LY/2,-LP);mi_selectsegment(-LY/2,-LP);
mi_selectsegment(LY/2,0);mi_selectsegment(-LY/2,0);
mi_selectsegment(LY/2-EP,0);mi_selectsegment(-LY/2+EP,0);
mi_selectsegment(LY/2-EP,-LP+EY);mi_selectsegment(-LY/2+EP,-LP+EY);
mi_selectsegment(LY/2-0.1,-LP);
mi_selectsegment(LY/2-EP-0.1,-LP+EY);mi_selectsegment(-LY/2+EP+0.1,-LP+EY);
mi_selectsegment(0,-LP+EY);
mi_setgroup(112);mi_clearselected();
```

%Crear Iman

```
mi_seteditmode('nodes');
mi_addnode(LY/2-EP,GAP+SIY);
mi_addnode(LY/2-EP,GAP+SIY+EI);
mi_addnode(-LY/2+EP,GAP+SIY+EI);
mi_addnode(-LY/2+EP,GAP+SIY);
mi_seteditmode('segments');
mi_addsegment(LY/2-EP,GAP+SIY,-LY/2+EP,GAP+SIY);
mi_addsegment(LY/2-EP,GAP+SIY+EI,-LY/2+EP,GAP+SIY+EI);

mi_selectsegment(0,GAP+SIY+EI);
mi_selectsegment(0,GAP+SIY);
mi_setgroup(115);mi_clearselected();
mi_selectgroup(115);
```

%Crear Bobina

```
mi_seteditmode('nodes');
mi_addnode(LB/2,GAP+LP-SB-EY);
mi_addnode(-LB/2,GAP+LP-SB-EY);
mi_addnode(LB/2,GAP+LP-SB-EY-EB);
mi_addnode(-LB/2,GAP+LP-SB-EY-EB);
mi_seteditmode('segments');
mi_addsegment(LB/2,GAP+LP-SB-EY,-LB/2,GAP+LP-SB-EY);
mi_addsegment(LB/2,GAP+LP-SB-EY,LB/2,GAP+LP-SB-EY-EB);
mi_addsegment(-LB/2,GAP+LP-SB-EY-EB,-LB/2,GAP+LP-SB-EY);
mi_addsegment(-LB/2,GAP+LP-SB-EY-EB,LB/2,GAP+LP-SB-EY-EB);

mi_selectsegment(0,GAP+LP-SB-EY);
mi_selectsegment(0,GAP+LP-SB-EY-EB);
mi_selectsegment(LB/2,GAP+LP-SB-EY-EB/2);
mi_selectsegment(-LB/2,GAP+LP-SB-EY-EB/2);
mi_setgroup(113);mi_clearselected();
mi_selectgroup(113);
mi_mirror(0,GAP+LP-EY/2,100,GAP+LP-EY/2);mi_clearselected();
```

%Crear Boundary

```
mi_seteditmode('nodes');
mi_addnode(LY/2*BF,-LP*BF);
mi_addnode(-LY/2*BF,-LP*BF);
mi_addnode(LY/2*BF,(LP+EB)*BF);
mi_addnode(-LY/2*BF,(LP+EB)*BF);
mi_seteditmode('segments');
mi_addsegment(LY/2*BF,-LP*BF,-LY/2*BF,-LP*BF);
mi_addsegment(-LY/2*BF,-LP*BF,-LY/2*BF,(LP+EB)*BF);
mi_addsegment(-LY/2*BF,(LP+EB)*BF,LY/2*BF,(LP+EB)*BF);
mi_addsegment(LY/2*BF,(LP+EB)*BF,LY/2*BF,-LP*BF);
```

%Propiedades E

```
mi_getmaterial('M-19 Steel');
mi_seteditmode('blocks');
mi_addblocklabel(0,-LP+EY/2);
mi_selectlabel(0,-LP+EY/2);
mi_setblockprop('M-19 Steel',0,1,'None',0,112,0);mi_clearselected();
mi_addblocklabel(0,GAP+LP-EY/2);
```

```

mi_selectlabel(0,GAP+LP-EY/2);
mi_setblockprop('M-19 Steel',0,1,'None',0,111,0);mi_clearselected();

%Propiedades iman

mi_getmaterial('NdFeB 32 MGOe');
mi_seteditmode('blocks');
mi_addblocklabel(0,GAP+SIY+EI/2);
mi_selectlabel(0,GAP+SIY+EI/2);
mi_setblockprop('NdFeB 32 MGOe',0,1,'None',180,115,0);mi_clearselected();

%Propiedades Aire

mi_getmaterial('Air');
mi_seteditmode('blocks');
mi_addblocklabel(0,GAP+LP-EY-SB/2);
mi_addblocklabel(LY/2*BF-SB,-LP*BF+SB);
mi_selectlabel(0,GAP+LP-EY-SB/2);
mi_setblockprop('Air',0,1,'None',0,116,0);mi_clearselected();
mi_selectlabel(LY/2*BF-SB,-LP*BF+SB);
mi_setblockprop('Air',0,1,'None',0,0,0);mi_clearselected();

%Propiedades Bobina

mi_addcircprop('C1',0,1);
mi_getmaterial([num2str(d_al) 'mm']);
mi_seteditmode('blocks');
mi_addblocklabel(0,GAP+LP-EY-EB/2);
mi_addblocklabel(0,GAP+LP+SB+EB/2);
mi_selectlabel(0,GAP+LP-EY-EB/2);
mi_setblockprop([num2str(d_al)
'mm'],0,1,'C1',0,101,turn);mi_clearselected();
mi_selectlabel(0,GAP+LP+SB+EB/2);
mi_setblockprop([num2str(d_al)
'mm'],0,1,'C1',0,102,-
turn);mi_clearselected();
mi_zoomnatural();mi_clearselected();

```

PROCESO ITERATIVO

Contactador con tecnología HRM

```

for i=Imin:(Imax - Imin)/(N_it-1):Imax % Iteracion de corrientes
    mi_addcircprop(num2str(round(i,2)),i,1)
    mi_seteditmode('group');
    mi_selectgroup(101);
    mi_setblockprop([num2str(d_al)
'mm'],0,1,num2str(round(i,2)),0,101,turn);mi_clearselected();
    mi_clearselected();
    mi_seteditmode('group');
    mi_selectgroup(102);
    mi_setblockprop([num2str(d_al) 'mm'],0,1,num2str(round(i,2)),0,102,-
turn);mi_clearselected();
    c=1;
    t=(GAP-GAPMIN)/(N_ite-1);
    if N_ite>1 % Toma de decision si es
unico GAP
        for j=GAP:-t:GAPMIN % Iteracion de GAP

```

```

mi_saveas('Contactor2.fem');
mi_analyze();
mi_loadsolution();
mo_showdensityplot(1,0,0,1.1,'bmag');
mo_showvectorplot(1,1.8);
mo_selectblock(0,(-LP+(c-1)*t)+EY/2);
F=mo_blockintegral(19);
f(c,a)=F;
pos(c,a)=round(j,2);
cor(c,a)=i;
if GAP-(t)*(c)>0
    mi_seteditmode('group');
    mi_selectgroup(112);
    mi_movetranslate(0,t);
else
    break;
end
c=c+1;
end
if a<=N_it
    cir_prop(a,:)= mo_getcircuitproperties(num2str(round(i,2)));
end
a=a+1;
mi_seteditmode('group');
mi_selectgroup(112);
mi_movetranslate(0,-(c-1)*t);
mi_clearselected();
else
    mi_saveas('Contactor2.fem');
mi_analyze();
mi_loadsolution();
mo_showdensityplot(1,0,0,2.6,'bmag');
mo_showvectorplot(1,1.8);
mo_selectblock(0,(-LP+EY/2));
F=mo_blockintegral(19);
f(1,a)=F;
pos(1,a)=GAP;
cor(1,a)=i;
flu=mo_getb(x,y);
flux=sqrt(flu(1)^2+flu(2)^2);
flux_(1,a)=flux;
cir_prop(a,:)= mo_getcircuitproperties(num2str(round(i,2)));
a=a+1;
end
end

% Selecciona y elimina material del imán

mi_seteditmode('group');
mi_selectgroup(115);
mi_selectgroup(116);
mi_deleteselcted;
mi_clearselected();
mo_close;

% CONTACTOR CONVENCIONAL

for i=Imin:(Imax - Imin)/(N_it-1):Imax % Iteracion de corrientes
    mi_seteditmode('group');

```

```

mi_selectgroup(101);
mi_setblockprop([num2str(d_al)
'mm'],0,1,num2str(round(i,2)),0,101,turn);mi_clearselected();
mi_clearselected();
mi_seteditmode('group');
mi_selectgroup(102);
mi_setblockprop([num2str(d_al)      'mm'],0,1,num2str(round(i,2)),0,102,-
turn);mi_clearselected();
c=1;
if N_ite>1                                % Toma de decision si es
unico GAP                                  % Iteracion de GAP
    for j=GAP:-t:GAPMIN
        mi_saveas('Contactor.fem');
        mi_analyze();
        mi_loadsolution();
        mo_showdensityplot(1,0,0,1.1,'bmag');
        mo_showvectorplot(1,1.8);
        mo_selectblock(0,(-LP+(c-1)*t)+EY/2);
        F=mo_blockintegral(19);
        f_si(c,b)=F;
        pos_si(c,b)=j;
        cor_si(c,b)=i;
        if GAP-(t)*(c)>0
            mi_seteditmode('group');
            mi_selectgroup(112);
            mi_movetranslate(0,t);
        else
            break;
        end
        c=c+1;
    end
    if b<=N_it
        cir_prop_si(b,:)= mo_getcircuitproperties(num2str(round(i,2)));
    end
    b=b+1;
    mi_seteditmode('group');
    mi_selectgroup(112);
    mi_movetranslate(0,-(c-1)*t);
    mi_clearselected();
else
    mi_saveas('Contactor2.fem');
    mi_analyze();
    mi_loadsolution();
    mo_showdensityplot(1,0,0,2.6,'bmag');
    mo_showvectorplot(1,1.8);
    mo_selectblock(0,(-LP+EY/2));
    F=mo_blockintegral(19);
    flu=mo_getb(x,y);
    flux=sqrt(flu(1)^2+flu(2)^2);
    flux_si(1,b)=flux;
    f_si(1,b)=F;
    pos_si(1,b)=GAP;
    cor_si(1,b)=i;
    cir_prop_si(b,:)= mo_getcircuitproperties(num2str(round(i,2)));
    b=b+1;
end
end
end

```

GRÁFICA DE RESULTADOS

```
if N_ite>1
    figure;
    subplot(1, 2, 1);
    plot(pos, f);
    legendCellArray = cellstr(num2str(cor(1,:)', 'Corriente: %.2f'));
    legend(legendCellArray);
    xlabel('GAP [mm]');
    ylabel('Fuerza [N]');
    title('Fuerza [N] vs GAP [mm] Con Iman');
    grid on;
    subplot(1, 2, 2);
    plot(pos_si, f_si);
    legendCellArray_si = cellstr(num2str(cor_si(1,:)', 'Corriente: %.2f'));
    legend(legendCellArray_si);
    xlabel('GAP [mm]');
    ylabel('Fuerza [N]');
    title('Fuerza [N] vs GAP [mm] Sin Iman');
    grid on;

    % Etiquetas en la gráfica de barras de aumento de fuerza en %
    aumento_porcentaje=((f-f_si)./f_si).*100;
    figure();
    bar(pos, aumento_porcentaje);
    xlabel('GAP [mm]');
    ylabel('Aumento de Fuerza (%)');
    title('Aumento de Fuerza en % vs GAP');
    grid on;

    % Añadir leyenda a la gráfica de barras
    legendCellArray_aumento = cellstr(num2str(cor(1,:)', 'Corriente:
%.2f'));
    legend(legendCellArray_aumento);
else
    figure;
    plot(cor, f, 'r', 'LineWidth', 1);
    xlabel('Corriente [A]');
    ylabel('Fuerza [N]');
    grid on;
    hold on;
    plot(cor_si, f_si, 'b', 'LineWidth', 1);
    legend('Con Iman', 'Sin Iman');
    xlabel('corriente [A]');
    ylabel('Fuerza [N]');
    title('Fuerza [N] vs Corriente [A]');
    grid on;

    figure;
    plot(cor, flux_, 'r', 'LineWidth', 1);
    xlabel('Corriente [A]');
    ylabel('Flujo [webers]');
    grid on;
    hold on;
    plot(cor_si, flux_si, 'b', 'LineWidth', 1);
    legend('Con Iman', 'Sin Iman');
    xlabel('corriente [A]');
    ylabel('Flujo [webers]');
```

```
title('Flujo [webers] vs Corriente [A]');
grid on;

% Etiquetas en la gráfica de barras de aumento de fuerza en %
aumento_porcentaje=((f-f_si)./f_si).*100;
figure();
bar(pos(1), aumento_porcentaje);
xlabel('GAP [mm]');
ylabel('Aumento de Fuerza (%)');
title('Aumento de Fuerza en % vs GAP');
grid on;

% Añadir leyenda a la gráfica de barras
legendCellArray_aumento = cellstr(num2str(cor(1,:)), 'Corriente:
%.2f');
legend(legendCellArray_aumento);

end

figure();
% Graficar "Sin Iman" en azul
h1 = plot(cir_prop_si(:, 1) .* cir_prop_si(:, 2), f_si, 'b', 'LineWidth',
1);
hold on;

% Graficar "Con Iman" en rojo
h2 = plot(cir_prop(:, 1) .* cir_prop(:, 2), f, 'r', 'LineWidth', 1);

% Agregar leyendas y etiquetas
legend([h1(1), h2(1)], 'Sin Iman', 'Con Iman');
xlabel('Potencia [W]');
ylabel('Fuerza [N]');
title('Fuerza [N] vs Potencia [W]');
grid on;

% Añadir etiquetas al gráfico de potencia vs. fuerza
for i = 1:N_ite
    text(max(cir_prop_si(:, 1) .* cir_prop_si(:, 2)), f_si(i, N_it), ...
        [' ' num2str(pos_si(i,1)) ' mm'], 'VerticalAlignment', 'bottom',
'HorizontalAlignment', 'left');
end
```

ANEXO B. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DEL CONTACTOR

En este apéndice se proporciona una descripción a de cómo obtener los parámetros del contactor convencional necesarios para la ejecución de este proyecto. Esto incluye información sobre el diámetro de las espiras, los parámetros eléctricos de funcionamiento y el número de espiras.

Partiendo del análisis del Contactor SPRECHER+SCHUH CA 3-9-10 con armadura tipo E, se llevaron a cabo mediciones experimentales cruciales.



Figura 38. Fotos de contactor SPRECHER+SCHUH CA 3-9-10

Para la obtención del espesor del alambre del bobinado se obtuvo varias medidas de la longitud de las bobinas enrolladas en un tubo con el conteo del número de espiras se pudo obtener un valor del espesor al dividir estos parámetros.

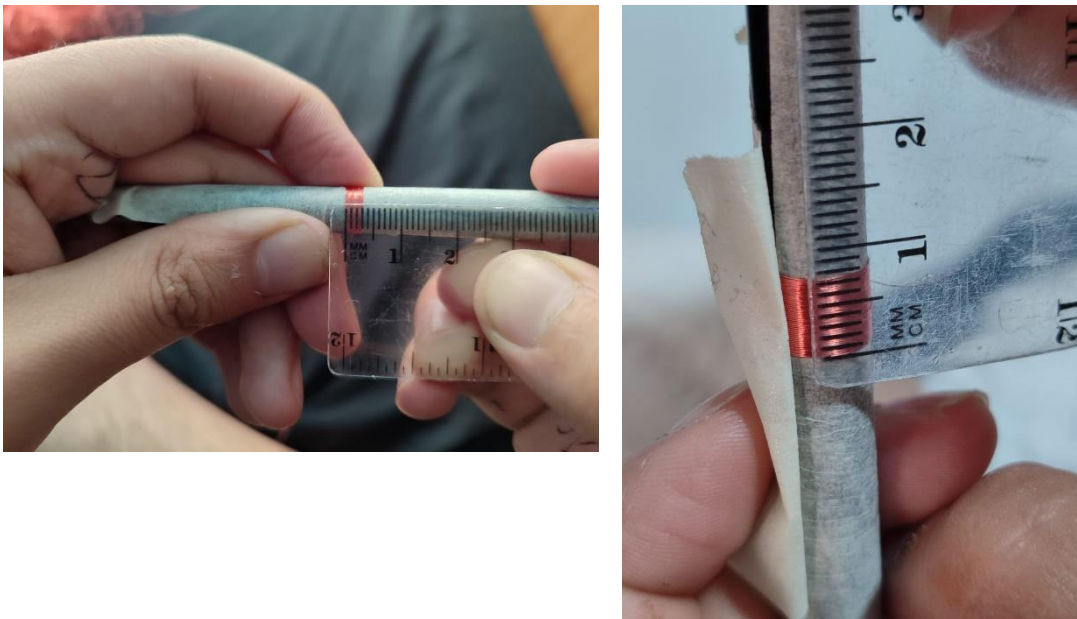


Figura 39. Obtención de espesor de alambre de la bobina

Para la obtención de los parámetros eléctricos se realizaron ensayos condiciones de corriente alterna (CA) y una tensión de 224V, se obtuvieron los siguientes datos: una corriente alterna de 0.36A.

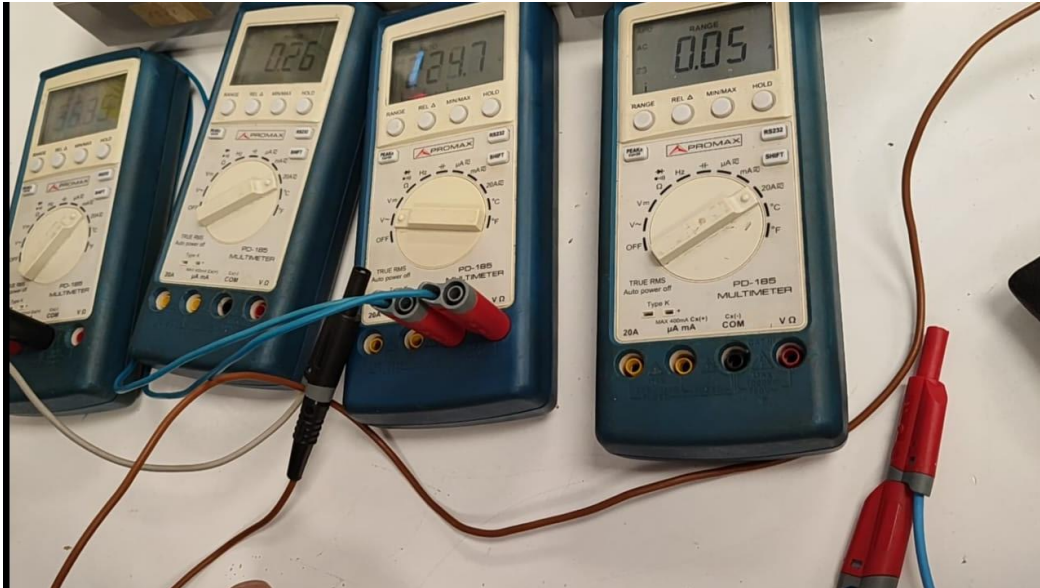


Figura 40. Obtención de parámetros eléctricos del contactor

Adicionalmente, el mismo modelo de contactor fue sometido a corriente continua (CC), resultando en una tensión de 37V y una corriente continua (I_{dc}) de 0.44A.

Para la obtención del número de espiras, se realizó el desbobinado de un contactor y el conteo de estas obteniendo un resultado de 4780 espiras.