



# Análisis por medio de la simulación de un accionamiento con motor de reluctancia conmutada

Javier Muñoz  
Mario Morera  
Elio Castro

Recibido: Octubre del 2007  
Aprobado: Diciembre del 2007

## Resumen / Abstract

Se presentan los fundamentos teóricos que modelan el comportamiento de los motores de reluctancia conmutada y sus accionamientos. Se exponen las características constructivas generales, las ecuaciones diferenciales que constituyen el modelo matemático del motor y se describen los bloques en Simulink utilizados para la simulación. El sistema modular se valida comparando el comportamiento de las variables de salida con señales obtenidas experimentalmente. Es empleado, además, para realizar diversos estudios sobre la instalación. Los resultados obtenidos en cada corrida son reflejados y se exponen las condiciones de operación y la explicación teórica de lo obtenido.

Palabras clave: Matlab, motor de reluctancia conmutada, simulación, Simulink

This paper presents the theoretical basis that models the behavior of The switched reluctance machines and their drives. The general characteristics, the differential equation system that constitutes the mathematical model of the motor and the Simulink's blocks, which have been built for running the simulation, are outlined. The results of the simulation have been shown and compared with those obtained experimentally. The Simulink model is used for studying the Switched Reluctance motor drive behavior under some operation conditions and theoretical explanations for the simulation's results are given in every case.

Key words: Matlab, switched reluctance motor, simulation, Simulink.

## INTRODUCCIÓN

Los motores de reluctancia conmutada (MRC) están compuestos por un estator y un rotor con polos salientes. En los rotores de los MRC no se encuentran conductores ni imanes permanentes. Los números de polos en el estator ( $N_S$ ) y en el rotor ( $N_R$ ) son, en general, diferentes. Los enrollados del estator del MRC son enrollados concentrados, que son más baratos que los enrollados distribuidos.<sup>1</sup>

El principio físico en el cual se basa el funcionamiento del MRC es tal, que cuando es energizado un par de polos del estator, el correspondiente par de polos del rotor es atraído para minimizar la reluctancia de la trayectoria que recorre el campo electromagnético. Energizando las restantes fases del estator en sucesión, es posible desarrollar un momento constante en cualquier dirección de rotación.<sup>1</sup> El par electromagnético desarrollado es independiente del sentido de circulación de la corriente.

En general, las ecuaciones de voltaje del motor de reluctancia conmutada en el sistema de referencia del estator, tienen la siguiente forma:

$$u_{Sj} = R_S i_{Sj} + \frac{d\psi_{Sj}}{dt} \quad \dots(1)$$

donde:

j: Fase analizada.

$R_S$ : Resistencia de fase del estator.

$\Psi_{Sj}$ : Flujo magnético del devanado  $S_j$  del estator.

Asumiendo que no existe acoplamiento mutuo entre las fases del estator, la expresión 1 puede ser desarrollada de la siguiente manera:

$$u_{SA} = R_S i_{SA} + \frac{\partial \psi_{SA}}{\partial i_{SA}} \frac{di_{SA}}{dt} + \frac{\partial \psi_{SA}}{\partial \theta_R} W_R \quad \dots(2)$$

donde:

$$W_R = \frac{d\theta_R}{dt} \quad \dots(3)$$

es la velocidad del rotor y

$$L_D = \frac{\partial \psi_{SA}}{\partial i_{SA}} \quad \dots(4)$$

es la inductancia dinámica, que cambia su valor en dependencia de la posición del rotor y los niveles de saturación. El tercer sumando de la expresión 2 es un voltaje rotacional.

El par electromagnético instantáneo para una fase puede expresarse como aparece a continuación:

$$M_{EM} = \left. \frac{\partial W_C(\theta_R, i_{SA})}{\partial \theta_R} \right|_{i_{SA} = \text{cte.}} \quad \dots(5)$$

donde:

$$W_C = \int_0^i \psi_{SA}(\theta_R, i_{SA}) di \quad \text{es la coenergía.}^{1-3} \quad \dots(6)$$

### Descripción de la instalación

La instalación consiste en el accionamiento de un MRC y su esquema en bloques se puede apreciar en la figura 1.

El MRC es un motor de cuatro fases, con cuatro polos por fase. En la figura 2 se muestra un corte transversal del motor.<sup>4,5</sup> Los datos más importantes del motor aparecen tabulados en la tabla 1.

### Simulación y análisis de los resultados

Para el desarrollo de los modelos y la simulación del accionamiento se seleccionó el Simulink del Matlab.<sup>6</sup> Se decidió tener en cuenta las alinealidades del MRC con el objetivo de obtener resultados más exactos, y las mismas se implementaron a partir de la utilización de tablas de look up de dos dimensiones. En dichas tablas de look up se recogen los comportamientos de la inductancia dinámica por fase, la derivada de flujo con respecto a la posición del rotor y el par electromagnético. Los mismos se muestra en las figuras 3, 4 y 5 respectivamente.

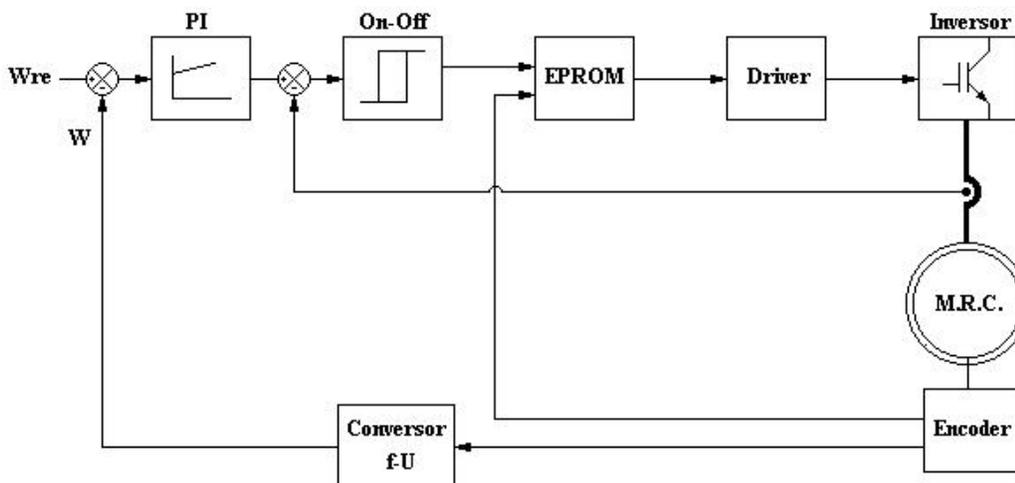
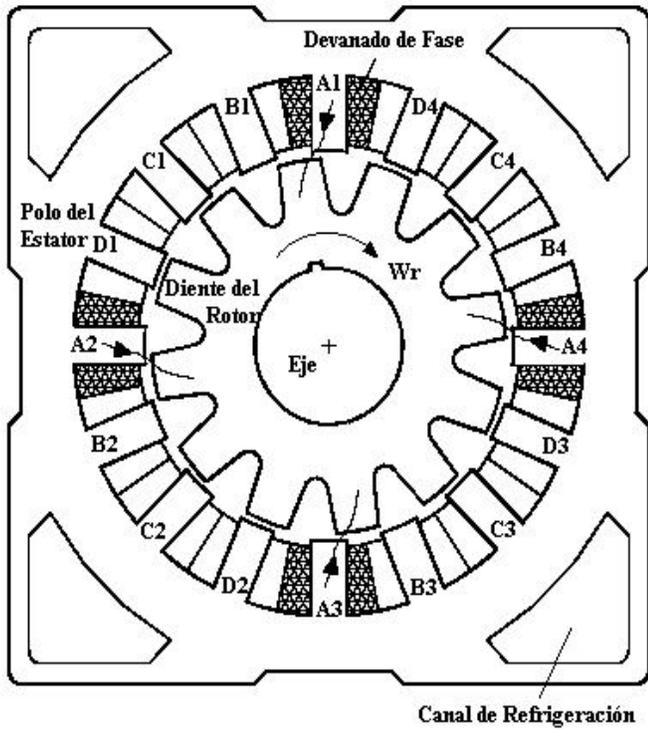


Diagrama en bloques del lazo de control de la velocidad del rotor. Como sensor de posición es utilizado un encoder absoluto. La señal de retroalimentación de velocidad es obtenida de un conversor voltaje-frecuencia que toma información de la posición desde el encoder. Los sensores de corriente son de efecto hall.

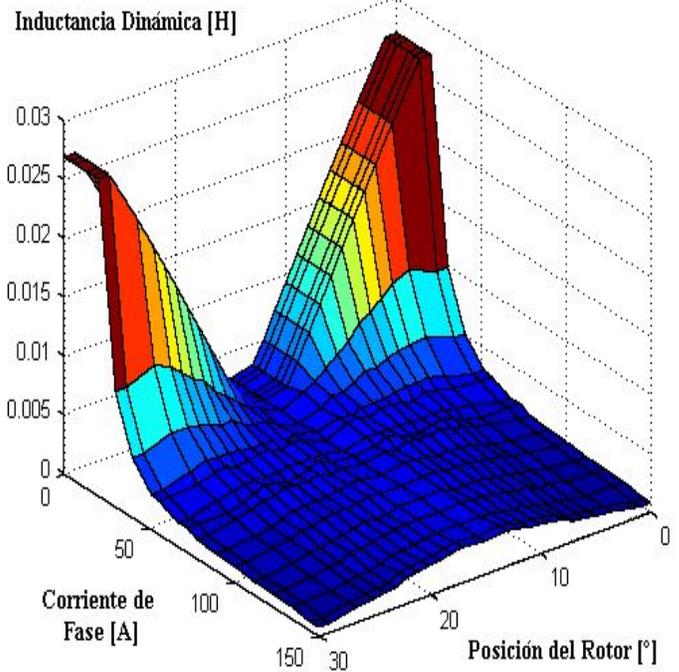


Corte transversal del motor de reluctancia conmutada de cuatro fases en el estator, cuatro polos por fase y 12 dientes en el rotor. Los enrollados en polos diametralmente opuestos son conectados en serie para conformar un par de polos y los pares de polos pertenecientes a una misma fase se conectan en paralelo. 2

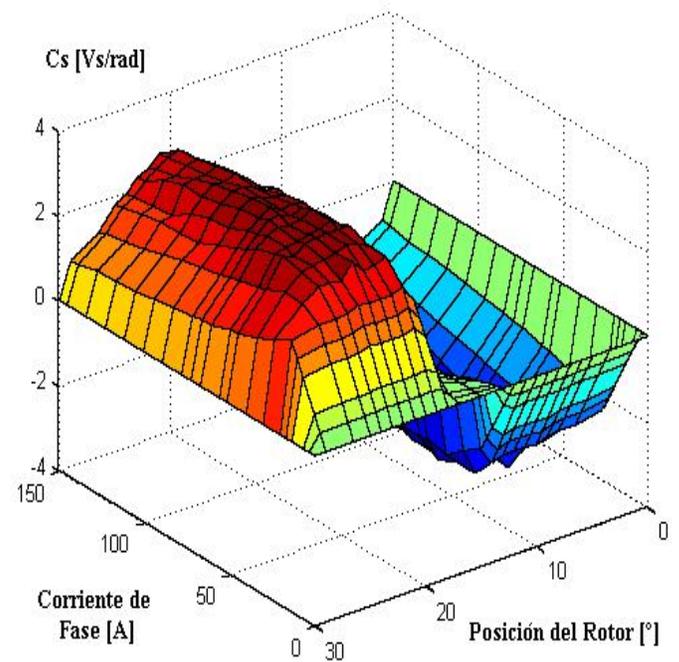
El subsistema concebido para la simulación de la ley de Kirchhoff para tensiones se muestra en la figura 6, y el que simula la ecuación mecánica del MRC se muestra en la figura 7.<sup>7</sup>

**Tabla 1**  
Datos de catálogo del motor

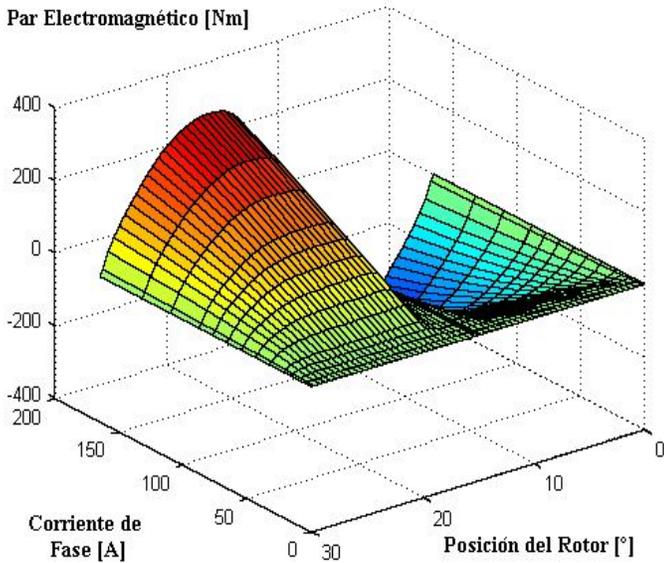
Dato	valor
Potencia nominal (kW)	18,5
Velocidad nominal (r/min)	1 500
Momento nominal (Nm)	117
Momento de inercia (kgm <sup>2</sup> )	0,088 3
Eficiencia nominal (%)	93
Corriente nominal (A)	60
Voltaje nominal (V)	750
Resistencia por fase (f)	0,155



Comportamiento de la inductancia dinámica por fase del estator. 3



Derivada de flujo con respecto a la posición del rotor. 4



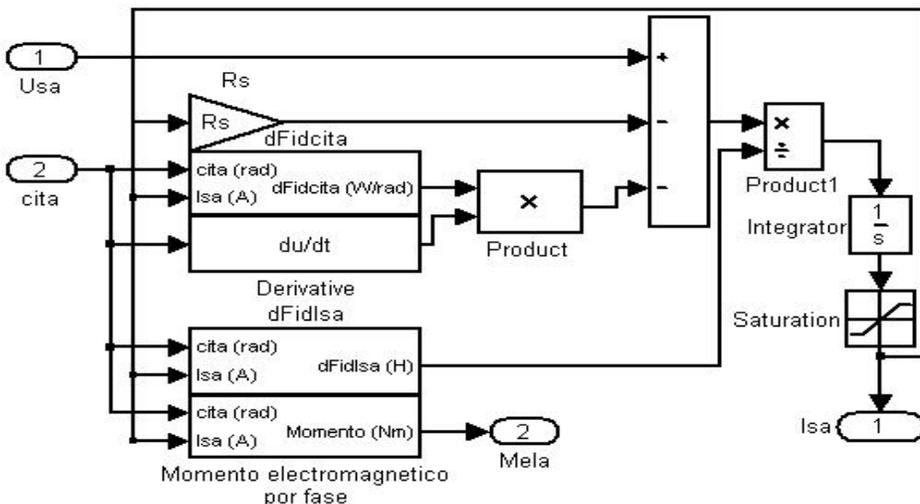
Momento electromagnético por fase del motor.

5

Para la simulación del lazo de control del accionamiento se conformó el esquema que aparece en la figura 8. Este fue utilizado con el propósito de estudiar el comportamiento en estados estable y transitorio, y en diferentes condiciones de operación, de variables tales como la velocidad del rotor, el par electromagnético, el error de velocidad y las corrientes de fase entre otros.

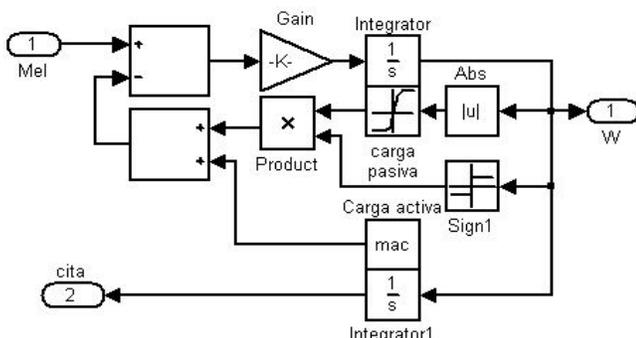
Con el objetivo de validar el modelo obtenido fueron comparadas las formas de onda medidas en la instalación experimental real, con los resultados de la simulación. En la figura 9 se observan las señales de tensión y corriente de fase para una velocidad de 400 r/min y 30 Nm de par de carga mecánica.

Para la obtención de las características mecánicas (estáticas) del motor de reluctancia conmutada se inhabilitó el lazo de control de corriente del modelo, lo cual se consiguió programando valores de salidas idénticos para los dos estados de los controladores histerésicos e iguales a la tensión que se desea aplicar al MRC. Hecha esta modificación el lazo de control de la velocidad queda igualmente inhabilitado por lo que el motor opera a lazo abierto y se puede obtener su característica mecánica.



Subsistema desarrollado para la simulación de la ley de Kirchhoff para tensiones de fase del motor.

6



Subsistema desarrollado para la simulación de la ecuación mecánica del MRC.

7

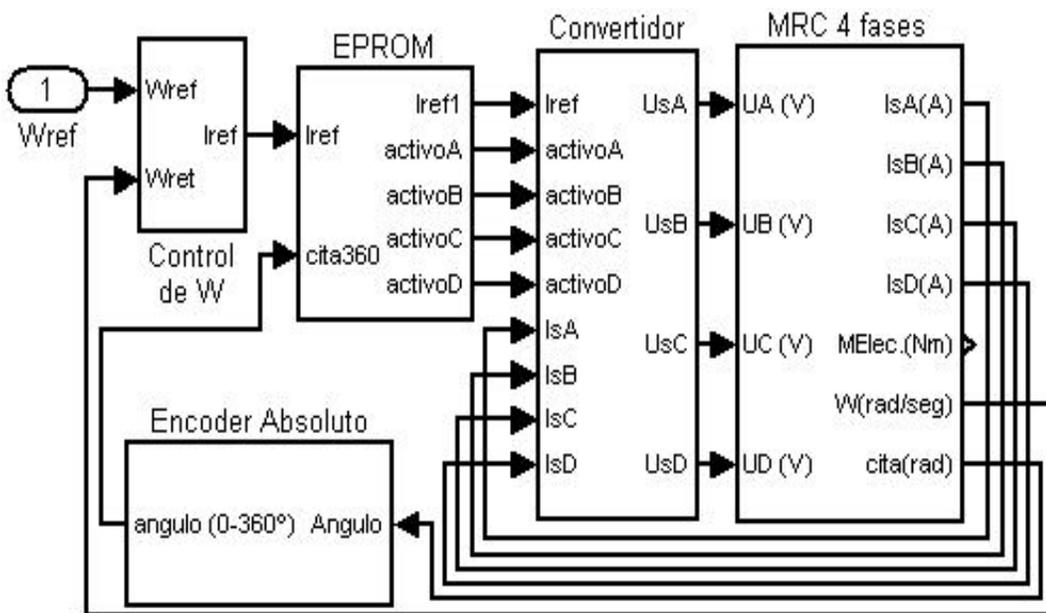
En la figura 10 se pueden apreciar tres curvas de velocidad del rotor en estado estable, en función del par de carga para tres tensiones diferentes.

Para el análisis de la respuesta del sistema ante un cambio de la señal de referencia en forma de escalón, se realizó la corrida de la cual se muestran los resultados en las figuras 11, 12 y 13. En la simulación se realizaron tres cambios a intervalos de la señal de referencia. En la tabla 2 se recogen los datos de los

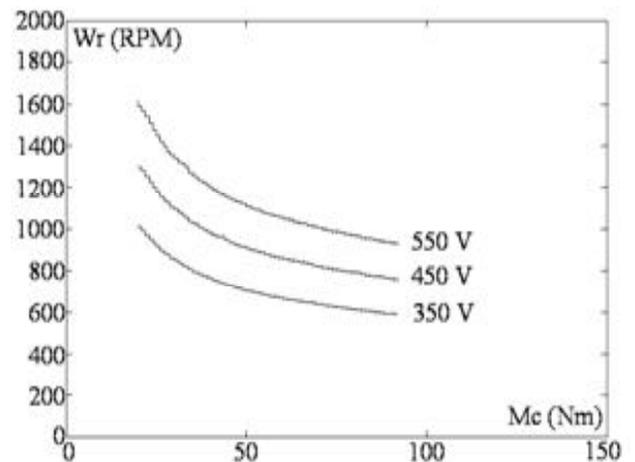
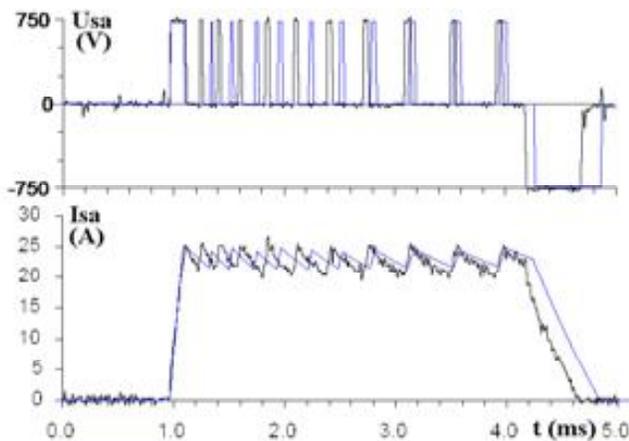
valores de momento de inercia, momento de carga, limitación de corrientes de fase y el ajuste de los reguladores de velocidad y corriente.

En la figura 11 se aprecia que el tiempo de establecimiento de la velocidad en el arranque es de aproximadamente 0,45 s. Se aprecia también que no ocurren sobre oscilaciones en la respuesta transitoria durante ninguna de las transiciones. En la figura 13 se comprueba que el error de velocidad en estado

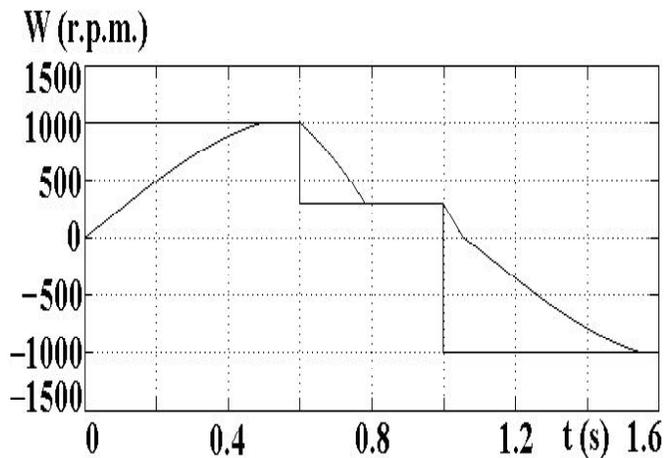
estacionario es siempre menor que 1,6 r/min lo que equivale a un error porcentual con respecto a la referencia de un 0,16. En la figura 12 aparece la forma de onda del par electromagnético del motor. En ella se pueden observar las oscilaciones inherentes a esta señal producto de la estrategia de control utilizada en la instalación, y el comportamiento de la amplitud de las mismas para los procesos de aceleración, frenaje y operación en estado estacionario.<sup>8</sup>



Modelo para la simulación del lazo de control de la velocidad

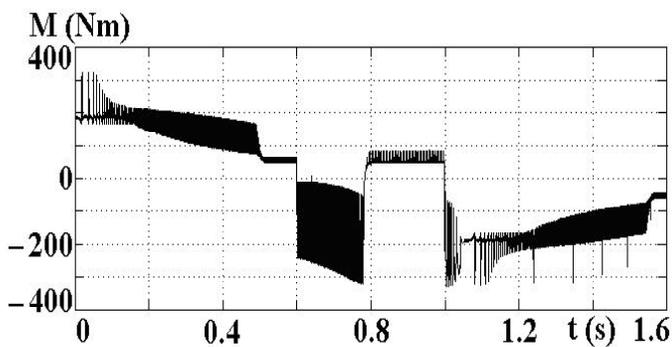


Características mecánicas del motor.



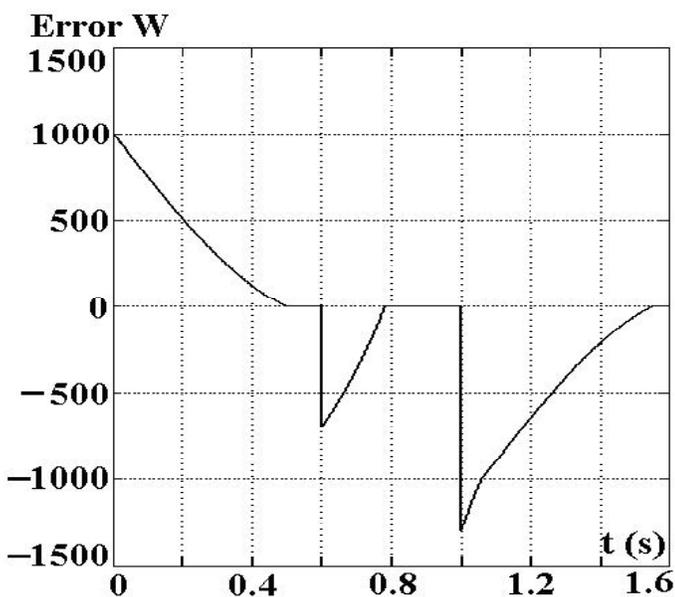
Señal de referencia con cambio en forma de escalón y velocidad del rotor.

11



Momento electromagnético del MRC en estados estacionario y transitorio.

12



Error de la velocidad en el accionamiento.

13

**Tabla 2**  
Condiciones de operación del sistema

Datos	Valor
Kp	55
Ki	1,5
Límite de corriente máxima (A)	90
Banda de histéresis de corriente (A)	1
Momento de inercia del motor (kgm <sup>2</sup> )	0,883
Momento de inercia de la carga (kgm <sup>2</sup> )	0,46
Momento de carga (NM)	50

## CONCLUSIONES

1. El modelo obtenido permite el análisis de las formas de onda de la velocidad, el par electromagnético, las tensiones y las corrientes de fase, para diferentes estados de carga del motor, ángulos de conmutación, valores de tensión de alimentación y ajustes de los reguladores.
2. La utilización de tablas de look up de dos dimensiones permite la simulación de la inductancia dinámica, la derivada del flujo con respecto a la posición del rotor y el par electromagnético del motor, teniendo en cuenta las no linealidades.
3. Los resultados que se obtienen a partir del sistema modular confeccionado en Simulink fueron validados al ser comparados con resultados experimentales.

## REFERENCIAS

1. **Vas, Peter:** Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford University Press, Inc., New York, 1998.
2. **Fitzgerald, A. E. and C. Kingsley:** Electric Machinery, 6ta. ed., USA, 2003.
3. **Boldea, I. and S. A. Nassar:** Electric Drives, USA, 1992.
4. **Wolff, J.:** Geschalteter Reluktanzmotor Drehmomentstarker Electromotor mit leinem Bauvolumen, Alemania, 1997.
5. **Wolff, J. y G. Gómez:** "El motor de reluctancia conmutado: Un motor eléctrico con gran par motor y poco volumen", Energía, No. 4, pp. 113-115, agosto, 1997.
6. **Llanes Vilaragut, M.:** "Identificación neuronal del generador sincrónico y su sistema de excitación para la detección de cortocircuitos entre espiras del rotor", Tesis presentada en opción al grado

científico de doctor en Ciencias Técnicas, Ciudad de La Habana, 2002.

**7. Costa, A.:** Sistema modular de simulación dinámica del motor de inducción trifásico jaula de ardilla, Informe de Investigación, CIPEL, Ciudad de La Habana, Cuba, julio, 2002.

**8. Muñoz Álvarez, Javier:** "Estudio y simulación de un accionamiento con motor de reluctancia conmutada", Tesis en opción al grado científico de máster en Ingeniería Eléctrica, Ciudad de La Habana, noviembre, 2004.

## AUTORES

### Javier Muñoz Álvarez

Ingeniero Electricista, Instructor, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Super-

rior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:javiern@electronica.cujae.edu.cu

### Mario Morera Hernández

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Eléctrica, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:marmor@electronica.cujae.edu.cu

### Elio Castro Alfonso

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Asistente, Departamento de Ingeniería Eléctrica, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:eca@electronica.cujae.edu.cu



EL CIER es la Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética que se celebra en Cuba cada dos años, ahora en su sexta edición.

La misión del CIER es brindar un espacio para compartir experiencias y crear sinergias entre científicos, profesionales, empresarios y otros especialistas frente al reto de lograr una cultura energética sostenible.

El evento es organizado por el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), de La Habana, con su Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), quienes convocan al mismo junto a la Universidad Técnica de Energía Renovable (UTER) del Ministerio de Educación Superior y el Grupo Nacional de Energía Renovable, Cogeneración, Ahorro y Eficiencia Energética.

Fecha de desarrollo del evento: 9-12 de Junio 2009, en Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba  
Dirección del evento en Internet: <http://www.ciercuba.com/>

