

## CRITERIOS DE DISEÑO PARA UN MOTOR DE RELUCTANCIA AUTOCONMUTADA OPERANDO A 42V EN UNA APLICACIÓN AUTOMOTRIZ

### RESUMEN

Este documento presenta un conjunto de criterios y restricciones para el diseño de un motor de reluctancia autoconmutado de 4 fases operando a 42V para una aplicación automotriz. El estudio de las variables y su parametrización en el caso de motores de pequeño voltaje fue desarrollado utilizando el software analítico RMxprt-Ansoft. Por otra parte, los requerimientos de la aplicación automotriz en particular son discutidos. Finalmente se aplican dichas restricciones a un programa de diseño realizado en MATLAB verificándose su desempeño de acuerdo a los requerimientos deseados.

**PALABRAS CLAVES:** Motor de Reluctancia Autoconmutado, 42V, Diseño.

### ABSTRACT

*This paper presents a set of criteria and restrictions for the design of a 4-phases switched reluctance motor operating to 42V for an automotive application. The study of the variables and its parameterization for small voltage motors was developed using the analytical program RMxprt-Ansoft. On the other hand, the requirements of the automotive application are discussed. Finally these restrictions in a program of design made in MATLAB are applied and its agreed execution to the motor requirements is verified.*

**KEYWORDS:** Switched Reluctance Motor, 42V PowerNet, Motor Design

### 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día casi todos los accionamientos electromecánicos en un vehículo utilizan exclusivamente motores DC con escobillas y accionamientos por polea; sin embargo los motores AC sin escobillas son los más fuertes candidatos para sustituirlos en aplicaciones a 42V [1]. El motor de reluctancia autoconmutado (SRM), por su mayor eficiencia y alta densidad de potencia, mejor disipación de calor y una mayor vida útil, es uno de los mejores candidatos en accionamientos de media potencia (500W-2000W) operando en el estándar automotriz de 42V.

Sin embargo, el diseño del mismo es complejo debido a sus múltiples parámetros de diseño y a su característica altamente no lineal cuando opera con corrientes de saturación. Aunque algunos autores han explorado procedimientos de diseño para motores de reluctancia [2] o diseños empíricos [3], en este caso proponemos una alternativa para aplicaciones de bajo voltaje, tomando como referencia las nuevas metodologías de “sizing” y pre-diseño de la maquina, basadas en el estudio de las curvas de enlace de flujo y de par [4-5].

Por otra parte, se ha observado que establecer rangos aproximados para algunos de los parámetros de la maquina, permite disminuir la complejidad en el diseño del mismo para la presente aplicación. Estas restricciones de diseño se incorporan a un método sistemático de cálculo implementado en MATLAB; y posteriormente se comparan sus resultados con los de un software

### SANDRA M. CASTAÑO S

Ing. Electricista  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Estudiante de Doctorado  
Universidad Rovira i Virgili (ES)  
sandra.castano@urv.cat

### JAVIER MAIXE A.

Ing. Telecomunicaciones, Ph.D.  
Profesor Titular  
Universidad Rovira i Virgili (ES)  
xavier.maixe@urv.cat

comercial, con el fin de verificar el ajuste de los mismos a las especificaciones propuestas.

### 2. REQUERIMIENTOS DE LA APLICACIÓN.

Los requerimientos técnicos para el diseño del motor de un compresor para aire acondicionado operando a 42V son:

- La potencia en el eje del motor del compresor debe ser de alrededor 1-5hp (0.75-3.7kW), con una capacidad de operación de forma continua entre 0.7-2 kW.
- Se requieren valores de par constante entre 3.5-6 N.m hasta 3500-5500 rpm.
- La eficiencia debe ser superior al 75% en todo el margen de operación.
- En lo posible, la velocidad nominal del motor debe estar en el margen de 4000-7000 rpm o inclusive mayor.
- La temperatura de operación máxima esperada dentro del compartimiento de la maquina es 125°C.

Otras características así mismo importantes y deseables son: a) La minimización del espacio ocupado y peso, donde el diámetro externo del estator no será superior al del compresor [6]. b) La minimización del costo y del material utilizado, relacionado con la topología del motor y el costo del convertidor. Elegir a primera instancia un motor a 4 fases puede sugerir un aumento en el costo del convertidor, también implica una reducción del rizado del par permitiendo optimizar la relación par generado por amperio (cuando se es operado en un lazo de control), sin

embargo este análisis no se presenta en esta publicación. La tabla 1 resume algunas características del SRM a diseñar. La sección de corte y la nomenclatura utilizada para el SRM es presentada en la figura 1.

Configuración	Valores Esperados
Potencia ( $P_{rated}$ )= 1.5 kW	$T_{rated} > 4N.m$ , $\omega = 4000$ rpm
$V_{DC} = 42V$ ;	Velocidad crítica ( $\omega_c$ )=16000 rpm
Corriente por fase ( $I_{ph}$ ) < 65A	N°. Polos estator ( $N_s$ ) = 8
Velocidad rotor ( $\omega_{rated}$ )=4000rpm	N°. Polos rotor ( $N_r$ ) = 6
Diam. ext. estator ( $D_o$ )=120mm	Fases ( $N_{ph}$ ) = 4;
Temperatura ( $T_{emp\_cu}$ )= 125°C	$n_{par} = 1$ ; $n_{ser} = 1$

Tabla 1. Configuración deseada para el diseño del SRM

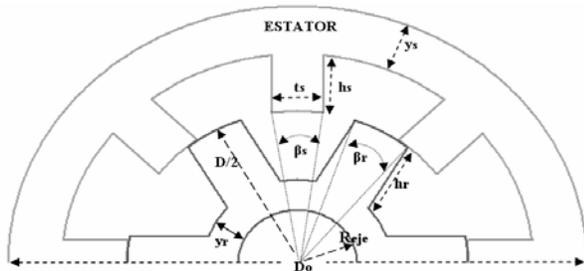


Figura 1. Sección de corte de un 8/6 SRM

### 3. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CONSTRUCTIVAS Y SIZING

Este artículo busca establecer los rangos de diseño de algunas variables de construcción para motores SRM operando a bajas tensiones sobre los siguientes parámetros: par, eficiencia, potencia y su relación con la velocidad del rotor.

**3.1. Sobre la relación par-velocidad:** El primer paso en el prediseño de un motor SRM es la estimación del tamaño de la maquina sobre la base del par requerido. Para ello, la correcta determinación del par se obtiene al establecer la curva de enlace de flujo vs. corriente, la cual toma en cuenta el efecto de saturación de la máquina. En ella, el área encerrada bajo las curvas del enlace de flujo entre las posiciones de polos del rotor y estator alineados y aquellos no alineados corresponde al lazo de coenergía ( $W_c$ ), ver Fig. 2. La relación entre par y coenergía [2] se expresa en la ecuación (1).

$$T_{ph}(\theta, I_{ph}) = \left. \frac{\partial W_c(\theta, I_{ph})}{\partial \theta} \right|_{I_{ph}=\text{constant}} \quad (1)$$

Sin embargo desde el punto de vista constructivo, las variables que establecen un efecto notable en el par de la maquina SRM son: el entrehierro ( $g$ ), el producto entre el diámetro exterior del rotor ( $D$ ) y la longitud axial ( $L$ ), conocida como área de trabajo del rotor ( $A_r$ ) y el numero de espiras por polo ( $T_p$ ).

**3.1.1. Selección del entrehierro:** Como es bien conocido, cuanto menor es el entrehierro, más próximo se es a la maquina ideal. Este principio se aplica en general a todas las maquinas, sin embargo tiene limitaciones respecto a la manufactura del motor, como se indica en (2).

$$0.2mm < g < 0.6mm \quad (2)$$

Por otra parte, el efecto del entrehierro sobre las curvas de enlace de flujo con corrientes inferiores a 65A, es mostrado en la figura 2a. En ella, se observa como una disminución de la longitud del entrehierro, incrementa el nivel de saturación ( $B_{sat}$ ), y  $W_c$ . (aumento del par). La figura 2b confirma este aumento del par debido a la disminución del entrehierro, sin embargo se presenta una disminución en la velocidad base ( $w_b$ ).

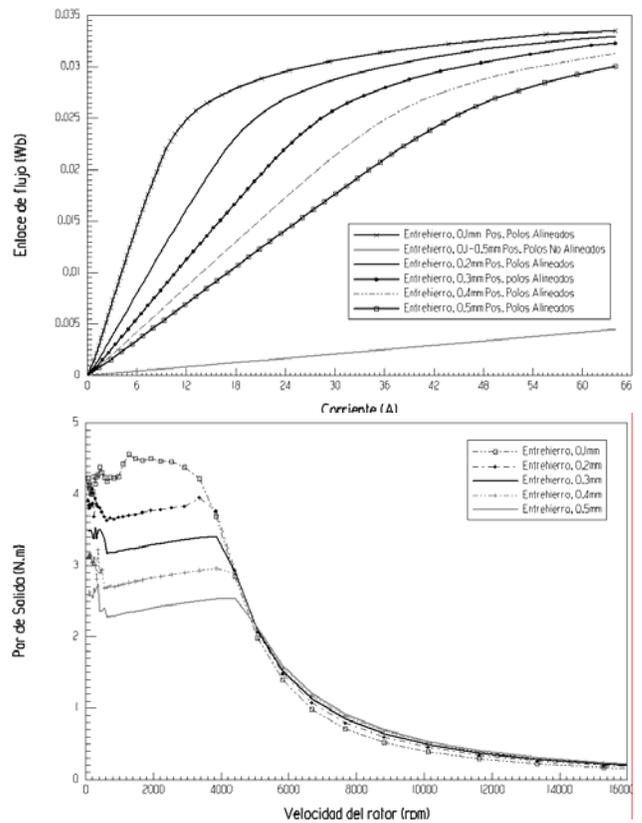


Figura 2. a) Curvas del Enlace de flujo vs. Corriente por fase b) Curvas de par vs. Velocidad del rotor en función del entrehierro

**3.1.2. Área de trabajo del rotor ( $A_r$ ):** Aunque el comportamiento de la maquina SRM es no-lineal, la estimación del par esta relacionada linealmente a  $A_r$ , ecuación (3). De tal manera que cuanto mayor sea  $A_r$ , mayor será el par que desarrolle el motor. Sin embargo, se observa un descenso de la velocidad, debida al incremento en la superficie del rotor.

$$T_{rated} = k.D.L \quad (3)$$

En la ecuación (3),  $D$  es evaluado si la velocidad es conocida; sin embargo el valor de  $k$  depende de

parámetros de diseño eléctricos y magnéticos, así como de algunas constantes empíricas [5]. Para evitar elegir un  $k$  incorrecto, se realiza el método de “sizing”, basado en la parametrización de las principales variables de la maquina manteniendo los rangos de velocidad cercanos a los de la aplicación. A partir del software comercial RMxpert-Ansoft se puede establecer tendencias en algunos parámetros de diseño de un motor SRM, Fig. 3. Al conocer de antemano la velocidad de trabajo del prototipo a diseñar, se puede establecer el rango de valores de  $A_r$ , y con ello estimar los valores de par a desarrollar por el prototipo. La ecuación (4) establece el rango de valores de  $A_r$  para la actual aplicación.

$$45cm^2 < D.L = A_r < 60cm^2 \quad (4)$$

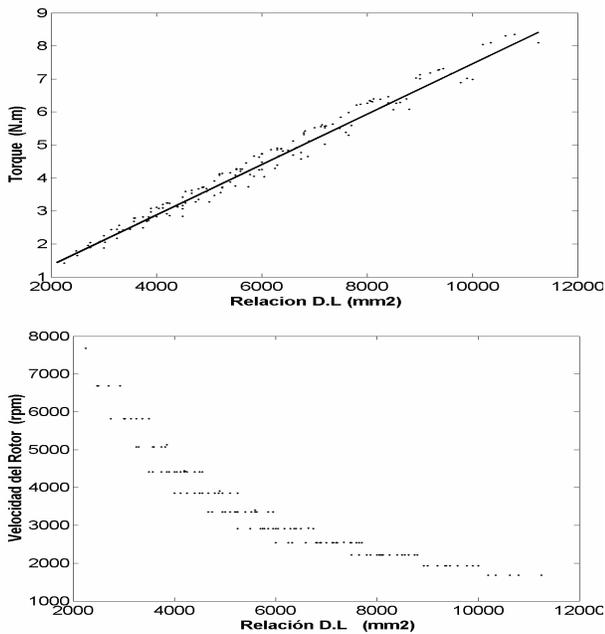


Figura 3. Influencia de  $A_r$  sobre el par y la velocidad del rotor.

**3.1.3. Selección del número de espiras por polo ( $T_p$ ):** La elección de  $T_p$  esta relacionada con la velocidad de trabajo, Fig. 4-5.

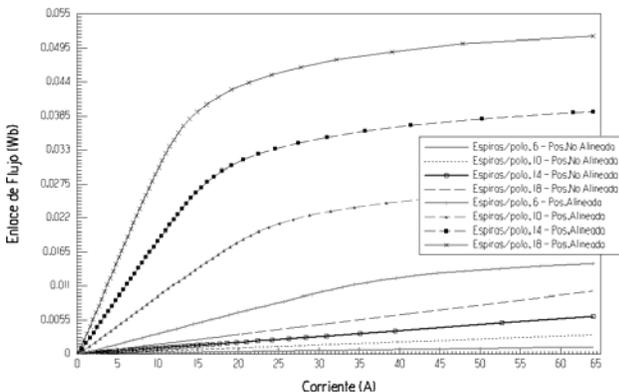


Figura 4. Influencia de  $T_p$  sobre el enlace de flujo y la corriente. Donde un aumento del número de espiras conlleva a una reducción de la velocidad base y crítica ( $w_c$ ) del motor, ante un aumento del par producido por la maquina.

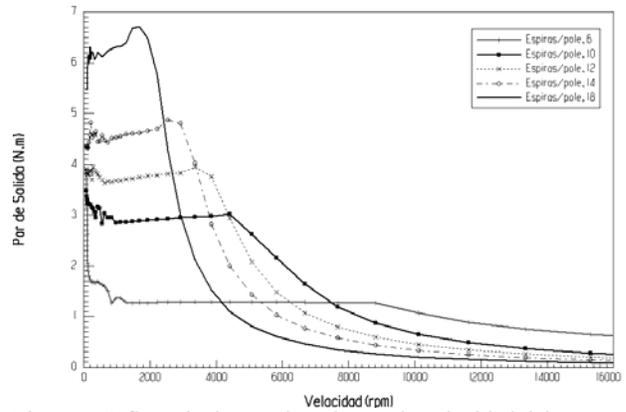


Figura 5. Influencia de  $T_p$  sobre el par y la velocidad del rotor.

**3.2. Eficiencia-velocidad del rotor:** La eficiencia esta marcada por la operación del motor a alta o baja velocidad. La influencia de  $T_p$  y la lámina magnética se observa en la Fig. 6.

La relación entre el espesor del yugo y del polo del estator  $y_s/t_s$ ,  $A_r$ , la relación entre las alturas de los polos  $h_r/h_s$  y la relación entre los diámetros del rotor-estator  $D/D_o$  son importantes en el aumento de la eficiencia en lo que respecta al rango de baja-media velocidad.

Los rangos de operación y las consideraciones para aumentar la eficiencia del motor, se establecen por otra parte en la tabla 2.

Variable	Consideraciones de diseño
$T_p$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumentar el número de espiras.</li> </ul> Sin embargo la relación $T_p$ vs. Eficiencia se atenúa a velocidad constante, esto conlleva saturación ante un notable aumento de $T_p$
$g$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disminuir el entrehierro en lo posible.</li> </ul>
Lamina magnética	La laminación establece el aumento de eficiencia en parte o todo el rango de velocidad, figura 5.
$y_s/t_s$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>y_s/t_s &gt; 0.55</math></li> <li>A alta velocidad es conveniente disminuir <math>t_s</math> o <math>\beta_r</math></li> <li>Aumentar el ancho del yugo del estator.</li> </ul>
$A_r$	$45cm^2 < D.L < 60cm^2; 1 < L/D < 1.35$
$h_r/h_s$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>0.7 &lt; y_r/y_s &lt; 1; 0.9 &lt; h_r/h_s &lt; 1.3</math></li> </ul> En lo posible disminuir la altura del polo del rotor.
$D/D_o$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>0.55 &lt; D/D_o &lt; 0.7</math></li> <li>En lo posible disminuir <math>D_o</math>.</li> </ul>

Tabla 2. Consideraciones para el aumento de la eficiencia

**3.3. Potencia-velocidad del rotor:** La potencia y la eficiencia están íntimamente relacionadas. Como anteriormente se mencionó, la influencia de algunas variables del motor, depende de la operación a alta o baja velocidad. Los rangos de trabajo se detallan en la tabla 3.

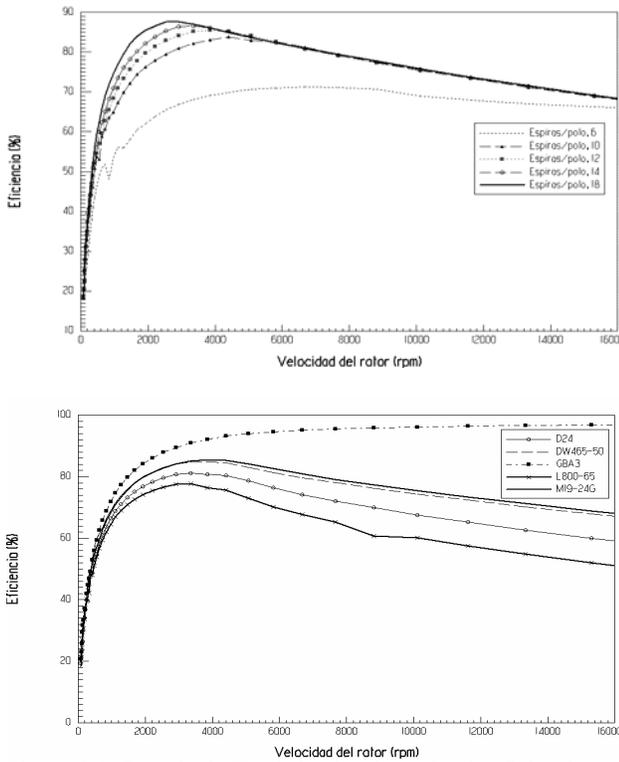


Figura 6. Influencia de  $T_p$  y la laminación sobre la eficiencia

Variable	Consideraciones de diseño
$T_p$	Al aumentar el numero de espiras por polo: <ul style="list-style-type: none"> <li>Disminuye <math>w_b</math> (velocidad del rotor donde la potencia es máxima) y la velocidad critica <math>w_c</math>.</li> <li>Implica una disminución en el rango de valores de velocidad para el cual la potencia se encuentra en un rango aproximado al máximo, ver Fig. 7.</li> </ul>
$g$	Disminuir el entrehierro, conduce a un aumento de potencia a baja velocidad (<4000rpm).
Lámina magnética	Utilización de chapa magnética $S_iF_e$ , ocurren notorios cambios a velocidades medias.
$y_s/t_s$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>0.5 &lt; y_s/t_s &lt; 1.3</math></li> <li>Aumentar el ancho del yugo del estator en lo posible, ver Fig. 7.</li> </ul>
$A_r$	$45cm^2 < D.L < 100cm^2$ ; $1.0 < L/D < 1.35$
$h_r/h_s$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>0.65 &lt; y_r/y_s &lt; 1.2</math>; <math>0.8 &lt; h_r/h_s &lt; 1.3</math></li> <li>Disminuir <math>h_r</math> solo si opera a baja velocidad. A alta velocidad la variación de la potencia es mínima.</li> </ul>
$D/D_o$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>0.55 &lt; D/D_o &lt; 0.65</math>, ver figura 8</li> <li>En lo posible disminuir <math>D_o</math> con respecto a <math>D</math></li> </ul>
$\beta_r$ y $\beta_s$	Cuando se trabaja a altas velocidades, conviene disminuir el arco del polo del rotor ( $\beta_r$ ) y el arco del polo del estator ( $\beta_s$ ) para aumentar la potencia y $w_c$ . A velocidad constante, corresponde un valor óptimo $\beta_r \geq \beta_s$ de $\beta_s$ para un valor óptimo de $P_{max}$ .

Tabla 3. Consideraciones para el aumento de potencia de salida

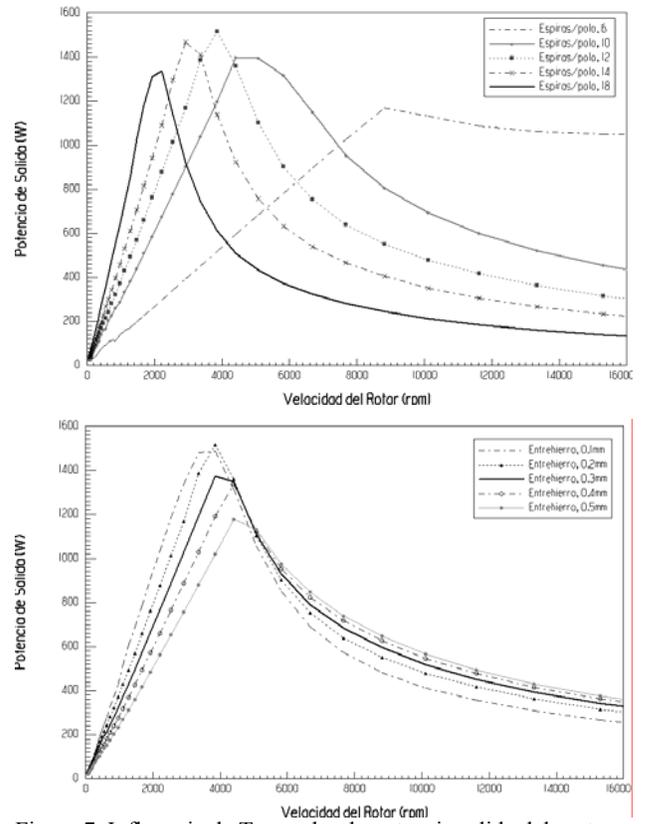


Figura 7. Influencia de  $T_p$ ,  $g$  sobre la potencia salida del motor.

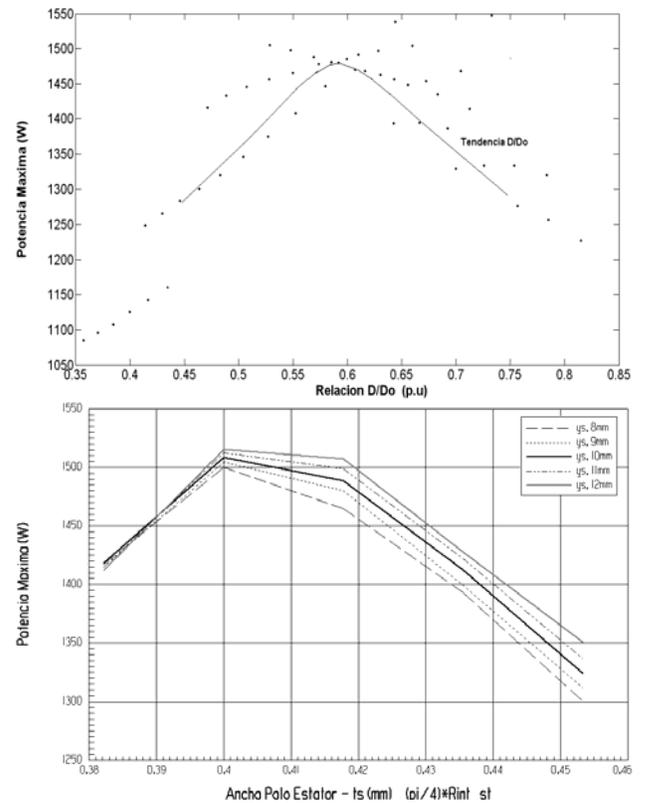


Figura 8. Influencia de  $D_o/D$  y  $y_s/t_s$  sobre la potencia de salida del motor.

### 4. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Seguidamente, se describe mediante el diagrama de flujo de la figura 9 un método analítico de diseño simple de maquinas SRM [7], el cual es implementado en MATLAB. Este diagrama de flujo permite estimar con eficacia las virtudes de un prototipo de diseño con respecto a otro, siempre y cuando se manejen ciertos límites de referencia.

El procedimiento se resume en los siguientes pasos:

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

Los pasos 3) y 4) corresponden al diseño laminar y del devanado de la maquina, los rangos óptimos de valores para  $y_r/y_s$  y  $D/D_o$  acorde a consideraciones de diseño relacionadas al aumento de eficiencia y potencia de salida del motor y descritas en el punto anterior, son añadidas como restricciones al programa de calculo. Además, el espacio mínimo entre devanados adyacentes ( $C_L$ ) corresponde a una restricción del diseño del devanado, al evitar el cortocircuito de dos fases contiguas.

El paso 5) establece de modo analítico las curvas de ejecución estáticas de la máquina: curvas de enlace de flujo, inductancia y par promedio [8]. Además, los valores de parámetros dependientes del diseño como son el peso total ( $W_t$ ) y del devanado, la resistencia por fase con corrección según la temperatura de operación, etc.

Las curvas dinámicas de par basadas en la posición del rotor y de corriente por fase teniendo en cuenta los ángulos de disparo del convertidor asociado al motor [2,7], así como las pérdidas en el cobre corresponden a la operación del paso 6.

### 5. VERIFICACION Y RESULTADOS

Aunque sencillo, respecto a la complejidad del motor, este programa analítico permite estimar la eficacia del diseño de un prototipo con respecto a otro, sin la necesidad de la utilización de un software de elementos finitos (FEA). Además, una buena aproximación de las constantes de diseño permite un ahorro en el tiempo de ejecución de la simulación.

La tabla 4 corresponde a las características de diseño laminar y del devanado del prototipo final de motor SRM acorde a los rangos de trabajo estimados en las secciones anteriores y a los requisitos deseados en la tabla 1.

La tabla 5 compara los valores de los parámetros eléctricos estimados por el programa analítico CAD y los valores de los mismos a partir del software de elementos finitos. El porcentaje de error entre ellos es menor al 8% indicando una correcta estimación de los resultados para dicho prototipo.

La figura 10a corresponde a la característica del par basado en la posición del rotor para una fase y al par total a la velocidad de operación (4000rpm), ambos realizados con ayuda del programa analítico SRM CAD para el prototipo final. Cabe señalar que el par total corresponde

a la sumatoria de pares en cada una de las fases del motor. La figura 10b corresponde a la característica del par con respecto a la velocidad del rotor para el prototipo final utilizando el software comercial.

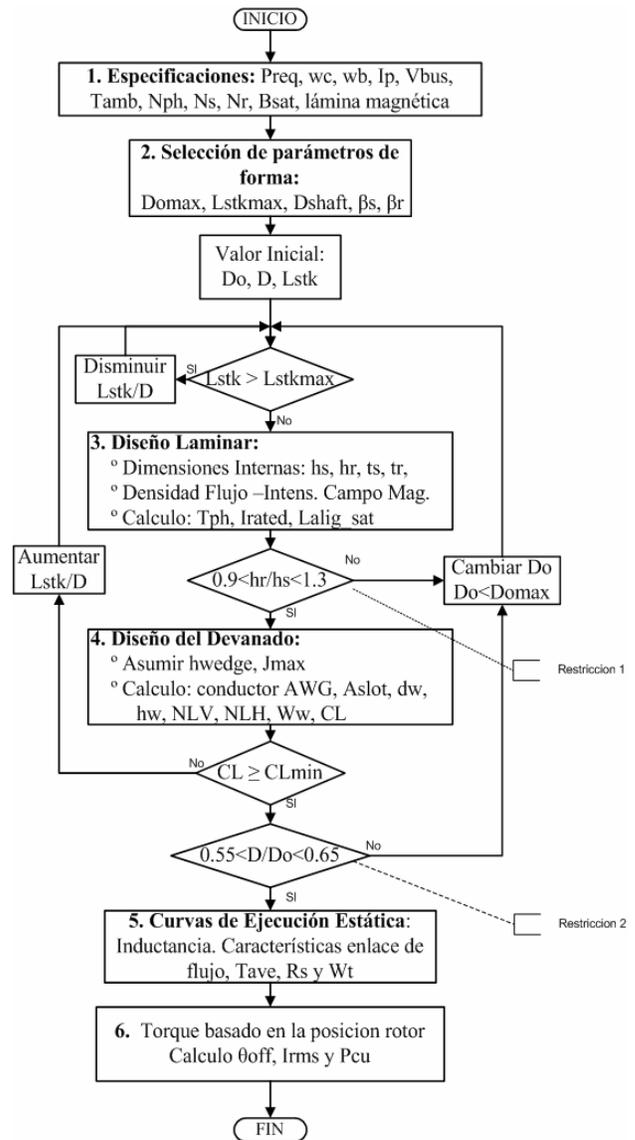


Figura 9. Diagrama de flujo del programa SRM CAD

DISEÑO LAMINAR	DISEÑO DEL DEVANADO
Lamina M19-24G SiFe	$C_1 \geq 2.5 \text{ mm}$
$\beta_s = 17.98^\circ$ , $\beta_r = 20.4^\circ$	Cal AWG = 11
$D = 71 \text{ mm}$ ; $L_{stk} = 70 \text{ mm}$	$Wire_{wrap} = 0.1 \text{ mm}$
$D_{eje} = 25 \text{ mm}$ ; $g = 0.2 \text{ mm}$	$N_{LV} = 3$ $N_{LH} = 4$
$B_{sat} = 1.75 \text{ Tesla}$ ;	$h_w = 11.4 \text{ mm}$
$y_r = 6.96 \text{ mm}$ ; $y_s = 11.14 \text{ mm}$	Vueltas por fase, $T_{ph} = 24$

Tabla 4. Datos de diseño laminar y devanado realizado en CAD

Este prototipo establece un par igual o superior a los 4N.m actuando hasta los 4000rpm, sin exceder la corriente máxima de diseño (65A). En la figura se observa la eficiencia del motor, la cual es superior al 75%

durante la mayor parte del rango de velocidad de trabajo. A modo general tanto las tablas 4-5 y la figura 10 indican la esperada ejecución del prototipo acorde a las principales especificaciones de la aplicación.

PARAMETROS	CAD	FEA
Perdidas en el cobre totales - $P_{cu}$ (W)	115.34	98.4
Corriente de fase máxima - $I_{phmax}$ (A)	62.93	64
Longitud devanado/vuelta - $L_m$ (mm)	192.6	193.7
Resistencia por fase/devanado - $R_s$ ( $\Omega$ )	0.0277	0.02807
Inductancia no-alineada - $L_u$ (mH)	0.007109	0.007053
Inductancia alineada no-saturada $L_{ansat}$ (mH)	1.5	1.4826
Inductancia alineada saturada - $L_{sat}$ (mH)	0.5205	0.515
Torque promedio - $T_{rated}$ (N.m)	5.25	5.41
Peso total - $W_t$ (kg)	5.59	5.784

Tabla 5. Comparación de parámetros eléctricos utilizando CAD y FEA para el diseño de un SRM.

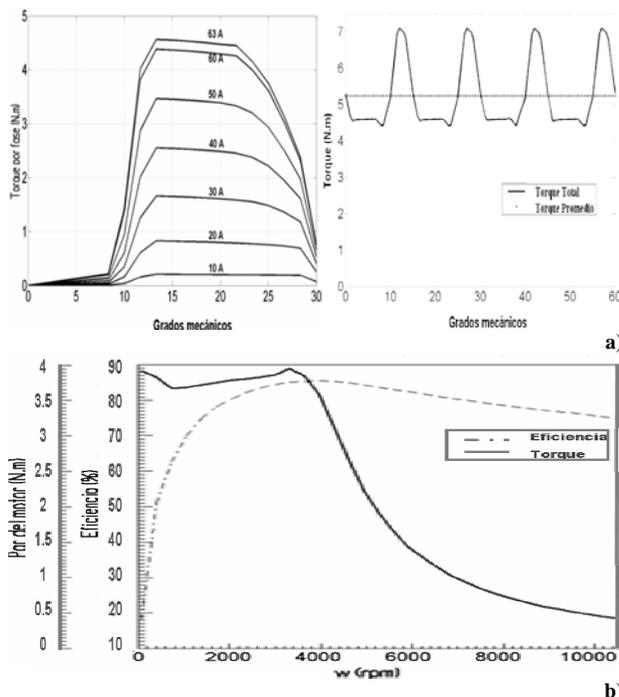


Figure 10. a) Características del par respecto a la posición del rotor y valor del par promedio obtenido por CAD a 4000 rpm. b) Curva de par y eficiencia realizada en RMXprt-Ansoft

## 6. CONCLUSIONES

Se han presentado las restricciones de diseño de algunas variables del motor SRM operando a 42V - 4 fases. Para establecer los rangos de diseño se cuenta con la ayuda de un software comercial, con el fin de parametrizar las entradas, y de esa manera obtener un completo rango de operación ajustado a las necesidades de la aplicación. Posteriormente, algunas consideraciones de diseño son introducidas como restricciones en un programa desarrollado en MATLAB, basado en un método analítico iterativo [7], el cual permite estimar con eficacia

y en un relativo corto tiempo las bondades de un prototipo con respecto a otro.

Por otro lado, se presentaron algunos de los datos correspondientes al diseño final del SRM de 4-fases a 42V; junto con una comparación de las características del par y de ciertos parámetros eléctricos de la máquina, entre el CAD y el software comercial.

Se observó entonces, que la valoración de los parámetros obtenidos, muestran una buena correspondencia entre los resultados estimados al usar el programa desarrollado y los del software comercial utilizado.

## 7. AGRADECIMIENTOS.

Ministerio Español de Educación y Ciencia, proyecto de investigación DPI2004-07969-C02-01.

Ansoft Corporation -Maxwell RMXprt- www.ansoft.com.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MAIXE, J., Memoria científico-técnica del proyecto: Sistemas avanzados para la nueva arquitectura eléctrica de los Automóviles, "Convocatorias Ayuda Proyectos de Investigación", DPI2004-07969-C02-01
- [2] KRISHNAN, R., Switched reluctance motor drives: modeling, analysis, design and application, CRC 2001
- [3] CHANG, L., Design procedures of a SRM for automobile applications, IEEE CCECE vol 2, 1996
- [4] ANWAR, M.N., HUSAIN I., A comprehensive design methodology for switched reluctance machines, IEEE Ind. Applications, vol 37, no6, 2001
- [5] FUENGWARODSAKUL, N.H., FIELDER J., New methodology in sizing and predesign of SRM using normalized flux-linkage diagram, IEEE- IAS 2005.
- [6] EDRINGTON, C.S., FAHIMI B., Coolant pump drive: an application for SRM, Vehicular Technology Conference, IEEE 58<sup>th</sup>, vol. 5, Oct. 2003
- [7] CASTANO, S. M, MAIXE J., Design of an 8/6 SRM for 42V air-conditioning compressor automobile application, Proceedings 10<sup>th</sup> International Conference TMT 2006, Lloret de Mar, Spain 2006.
- [8] RADUN, A., Analytical calculation of the SRM's Unaligned Inductance, IEEE Trans. Magnetics, vol 35, 1999.