

Consideraciones para el Modelado y Simulación de un Accionamiento de Reluctancia Conmutada

Sandra M. Castaño* y Javier Maixe**

*Universidad Antonio Nariño, sandcastano@uan.edu.co ** Universidad Rovira i Virgili, javier.maixe@urv.cat

Resumen — Este artículo aborda la temática del modelamiento de los motores de reluctancia conmutada (SRM) y la simbiosis que se presenta entre modelado del convertidor, el control y la aplicación. Este artículo propondrá algunas consideraciones en lo que refiere al accionamiento, el motor y la manera de establecer el modelado integral del mismo ya sea abordando una temática lineal o no lineal según la aplicación. Finalmente se explica la utilización y operatividad de varios modelos del accionamiento-motor los cuales han sido enteramente desarrollados usando Matlab-Simulink.

Palabras clave — Modelamiento, maquinas eléctricas, simulación

Abstract — This article discusses the topic of modeling switched reluctance motors (SRM) and the symbiosis that occurs between the converter modeling, control and application. This article will propose some considerations in relation to the motor-drive. In addition, it will establish a comprehensive modeling using a linear or nonlinear issue regarding the application. Finally, this article explains the use and operation of multiple-motor drive models which have been entirely developed using Matlab-Simulink.

Keywords — Modeling, electric machines, simulation

I. INTRODUCCIÓN

La etapa de modelado y simulación, es necesaria cuando se desea crear un escenario "real" de trabajo. En muchas aplicaciones el SRM debe tener en cuenta los efectos de la saturación electromagnética de los materiales que lo fabrican. Dependiendo de la aplicación los ordenes de corrientes por fase pueden alcanzar valores considerablemente altos (<100A) y sobre esos márgenes trabajar con la característica lineal de la maquina no es lo mas indicado. Las no linealidades de la maquina deben ser tomadas en cuenta con un apropiado modelado de la característica no lineal flujo-corriente-posición del rotor (ϕ - i - θ) y del par electromagnético a la salida (T - i - θ). El SRM posee algunas cualidades que lo hacen muy interesantes tanto para uso automotriz, aeronáutico, domestico (lavadoras) o industrial (operador de puerta). Esto se debe a su alta confiabilidad, tolerancia a fallos, alta densidad de potencia, un alto par por amperio y a su disposición a trabajar a altas velocidades.

Para comprender mejor las razones sobre el uso de los accionamientos SRM, este artículo realiza una breve descripción de su funcionamiento y de las ecuaciones que lo conforman confirmando la estrecha relación entre accionamiento y motor así como su relación al trabajar a diferentes regiones de trabajo y/o velocidades. A raíz de ello, se describe cada uno de los convertidores extensibles a aplicación automotrices, destacando la influencia de cada uno sobre el desempeño del accionamiento, y finalmente la elección del mismo para una aplicación en particular. En la

sección II se aborda el proceso de caracterización e introducción al modelado del accionamiento SRM en base a tablas "look-up" las cuales se conforman en base a los datos estimados por un software de elementos finitos *RMxprt/Maxwell2D*, y embebidas en un entorno apoyado en Matlab-Simulink. En la sección III se toman dos aplicaciones y la manera de abordar el modelado de las mismas, en la última sección se establece las conclusiones al respecto.

II. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de operación del motor de reluctancia autoconmutado (SRM), es comparable a los dientes de un rotor de hierro, los cuales se orientan en un campo magnético, el cual es producido gracias a una corriente eléctrica en los polos del estator. Mediante una determinada conmutación del campo magnético se consigue un movimiento rotatorio del núcleo. El concepto de "reluctancia" se corresponde con la resistencia magnética, que opone dicho rotor al campo electromagnético [1]. Como la reluctancia varía con el flujo, el cual a su vez varía con la posición del rotor, la reluctancia en cualquier circuito magnético esta dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{FMM}{\phi} = \frac{H \cdot l}{B \cdot S} \quad (1)$$

Donde: R es la reluctancia, FMM es la fuerza magnetomotriz, Φ es el flujo magnético, H es el campo magnético en el aire, l es la longitud del camino magnético, B es la densidad de flujo y S es el área de la sección del camino magnético.

Los parámetros anteriores contribuyen a la variación de la inductancia del circuito magnético en la medida que la posición angular del rotor cambia. Antes del alineamiento de los polos del rotor y del estator, la permeabilidad μ es esencialmente igual a la permeabilidad del vacío μ_0 , la cual es muy pequeña comparada con la del material del núcleo. Sin embargo, en la posición de polos alineados, el área de solapamiento llega a su valor máximo y por tanto allí, la permeabilidad μ es máxima y la reluctancia R disminuye a su valor mínimo, (ver Fig.1).

A. Caracterización del accionamiento SRM

La tensión instantánea en los terminales de una fase de un motor SRM esta relacionado al flujo enlazado por el devanado, mediante la *Ley de Faraday*, la ecuación se expresa como:

$$v = R \cdot i + \frac{d\phi(\theta, i)}{dt} = R \cdot i + \frac{\partial \phi(\theta, i)}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial \phi(\theta, i)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

Donde: El término $R \cdot i$ corresponde a la caída de tensión en el devanado; el segundo término de la ecuación equivale a la inductancia por fase $L(\theta, i)$ y el tercer término corresponde a la fuerza contraelectromotriz FEM .

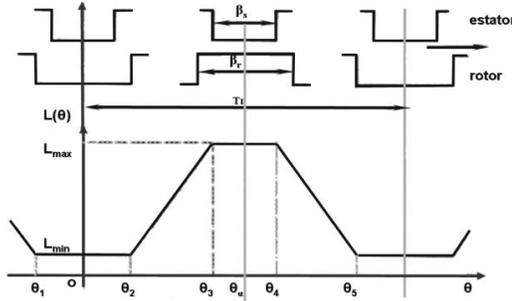


Fig. 1: Inductancia ideal vs. Posición del rotor para una corriente constante [8]

En resumen la ecuación (2) pasa a ser:

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + i \omega \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3)$$

En aplicaciones a altas velocidades, la FEM aumenta. Lo que puede implicar que la FEM puede ser mayor que la tensión de entrada v , forzando un di/dt negativo y por tanto establece un decrecimiento de la corriente. Durante dicho periodo, la tensión de alimentación se revierte y la corriente de fase cae a cero muy rápidamente. Un correcto ajuste de los instantes de conmutación de los interruptores del convertidor implica aumentar el crecimiento de corriente y evitar la oposición por el aumento de la FEM [1, 2].

Para explicar la relación entre enlace de flujo y par del motor, se usa una curva de magnetización típica de un par de posiciones contiguas y cercanas a la posición de polos alineados y no alineados para una fase. La forma de obtención de trabajo mecánico y de par se observa en la Fig. 2.

El trabajo mecánico ΔW_m (ec. 4) se expresa como $\Delta W_m = T_e \cdot \Delta \theta$. Al aplicar el límite de $\Delta \theta \rightarrow 0$ para cualquier valor de corriente i , el par instantáneo del SRM se define como:

$$\Delta W_m = \int_{i=0}^{i_0} \phi(\theta_b, i) di - \int_{i=0}^{i_0} \phi(\theta_a, i) di \quad (4)$$

$$T_e = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_{i=0}^i \phi(\theta, i) di \quad (5)$$

Mientras, la ecuación de par total es equivalente a la sumatoria de par en todas las fases. Adicionalmente a lo anterior, el modelado lineal o no lineal de la máquina SRM involucra el uso de las ecuaciones mecánicas de la máquina.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B_m \cdot \omega \quad (7)$$

Donde: B_m es el coeficiente de fricción viscosa, J es el momento de inercia del rotor, T_L es el par de carga y ω es la velocidad angular del rotor.

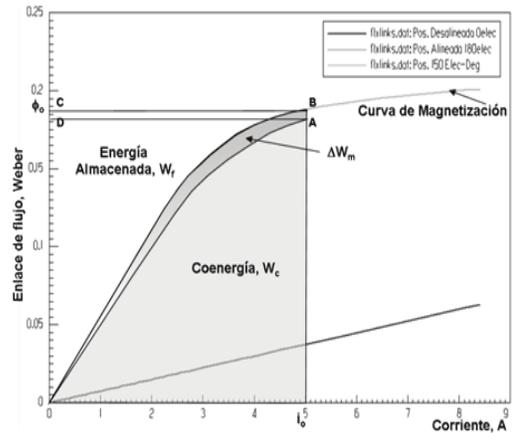


Fig. 2: Definición de coenergía, energía de campo y trabajo mecánico

B. Las topologías de convertidores en el SRM

El convertidor suministra las tensiones conmutadas DC que establecen los pulsos de corriente en los devanados de las fases de acuerdo a las señales de control. Como el SRM es una máquina controlada electrónicamente. El convertidor asimétrico o clásico para $2 \cdot \text{interruptores/fase}$ (Nph) o puente-H, será empleado para su uso en este artículo. Este convertidor es el más flexible y versátil de los convertidores para 4-cuadrantes SRM [1, 3], (Fig.3).

La principal ventaja es: La flexibilidad en el control, ya que todas las fases pueden ser controladas independientemente, lo cual es esencial en la operación a muy altas velocidades o cuando se presenta solapamiento entre las corrientes de fase adyacentes.

La principal desventaja es: su número alto de interruptores requerido por fase. Para aplicaciones a baja tensión como aquellas al ámbito del automóvil, la caída de tensión en dos interruptores podría ser significativa comparado con el valor del bus de continua disponible. En la actualidad hay algunas topologías con reducido número de interruptores [12 - 15] como son: los convertidores de $1.5 \cdot Nph$ interruptores; las topologías para convertidores de $(Nph + 1)$ interruptores como: *C-Dump*, de transistor compartido o de tensión continua variable; además de convertidores de Nph interruptores como son las topologías *R-Dump*, bifilar, fuente partida y la topología de $Nph - \text{transistores}$ y $2 \cdot Nph$ diodos.

C. Posición del rotor y control de corriente del accionamiento

Es basado en las siguientes suposiciones:

La posición del rotor en cada instante es conocida y determinada por un encoder. Algunas aplicaciones al ámbito automotriz establecen la necesidad de un control sin sensores, particularmente cuando la máquina y el accionamiento debe funcionar a altas temperaturas. Caso de la bomba eléctrica de agua y el compresor del sistema de aire acondicionado.

Con respecto al esquema de control de corriente, el de banda de histéresis es seleccionado por su fácil implementación y su rápida respuesta dinámica. El control de corriente por histéresis es usado para aplicaciones de bajas y medias velocidades debido a que existe el tiempo suficiente para controlar la corriente de fase. Sin embargo, este controlador se caracteriza por una amplia variación de la frecuencia de conmutación y un aumento en el rizado de la corriente.

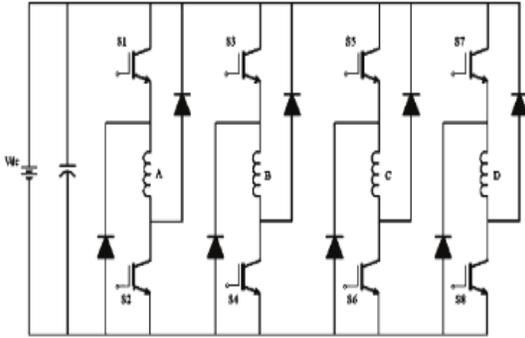


Fig. 3: Convertidor clásico de 2-interruptores/fase para un SRM 8/6- 4fases

III. MODELADO Y SIMULACION DEL SRM

A. Modelo y Simulación del SRM

Los métodos para el modelado del SRM utilizan la representación de las curvas de enlace de flujo o del perfil de inductancia de manera analítica y numérica como sería: la representación por series de Fourier [4], funciones polinomiales [5, 6] o modelos basados en trocear la característica de flujo de saturación en varias piezas lineales [7]. Además, de algoritmos de interpolación *on-line* y técnicas de estimación que usan datos obtenidos de exámenes experimentales o métodos de elementos finitos [8, 9].

Sin embargo, algunas veces el tiempo de conmutación en algunos procesos es alto y propenso a errores significativos, debido al uso de las derivadas parciales del enlace de flujo con un conjunto finito de datos, entre otros. La clave para alcanzar un modelado efectivo del SRM es usar una metodología que permita la no linealidad de su característica de magnetización, maximizando la velocidad de simulación [10].

Una posibilidad es la inclusión de las relaciones enlace de flujo/corriente/posición del rotor y par/corriente/posición del rotor (Fig.4), representadas en forma de tablas "look-up". Estas se pueden hallar con ayuda de una herramienta de simulación basada en el análisis de elementos finitos o de ensayos experimentales para obtener los valores de las curvas de enlace de flujo sobre todo el rango de operación. La disponibilidad de conocer los valores de la distribución de flujo en cada parte del SRM con respecto a pequeñas variaciones de la posición del rotor nos permite encontrar los valores no lineales de otros parámetros tales como: inductancia, fuerza electromotriz, entre otros. Por lo que es entonces posible obtener la ejecución dinámica o transitoria del SRM usando la capacidad e integración del *Matlab-Simulink* como escenario. Otra ventaja radica, en que los datos a posteriori sean obtenidos de los ensayos experimentales y que proporcionen las características de las curvas de enlace de flujo reales, los cuales puedan ser fácilmente trasladadas a forma de tablas "look-up" y embebidas nuevamente dentro del escenario.

Para un modelo lineal el enlace de flujo magnético y el par por cada fase j viene dado por:

$$\phi(\theta, i) = L(\theta) \cdot i \quad (8)$$

$$T_e = \frac{\partial L_j}{\partial \theta} \int_0^{i_j} i_j di_j = \frac{1}{2} i_j^2 \frac{dL_j}{d\theta} \quad (9)$$

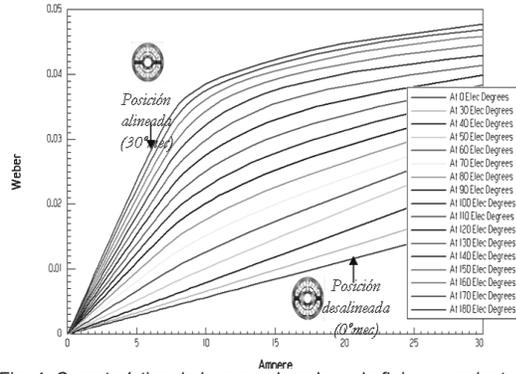


Fig. 4: Característica de la curva de enlace de flujo vs corriente a varias posiciones del rotor, incluye las posiciones alineada y no alineada de los polos del rotor y el estator para un motor 8/6-4ph. Ejemplo arbitrario.

Cabe recordar que el modelo lineal no toma en cuenta la saturación de la máquina, esto significa que solo es apto para corrientes de operación por debajo del punto de saturación (depende del diseño de motor). A su vez la consecución de par es más simple y se obtiene directamente, ecuación (9). Ejemplos prácticos de su utilización se presentan cuando se trabaja a bajas corrientes y bajas/medias velocidades, como en el caso del ventilador del radiador en sistemas de aire acondicionado.

La estructura general utilizando *Matlab-Simulink* no cambia cuando se trata de establecer el modelado lineal o no lineal. Sin embargo, la estructura por cada fase, si varía ligeramente, como se observa en la Fig.5 - 6.

B. Resultados del modelado y simulación lineal

Para un modelo lineal utilizamos un motor 6/4-3φ; máquina de 6 y 4 polos en estator y rotor respectivamente. Los resultados del modelo lineal utilizando una corriente por debajo del límite de saturación $I_{ref}=8A$, y una velocidad de $w=100rad/s$ con ángulos de conmutación del accionamiento arbitrarios en $\theta_{on}=0^\circ$, $\theta_{off}=30^\circ mec$. En este ejemplo, Fig. 7; se observan las curvas de corriente, la banda de histéresis y el par entregado por cada fase. El esquema de coenergía W implica el par promedio que para esa corriente es capaz de establecer la máquina.

Cabe señalar que el control de la máquina, esta relacionada con la forma de la curva par-velocidad, de tal manera que el ajuste de los ángulos de encendido del accionamiento permitan conseguir una maximización del par/amperio o un incremento en la eficiencia del sistema.

La inclusión de un modulo específico en simulación donde se establezcan el ajuste del los ángulos de operación, se establece en forma de tablas *look-up* en relación al valor de la corriente y la velocidad de operación conocidas como tablas *look-up offline*.

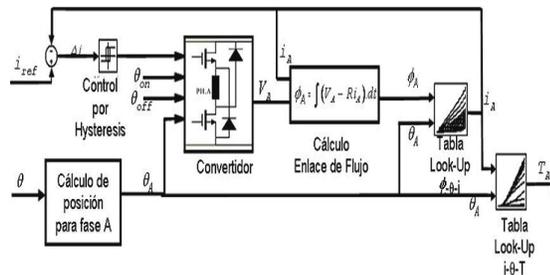


Fig. 5: Modelo dinámico del SRM + control de corriente por Histéresis para una sola fase del SRM. [11]

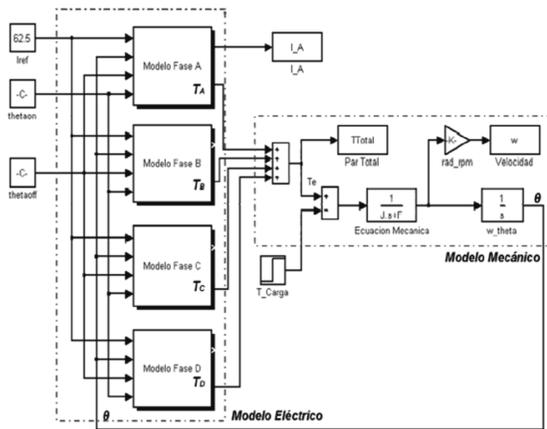


Fig. 6: Modelo dinámico completo de un SRM 4 fases utilizando Matlab-Simulink

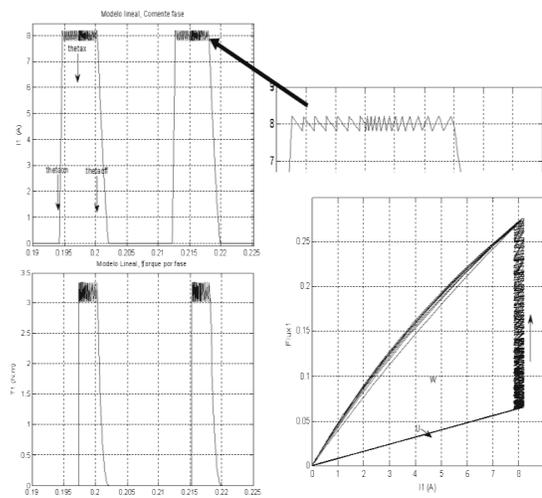


Fig. 7: Resultados del modelo lineal para un SRM 6/4, $I_{ref}=8A$, $\theta_{on}=0^\circ$, $\theta_{off}=30^\circ$ mec, $w=100\text{rad/s}$ (a) Curvas de corriente y del par para la fase A. b) Esquema de coenergía.

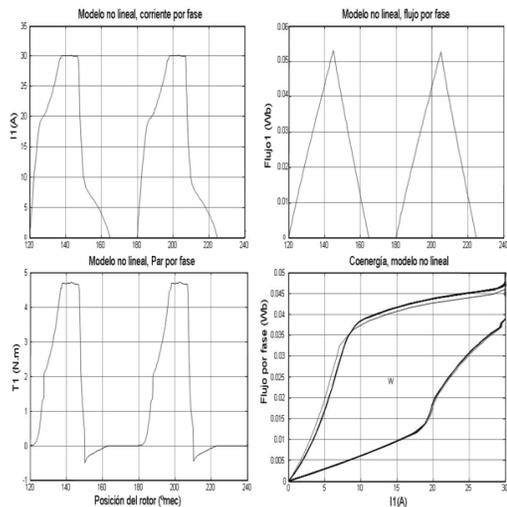


Fig. 8: Resultados del modelo no-lineal para un SRM 8/6, $I_{ref}=30A$, $\theta_{on}=0^\circ$, $\theta_{off}=25^\circ$ mec. (a) Curvas de corriente y del par para la fase A. b) Curvas del enlace de flujo por fase y del esquema de coenergía.

C. Resultados del modelado y simulación no lineal

Un modelo efectivo de la máquina es generalmente no-lineal. El modelo no-lineal es utilizado en el modelado de accionamientos SRM que involucren corrientes de operación altas. Para el caso del motor que trabaja asociado al compresor de un sistema de aire acondicionado en un automóvil, la velocidad de trabajo puede alcanzar hasta los 65A con pares de hasta 6.5N.m, cuando el bus de operación es 42V, sobre esos valores un modelo lineal no es disponible.

La Fig. 8 muestra los valores de corriente, par y flujo por fase, además de coenergía para el caso del modelo no-lineal de un SRM arbitrario tipo 8/6-4 fases. En base a las curvas de enlace de flujo (Fig.4), para ángulos de operación del accionamiento $\theta_{on}=0^\circ$, $\theta_{off}=25^\circ$ mec e $I_{ref}=30A$; utilizando el convertidor (Fig. 3) y un controlador por histéresis.

Las curvas registradas con el modelo no lineal desvelan los efectos de la saturación. Se observa, las eventualidades de la operación del accionamiento. Esto refiere a que en este caso, el ángulo de conmutación $\theta_{off}=25^\circ$ mec, es aparentemente inadecuado puesto que la caída de corriente en esta fase está en la región de pendiente negativa de la inductancia.

Lo que implica la generación de par negativo por fase y por consiguiente el par promedio generado será reducido.

Sin embargo, algunas veces el par generado por una fase no tendrá un impacto en el par total, desde que dicho par sea compensado por las señales generadas por las fases contiguas. El establecimiento de ángulos de conmutación óptimos, conlleva a una mejora de la generación de par, el rizado de par y en rendimiento del sistema.

La variación de los ángulos de conmutación afecta la forma de onda de corriente; por ende, a los valores del par promedio. La curva (Fig. 9) muestra la relación entre el par nominal de un motor SRM y su relación con la velocidad de operación, para un par de ángulos de operaciones fijos del convertidor en todo el rango de velocidad. Para la realización de la grafica se empleó el programa *RMxprt-Ansys*.

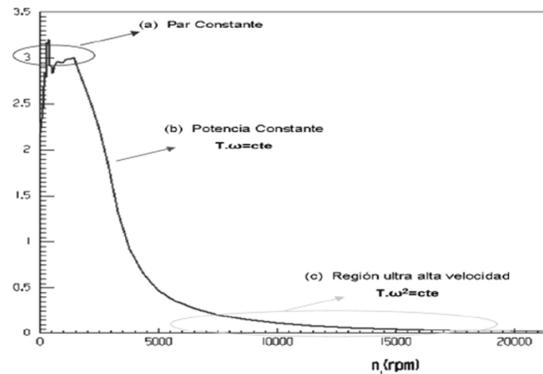


Fig. 9: Característica par-velocidad y las diferentes regiones de trabajo para un accionamiento SRM.

IV. CONCLUSIONES

A pesar de existir una amplia gama de topologías de convertidores en la industria automotriz particularmente con bajo número de interruptores, el modelo final del accionamiento para un SRM basado en un convertidor convencional de dos interruptores por fase sigue siendo comercial mientras el número de fases sea menor.

El control por histéresis es modelado para controlar las corrientes de fase, aunque cualquier control de corriente puede ser representado en el modelo del accionamiento.

En las secciones precedentes, se ha descrito el modelo no lineal del accionamiento de un motor de reluctancia, a partir de la presentación de la característica magnética no lineal del motor. Las características no-lineales de las curvas de enlace de flujo, corriente y posición del rotor son necesarias y son representadas por tablas *look-up*.

La principal ventaja de la representación del modelo magnético del motor es que la generación de tablas es un método ampliamente conocido, y aunque su problema siempre ha sido la obtención o manipulación de datos, hoy en día ellos pueden ser accedidos fácilmente a través de un programa de elementos finitos o a partir de una cantidad mínima de datos proporcionados por un registro experimental.

El modelo no lineal puede estimar las curvas de operación del accionamiento en condiciones de saturación o de analizar las características estáticas y dinámicas antes de su manufacturación. Además, de ser una herramienta óptima para la estrategia de control *offline* para cualquier aplicación. Los límites de velocidad de cada rango de operación podrán ser obtenidos a través de simulación, a par constante, potencia constante o en su modo natural.

REFERENCIAS

- [1] J. Salsench, "Accionaments per a motors de reluctància conmutada", Tesis de Ingeniería. *Universitat Rovira I Virgili*, Sept. 2003
- [2] X. Wang, "Modelling and implementation of controller for switched reluctance motor with ac small signal model", Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [3] R. M. Davis, W. F. Ray, R. J. Blake., "Inverter drive for switched reluctance motor: circuits and component ratings," *Electric power Applications, IEE Proceedings B*, vol. 128, pt. B, no. 2, Mar. 1981.
- [4] B. Fahimi, G. Suresh, J. Mahdavi, M. Ehsani, "A new approach to model switched reluctance motor drive application to dynamic performance prediction, control and design", *IEEE PESC 98 Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2097-2102 vol.2., May. 1998.
- [5] S.H. Mao, M.C. Tsai, "An analysis of the optimum operating point for a switched reluctance motor", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 282, pp.53-56, 2004.
- [6] K. Chong-Chul, H. Jin, H. Dong-Seok, "Simulation of a switched reluctance motors using Matlab/M-file", *IEEE IECON 02 Industrial Electronics Society*, pp. 1066-1071 vol.2., 2002.
- [7] D.A. Torrey, X.M. Niu, E.J. Unkauf, "Analytical modeling of variable- reluctance machina magnetization characteristics", *IEE Proceedings Electronics. Power Appl.*, vol.142., No1, January 1995.
- [8] R. Krishnan, "Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design and applications", *Industrial Electronics Series*, CRC Press, Boca Raton, 2001.
- [9] T.J.E. Miller, "Electronic control of switched reluctance machine", *Newnes Series*, 2001.
- [10] F. Soares, P.J. Costa Branco., "Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment", *IEEE Trans. Aerospace Electr. Systems*, vol 37, no 3, Jul 2001
- [11] S.M. Castano, J. Maixé, "Control de la temperatura en un vehículo bajo la actuación del accionamiento de reluctancia conmutada", *Proc. Seminario de Automática, Electrónica e Instrumentación SAAE 2010*, Bilbao, Julio 2010.
- [12] A.Martínez, "Accionamiento con motor de reluctancia conmutada optimizado para una lavadora domestica", *Universitat D'Estiu 2007 de la Universitat Rovira i Virgili.*, Presentación., Julio 2007
- [13] C. Pollock and B. W. Williams, "Power converter circuits for switched reluctance motors with the minimum number of switches," *Proc. Inst.Elec. Eng.*, vol. 137, pt. B, no. 6, Nov. 1990, pp. 373-384.
- [14] R. Krishnan, P. Materu, "Design of a single switch per phase converter for switch reluctance motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, pp. 469-476, Dec. 1990.
- [15] M. Ehsani, I. Husain, K. R. Ramani, J. H. Galloway, "Dual decay converter for switched reluctance motor drives for low-voltage applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 8, pp. 224-230, Apr.1993.