



## Análisis multifísico de un motor de reluctancia conmutada de rotor exterior usando elementos finitos

### Multiphysics analysis of an in wheel switched reluctance motor using finite elements

Harold David Puin Ávila<sup>1</sup>, Luis Antonio Noguera Vega<sup>2</sup>,  
Jhovan Hernán Caicedo Morera<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** Agosto 28 de 2015

**Fecha de aceptación:** Septiembre 25 de 2015

**Como citar:** Puin, H., Noguera, L. & Caicedo, J. (2015). Análisis multifísico de un motor de reluctancia conmutada de rotor exterior usando elementos finitos. Revista Tecnura, 19 (CITIE), 151-156. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a17>

#### Resumen

En este artículo se presenta el proceso de modelado y simulación de un motor de reluctancia conmutada de rotor exterior para aplicaciones automotrices, mediante el software de análisis por elementos finitos COMSOL Multiphysics V4.4, obteniendo el cálculo de variables magnéticas, eléctricas y mecánicas, con una convergencia de  $10e-3$  para un máximo de 11 iteraciones, aplicando el algoritmo de Newton-Raphson. Estableciendo con buena exactitud el comportamiento del motor durante su funcionamiento, el cual desarrolla un torque de 13 Nm a una corriente de 12 A.

**Palabras claves:** Elementos finitos, motores de reluctancia conmutada, tracción directa,.

#### Abstract

In this paper are presented the modeling process and simulation of a In Wheel Switched Reluctance Motor for EV applications, through finite element analysis software COMSOL Multiphysics V4.4, is obtained the calculation of magnetic, electric and mechanical variables, with a convergence of  $10e-3$  and maximum iteration of 11, applying the Newton Raphson algorithm, is established with a good accuracy the behavior of the machine during operation, this motor development a torque of 13 Nm to 12 A current.

**Keywords:** Direct drive, finite elements, switched reluctance motor,

<sup>1</sup> Tecnólogo en Electricidad, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: [hdpuina@correo.udistrital.edu.co](mailto:hdpuina@correo.udistrital.edu.co).

<sup>2</sup> Ingeniero en Distribución y Redes eléctricas, Especialista en automatización industrial Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: [lanoguera@udistrital.edu.co](mailto:lanoguera@udistrital.edu.co)

<sup>3</sup> Tecnólogo en Electricidad, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: [jhcaicedom@correo.udistrital.edu.co](mailto:jhcaicedom@correo.udistrital.edu.co).

## INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos actuales por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero generados por los motores de combustión interna, han incrementado las investigaciones enfocadas en el diseño y desarrollo de motores eléctricos para tracción vehicular, para lo cual se está implementando avanzados software de modelado y simulación por elementos finitos, (Yildirim, Polat, Oksuztepe, & Omac, 2014), los cuales utilizan EDPs (Ecuaciones Diferenciales Parciales), para el modelado de sistemas físicos, permitiendo de esta manera agilizar y reducir costos en los procesos de diseño y fabricación de prototipos de estas máquinas, al validar modelos teóricos (Pađurariu, Somesan, Viorel, & Martis, 2010) y obtener variables de interés que puedan ser utilizadas en etapas de control (Lin, Zhou, Stanton, & Cendes, 2008). Enmarcado en esta investigación, se encuentra como alternativa, el motor de reluctancia conmutada de rotor exterior (Yang, Shang, Brown, & Krishnamurthy, 2015), al tener como principales características la transmisión directa de la potencia del motor a la rueda, una estructura simple, fabricación económica, la inexistencia de pérdidas por efecto joule en el rotor, un control robusto (Omekanda, 2013) y cuyo principio de funcionamiento se basa en el par reluctante que aparece sobre el rotor al excitar los polos del estator, el cual tiende a alinear los polos de la máquina obteniéndose el giro del motor.

## MODELADO Y SIMULACIÓN DEL MOTOR

En el estudio de las variables electromagnéticas y mecánicas se implementó la interface de campos magnéticos y máquinas rotativas respectivamente, del modulo AC/DC de COMSOL Multiphysics V4.4, con dimensiones de modelado en 2D y 3D, para un estudio de tipo estacionario. El proceso de modelado es descrito a continuación.

### Especificaciones

Las características del motor, presentadas en la tabla 1, fueron calculadas a partir del modelo de circuito magnético del motor (Sakthivel, Chandrasekar, & Arumugam, 2011) y los procedimientos de diseño para motores de reluctancia conmutada (Krishnan, 2001), estableciendo como requisito técnico que el motor desarrolle un torque máximo equiparable a un motor de combustión interna de bajo cilindraje de motocicleta (100 – 150cc), como requisito geométrico que el motor se pueda acoplar a una rueda de motocicleta y considerando con igual importancia que el material constructivo sea Silicon Steel M22, el cual tiene una densidad de campo de saturación entre 1.4T y 1.6T.

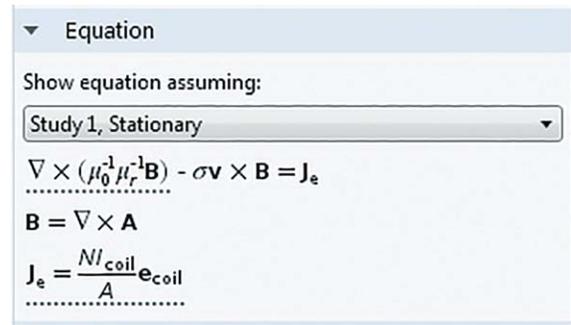
**Tabla 1.** Especificaciones para el modelado por MEF.

<b>Número de polos en el estator</b>	<b>8</b>	<b>Diámetro del eje (Dsh)</b>	<b>7.9 cm</b>
Número de polos en el rotor	6	Altura del polo estatórico (hs)	6 cm
Corriente nominal	12 A	Altura del polo rotórico (hr)	2 cm
Diámetro exterior (D0)	40 cm	Número de vueltas por fase	142
Diámetro interior (D)	20 cm	Número de vueltas por polo	71
Longitud del entrehierro(g)	0.5 mm	Altura de los devanados	3.9072 cm
Arco del polo estatórico	22 °	Ancho de los devanados	4.884 mm
Arco del polo del rotor	23 °	Longitud del motor (L)	6.5 cm

**Fuente:** Elaboración propia.

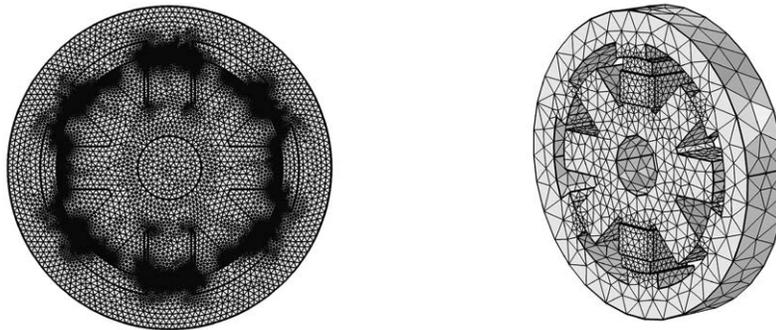
## Metodología de simulación

El proceso de simulación del motor, inicia con la selección del tipo de espacio de trabajo, teniendo como principales opciones el modelado geométrico en 2D y 3D, luego se definen los componentes y materiales del modelo, se selecciona la interfaz de simulación física que regirá el sistema a simular, configurándose a partir de las características del motor (figura 1) y se establecen las condiciones para el cálculo de resultados.



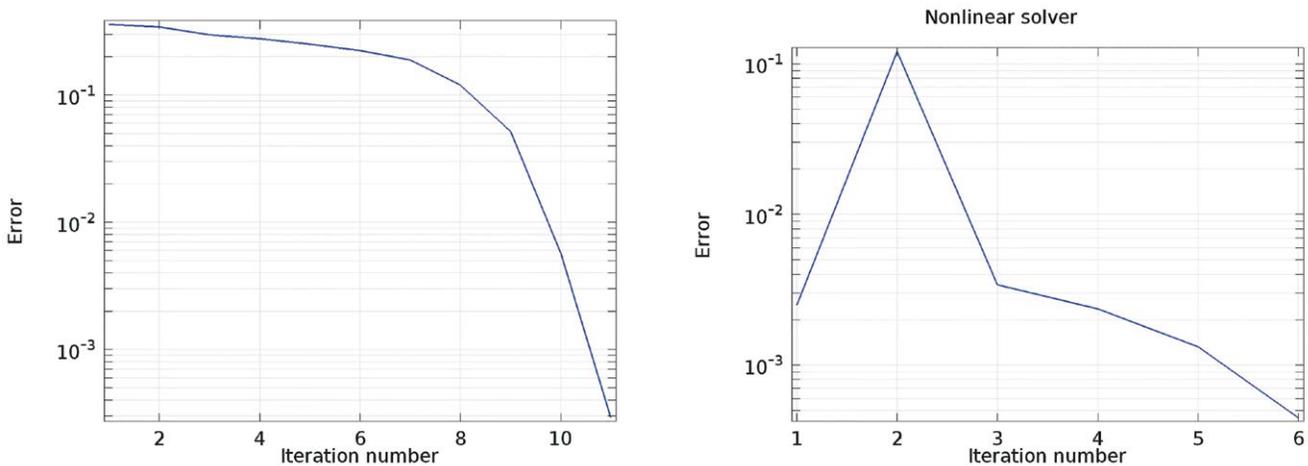
**Figura 1.** Ecuaciones implementadas por el software para el modelado y simulación de los bobinados del motor.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 2.** Mallado de elementos finitos para los modelos 2D y 3D del motor.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 3.** Informe de convergencia de la simulación en 2D (derecha) y 3D (izquierda).

**Fuente:** Elaboración propia.

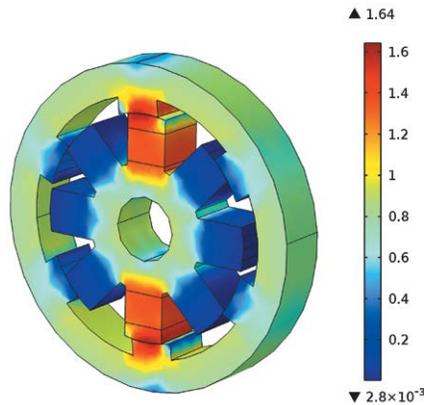
El proceso de modelado continua, al establecer el tipo de estudio y construcción de la malla de elementos finitos, siendo esta de 108190 y 50058 elementos para el caso de los modelos 2D Y 3D, respectivamente, tal como se observa en la figura 2, la precisión de los resultados esta directamente influenciada por la cantidad de elementos y nodos de estas mallas.

El modelado y simulación del sistema, finaliza cuando el programa arroja el informe de procesamiento de datos, el cual incluye la cantidad de iteraciones realizadas y la evolución histórica de convergencia hacia el error deseado, tal como se observa en la figura 3.

## RESULTADOS

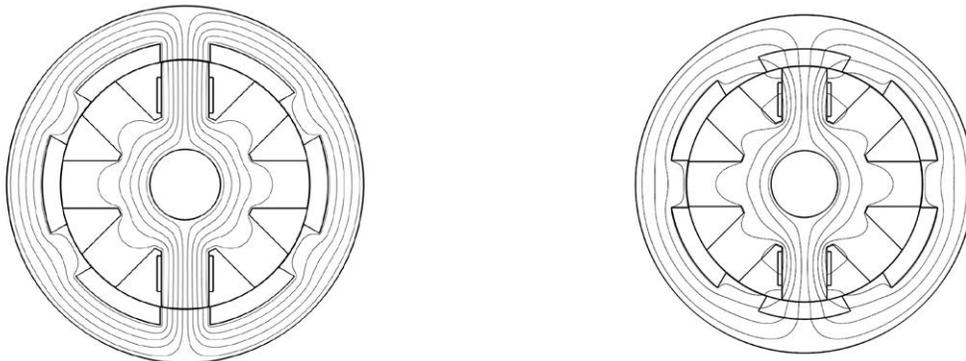
### Densidad de campo magnético y flujo magnético.

En la figura 4 se observa la densidad de campo magnético en la estructura del motor, alcanzando un máximo de 1.5 T en la sección central, producto de la disminución de la reluctancia equivalente del circuito magnético del motor al disminuir la longitud del entrehierro, durante la transición de posiciones de desalineamiento polar a alineamiento polar. Viéndose afectado de igual manera en este proceso el flujo magnético, el cual alcanza



**Figura 4.** Densidad de campo magnético en la estructura del motor.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 5.** Distribución del flujo magnético en desalineamiento y alineamiento polar.

**Fuente:** Elaboración propia.

un valor máximo en posición de alineamiento de 4,8 mWb y tal como se observa en la figura 5, presenta cambios considerables durante el funcionamiento del motor, ocasionando que el motor presente un comportamiento no lineal y generando a altas velocidades del rotor, corrientes de Foucault en la estructura de la máquina, disminuyendo la eficiencia del sistema.

### Resistencia, tensión, corriente y potencia en los devanados

La tabla 2 expone magnitudes eléctricas constantes como la resistencia, la cual depende únicamente de las características constructivas o en el caso de la corriente, tensión y potencia que depende de los parámetros preestablecidos en la fuente de alimentación. Sin embargo, también se observan magnitudes eléctricas variables como la inductancia que se ve afectada por la considerable

variación del flujo magnético durante el funcionamiento del motor.

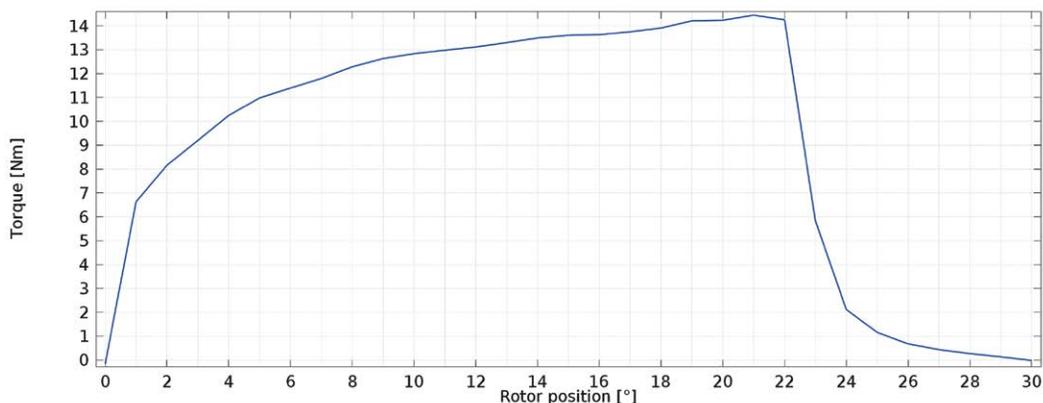
### Torque

El comportamiento simulado del torque para la transición de posiciones de desalineamiento polar(30°) a alineamiento polar(0°) y para una corriente en los devanados del motor de 12 A, se muestra en la figura 6, teniendo un valor promedio de 13 Nm y del cual se puede deducir, que debido a las oscilaciones presentadas la potencia de salida se verá afectada, presentando un comportamiento similar, sin embargo, el torque generado se encuentra dentro de los valores planteados para una aplicación de tracción vehicular, puesto que el torque desarrollado por motocicletas que tienen motores de combustión interna de entre 100 y 150 cc de cilindraje esta entre los 10Nm y los 13Nm, respectivamente.

**Tabla 2.** Variables eléctricas calculadas por AEF

Variable	Valor	Variable	Valor
Corriente en el devanado	12 A	Resistencia del devanado	0.29493Ω
Potencia consumida	42.4702 W	Inductancia en desalineamiento	9.4 mH
Tensión en el devanado	3.53918 Vdc	Inductancia en alineamiento	57.5 mH

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 6.** Torque generado por el motor desde la posición de desalineamiento polar a la de alineamiento polar.

**Fuente:** Elaboración propia

## CONCLUSIONES

El software de modelado, análisis y resolución por elementos finitos es una opción mas eficiente en comparación con la construcción de prototipos de motores para tracción vehicular, al ser una poderosa herramienta que le permiten a los diseñadores analizar el comportamiento de estas máquinas y plantear diseños.

El motor de reluctancia conmutada de rotor exterior presentado en este documento, trabaja dentro de los valores magnéticamente recomendados por los autores, al estar justo en el codo de saturación de la curva de magnetización del material constitutivo.

Las razones del complejo modelo de control que implementan en general los motores de reluctancia conmutada, se debe a la fuerte variación de la inductancia del circuito equivalente del motor.

El motor de reluctancia conmutada de rotor exterior expuesto en este artículo alcanza la máxima eficiencia cuando inicia el proceso de sobreposición de polos del rotor y estator, a partir del cual comienza a disminuir, registrándose la mínima eficiencia cuando los polos están completamente alineados.

## FINANCIAMIENTO

Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

- Krishnan, R. (2001). *Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. Blacksburg, Virginia: CRC Press.
- Lin, D., Zhou, P., Stanton, S., & Cendes, Z. (2008). A dynamic analytical model for switched reluctance motors. *IEEE*, 1-6.
- Omekanda, A. M. (2013). Switched reluctance machines for EV and HEV propulsion: State of the art. *IEEE*, 70-74.
- Pădurariu, E., Somesan, L., Viorel, I. A., & Martis, C. S. (2010). Switched Reluctance Motor Analytical Models, Comparative Analysis. *IEEE*, 285-290.
- Sakthivel, P., Chandrasekar, V., & Arumugam, R. (2011). Design of a 250W, low speed switched reluctance hub motor for two wheelers. *IEEE*, 176-181.
- Yang, Z., Shang, F., Brown, I., & Krishnamurthy, M. (2015). Comparative study of interior permanent magnet, induction and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications. *IEEE*, 1.
- Yildirim, M., Polat, M., Oksuztepe, E., & Omac, Z. (2014). Designing in wheel switched reluctance motor for electric vehicles. *IEEE*, 793-798.