

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

Bravo Castro Joel

Febrero 2024

## 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.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG) ha establecido acuerdos de investigación con RAC Technologies para explorar la tecnología HRM. Tras desarrollar modelos de motores HRM y realizar descubrimientos significativos, se patentó un modelo mejorado llamado "Hybrid electric reluctance machine".[1] A pesar de los avances, este estudio se centra en comprender a fondo la tecnología HRM y abordar cuestiones aún no exploradas, contribuyendo al avance del conocimiento en este campo específico.

La motivación detrás de esta iniciativa radica en la adquisición de conocimientos para diseñar máquinas electromagnéticas de alto rendimiento, aplicando habilidades obtenidas durante el máster en materias como diseño de máquinas eléctricas y gestión de energía. Este estudio podría marcar un avance significativo al proporcionar no solo contactores más eficientes, sino también motores para vehículos eléctricos con un

rendimiento mejorado, contribuyendo a la eficiencia energética y la movilidad sostenible.

La justificación se basa en la creciente presencia de contactores en la industria, donde la eficiencia energética es crucial. La aplicación de la tecnología HRM emerge como una oportunidad estratégica para potenciar el rendimiento de los contactores, y dado el estado evolutivo de esta tecnología, se requiere una investigación exhaustiva para comprender sus implicaciones y posibilidades.

Los objetivos del estudio son los siguientes:

- Investigar los actuales accionamientos y la tecnología HRM.
- Evaluar ventajas y desventajas de los contactores y la tecnología HRM.
- Proporcionar propuestas de accionamientos con tecnología HRM.
- Realizar simulaciones electromagnéticas en contactores.
- Implementar hallazgos en un motor HRM para mejorar sus prestaciones.
- Comparar y analizar los resultados obtenidos en contactores y motores HRM.
- Elaborar una documentación completa que registre los descubrimientos en contactores y motores HRM.

Los objetivos planteados buscan mejorar la eficiencia y sostenibilidad en sistemas electromecánicos, con un enfoque en contactores y motores híbridos de reluctancia variable. Se pretende transferir avances desde los contactores para optimizar los motores HRM en desarrollo.

## 2. ESTADO DE ARTE

### 2.1 CONTACTORES EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad, la historia de los contactores, esenciales en sistemas electromecánicos, se entrelaza con innovaciones para mejorar eficiencia y sostenibilidad. La patente US 2009/0167470 A1 de Oscar Rolando Ávila Cusicanqui y José Carlos Tinoco Soares, del 2 de julio de 2009, [2] describe un interruptor eléctrico que combina bobinas con corriente alterna o rectificadas e imanes permanentes para aumentar la fuerza de atracción, marcando un hito en la evolución de los contactores. Este avance refleja la constante búsqueda de soluciones más

eficientes y sostenibles en sistemas electromecánicos, delineando un futuro prometedor para estos componentes esenciales.

## 2.2 TECNOLOGÍA HRM EN LA ACTUALIDAD

En el ámbito de los motores híbridos de reluctancia variable (HRM), se han propuesto diversas topologías que superan a los modelos convencionales. Nakamura et al. (2007) introdujeron un motor de reluctancia conmutada con imanes permanentes entre las puntas del estator, evidenciando un aumento del 20% en el par máximo. [3]

Andrada et al. (2015) presentaron máquinas híbridas de reluctancia con electromagnetos en forma de U, destacando su rendimiento excepcional en simulaciones y experimentos. [4]

Zhu et al. (2018) propusieron un motor híbrido de reluctancia conmutada 6/10, 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, esto junto con comparaciones adicionales con motores sin escobillas de dimensiones similares respaldan la superioridad del HRM en la utilización eficiente de imanes permanentes. La construcción de un prototipo validó experimentalmente los resultados teóricos y de simulación, destacando el potencial del HRM para aplicaciones industriales con alta densidad de par. [5]

En junio 2020, se ha investigado un motor de reluctancia con par de imanes permanentes (PM-SRM), que mostró un aumento del 97,6% en el par de salida en comparación con SRM convencionales. [6]

Por último, en un artículo científico de IEEE. se introdujo un diseño de SRM con estructura de núcleo tipo C en 2024, se comprobó que la topología multidiente puede mejorar de manera considerable el par de salida de los SRM. No obstante, es importante señalar que, más allá de cierto número de dientes en los polos del estator, el torque electromagnético desarrollado tiende a disminuir. [7]

## 3. MÉTODOS

### 3.1 ESPECIFICACIONES DE LA ARQUITECTURA

#### Parámetros Del Contactador

Se parte del conocimiento de los materiales y dimensiones específicas del contactador SPRECHER+SCHUH CA 3-9-10 con armadura tipo E.

Las mediciones experimentales bajo condiciones de corriente alterna (CA) a 220V revelaron una corriente alterna ( $I_{ac}$ ) de 0.31A, para 4780 espiras totales en la bobina con un espesor de alambre de 0.125mm. En corriente continua (CC) con 37V, se obtuvo una corriente continua ( $I_{dc}$ ) de 0.44A.

Estos datos ofrecen una visión integral de la respuesta del contactador a distintas condiciones eléctricas, información crucial para su aplicación y diseño. Además, se precisaron las dimensiones de la armadura y se aproximó la configuración tipo U, *Figura 1*, integrando detalles de la patente US2009/0167470A1 de Oscar Rolando Ávila Cusicanqui, proporcionando una comprensión más detallada del diseño y rendimiento del contactador.

**Tabla 1.** Parámetros de la simulación del contactador.

Variable	Descripción
LP	Longitud de patas de armadura
EP	Espesor de patas
LY	Longitud de yugo
EY	Espesor de yugo
EB	Espesor de bobina
LB	Longitud de bobina
EI	Espesor de imán
GAP	Separación máxima entre armadura fija y móvil
GAPMIN	Separación mínima entre armadura fija y móvil
LW	Profundidad del contactador
N_ITE	Número de iteraciones del GAP
N_IT	Número de iteraciones de corriente
d_al	Diámetro del alambre de bobina
lmin	Intensidad mínima que circula por la bobina
lmax	Intensidad máxima que circula por la bobina
MATERIAL DE LA ARMADURA MATERIAL DEL IMÁN PERMANENTE	

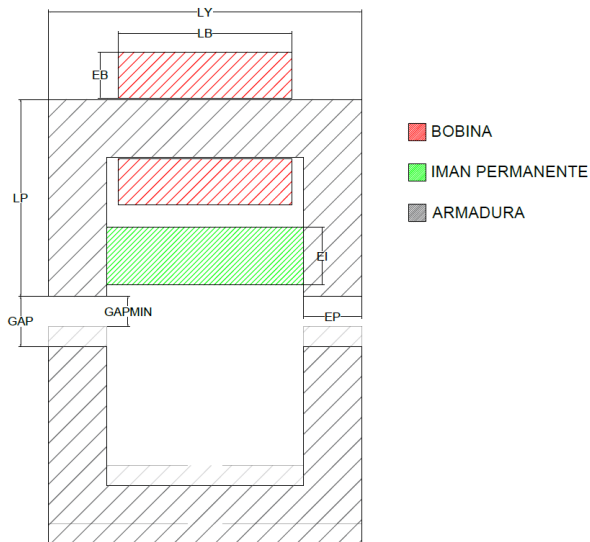


Figura 1. Esquema del contactor.

### Modelo Motor HRM

Se implementarán los hallazgos de la investigación de contactores con tecnología HRM, partiendo del modelo de motor HRM de Josué Duarte [8]. Se detallará el procedimiento de modelado y simulación de motores de reluctancia variable e híbridos, basándose en el conocimiento previo de materiales y dimensiones del motor.

Tabla 2. Parámetros de la simulación del motor HRM.

Variable	Descripción
HM	Altura del imán
HY	Altura del yugo
BS	Ancho del polo rotórico
BP	Ancho del brazo del yugo
RG	Radio externo del rotor
RY	Radio externo del yugo
M	Numero 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	

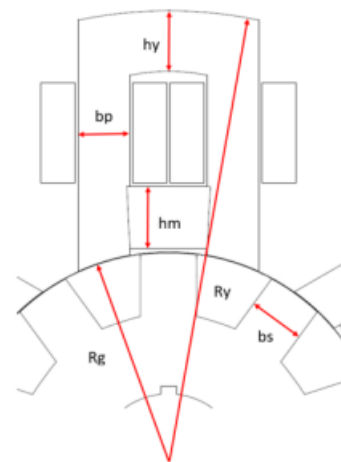


Figura 2. Dimensiones del motor.

## 3.2 PRUEBAS Y VALIDACIÓN

### Simulación Estática Del Contactor

En la fase inicial, se realizará una simulación estática empleando análisis magnético de elementos finitos mediante el programa Finite Element Method Magnetics (FEMM) a través de Matlab. El objetivo es calcular curvas que relacionen la fuerza generada con el espacio de aire (GAP), la fuerza generada con la corriente y el consumo eléctrico tanto para contactores convencionales como para los que incorporan tecnología HRM.

Se utilizará un script en Matlab que simplifica el dibujo del contactor a partir de los parámetros indicados en las Tablas 1 y 3.

Tabla 3. Parámetros iniciales de la simulación del contactor.

Variable	Descripción
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 IMÁN PERMANENTE	NdFeB32MGOe

Tras generar el diseño del contactor, se configura una simulación estática de elementos finitos para analizar el comportamiento del flujo magnético y el par en respuesta a diversas corrientes en las bobinas, considerando diferentes posiciones entre las armaduras.

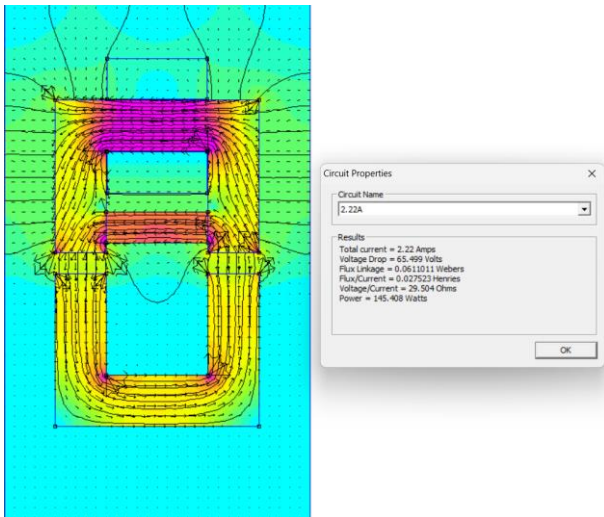


Figura 3. Análisis de elementos finitos magnéticos en FEM.

Los datos obtenidos permiten 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 gráficas son fundamentales para evaluar la viabilidad de aplicar la tecnología HRM a contactores, identificando puntos específicos de beneficio o la viabilidad general de su implementación.

### Simulación Estática Del Motor HRM

El proceso inicia con la construcción de la geometría del motor en FEMM utilizando un programa en Matlab que aprovecha la API de FEMM para diseñar motores SRM y HRM con una estructura 12/10, Tablas 2 y 4.

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	NO
FERROMAGNETICO	
MATERIAL DEL IMAN	NdFeB32MGOe
PERMANENTE	

Una vez completado el diseño, se configura la simulación de elementos finitos, la cual es estática y tiene como objetivo comprender el comportamiento del flujo magnético y el par ante diversas corrientes en las bobinas y con el rotor en distintas posiciones. Se crea un vector de corrientes, llamado "CurrentTab," y otro vector que representa los ángulos de rotación del rotor, llamado "AngleTab."

Se realiza una simulación para cada combinación posible entre "AngleTab" y "CurrentTab," generando una matriz que refleja el flujo y el par en función de la corriente y el ángulo.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA HRM EN CONTACTORES

#### Fuerza vs corriente y gap

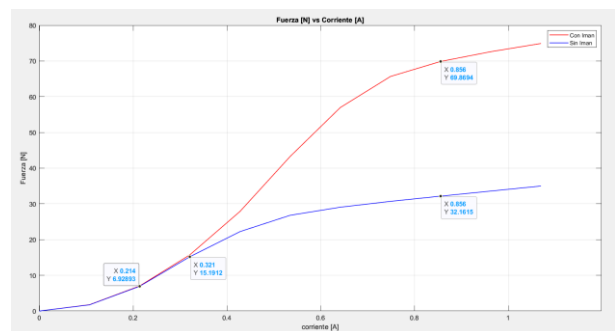


Figura 4. Fuerza vs corriente de contactor con y sin imán para GAP de 1.60mm.

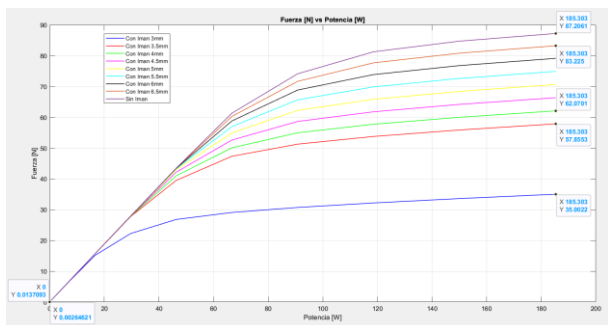
En esta investigación, se evaluó la variación de la fuerza generada por un contactor convencional y otro con imán en función de diferentes corrientes y distancias de separación entre la armadura fija y la móvil (GAP). Para corrientes bajas, no hubo un aumento significativo en la fuerza del electroimán. El máximo aumento porcentual de fuerza (115%) se logró a una corriente de 0.86A con un GAP de 2mm, disminuyendo para valores mayores y menores de GAP.

Posteriormente, se llevó a cabo un estudio más detallado con GAPs entre 1mm y 2.5mm y corrientes de 0 a 1.5A. Se identificó que para cada valor de GAP existe una corriente específica que proporciona el mayor aumento porcentual de la fuerza. El punto con mayor aumento de fuerza se encontró en un GAP de 1.6mm y una corriente de 0.86A, con un aumento del 117.36%. Este punto se adoptó como referencia para futuras simulaciones debido a su sensibilidad.

Se procedió a estudiar la fuerza generada y el consumo energético para un contactor con un GAP de 1.6mm. Se destacó que, al analizar el barrido de corriente de 0 a 1.07A (Figura 4), se observa un cambio significativo en la fuerza generada a partir de 0.321A, alcanzando el máximo aumento de fuerza (117%, 69N) a 0.86A.

Este estudio demuestra la posibilidad de obtener un aumento sustancial de la fuerza en un contactor convencional al incorporar un imán permanente, sin aumentar el consumo eléctrico. Además, se señala la saturación en el flujo magnético a corrientes elevadas, evidenciando un incremento mínimo en el flujo magnético.

### Efectos del espesor del imán



**Figura 5.** Fuerza vs potencia consumida de contactor con diferentes espesores de imán.

Se examinaron los impactos de variar las dimensiones del imán en un GAP de 1.60mm en un contactor. En el caso de un contactor convencional sin imán, la corriente en el bobinado genera un campo magnético, ejerciendo fuerza sobre la armadura para su movimiento. En un contactor con imán permanente, se suma un campo magnético constante del imán permanente al generado por la corriente, aumentando la fuerza total. Sin embargo, se identifica un punto de saturación donde la fuerza deja de aumentar significativamente.

De la Figura 5 se destacan dos aspectos importantes: en ausencia de corriente, se observa una fuerza inicial inducida por el campo magnético del imán permanente, variando según la intensidad del campo generada por

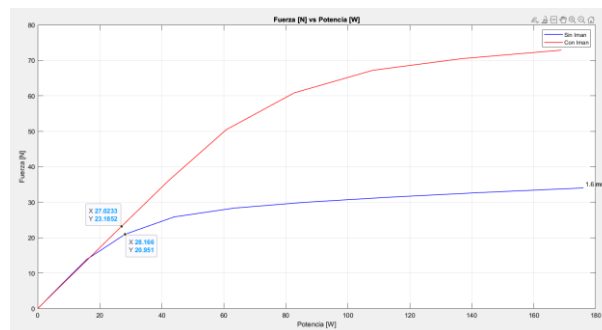
este; y se ilustra la posibilidad de lograr un aumento significativo en la fuerza de un contactor convencional mediante la adición de un imán permanente, manteniendo constante el consumo eléctrico.

### Primera aproximación de contactor con imán

Se buscó obtener resultados similares al diseño inicial del contactor sin imán explorando la variación de parámetros, incluyendo el espesor del imán y el número de espiras de bobinado. Considerando que el punto de operación de la bobina es 0.44A, se buscó diseñar un contactor con imán que proporcionara la misma fuerza a esta corriente.

Utilizando un imán de 5mm de espesor y con la reducción del número de espiras a 3500, se logró obtener una fuerza comparable a la de un contactor convencional. La disminución en el número de espiras resultó en una reducción del consumo de potencia del contactor con imán, con un ahorro de aproximadamente 3.71 vatios. Este ahorro representa un 8.84% de eficiencia, resaltando la viabilidad y eficacia de la implementación del contactor con imán en términos de eficiencia energética.

**Figura 6.**



**Figura 6.** Fuerza vs potencia consumida de contactor con y sin imán con GAP de 1.60mm.

### Efectos de modificar espesor de patas de la armadura

Incrementando el espesor a 10mm, se observa un aumento en la fuerza generada respecto al diseño inicial. Este incremento se atribuye a la relación directa entre el flujo magnético, el campo magnético y la sección transversal en un circuito magnético. No obstante, este crecimiento se ve limitado por restricciones físicas, como la saturación del material.

La saturación indica el límite de flujo magnético que el material puede soportar, y a medida que se acerca a este punto, el aumento en la sección transversal ya no se traduce en un incremento proporcional del flujo magnético.

### Efectos de modificar largo de patas de la armadura

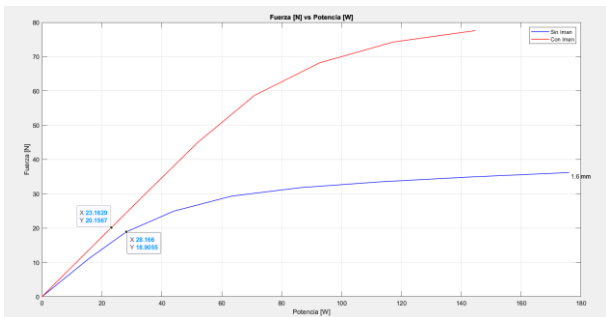
Al extender la longitud de las patas de la armadura del contactor a 27 mm, se observa una disminución en la

fuerza de atracción en comparación con el diseño original. La ampliación del camino magnético aumenta la reluctancia del circuito magnético, indicando la resistencia del material a la formación de flujo magnético. Esta reluctancia adicional resulta en una reducción del flujo magnético y, por ende, en una disminución de la fuerza generada por el electroimán.

### Segunda aproximación de contactor con imán

Se realizaron ajustes en la configuración del contactor, reduciendo espiras y modificando dimensiones de la armadura y del imán para lograr rendimiento similar a un contactor comercial con menos material. Aunque inicialmente la fuerza del contactor con imán es inferior, alcanza un aumento significativo al superar la coercitividad del imán.

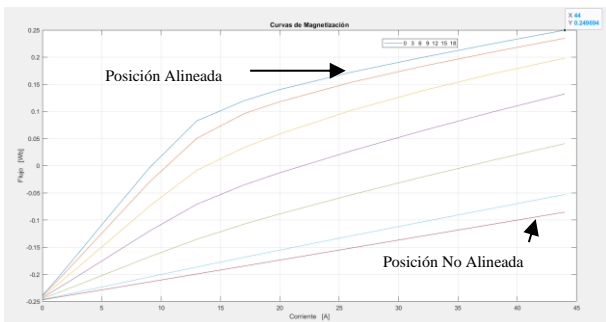
La reducción en espiras y longitud de patas disminuye el consumo de potencia y las pérdidas de flujo, mientras que el aumento en el espesor de las patas optimiza la generación de fuerza. Se requieren 5.003 vatios menos para la misma fuerza, representando un ahorro de energía del 17.76%, subrayando la viabilidad del contactor con imán en eficiencia energética. *Figura 7.*



**Figura 7.** Fuerza vs potencia consumida de contactor convencional y contactor con imán modificando parámetros de dimensión.

## 4.2 HALLAZGOS EN CONTACTORES IMPLEMENTADOS A MOTOR HRM

### Resultados del motor HRM-12/10

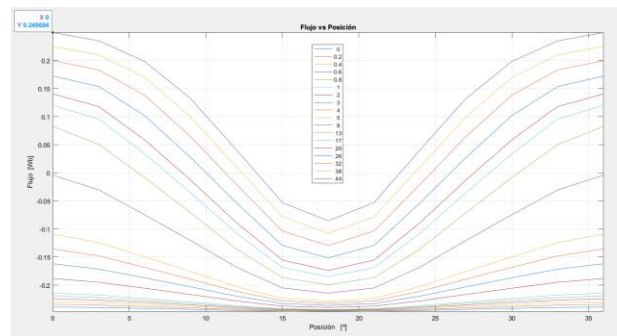


**Figura 8.** Curvas de magnetización de HRM-12/10.

Aplicamos los hallazgos de la tecnología HRM al contactor en un motor HRM, simulando para ángulos de posición de 0° a 18° y corrientes de 0 a 44A. El flujo concatenado puede ser negativo debido al imán, ampliando el área entre las posiciones alineada y no alineada para generar más par mecánico. Expresado matemáticamente como:

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

La influencia del imán introduce una región de trabajo con flujo negativo, generando par negativo en bajas corrientes y posiciones no alineadas, desfavorable para el motor.



**Figura 9.** Flujo en función de la posición angular y el valor de corriente de fase del motor HRM-12/10.

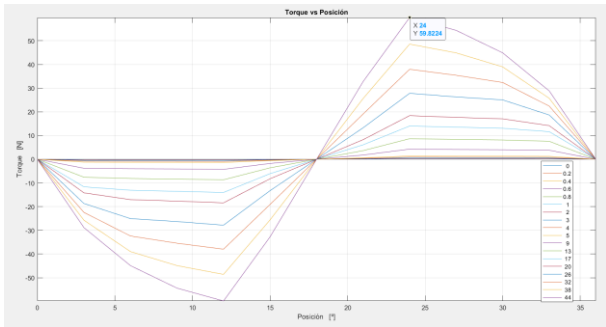
La *Figura 9* muestra la relación entre el flujo, la posición angular y la corriente, con una corriente máxima de 44 A. A partir de 13 A, el flujo deja de ser lineal y se satura, lo que significa que se necesita más flujo para mayores corrientes, pero ya no de manera proporcional.

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.

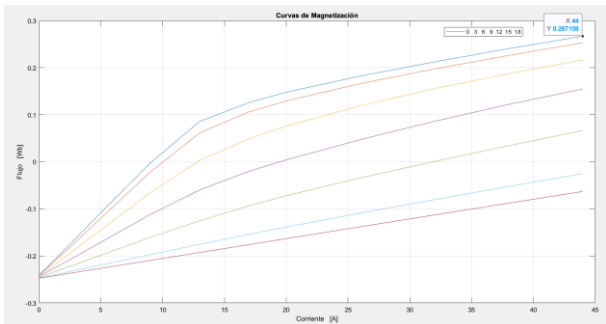


**Figura 10.** Valor del par en función de la posición angular y el valor de corriente de fase del motor HRM 12/10.

La variación del par muestra que, para corrientes bajas, el par se mantiene constante, pero para corrientes elevadas, hay un pico inicial seguido de una disminución gradual (Figura 10), siendo menos favorable para reducir el rizado de par, pero beneficioso para aportar potencia mecánica. Se logra un torque estático de 59.82N a 44A.

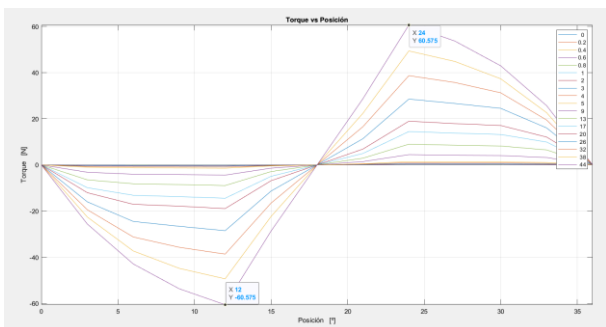
### **Resultados de implementación de hallazgos de contactores a motor hrm-12/10**

Los ajustes menores en la configuración del motor HRM 12/10 han generado un ligero incremento en el flujo magnético, reflejado en las curvas de magnetización, Figura 11.



**Figura 11.** Curvas de magnetización de HRM-12/10 modificado.

Este aumento proporcional en el flujo se traduce en un incremento pequeño pero significativo en el torque generado (Figura 12), evidenciado por un aumento de aproximadamente 0.75 N en el par estático del motor.



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

## **5. CONCLUSIONES**

La aplicación de la tecnología HRM en contactores destaca la importancia de considerar la coercitividad y saturación magnética. El incremento en el espesor del imán requiere mayor intensidad de campo, logrado mediante corriente o con espiras adicionales en la bobina.

La presencia del imán permanente genera fuerza proporcional al tamaño del imán. Las dimensiones de la armadura impactan en la generación de fuerza: una mayor sección de patas intensifica la fuerza magnética, mientras que una mayor longitud la reduce debido al aumento del camino reluctante.

La permeancia, vinculada a la facilidad del flujo magnético, es clave. El estudio resalta la necesidad de equilibrar dimensiones para optimizar la generación de fuerza en contactores HRM.

Para diseñar eficientemente un motor HRM, se sugiere evaluar la potencia necesaria para la tarea y ajustar los parámetros, como el espesor del yugo y el radio del rotor, considerando restricciones dimensionales. Este enfoque optimiza el rendimiento y eficiencia del motor.

Durante el desarrollo del proyecto, se mejoró un modelo existente de motor HRM mediante la modificación de parámetros geométricos, logrando un incremento de 0.75 Nm en el torque estático, lo que destaca la oportunidad de optimizar modelos preexistentes.

## **6. LÍNEAS FUTURAS**

Para validar las simulaciones, se propone construir prototipos reales, permitiendo comparaciones directas con resultados experimentales. Además, se sugiere desarrollar software automatizado para el modelado integral de motores HRM, abarcando aspectos dinámicos, térmicos, mecánicos y eléctricos. Se plantea explorar mejoras en el rendimiento mediante el uso de diversas chapas magnéticas, formas trapezoidales en el rotor y evaluación de máquinas multietapa, incluyendo análisis de sensibilidad y optimización del rizado de par y rendimiento.

## **7. REFERENCIAS**

- [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 Permanent 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 Electronics, 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.