

Automatización del sistema de obtención de la curva par-velocidad en motores de reluctancia autoconmutados e híbridos.

Autor: Josué Nefalí Duarte Mejía
Trabajo final de máster

Director: Balduino Blanqué Molina
Universidad Politécnica de Cataluña

Resumen

En la actualidad, los motores de reluctancia autoconmutados (SRM) y sus variaciones híbridas (HRM), son motores que están adquiriendo un gran interés de parte de la comunidad científica debido a las elevadas ventajas y prestaciones que presentan sobre otros tipos de motores comúnmente utilizados. En la búsqueda de optimizar y mejorar dichos motores se han encontrado con la gran complejidad que presenta el diseño, modelado y control de estos. Para agilizar el desarrollo de estos motores, se ha visto la necesidad de automatizar el proceso de simulación y obtención de resultados de una forma más rápida. En trabajos anteriores [1], se ha logrado automatizar una parte del proceso de simulación de este tipo de motores la cual llamaremos simulación estática, que consiste en una simulación estática del comportamiento magnético del motor y tiene como objetivo la obtención de las curvas de par y flujo para poder implementar un modelo dinámico en Simulink, sin embargo, hasta el momento no se ha desarrollado ninguna forma que permita obtener el comportamiento dinámico (curva par-velocidad) de estos motores de forma automática, es por ello que en este trabajo se presenta un software de automatización del proceso de obtención de la curva par-velocidad de motores SRM y HRM de forma automática, sencilla y rápida, aportando la mayor cantidad de mejoras al proceso de modelado y simulación de estos motores.

1. Introducción

En los últimos años, la investigación de motores de reluctancia autoconmutados ha llevado al descubrimiento de variaciones de estos mismo que llamamos motores de reluctancia híbridos (HRM). Algunas de las variaciones que presentan mejores resultados, son aquellas que incorporan imanes permanentes en diferentes partes de la estructura magnética de los motores y se basan en el mismo mecanismo de generación de par que los motores SRM. Estos motores permiten una gran cantidad de configuración de su circuito magnético, bobinas y parámetros de control y simulación.

Dado que la incorporación de imanes permanentes altera el comportamiento magnético de la máquina, es interesante estudiar como este cambio afecta la generación de pérdidas magnéticas en los motores de reluctancia híbridos, para ello, existen una gran variedad de formas de cálculo pero los más interesantes son 2 métodos de cálculo: El modelo de Bertotti, que fue presentado en [2] 1988 y es uno de los modelos más utilizado para dicho cálculo, así como el modelo de superficie de pérdidas, presentado recientemente

en [3] y que incorpora un estudio más detallado del cálculo de pérdidas y sus resultados son más precisos, sin embargo, es un método que requiere un conocimiento extremo de las propiedades magnéticas del motor.

El proceso de automatización de la obtención del comportamiento dinámico de estos motores tiene como objetivo el ahorro de tiempo. Se construyó a partir del análisis de las curvas par-velocidad y eficiencia-velocidad obtenidas de forma manual, el proceso de automatización consta de 2 partes: en la primera parte se obtiene la corriente máxima que soporta el motor para un determinado sistema de refrigeración, y en la segunda parte se obtiene la curva par-velocidad, así como también permite obtener la configuración de parámetros del motor que proporcionan los mejores resultados dinámicos, dependiendo de la prioridad que se le quiere dar a la obtención de par o eficiencia.

2. Fundamento teórico

Para poder comprender como se realizó la implementación del software y los resultados obtenidos, primero se deben de conocer algunos fundamentos básicos de motores de reluctancia autoconmutados e híbridos y el proceso de modelado y simulación de estos, como se muestra a continuación:

2.1 Motores de reluctancia autoconmutados e híbridos

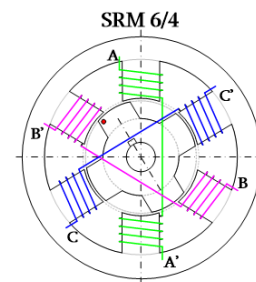


Figura 1: Motor de reluctancia autoconmutado 6/4.

El motor de reluctancia autoconmutado (SRM) es un accionamiento de corriente continua sin escobillas ni imanes permanentes, está constituido por una estructura magnética de laminaciones de acero que forman polos salientes en el estator y en el rotor, como se muestra en la figura 1. En los polos estáticos se ubican bobinas conectadas en serie o paralelo, a pares diametralmente opuestos, de esta forma se constituyen las fases del motor.

Por otro lado, los motores de reluctancia híbridos (HRM) son máquinas que cuentan con las ventajas de los motores de reluctancia y al mismo tiempo incorporan imanes permanentes en su estructura magnética para aumentar la densidad de potencia y par de la máquina, esto se ve directamente reflejado en el aumento del rendimiento.

Independientemente del tipo de motor, el par se produce por la tendencia del circuito magnético a adoptar una configuración de mínima reluctancia. Esto indica que cada vez que se excita una fase, el rotor se mueve de forma que los 2 polos rotóricos tienden a alinearse con los 2 polos estáticos con el propósito de alcanzar la inducción máxima de la fase, en la figura 1, cuando se alimenta la fase A, se ejercerá un par en sentido horario sobre el rotor hasta llegar a la posición alineada. Para lograr que el motor gire se debe de alimentar las fases con una secuencia A, B, C, A ... y esta conmutación se realiza a través del convertidor de potencia.

La conmutación de las fases del estator se realiza mediante un convertidor estático de potencia clásico, constituido normalmente de interruptores IGBT's, la conmutación de estos interruptores está controlada por un sistema de control que obtiene información de la posición del rotor a través de sensores ópticos o magnéticos y mide las corrientes para implementar el algoritmo de control deseado, como se muestra en la figura 2.

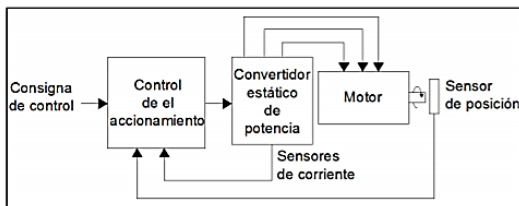


Figura 2: Esquema de accionamiento de motor 6/4.

2.2 Modelado y simulación de motores SRM e híbridos

El proceso de modelado y simulación de estos motores consta de 2 partes: Una simulación estática y posteriormente una simulación dinámica como se explica a continuación.

2.2.1 Simulación estática

La primera parte consiste en una simulación estática basada en un análisis magnético de elementos finitos realizado en el programa Finite Element Method Magnetics (FEMM), con el objetivo de calcular las curvas de flujo magnético, par y densidad de flujo magnético, que son necesarias para poder construir el modelo del motor en Simulink y realizar las simulaciones dinámicas.

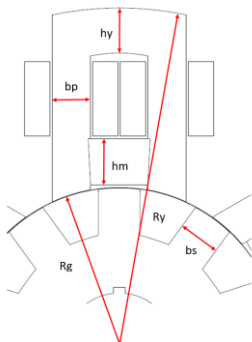


Figura 3: Dimensiones del motor.

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

Tabla 1: Dimensiones del motor necesarias.

Partiendo de que se conocen las dimensiones del motor mostradas en la figura 3, se puede realizar el dibujo del motor en FEMM utilizando una API de Matlab que permite realizar el dibujo desde este programa de forma automática. Una vez se cuenta con el dibujo del motor, se procede con la configuración de simulación de elementos finitos. Como se ha mencionado antes, la simulación se realiza de forma estática y lo que se busca es encontrar el comportamiento del flujo magnético y par bajo la influencia de diferentes corrientes de alimentación de las bobinas y con el rotor colocado en diferentes posiciones. Para esto, se debe de crear un vector de corrientes que llamaremos "CurrentTab" y un vector de ángulos de rotación del rotor que llamaremos "AngleTab", con estos vectores se lanza la simulación estática y como resultado se obtienen las siguientes curvas.

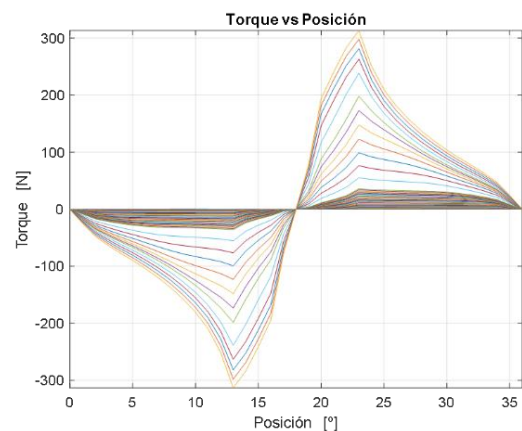


Figura 4: Curva par vs posición para un motor HRM 12/10.

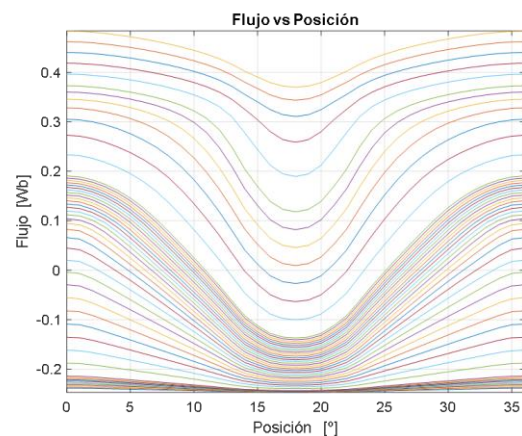


Figura 5: Curva flujo vs posición para un motor HRM 12/10.

Las figuras 4 y 5 muestran el comportamiento del par y flujo magnético para múltiples corrientes de alimentación de las bobinas en función de la posición del rotor. A través de un código de postprocesado se obtienen las derivadas de flujo respecto a la corriente y a la posición, que posteriormente serán implementadas en la simulación dinámica.

2.2.2 Simulación dinámica

Una vez se han obtenido las curvas de par y flujo magnético, se procede a realizar la simulación dinámica, para ello es necesario construir un modelo de Simulink. Partiendo del circuito equivalente de una fase del motor.

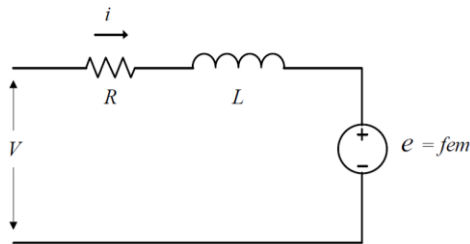


Figura 6: Circuito equivalente de la fase de un motor SRM o HRM.

Con el circuito mostrado en la figura 6, se puede obtener la ecuación del voltaje de la fase, como se muestra en la ecuación 1.

$$v = i \cdot R + \frac{d\Psi(\vartheta, i)}{dt} \quad (1)$$

Donde i es la corriente de la fase, R la resistencia y Ψ es el flujo concatenado que depende del ángulo y la corriente, desarrollando la derivada del flujo y despejando para la corriente se obtiene:

$$i = \frac{v - \frac{d\Psi}{d\dot{i}} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{d\Psi}{d\vartheta} \cdot \dot{\vartheta}}{R} \quad (2)$$

Utilizando la ecuación 2, se construyó el diagrama de bloques de la figura 8. Este es un diagrama simplificado del modelo que se utiliza en Simulink y las derivadas parciales del flujo se obtienen a partir de los datos de flujo de la figura 5, obtenidos en la simulación estática.

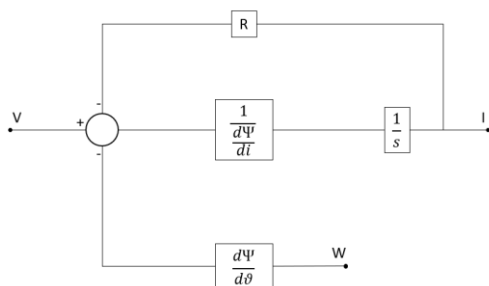


Figura 7: Diagrama de bloques del modelo simplificado.

Implementando una versión completa de este modelo del motor en Simulink y configurando los parámetros de la simulación dinámica mostrados en la tabla 2, se realizaron las simulaciones para la obtención de resultados, sin embargo, se puede implementar cualquier otro modelo matemático, siempre que se base en el efecto del flujo concatenado y sus derivadas parciales que se obtienen del análisis de elementos finitos.

Variable	Descripción
Control de velocidad	Activar o desactivar el lazo mecánico para controlar la velocidad o el par.
Regulación de corriente	Seleccionar el tipo de regulación: Pulso único, control PWM o control por histéresis.
Modo de regulación	Seleccionar el modo de regulación: Hard Chopping o Soft Chopping.
I ref (A)	Referencia de limitación de la corriente que circula por las bobinas.
θ ON	Ángulo de inicio de conducción.
θ OFF	Ángulo final de conducción.
Velocidad	Velocidad a la que rota el motor.

Tabla 2: Lista de parámetros de la simulación dinámica.

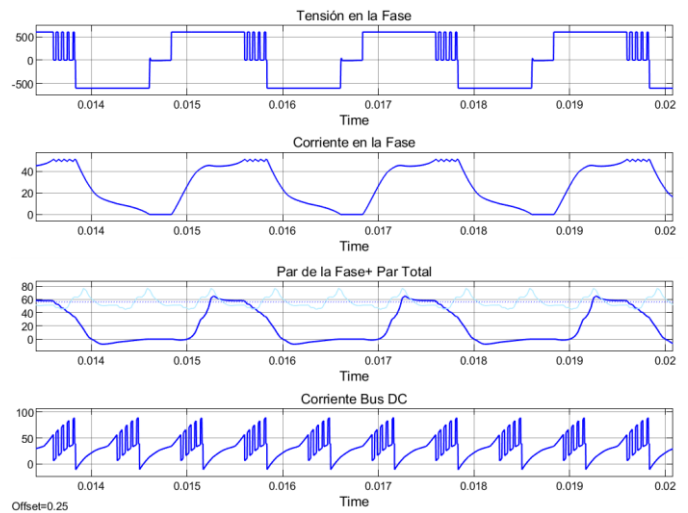


Figura 8: Resultados de la simulación de un motor HRM 12/10.

La simulación dinámica en Simulink también proporciona los valores medios del par total, eficiencia, potencia absorbida y potencia útil.

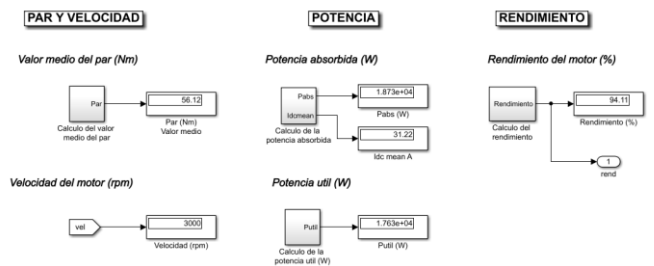


Figura 9: Resumen de resultados obtenidos.

Para construir una curva par-velocidad del motor de forma manual, es necesario realizar una simulación para cada combinación de parámetros para la cual se desea observar sus resultados, luego se extraen todos los resultados en una tabla de Excel y se elige la mejor configuración para cada velocidad del rango definido, sin embargo, este procedimiento requiere una gran cantidad de tiempo para obtener resultados.

3. Implementación de la automatización

Se dividirá la implementación en 3 etapas: En la primera se busca obtener la corriente máxima que soporta el motor, en la segunda parte se realiza la simulación y obtención de los resultados de cada combinación de parámetros y por último se cuenta con una etapa de postprocesado.

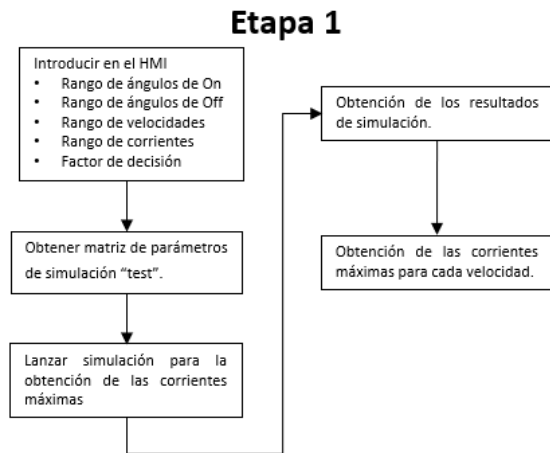


Figura 10: Diagrama de la primera etapa del proceso de obtención de la curva par-velocidad.

En la figura 10, se muestra la primera etapa del proceso completo que se ha implementado para obtener la curva-par velocidad del motor y la configuración de parámetros que ofrece los mejores resultados. El proceso comienza con la introducción de los rangos de los parámetros dentro de los cuales se quiere encontrar la mejor configuración, esto se hace a través de la interfaz de usuario diseñada, mostrada en la figura 11.



Figura 11: Interfaz de usuario del software.

La interfaz de usuario cuenta con un método sencillo de selección de la ventilación del motor (parte derecha), se debe de seleccionar el archivo que contienen los datos de la simulación estática y el modelo dinámico de Simulink que se desea simular. En el área de postprocesado se cuenta con un factor de importancia que permite ajustar la curva par-velocidad y eficiencia-velocidad a las necesidades del motor que se desea diseñar.

Una vez se han introducido todos los parámetros, se procede con el proceso de simulación. Dado que se pretende obtener las mayores prestaciones del motor, es importante asegurarse de que el motor es capaz de disipar toda la energía, para ello se debe de realizar el cálculo del factor de carga, de la siguiente forma:

$$K_j = \frac{P_{in} - P_{out}}{\text{Superficie cilíndrica}} \quad (3)$$

Este cálculo sirve para determinar el sistema de refrigeración que se debe de utilizar, basado en la siguiente tabla:

Factor de carga	Tipo de refrigeración
1.5 – 3 (KW/m ²)	Totalmente encapsulado
5 – 12 (KW/m ²)	Refrigeración forzada
12 – 20 (KW/m ²)	Refrigeración líquida

Tabla 3: Factor de carga de los sistemas de refrigeración.

El proceso continúa encontrando la mayor corriente que permite el motor sin pasar el límite de factor de carga determinado por el sistema de refrigeración. En la tabla 4, se muestran los resultados donde se quiere encontrar la corriente máxima que soporta el motor para un determinado sistema de refrigeración donde se encontró: Para el motor HRM 12/10 caso 0 se encontró que, utilizando un sistema de refrigeración forzada, no se puede exceder los 120 A para una configuración en paralelo, y utilizando una refrigeración líquida, la corriente máxima es de 180 A.

Velocidad	Limitación de corriente	Par generado	Eficiencia	Factor de carga
1000	100	57.89	87.12	8.66
1000	120	72.77	87.55	10.46
1000	140	87.37	87.13	13.04
1000	160	101.20	86.44	16.05
1000	180	114.00	86.77	17.57
1000	200	125.57	86.14	20.43

Tabla 4: Resultados de la búsqueda de la corriente máxima.

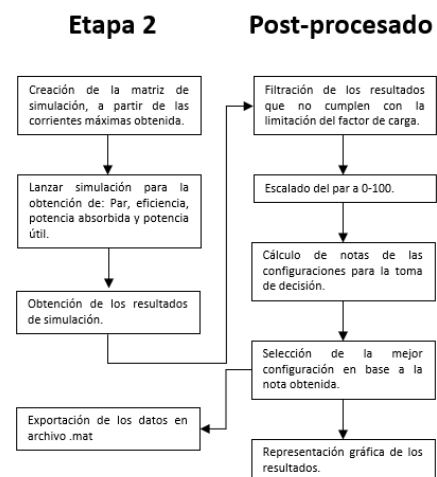


Figura 12: Diagrama de la segunda etapa y postprocesado.

Con los valores de corriente máxima obtenidos, se acota la matriz de parámetros de la simulación de obtención de resultados para ahorrar tiempo. Esta simulación nos proporciona el par, eficiencia, potencia absorbida y potencia útil del motor.

El post procesado consiste en 2 etapas. El primer paso es realizar la filtración de los resultados, eliminando todos aquellos resultados donde el factor de carga supera el límite establecido por el sistema de ventilación. Posteriormente se

hace un escalado de los valores de par obtenidos a escala 0-100, para poder implementar el sistema de notas que tomará la decisión de cual configuración es la mejor. El cálculo de la nota se realiza de la siguiente manera:

$$Peso_{par} + Peso_{eficiencia} = 1 \quad (4)$$

$$Nota = Par(\%) \cdot Peso_{par} + Eficiencia(\%) \cdot Peso_{eficiencia} \quad (5)$$

Con el uso de las ecuaciones 4 y 5, se realiza el cálculo de la nota de cada configuración de parámetros, como se muestra en la tabla 5. La configuración que obtiene la mejor nota es la que se denominará mejor configuración, este proceso se repite para cada velocidad dentro del rango de velocidades de forma que se encuentra una configuración de parámetros, par y eficiencia para cada velocidad y con estos datos se construyen las curvas par-velocidad y eficiencia-velocidad.

Velocidad	Ángulo On	Ángulo Off	Limitación de corriente	Nota
1000	0	15	170	89.68
1000	0	16	170	90.52
1000	1	15	170	88.75
1000	1	16	170	89.71
1000	0	15	180	92.46
1000	0	16	180	93.46
1000	1	15	180	91.04
1000	1	16	180	91.94

Tabla 5: Resultados del cálculo de nota de cada configuración de parámetros.

4. Análisis de resultados

Para observar los resultados, se realizará el estudio de 4 motores de reluctancia autoconmutados híbridos, donde se pretende obtener el comportamiento dinámico de cada motor con la intención de determinar cuál de ellos presenta mejores características ante diferentes configuraciones de las bobinas y el sistema de refrigeración. En la figura 13, se muestran las dimensiones de los 4 casos de estudio.

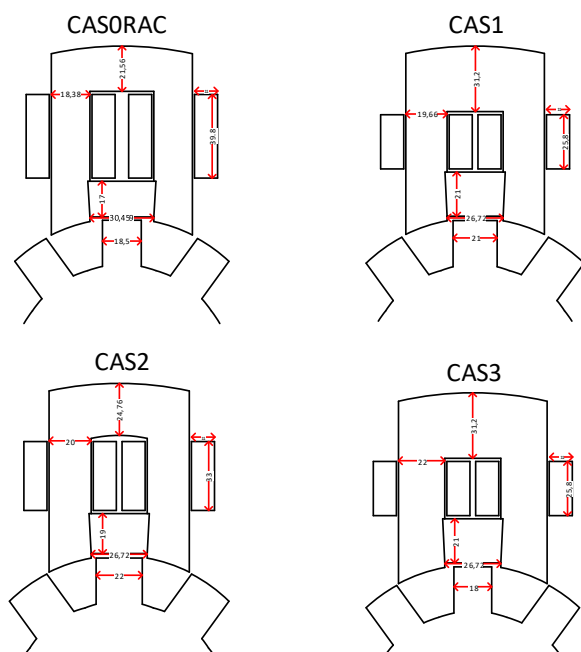


Figura 13: Casos de estudio.

4.1 Bobinas en serie y refrigeración líquida

En esta primera se analizará el comportamiento de cada motor con una conexión de sus bobinas en serie y una refrigeración líquida.

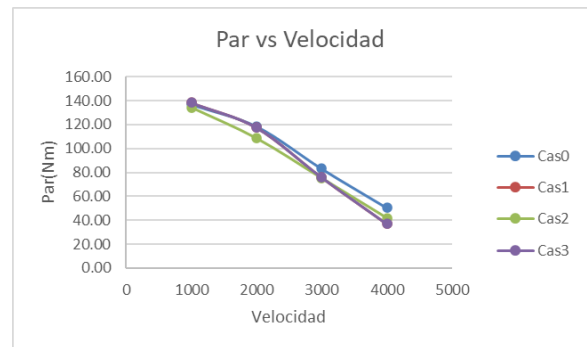


Figura 14: Curvas par-velocidad de los 4 casos con refrigeración líquida.

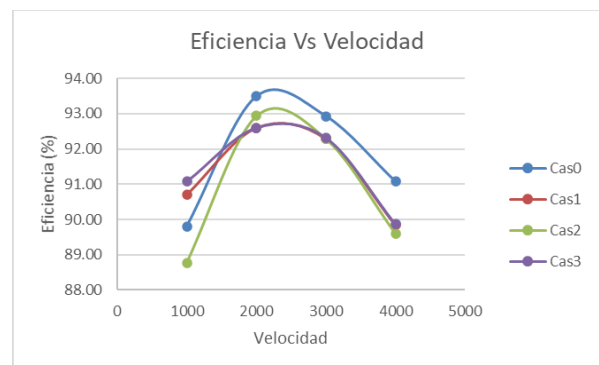


Figura 15: Curvas eficiencia-velocidad de los 4 casos con refrigeración líquida.

En las figuras 14 y 15, se observan las curvas par-velocidad y eficiencia-velocidad para los 4 casos de estudio, utilizando una refrigeración líquida y un factor de decisión de 50% para par y eficiencia. En cuanto a par, ninguna de los casos presenta una gran diferencia respecto a los demás, pero se puede decir que el caso 0 ofrece un par ligeramente superior a lo largo del rango de velocidades. En cuanto a eficiencia, se puede observar una mayor eficiencia del caso 0 a partir de 1500 rpm, teniendo como punto máximo una eficiencia de 93.5% a 2000 rpm.

4.2 Bobinas en paralelo y refrigeración líquida

En esta segunda parte se analizará el comportamiento dinámico de los motores utilizando una configuración de sus bobinas en paralelo y una refrigeración líquida.

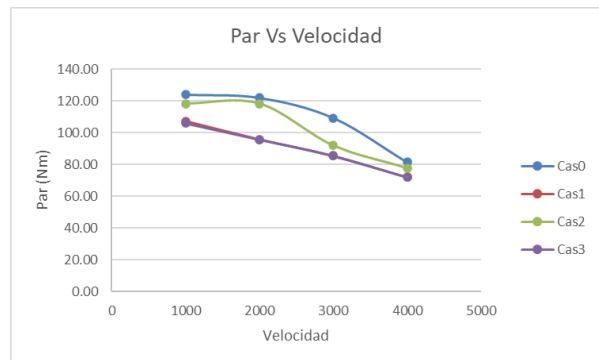


Figura 16: Curvas par-velocidad, bobinas en paralelo.

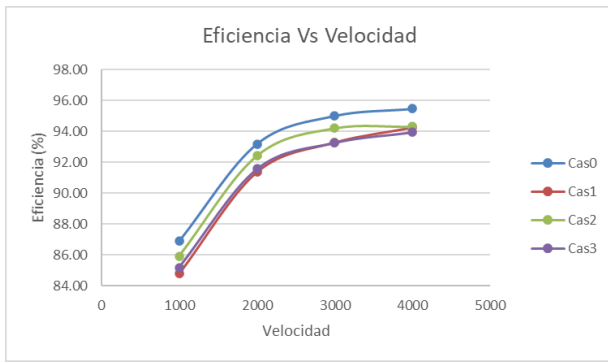


Figura 17: Curvas eficiencia-velocidad de los 4 casos con bobinas en paralelo.

En las figuras 16 y 17, se muestran las curvas par-velocidad y eficiencia-velocidad de los 4 casos de estudio, con sus bobinas en paralelo, refrigeración líquida y un factor de decisión de 50% para par y eficiencia. En la curva de par se puede observar claramente que el caso 0 ofrece un par entre 6 y 18 Nm mayor que los demás casos. En cuanto a eficiencia, el caso 0 de igual forma ofrece una eficiencia alrededor de 1% mejor que los demás casos.

4.3 Comparativas

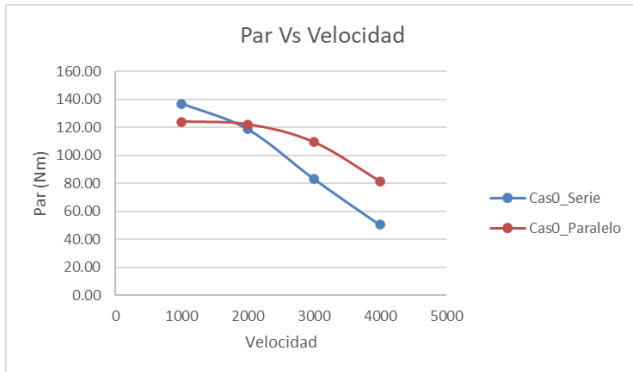


Figura 18: Comparación de las curvas par-velocidad para bobinas en serie y paralelo del caso 0.

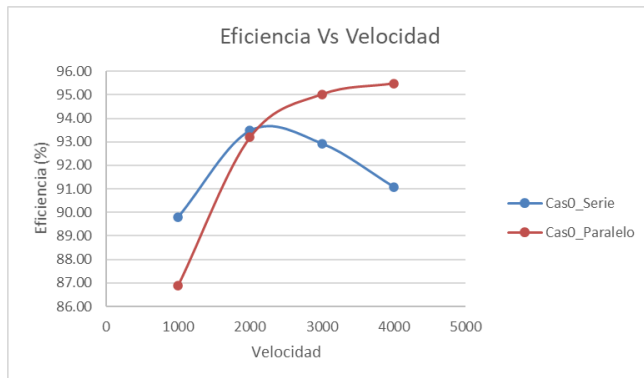


Figura 19: Comparación de las curvas par-velocidad para bobinas en serie y paralelo del caso 0.

En las figuras 18 y 19, se muestra una comparativa entre las configuraciones de las bobinas en serie y paralelo del caso 0 de estudio. Se observa que el comportamiento de las configuraciones en serie a bajas velocidades es mejor tanto en par como en eficiencia con una diferencia de 12.91 Nm y 2.9% respectivamente, sin embargo, se observa que al aumentar la velocidad, el par y eficiencia de la configuración en serie cae y se observa una diferencia de 30 Nm en par y

4.41% en eficiencia a favor de la configuración en paralelo a 4000 rpm, esto se debe principalmente a la alta capacidad de carga de corriente que presenta la configuración en paralelo, que la hace mejor a altas velocidades.

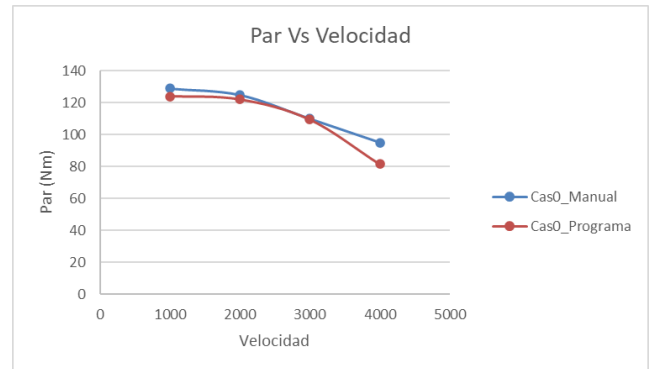


Figura 20: Comparativa de las curvas par-velocidad obtenidas mediante el método manual y el programa.

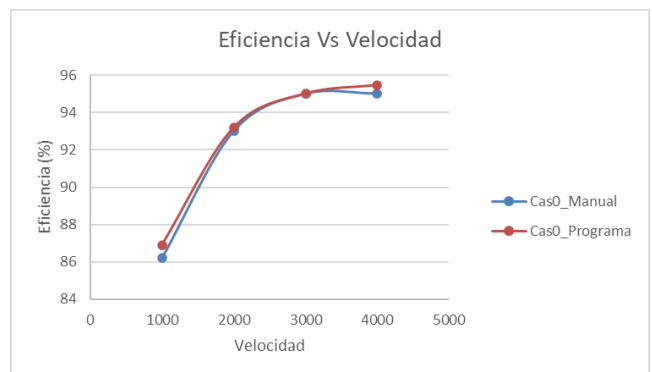


Figura 21: Comparativa de las curvas eficiencia-velocidad obtenidas mediante el método manual y el programa.

En las figuras anteriores, se muestra una comparativa entre los resultados obtenidos de forma manual y los que se obtuvieron utilizando el programa presentado en este trabajo para el caso 0 de estudio con una refrigeración líquida y bobinas en paralelo. De esta comparativa, se puede observar que las curvas son prácticamente iguales, con una pequeña desviación cuando el motor rota a 1000 y 4000 rpm, sin embargo, esta pequeña desviación, se debe a que el programa toma de forma rigurosa el límite del factor de carga permitido y de forma manual se tuvo más flexibilidad y se permitieron considerar configuraciones donde el factor de carga era mayor al límite.

Forma de obtención	Tiempo total
Manual	Entre 8-11 Horas, dependiendo del conocimiento previo sobre el motor.
Mediante software	Entre 3-6 Horas, dependiendo de la potencia del ordenador y los rangos de búsqueda.

Tabla 6: Comparativa del tiempo entre el método manual y el software.

En cuanto a tiempo, de forma manual se puede tardar entre 30 y 40 minutos para obtener los resultados para cada velocidad, es decir, en nuestro caso de análisis (4 velocidades) el tiempo total está entre 2 h y 2:40 h por cada uno de los casos de estudio. El tiempo que tarda el programa

en obtener los resultados de cada motor depende de los rangos de parámetros considerados y de la capacidad de cómputo del ordenador, este tiempo debe estar entre 45 min y 1.5 horas para cada motor.

5. Aportaciones

En esta sección se presentan algunos trabajos desarrollados que no están directamente relacionados con los objetivos y alcance del proyecto, pero son de mucha utilidad y generan un buen aporte a trabajos realizados anteriormente y al modelo de motores de reluctancia autoconmutados e híbridos.

5.1 Interfaz de usuario de la simulación estática

Como se ha explicado anteriormente, la simulación de este tipo de motores consta de 2 partes, la simulación estática y la simulación dinámica. En proyectos anteriores, se ha trabajado en el desarrollo de softwares de automatización de la simulación estática, llegando a construir programas con mucha flexibilidad y que producen un gran ahorro de tiempo, sin embargo, este programa desarrollado no cuenta con ningún tipo de interfaz gráfica, lo que produce que la introducción de todos los parámetros sea tediosa y requiera cierto conocimiento sobre el código del programa.

Es por ello que se decidió desarrollar un interfaz gráfico utilizando el entorno de desarrollo de apps de Matlab (App designer), obteniendo el siguiente resultado:

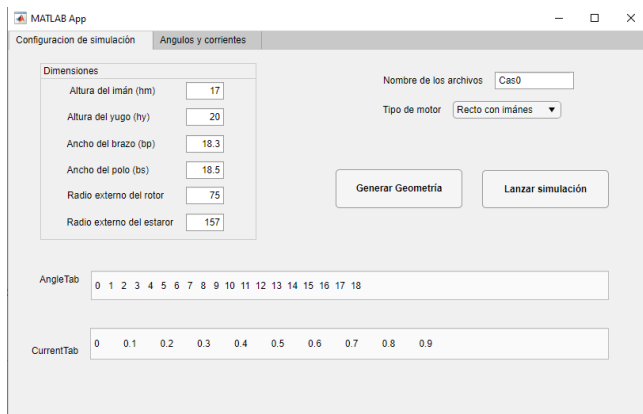


Figura 22: Pantalla principal de la interfaz.

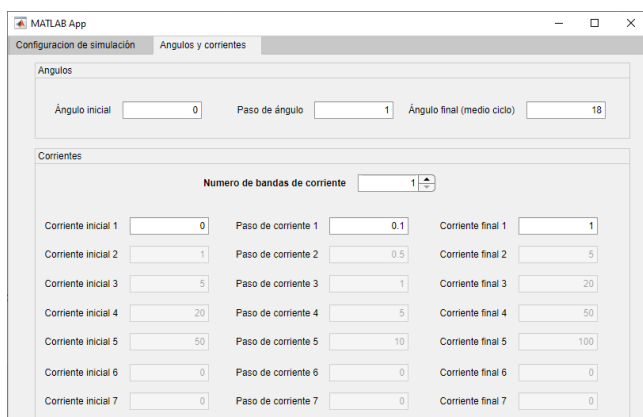


Figura 23: Pantalla secundaria de la interfaz de la simulación estática.

Esta interfaz gráfica permite facilitar la parametrización de la simulación estática. En la parte superior permite modificar las variables estándar que definen el dimensionado de un

motor, se muestran los vectores “angletab” y “currenttab” con los que se genera la simulación estática y se configuran en la pantalla secundaria. Además, se cuenta con la capacidad de cambiar la estructura del motor de forma fácil y de generar sólo el dibujo del motor para comprobar que sea correcto.

5.2 Cálculo de pérdidas magnéticas

Se han realizado estudios de pérdidas magnéticas en motores de reluctancia autoconmutados desde hace varios años y se tiene ha logrado realizar una estimación de su valor, sin embargo, el grupo de investigación GAECE está realizando el estudio de un motor híbrido que no conocen su comportamiento en pérdidas magnéticas, es por ello que nace el interés de la implementación de este cálculo en el modelo.

En este trabajo se logró implementar el modelo tradicional de Bertotti para el cálculo de pérdidas, el cual se basa en la separación de las pérdidas en 3 términos como se muestra a continuación:

$$P\left(\frac{W}{Kg}\right) = C_0 \cdot B_{max}^2 f_m + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6 \delta} (B_{max} f_m)^2 + C_1 (B_{max} f_m)^{3/2} \quad (6)$$

Donde C_0 y C_1 son constantes dependientes del material y delta es la densidad del material ferromagnético. Dado que las constantes C_0 y C_1 son los únicos parámetros no conocidos, es necesario el conocimiento experimental de al menos 2 puntos de la curva característica del material P vs B a una misma frecuencia, es decir, conocer la densidad de pérdidas que genera el material ante dos densidades de flujo diferentes. Sin embargo, este método está diseñado para señales de alimentación sinusoidales, por lo que se decidió también implementar una variación del método de Bertotti que fue diseñado para aquellas señales no sinusoidales, como se muestra a continuación:

$$P(W/Kg) = C_0 \cdot B_{max}^2 f + \frac{1}{T} \int \sigma \frac{d^2}{12} \left(\frac{dB}{dt}(t)\right)^2 + \frac{1}{T} \int C_1 \left(\frac{dB}{dt}(t)\right)^{3/2} \quad (7)$$

Donde las constantes C_0 y C_1 se calculan de la misma forma que en el método básico de Bertotti.

Dado que los flujos magnéticos y densidad de flujo magnético de los motores SRM y HRM se comportan de forma irregular a través de la superficie de la chapa magnética de cada estructura magnética, como se muestra en la siguiente figura:

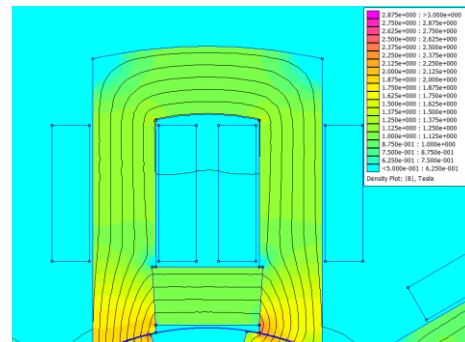


Figura 24: Mapa de densidad de flujo de una estructura magnética.

No es posible realizar el cálculo de pérdidas magnéticas utilizando cada estructura magnética que forma el motor como un solo bloque. Idealmente, lo correcto sería dividir cada estructura magnética en pequeñas regiones donde las características magnéticas se mantengan igual a lo largo de toda la superficie, sin embargo, esto produciría una cantidad de datos extremadamente grande, la cual se tardaría mucho tiempo en poder procesar, por ello se decidió dividir el área de cada estructura magnética en 2926 regiones de igual área, a continuación, se muestra una figura ilustrativa del seccionamiento realizado.

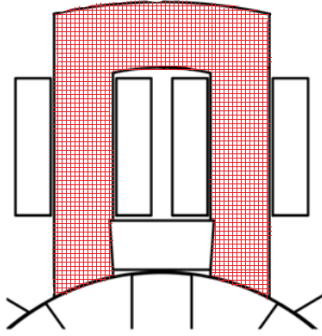


Figura 25: Seccionamiento de cada estructura magnética para el cálculo de pérdidas.

Una vez se ha dividido la estructura magnética en 2926 regiones, el cálculo de las pérdidas generadas por cada estructura estática se calcularía de la siguiente forma:

$$P_{fase} \left(\frac{W}{Kg} \right) = \sum_{n=1}^{2926} P_{reg(n)} \left(\frac{W}{Kg} \right) \quad (8)$$

Donde las pérdidas de cada región se calculan de la siguiente forma para el método básico de Bertotti:

$$P_{reg(n)} \left(\frac{W}{Kg} \right) = C_0 \cdot B_{max}^2 f_m + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6 \delta} (B_{max} f_m)^2 + C_1 (B_{max} f_m)^{3/2} \quad (9)$$

Y de la siguiente manera para el método transitorio de Bertotti:

$$P_{reg(n)} \left(\frac{W}{Kg} \right) = C_0 \cdot B_{max}^2 f + \frac{1}{T} \int \sigma \frac{d^2}{12} \left(\frac{dB}{dt}(t) \right)^2 + \frac{1}{T} \int C_1 \left(\frac{dB}{dt}(t) \right)^{3/2} \quad (10)$$

Donde se obtuvieron los siguientes resultados:

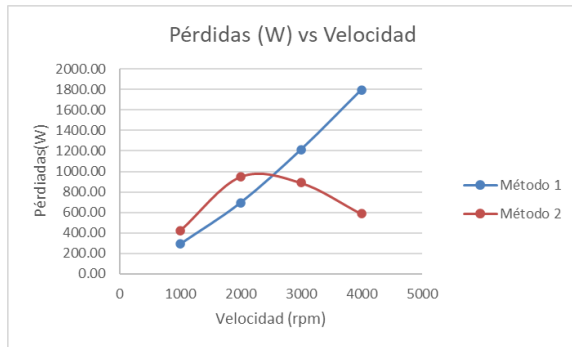


Figura 26: Comparativa de las pérdidas calculadas con ambos métodos.

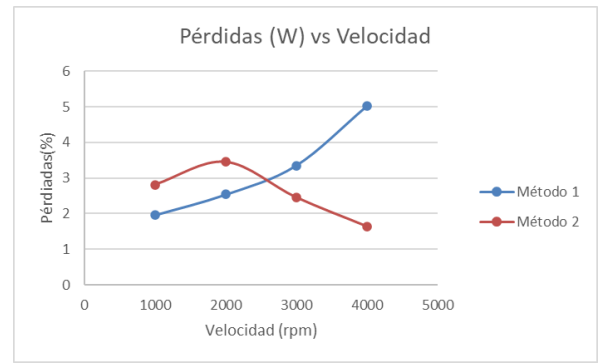


Figura 27: Comparativa de pérdidas porcentuales calculado con ambos métodos.

En las imágenes anteriores se muestran los resultados obtenidos con ambos métodos de pérdidas, estos resultados no pueden ser validados ya que no se cuenta con datos reales de pérdidas de este tipo de motores.

6. Conclusiones

- Se logró desarrollar un software de Matlab capaz de obtener la configuración de parámetros que presenta mejor comportamiento dinámico y su curva de par-velocidad. Siendo sencillo, rápido y con mucha flexibilidad gracias a que incorpora su propia interfaz de usuario.
- Al realizar la comparación entre los resultados obtenidos utilizando el programa desarrollado y los resultados obtenidos de forma manual, se observaron pequeñas variaciones a diferentes velocidades, estas variaciones son debido a la rigurosidad con la que el programa toma los límites establecidos para el factor de carga.
- El software presentado en este documento produce un ahorro de tiempo que oscila entre 1-2 horas por motor, dependiendo de la potencia del ordenador y los rangos de búsqueda que se consideren.

7. Referencias

- [1] C. Jativa, "Software para el diseño y optimización de motores de reluctancia auto conmutados (SRM)," Vilanova i la Geltrú, 2020.
- [2] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," *IEEE transaction on magnetics*, pp. 621-630, 1988.
- [3] T. Chevalier, A. Kedous-Lebouc, B. Cornut and C. Cester, "A new dynamic hysteresis model for electrical steel sheet.," *EISEVIER*, pp. 197-201, 2000.
- [4] M. Gomila, "Aportes al control de la máquina de reluctancia híbrida HRM.," Barcelona, 2016.
- [5] P. Andrada, B. Blanqué, E. Martínez and M. Torrent, "New Hybrid reluctance motor drive," *IEE*, pp. 2689-2694, 2012.