

DIMENSIONADO Y DISEÑO DE UN MOTOR DE RELUCTANCIA CONMUTADO PARA UNA APLICACIÓN AUTOMOTRIZ

DESIGN AND SIZING OF A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR FOR AN AUTOMOTIVE APPLICATION

SANDRA M. CASTANO

Ph.D., Profesor Investigador Universidad Antonio Nariño, Grupo REM, Bogota-Colombia, samilena@gmail.com

JAVIER MAIXÉ-ALTÉS

Ph.D., Profesor Titular Universitat Rovira i Virgili, Grupo GAEL, Tarragona-España, xavier.maixe@urv.cat

Recibido para revisar Julio 24 de 2012, aceptado Julio 2 de 2013, versión final Julio 23 de 2013

RESUMEN: Este artículo establece directrices que disminuyen la complejidad del proceso de diseño del motor de reluctancia conmutada (SRM), abarcan los efectos de la geometría de la máquina, y la configuración de los parámetros en el desempeño del SRM para una aplicación automotriz a 42V. Estos rangos de trabajo, o directrices de diseño se incorporan a un método sistemático de cálculo implementado en Matlab® en conjunción con un programa comercial de análisis de elementos finitos (Maxwell® by Ansys), con el fin de obtener los valores de las curvas de enlace de flujo y de par acordes a las condiciones de trabajo de la aplicación. Posteriormente se comparan estos resultados con aquellos de un software comercial, con el fin de verificar el ajuste de los mismos a las especificaciones propuestas.

PALABRAS CLAVE: Diseño, máquinas eléctricas, aplicaciones para el automóvil, 42V.

ABSTRACT: This article provides guidelines that reduce the complexity of the design process of switched reluctance motor (SRM) and include the effects of machine geometry, configuration and performance parameters of the SRM for an 42V automotive application. The ranges of operation or design guidelines are incorporated into a systematic method of calculation implemented in Matlab® in conjunction with a commercial finite element analysis (Maxwell® by Ansys). In order to obtain the characteristic analytical results of the flux linkage and torques for some rotor positions according to proposed requirements. Additionally, these results are compared with those of commercial software to check the fit to the specifications proposed.

KEYWORDS: Design, electrical machines, automobile applications, 42V.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño del motor de reluctancia conmutada (SRM) es complejo debido a sus múltiples parámetros de diseño y a su característica altamente no lineal cuando opera con corrientes de saturación. Algunos autores han explorado procedimientos para el diseño de motores de reluctancia [1-4] o el diseño de motores basados en metodologías de tipo empírico [5] e inclusive de metodologías de diseño de tipo comprehensivo no existentes en la literatura [6].

En el presente artículo se aplica una alternativa simple de diseño. Esta inicia tomando como referencia las nuevas metodologías de dimensionado o pre-diseño de la maquina y luego aplicar la metodología establecida en [6]. Este método lleva a definir un conjunto de criterios y directrices para el diseño de un motor de

reluctancia conmutada operando a 42V, los criterios se establecieron previamente en [15].

El estudio de las variables y su parametrización en el caso de motores de pequeño voltaje fue desarrollado empleando el software analítico *RMXprt® by Ansys*. Las restricciones se aplican a un programa de diseño analítico realizado en *Matlab®*, las distintas variables que interactúan en el diseño de la maquina se varían hasta la obtención de un “modelo satisfactorio”. Luego se verifica su desempeño de acuerdo a los requisitos establecidos para la aplicación. Entre los aspectos críticos a tener en cuenta en una aplicación automotriz, en mayor o menor medida figuran: la maximización del par por amperio, la minimización del rizado de par, la maximización de la eficiencia, la operación en un rango amplio de velocidad, el efecto del aumento de temperatura, el ruido acústico, la tolerancia a fallos

y el costo total.

2. Especificaciones y Requerimientos para el Diseño

Se ha optado por definir la aplicación: establecer las características técnicas del motor para accionar un compresor de aire acondicionado operando a 42V. Se deben tener en cuenta los parámetros par-velocidad de la máquina, los cuales dependen de: la temperatura exterior, la cilindrada, el caudal másico de aire, la presión de salida, el número de pasajeros en su interior, la construcción del vehículo y su tamaño [7].

2.1. Especificaciones

La potencia en el eje del motor compresor tiene una capacidad de operación en forma continua de 1-2 kW.

La velocidad de operación es de alrededor de 2000-6000 rpm o inclusive mayores [8].

El par constante es alrededor de 1-6 Nm [9].

Un nivel competitivo de eficiencia (>70%), al operar sobre rangos amplios de velocidad.

2.2. Requerimientos

Relacionados con la velocidad: la operación a alta velocidad es crítica. A mayor velocidad en el eje del compresor, más rápido es el tiempo en que se enfría la cabina [9].

Requerimientos mecánicos: la reducción de ruido acústico es una figura de mérito de diseño [10]. El ruido acústico como tal no se toma en consideración, si se tiene en cuenta el rizado de par, el cual es proporcional a la vibración y por ende al ruido en la máquina.

Requerimientos de temperatura: el motor que se considere idóneo para la aplicación, eventualmente debe estar preparado para trabajar a una elevada temperatura. En un futuro se espera la integración motor-compresor [9-10].

Limitaciones de espacio y forma: debe considerarse una máquina compacta en términos de densidad de potencia. Se asume los diámetros exteriores del estator

y del compresor, iguales.

Reducción de costo: implica un compromiso entre motor y convertidor; un incremento de fases implica un incremento de coste del accionamiento [11]. Sin embargo, la tolerancia a fallos se ve incrementada [12].

Modularidad: la redundancia en los servicios más críticos, implica el incremento de coste.

Viabilidad de Control: involucrar una máquina SRM implica la necesidad de optimizar la curva par-velocidad, manteniendo los niveles de eficiencia competitivos. En este apartado el criterio último de diseño se tomará en función de que se pueda conseguir el equilibrio adecuado del binomio coste-eficiencia y ejecución de par vs. velocidad [11].

3. SELECCIÓN DE PARAMETROS INICIALES

El primer paso en el prediseño de un motor SRM es la estimación del tamaño de la máquina sobre la base del par requerido.

La nomenclatura y sección de corte del SRM se observa en la Figura 1. Desde el punto de vista de construcción, las variables que establecen un efecto notable en el par de la máquina SRM son: el entrehierro g , la relación D/L , el número de espiras por polo T_p y el tipo de lámina utilizada. A partir de parametrización del modelo a partir de una configuración inicial, se obtuvieron los siguientes criterios, basados en [15]:

3.1. Numero de Fases y Polos por Fase

La máquina SRM de dobles salientes y excitación independiente es energizada por un inversor. La selección del número de fases N_{ph} y de repeticiones N_{rep} depende de la aplicación. La configuración válida a esta aplicación es: SRM 8/6, $N_s=8$, $N_r=6$, $N_{ph}=4$, $N_{rep}=1$. Es posible aumentar N_{rep} y disminuir el número de fases, esto implica que el número de polos del rotor aumente, permitiendo que el período de operación entre fases adyacentes sea más pequeño, disminuyendo el rizado de par.

3.2- Arcos de los Polos del Estator β_s y del Rotor β_r

Los arcos de los polos del estator y rotor se asignan

como condiciones iniciales de usuario. El sistema de estimación de los parámetros internos del programa analítico para el diseño del SRM, se basa en el siguiente criterio:

El arco del polo del rotor β_r debe de ser ligeramente más grande que el arco del polo del estator β_s con el fin de compensar los efectos del flujo del estator que conduzcan a pares negativos, alterando el par total promedio.

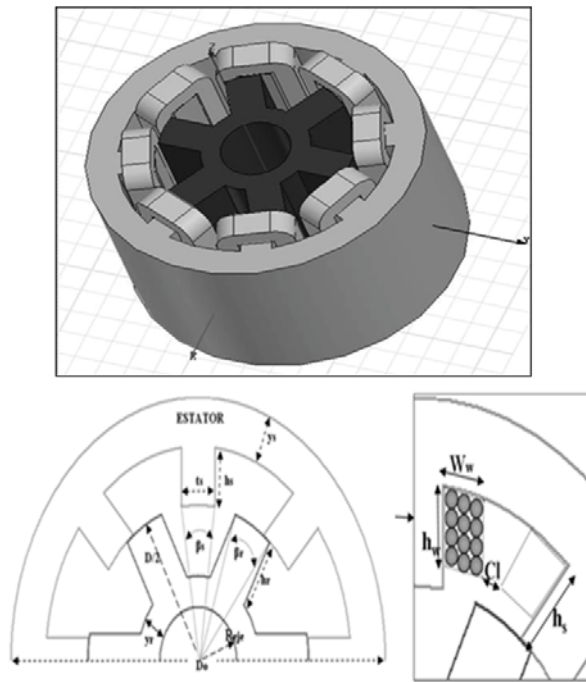


Figura 1. a) Vista del motor SRM 3D. b) Sección de corte de un 8/6 SRM y descripción de la ventana para el diseño SRM

3.3. Otros Parámetros Iniciales

Entrehierro: cuanto menor es el entrehierro, más nos aproximamos a la máquina ideal, sin embargo tiene limitaciones respecto a la manufactura del motor.

Relación D_0 vs D : para que la relación entre el radio del rotor y del estator sea lo mayor posible con el fin de producir un mayor par, ésta debe de ser provista por D cuando $D_0 = D_{max}$. Sin embargo, el aumento de D podría implicar la reducción del área disponible para albergar los devanados, y la reducción de la FEM de la máquina.

Relación D vs L : la velocidad de trabajo y el par a desarrollar puede establecer un rango para los valores de $D.L$. A partir de la parametrización de la máquina, el aumento de $D.L$ establece una tendencia progresiva para obtener un mayor de par y decreciente para el parámetro velocidad como se observa en la Figura 2.

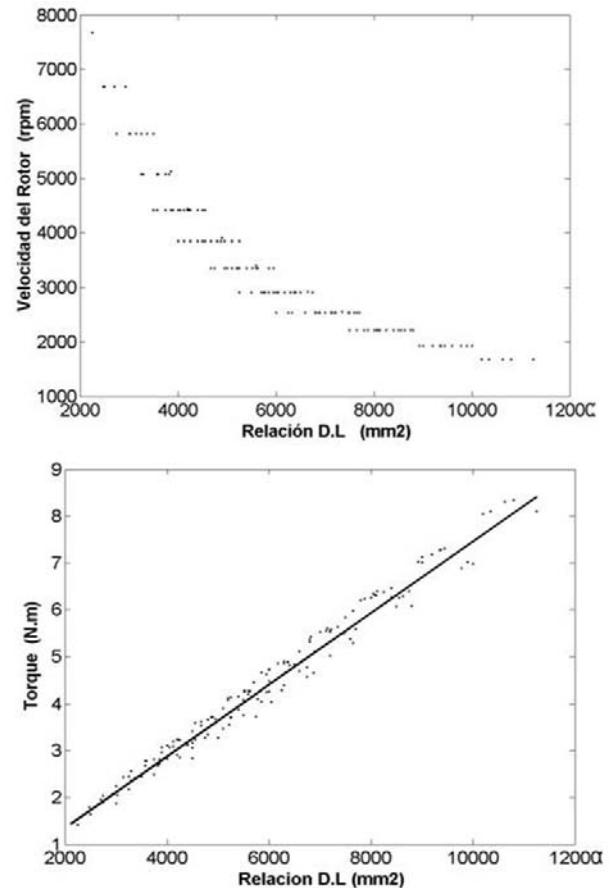


Figura 2. Tendencia de $D.L$ sobre la velocidad y el par del rotor, SRM 8/6[15]

Selección del número de espiras por polo (T_p): La densidad de par aumenta cuando se incrementa la densidad de corriente en el devanado J_{rms} .

Por condiciones iniciales el número de espiras por polo debe de incrementarse para mantener mayor el número de *amper-vueltas* cuando se incrementa la densidad de corriente en el devanado. Con un J_{rms} bajo, el par promedio del rotor puede mantenerse, al aumentar las dimensiones del rotor (D y L) sin violar la desigualdad de limitación de carga.

Selección de los yugos del estator (γ_s) y del rotor (γ_r): En

un SRM el flujo principal se divide en dos partes iguales cuando circula por los polos y cuando entra al yugo.

El flujo que circula por las secciones del yugo es compartido entre diferentes fases, y puede haber solapamiento durante la operación a alta velocidad. Con el fin de prevenir la saturación del hierro, y_r y y_s deben ser superiores al 50% del ancho de los polos del rotor tr y del estator ts , respectivamente.

4. PROCESO DE DISEÑO

El método analítico de simulación numérica se basa en los conceptos de [2-5,16]. El método se implementa en *Matlab®* y se describe por medio del diagrama de flujo de la Figura 3. El método permite estimar con eficacia las virtudes del diseño de un motor con respecto a otro, siempre y cuando se realice su ejecución dentro de ciertos límites de referencia enmarcados por los rangos de operación estipulados anteriormente. El procedimiento se resume en los siguientes 6 pasos:

- 1) Correspondencia a los requerimientos del motor.
- 2) Selección de parámetros, condicionado a los rangos de operación de cada variable. Se proponen valores iniciales para D , Do y L .

Los pasos 3) y 4) corresponden al diseño laminar y del devanado de la máquina, los rangos óptimos de valores para las relaciones y_r/y_s y D/Do son acordes a la sección anterior y son adicionados al programa.

Los pasos 5) y 6) establecen a partir del modelo analítico, las curvas de ejecución estáticas de la máquina: curvas de enlace de flujo basado en [4,13,16], las curvas de inductancia y de par promedio, etc., además de las curvas dinámicas de par basadas en la posición del rotor establecidas en [1].

4.1 Pasos 1 y 2: Especificaciones y Selección de Parámetros de Forma

Los pasos 1 y 2, definen las especificaciones eléctricas y mecánicas del motor. Se asume que parámetros como número de fases y el número de polos del estator y rotor sean previamente seleccionados.

La elección de una maquina SRM de 4 fases, con 8 polos

en el estator y 6 polos en el rotor se efectúa con el fin de disminuir el rizado del par y la reducción de ruido [6].

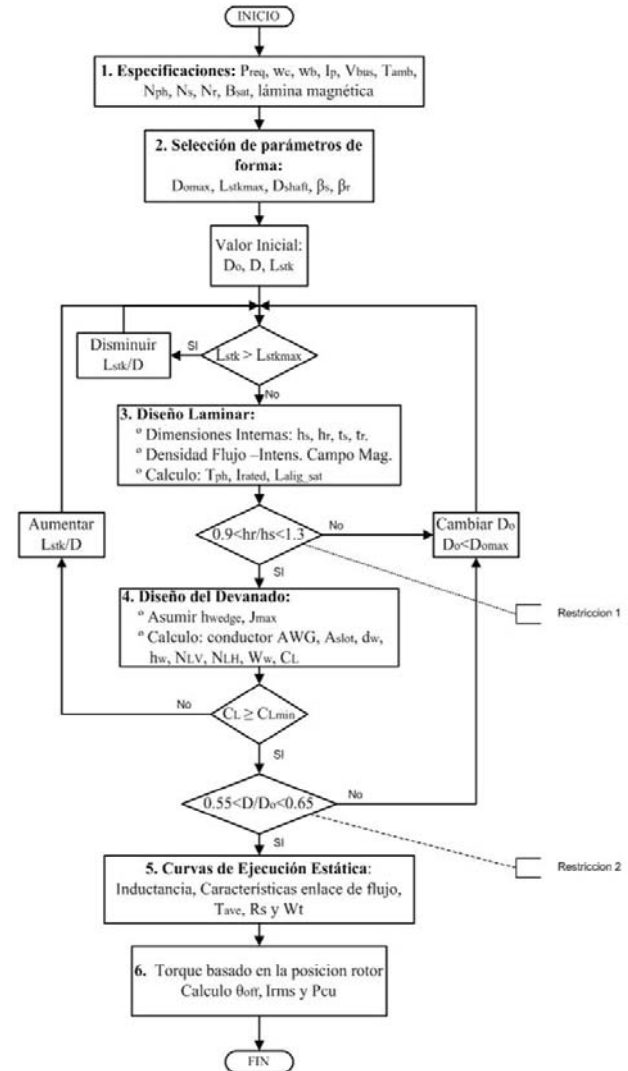


Figura 3. Diagrama de flujo del programa SRM CAD con restricciones basadas en [15]

Otro parámetro que se establece es el diámetro exterior del estator a partir del diámetro exterior del compresor, por cuestión de modularidad o de embalaje y acorde a la estimaciones de la normas IEC [14]. El diámetro del eje del rotor puede ser seleccionado a partir de parametrización basado en el requerimiento de par de la máquina o seleccionado igualmente a partir de las regulaciones dadas en [14-15,17].

Un resumen de la configuración inicial (Paso1) en el diseño de la máquina -accionamiento SRM se anota previamente en la Tabla 1.

Tabla 1. Configuración inicial para el diseño del SRM

$P_{rated} = 1.5 \text{ kW}$	Resistencia, $R_{ph} = 26.9 \text{ m}\Omega$
$V_{DC} = 42\text{V};$ $I_{ph} \leq 65\text{A}$	Inercia, $J = 133.17\text{e-}5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
$n_{rated} = 4000 \text{ rpm}$	$\theta_{on} = 31^{\circ} \text{ elect. deg.}$ $\theta_{off} = 124^{\circ} \text{ elect. deg.}$
$N_s=8; N_r=6;$ $N_{ph} = 4;$	$T_{cu} = 125^{\circ}\text{C};$ $D_o = 120 \text{ mm}$

Las restricciones de diseño conllevan a establecer los rangos tolerables de los parámetros de forma los cuales se anotan en la Tabla 2. Ellos están basados en los valores de parametrización de las variables del motor [15,17] realizados con ayuda del paquete de diseño de máquina *RMXprt by Ansys®*.

4.2. Paso 3: Diseño Laminar del Motor

Corresponde al diseño laminar del motor tomando la metodología propuesta por [1,2,6,14]. Este paso necesita de la selección de valores preliminares de D , L , β_s y β_r , en primera instancia, para luego ser recalcularlos por el diagrama de flujo. A partir del proceso de parametrización, se asume la mejor elección la lamina *MI9-24G* por sus buenos resultados en lo que a eficiencia se refiere en el rango de operación entre los 2000-7000 rpm. La densidad máxima de flujo para este tipo de lámina es situada alrededor de 1.75 T.

Tabla 2. Rangos de variación de los parámetros de forma [15]

Descripción	Rangos de Variación
Número de espiras por fase	$T_{ph} < 28$
Relación área de trabajo del rotor.	$45\text{cm}^2 < D.L =$ $A_e < 60\text{cm}^2$
Relación entre la longitud axial y la longitud exterior del rotor.	$1.0 < L/D < 1.35$
Relación de yugos entre rotor y estator.	$0.7 < y_r/y_s < 1$
Relación yugo y ancho del polo del estator.	$0.55 < y_r/t_s$
Relación de diámetros entre rotor y estator.	$0.57 < D/D_o < 0.63$
Relación de alturas de polos del rotor y estator.	$1 < h_r/h_s < 1.5$
Número de espiras por fase	$T_{ph} < 28$

4.3. Paso 4: Diseño del Devanado del Motor

Corresponde a los pasos empleados en el diseño de la ventana y del devanado del motor SRM e incluye el cálculo del espacio requerido por el devanado así como de otros parámetros (Figura 1). Este paso se basa en las metodologías empleadas por [1,14].

Para encontrar los parámetros de la ventana es necesario estimar:

- 1) El ancho del polo del estator, t_s ;
- 2) La máxima altura del devanado hw .
- 3) Cálculo de la mínima área de conductor asumiendo que la corriente que circula por él es la máxima para una temperatura de operación de 125°C.
- 4) Cálculo del tamaño estándar del conductor d_w .
- 5) Cálculo del número de capas transversales condicionado a la altura del devanado en la ventana.
- 6) Cálculo del número de capas transversales N_{LV} y horizontales N_{LH} condicionado a la altura del devanado en la ventana y el número de espiras por polo.
- 7) Examen del ancho del devanado W_w y del espacio de separación de devanados entre fases Cl , con el fin de evitar traslape: $Cl > Cl_{min}$.

Tabla 3. Configuración inicial para el diseño del SRM

Dimensiones Diseño de Laminar	Dimensiones Diseño de Devanado
$N_{ph} = 4 ; n_{par} = 1 ; n_{ser} = 1 ;$	Cal AWG = 11
$N_s=8; N_r=6$	Wire _{wrap} = 0.1 mm
$\beta_s = 17.98^{\circ}; \beta_r = 20.4^{\circ}$	Vueltas/fase, $T_{ph} = 24$
$D = 71 \text{ mm}; L_{stk} = 70 \text{ mm}$	$N_{LV} = 3; N_{LH} = 4;$
$y_r = 6.96\text{mm}; y_s = 11.14\text{mm}$	$h_w = 11.4\text{mm};$
Lam. M19 SiFe $B_{sat} = 1.75 \text{ Tesla};$	Separación, $C_i \geq 2.5 \text{ mm}$
$R_{shaft} = 12,5 \text{ mm}; g = 0.2 \text{ mm}$	

4.4. Pasos 5 y 6: Curvas de Ejecución Dinámica y Estática

Corresponde a los pasos empleados en el diseño de la ventana y del devanado del motor SRM e incluye el cálculo del espacio requerido por él. Corresponde a la estimación de la resistencia por fase, los pesos en el motor, las curvas características de enlace de flujo y la inductancia de fase basada en la posición del rotor. Además, los valores promedio de par y potencia son calculados. En el paso 6, el programa de cálculo ejecuta un análisis de enlace de flujo con el propósito de encontrar el par del motor basado en distintas posiciones del rotor. La computación del ángulo de apagado del convertidor y las formas de las corrientes eficaces se obtiene como un procedimiento basado en [1].

5. COMPARATIVA: SOFTWARE COMERCIAL Y MODELO ANALÍTICO

5.1. Determinación de las curvas de enlace de flujo y de inductancia a diferentes posiciones del rotor.

El modelo analítico de las curvas de enlace de flujo para un *SRM*, cuando los polos del rotor y del estator están solapados y no solapados, incluyendo saturación del hierro, sigue la aproximación [5]. Se asume que cada fase es independiente, esto significa que el flujo enlazado por cada fase depende solamente de la posición del rotor y de la corriente en cada fase.

El campo magnético se computa por medio de la solución de expansión de series de la ecuación de Laplace, para una geometría rectangular simplificada (Figura 1). Los parámetros geométricos y la curva característica BH de material permiten encontrar las curvas de enlace de flujo con una exactitud elevada en un tiempo de simulación relativamente corto. Cada curva representa el flujo enlazado por la fase a una posición de rotor y corriente de fase fijos. Usando el software *Maxwell by Ansys*®, se observa la distribución de las regiones y de los vectores de densidad de flujo magnético del motor SRM 8/6 obtenidos por análisis de elementos finitos para corrientes no superiores a 64A (Figura 4).

La densidad de flujo de saturación mientras los polos del rotor y del estator están alineados, está relacionada

con la corriente de saturación, el número de espiras y el entrehierro, este comportamiento obedece a la ley de *Ampere*.

Los resultados en las posiciones semi-alineadas empleando la fracción de alineación de polos proyectan resultados aceptables, ver Figura 5.

Mientras en las posiciones alineada y no alineadas son muy similares, ello cuando el programa basado en *Matlab*® para el conjunto total de curvas de enlace de flujo se compara con el software *RMXprt-Maxwell2D*® by *Ansys*.

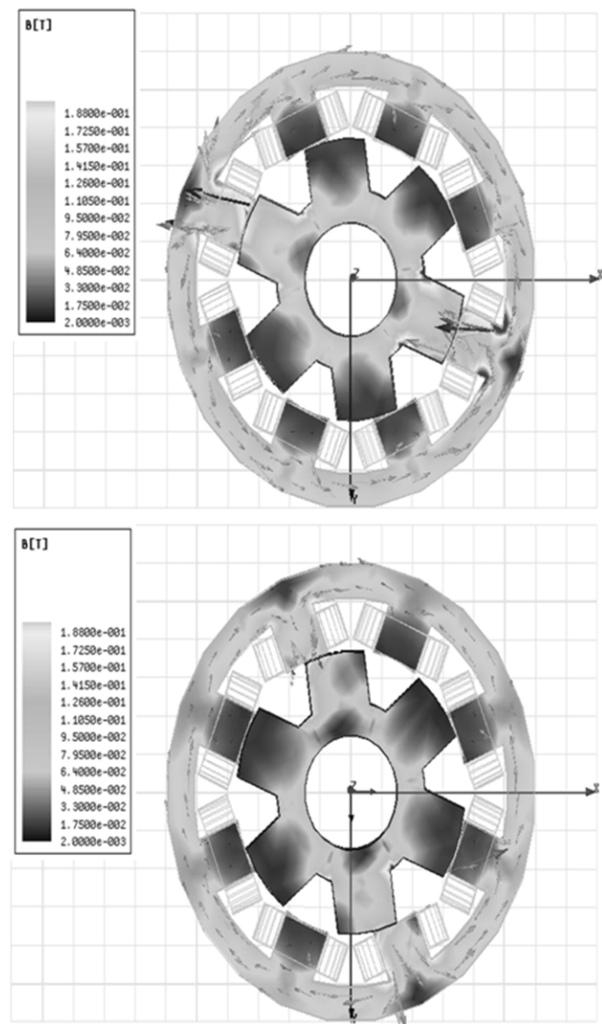


Figura 4. Curvas de flujo magnético del diseño analítico mostrando la circulación del flujo magnético, polos alineados y posiciones medias.

La inductancia por fase es calculada analíticamente al usar la aproximación lineal (no saturación). La construcción de la curva de inductancia utiliza el valor de la inductancia no alineada L_u [16] y el valor de la inductancia alineada saturada L_{sat} basada en la ecuación (1).

Los valores de las inductancias en los casos de polos no alineados y alineados en función de la posición del rotor y su comparación con la curva característica del software comercial (Figura 6) implican una correcta estimación de los puntos principales de la curva inductancia vs. posición del rotor y del valor de la corriente acorde a su operación.

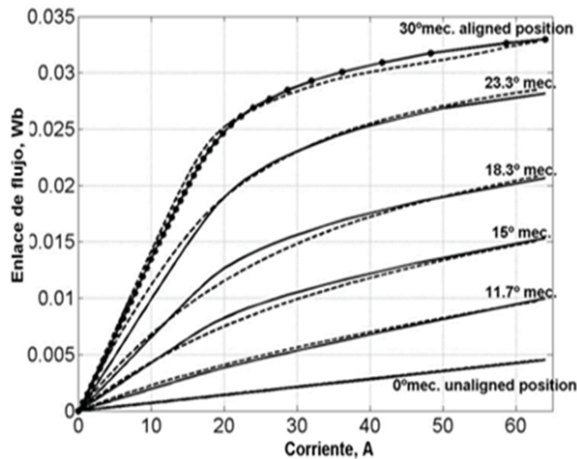


Figura 5. Comparación de las curvas de enlace de flujo para el modelo analítico (---) y el software de simulación en *RMXprt®* by *Ansys* (—)

$$L(\theta, I_{ph}) = \left(\Delta\lambda / \Delta I_{ph} \right) \Big|_{\theta=cte} \quad (1)$$

Se asumen los siguientes criterios:

- 1) Se incrementa el par promedio por fase al eliminar la generación del par negativo por medio de la creación de una zona muerta, por tal motivo $\beta_\sigma \leq \beta_p$.
- 2) El ángulo de encendido θ_{on} de los interruptores en el accionamiento es previamente conocido, $\theta_{on} < \theta_2$
- 3) El ángulo correspondiente a la caída de la corriente θ_f a la velocidad nominal esta basado en la característica magnética lineal.

Esto significa que la pendiente de la inductancia permanece constante de principio a fin desde el instante de tiempo t_f en que se asume el apagado de los interruptores en el accionamiento. Se asume que la velocidad es constante en el tiempo de conmutación ($q_{off} - q_{on}$).

Con estas suposiciones la forma analítica de la corriente es establecida, la ecuación (2) permite estimar el ángulo de apagado del convertidor para una determinada velocidad nominal y el máximo valor de corriente por fase cuando el uso de la zona muerta se hace necesario.

Se considera moderadamente aceptable la comparativa entre las curvas de corriente por fase realizadas por el modelo analítico SRM y el software comercial, ver Figura 7.

$$\theta_{off} = \frac{\pi}{N_r} + \frac{(\beta_r - \beta_s)}{2} - \frac{\omega_r L_a}{R_s} \ln \left[1 + \frac{R_s I_{ph}}{V_{dc}} \right] \quad (2)$$

5.2. Determinación del Par de Salida

Un procedimiento directo aplicado a cualquier condición de operación para el cálculo del par promedio T_{ave} puede ser evaluado simplemente al dividir la coenergía total por el desplazamiento angular, este procedimiento no toma en cuenta el efecto de solapamiento entre fases.

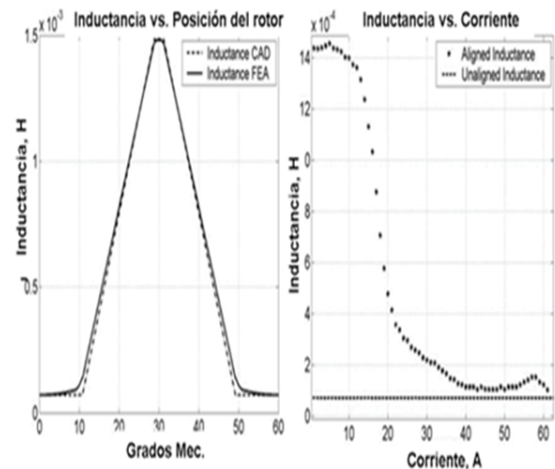


Figura 6. Comparativa analítico vs. software comercial. Inductancias en la posición alineada y no-alineada.

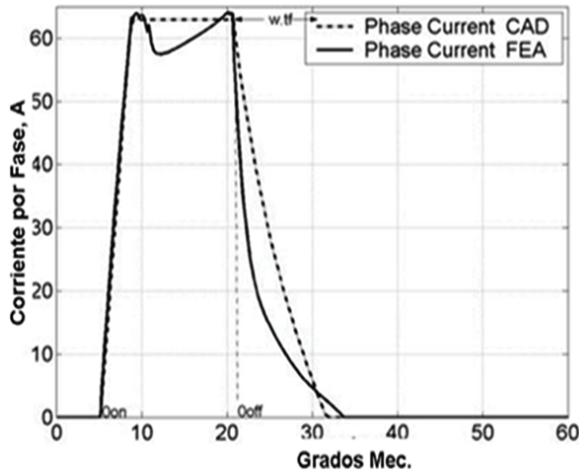


Figura 7. Evaluación de las corrientes por fase. Modelo analítico (--) y el software comercial de elementos finitos (-) para el modelo.

El par instantáneo T_{inst} permite encontrar el par desarrollado en todas las posiciones del rotor (incluyendo regiones con solapamiento). Este procedimiento implica conocer las curvas de enlace de flujo para realizarlo. Al encontrar la coenergía incremental ΔW_c dividido por el correspondiente incremento angular para cada posición del rotor, como se expresa en (3). El par instantáneo vs. posición del rotor por fase (Figura 8) desarrollado en particular para el diseño dado por el SRM basado en el programa analítico muestra los valores estimados del par total, correspondiente a la sumatoria del par en cada una de las fases y su relación con el par promedio.

$$T_{ph}(\theta, I_{ph}) = \frac{\partial W_c(\theta, I_{ph})}{\partial \theta} \quad (3)$$

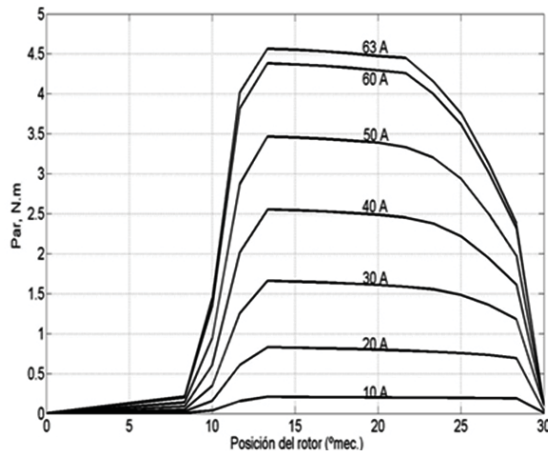


Figura 8. Característica del par por fase vs. posición del rotor para el diseño analítico SRM.

La Tabla 4 compara los parámetros adicionales y complementarios a las graficas los cuales son realizados empleando el programa analítico SRM y un software comercial. Los valores del diseño final analítico estiman una correcta ejecución acorde a las especificaciones de diseño de la aplicación. Esto se confirma, al comparar las características par-velocidad y de eficiencia-velocidad (Figura 9) las cuales son realizadas con el software RMXprt-Maxwell de Ansys.

Tabla 4. Comparación de parámetros eléctricos analíticos y FEA para SRM diseñado

PARAMETROS	Analítico	FEA
Pérdidas Totales en el cobre - P_{cu} (W)	115.34	98.4
Max. Corriente de fase - I_{phmax} (A)	69.93	64
Long. del devanado por vuelta - l_m (mm)	192.6	193.7
Resistencia devanado por fase - R_s (Ω)	0.0277	0.02807
Inductancia no alineada - L_u (mH)	0.00710	0.007053
Inductancia Alig. No Sat. - L_{nsat} (mH)	1.5	1.4826
Inductancia Alineada Sat. - L_{sat} (mH)	0.5205	0.515
Par promedio - T_{ave} (N.m)	5.25	5.41
Peso Total - W_t (kg)	5.59	5.784

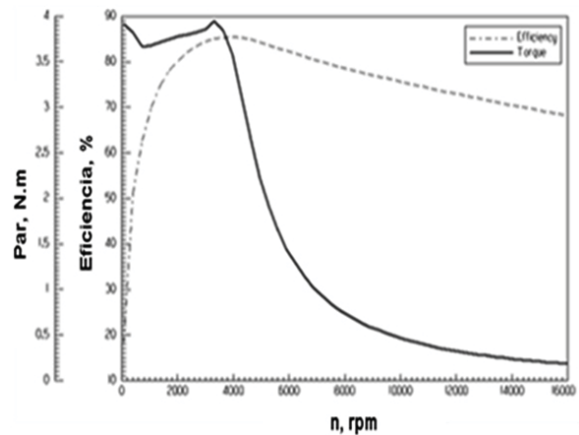


Figura 9. Característica de par y eficiencia en función de la velocidad del rotor realizado con ayuda del software RMXprt-Maxwell® by Ansys.

6. CONCLUSIONES

Este artículo introduce algunas consideraciones de diseño, restricciones y una metodología simple para el diseño de máquinas SRM. El método es analítico iterativo y permite ser aplicado en *Matlab*®.

El programa implica el procedimiento de diseño de un 42V SRM a 4 fases con el propósito de una aplicación automotriz el cual se basa en la combinación de diferentes aproximaciones introducidas previamente por diversos autores.

La técnica de simulación permite en corto tiempo estimar las bondades de un prototipo con respecto a otro de prestaciones cercanas, de manera eficaz y en un margen corto de tiempo.

El programa analítico puede predecir con detalle algunas curvas de ejecución de la máquina SRM “prototipo” tales como: inductancias, característica de enlace de flujo, forma de ondas de corriente, par desarrollado y otros parámetros.

Por comparación, existe una clara correspondencia entre los resultados estimados al usar el programa desarrollado y los de un software comercial como *RMXprt*® by *Ansys*.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Ministerio Español de Ciencia y Educación DPI2010-16084

REFERENCIAS

- [1] Krishnan, R., Switched reluctance motor drives: modeling, analysis, design and application, CRC, 2001.
- [2] Sheth, N.K., Rajagopal, K.R, Computer aided design of multi-phase SRM. *Journal of Applied Physics* 97, 2005.
- [3] Fuengwarodsakul, N.H., Fielder, J., Bauer, S.E., De Doncker, R.W., New methodology in sizing and predesign of SRM using normalized flux-linkage diagram, *IEEE Industry Application Conf.*, vol. 4. pp. 2704-2711, 2005.
- [4] Radun, A., Design Considerations for the Switched Reluctance Motor. *Trans. Industry Appl.* Vol. 31(5). pp

1079-1087, 1995.

- [5] Chang Liuchen., **Design procedures of a SRM for automobile applications.** *IEEE CCECE*, vol 2. pp. 947-950, 1996.
- [6] Anwar, M. N., Husain, I., Radun, A. V., A Comprehensive design methodology for switched reluctance machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, (6), 2001.
- [7] Fahimi, B., Gao, Y., Ehsani, M., On the suitability of switched reluctance motor drives for 42V super high speed operation: application to automotive fuel cells. *IEEE IECON'01* vol 2. pp. 1947-1952, 2001.
- [8] Murakami, H., Kataoka, H. and Honda, Y., Highly efficient brushless motor design for an air-conditioner of the next generation 42V vehicle. *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 1. pp. 461-466, 2001.
- [9] Naidu, M., Nehl, T. W. and Würth, L., Keeping cool while saving space and money: a semi-integrated, sensorless PM brushless drive for a 42-V automotive HVAC compressor. *Ind. Applications Magazine*, vol. 11, (4). pp 20-28, 2005.
- [10] Edrington, C.S. and Fahimi, B., Coolant pump drive: An Application for switched reluctance machines. *Vehicle Technology Conference, IEEE 58th*, vol. 5. pp. 3226-3230, 2003.
- [11] Kokernak, J.M. and Torrey, D.A., Design motor drives for low-voltage applications. *Conference Intertech*, June, pp. 13-14, 2001.
- [12] Quiroga, J., Cartes, D. and Edrington, C., Neural network based system identification of a PMSM under load fluctuation. *DYNA*, Año 76(160), ISSN 0012-7353, pp. 273-282. 2009.
- [13] Sheth, N.K. and Rajagopal, K.R., Calculation of the flux-linkage characteristics of a switched reluctance motor by flux tube method. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol 41(10). pp. 4069-4071, 2005.
- [14] Vijayraghavan, P., Design of Switched Reluctance motors and development of a universal controller for switched reluctance and permanent magnet brushless DC motor drives”, Thesis Doctor VT, Virginia, 2001.
- [15] Castaño, S.M. and Maixe, J., Criterios de diseño para un motor de reluctancia autoconmutada operando a 42V en una aplicación automotriz. *Scientia et Technica* Año XIII, No 34. ISSN 0122-1701, 2007

[16] Radun, A., Analytical calculation of the SRM's unaligned inductance. *IEEE Trans. Magnet* 35 (6), pp. 4473–7781, 1999.

[17] Castaño, S.M. and Maixe, J., Contribución al estudio y desarrollo del accionamiento eléctrico de reluctancia autoconmutada en el sistema de aire acondicionado en automóviles a 42V. Tesis Doctoral, Fac. Ing. Electrónica, Eléctrica y Automática, Universitat Rovira i Virgili, 2010.