

**MOTORES SINCRÓNICOS SIN DEVANADOS EN EL ROTOR
ACCIONADOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA PARA SU
APLICACIÓN EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**

**SYNCHRONOUS MOTORS WITHOUT ROTOR WINDINGS CONTROLLED BY
FREQUENCY CONVERTERS FOR ITS APPLICATION IN ELECTRIC
VEHICLES**

Percy R. Viego Felipe^{}, Julio R. Gómez Sarduy¹ y José R. Fuentes Vega¹*

¹Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cuatro Caminos Carretera a Rodas, km 3 ½,
Cienfuegos, Cuba.

Recibido: Mayo 8, 2017; Revisado: Junio 6, 2017; Aceptado: Septiembre 22, 2017

RESUMEN

Los motores que requieren los vehículos eléctricos deben poseer un comportamiento eficaz, eficiente y económico. El acelerado desarrollo de la electrónica de potencia y del control de velocidad con convertidores de frecuencia permite emplear sistemas de velocidad ajustable dentro de un amplio intervalo. En este trabajo, a partir de estudios realizados en la literatura especializada, fueron comparados distintos tipos de motores sincrónicos sin devanados en el rotor para estos vehículos. Las comparaciones se realizaron en base a momento y potencia, pérdidas y eficiencia, factor de potencia, costos y otros aspectos de los motores sincrónicos de imán permanente, sincrónicos de reluctancia y sincrónicos de reluctancia asistidos por imanes permanentes. Esto permitió valorar la mejor variante técnico económica. Se evidenció que el último tipo, utilizando imanes de ferrita, asegura menor costo, con altos valores absolutos y de densidad de momento y de potencia, elevada eficiencia y alto factor de potencia.

Palabras clave: vehículos eléctricos; motores sincrónicos para vehículos eléctricos; control de velocidad; convertidores de frecuencia.

Copyright © 2018. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Percy R. Viego, Email: pviego@ucf.edu.cu

ABSTRACT

Electric motors required by electric vehicles must be effective, efficient and economical. The accelerated development of power electronics and speed control with frequency converters allows the use of adjustable speed systems within a wide range. From a study of specialized literature, different types of synchronous motors without rotor windings were compared in this paper for these vehicles. Comparative assessments were made, based on momentum and power, losses and efficiency, power factor, costs and other characteristics of synchronous permanent-magnet motors, synchronous reluctance motors and synchronous reluctance motors assisted by permanent magnets. This allowed assessing the best technical-economic variant. It was shown that the last one, using ferrite magnets, ensures the lowest cost, with high absolute values and density of momentum and power, high efficiency and high power factor.

Key words: electric vehicles; synchronous motors for electric vehicles; speed control; frequency converters.

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas que provoca el uso de motores de combustión interna en los vehículos automotores, tienen la mejor solución con el empleo de vehículos eléctricos (EV), accionados por motores eléctricos (Ometto et al., 2015).

El EV es un concepto relativamente nuevo en el mundo de la industria automotriz (Saber y Venayagamoorthy, 2011). Es una gran oportunidad no solamente para ahorrar, sino que también contribuye a un medio ambiente estable y saludable. El impacto medioambiental de los EV es prácticamente cero, y contribuyen a reducir la huella ecológica y a afectar positivamente la economía. Aunque un EV tenga un costo capital mayor, la inversión se recupera satisfactoriamente. Los aspectos positivos ampliamente eclipsan los negativos; y si se entregan subsidios estatales para favorecer el medioambiente, se logra una relación costo/beneficio aún más favorable. Considerando que la demanda de combustible solo se incrementa, mientras que las reservas se agotan, los EV serán muy probablemente el modo normal de transportación en el futuro inmediato (Saber y Venayagamoorthy, 2011), (Ometto et al., 2015).

Cuba debe trabajar en la introducción masiva de los EV en un futuro cercano (como lo están haciendo los países desarrollados) para contribuir al ahorro de energía y a reducir el impacto ambiental.

El objetivo fundamental de este trabajo es comparar los motores sincrónicos sin devanados en el rotor (de imán permanente, de reluctancia y de reluctancia asistidos por imanes permanentes) que se pueden emplear en los EV, desde el punto de vista de sus características operacionales básicas y de los costos, así como recomendar la mejor variante técnico económica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El método empleado consistió en comparar las características constructivas, operacionales y los costos capitales de los motores sincrónicos (sin devanados en el

rotor), de imán permanente, de reluctancia y de reluctancia asistidos por imanes permanentes, controlados por accionamientos de frecuencia variable (AVF), que satisficieran los requerimientos de los motores eléctricos que operan los EV, entre ellas, fundamentalmente, las que se observan en la Figura 1 (Ometto et al., 2015). A partir de los valores obtenidos, se determinan las ventajas y desventajas en un análisis comparativo; y, finalmente recomendar el mejor tipo de motor desde el punto de vista técnico y económico.

La comparación se lleva a cabo a partir de los experimentos realizados por reconocidos autores que han publicado los resultados. Los fundamentales han sido: (Ometto et al., 2015); (Hendershot, 2012) y (Spargo et al., 2015).

Los principales materiales y equipos, están comprendidos en los necesarios para realizar experimentos operacionales a los motores eléctricos, con bancos de prueba e instrumentos eléctricos y mecánicos convencionales, pero alimentando el motor con un AVF de modulación por ancho de pulso (PWM), que permiten variar la velocidad del motor, mediante la aplicación de una onda de tensión que resulte lo mas sinusoidal posible a cada frecuencia (ver Figura 2).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las principales características que deben poseer los motores eléctricos de los EV son: elevados valores de momento y altas densidades de potencia, amplio intervalo de velocidad, amplia capacidad de operar a momento y potencia constantes, alta eficiencia, robustez, fiabilidad y costo razonable. En la Figura 1, puede observarse un esquema de las características de potencia y momento deseables en los motores para vehículos eléctricos (EV).

La demanda de un elevado desempeño de los motores eléctricos para las aplicaciones automotrices requieren del empleo de procedimientos de optimización eficientes y de una selección precisa de los materiales, especialmente del acero electrotécnico (Barcaro et al., 2011).

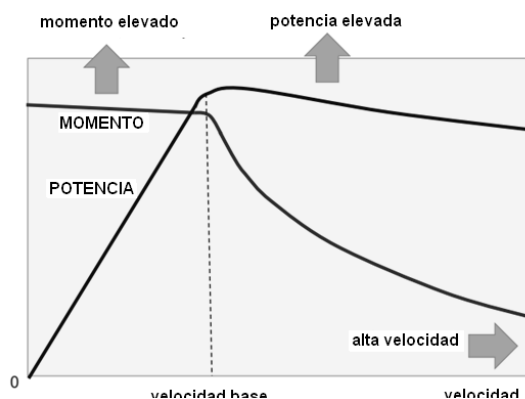


Figura 1. Esquema de las características de potencia y momento deseables en los motores para vehículos eléctricos. Fuente: (Ometto et al., 2015)

3.1. Motores sincrónicos de imán permanente

En la actualidad, la mayoría de los EV utilizan motores sincrónicos de imán permanente (PM-SynM), controlados por AFV. Ellos resultan atractivos porque poseen una alta eficiencia, elevado momento y potencia, y una gran fiabilidad. Compiten ventajosamente con los motores asincrónicos (IM), que eran utilizados inicialmente,

debido a ser despreciables sus pérdidas de cobre en el rotor, al no poseer devanados en el mismo (Hendershot, 2012).

En la Figura 2 puede observarse un esquema de AFV con un convertidor por modulación de ancho de pulso (PWM) accionando un motor sincrónico. Con el AFV se logra programar un comportamiento como el mostrado en la Figura 1, variando la tensión y la frecuencia en los terminales de entrada del motor.

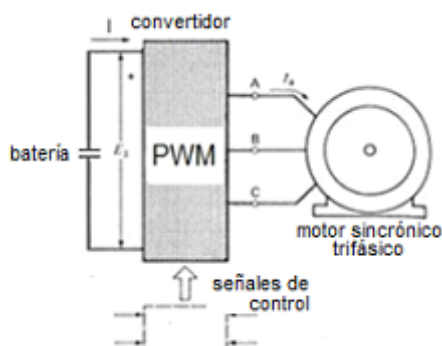


Figura 2. Esquema de AVF tipo PWM accionando un IM. Fuente: (elaboración propia)

En la Figura 3, se muestran esquemas de cuatro de los numerosos diseños de rotor para motores de imán permanente.

Los devanados de los estatores de estos motores, suelen ser análogos a los de los IM para ahorrar en el proceso productivo, aunque pueden encontrarse variaciones buscando mejoras de algunos parámetros, como es el caso de los devanados de ranuras fraccionarias (Spargo et al., 2015).

En la Figura 4, puede observarse un esquema de un PM-SynM con un devanado trifásico convencional de IM en el estator.

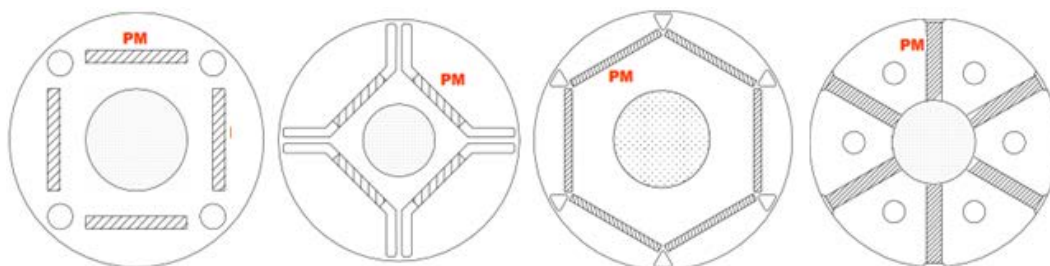


Figura 3. Esquemas de cuatro diseños de rotor para motores de imán permanente para 4 y 6 polos (donde PM son los imanes permanentes). Fuente: (Ometto et al., 2015)

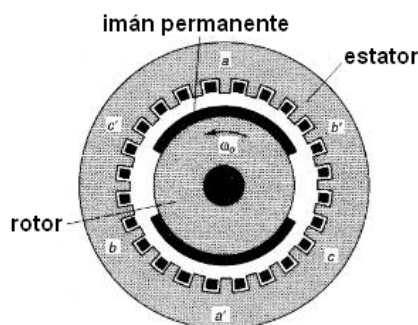


Figura 4. Esquema de un PM-SynM con devanado trifásico convencional en el estator
Fuente: (Ometto et al., 2015)

En la operación, el campo magnético rotatorio del estator se acopla con los imanes permanentes del rotor y esto permite que el rotor gire a velocidad sincrónica. Este acople se logra comenzando el proceso de arranque a una baja frecuencia que se programa en el AFV, sin necesidad de emplear jaula de ardilla en el rotor.

En la Figura 5, se presentan las características de salida de un PM-SynM). Puede observarse que las mismas corresponden a las deseables según la Figura 1, es decir, momento constante hasta la velocidad base y, a partir de allí, potencia aproximadamente constante hasta la velocidad máxima.

El problema fundamental que presenta esta máquina, es que para que se logren los altos valores de momento y potencia deseados, es necesario el uso de imanes potentes, que para lograrlos, hay que emplear tierras raras; por ejemplo, entre los más usados: NdFeB (aleación de neodimio, hierro y boro). Estos imanes cuestan muchas veces más por kg que los de ferrita (ABB Motors y Generators, 2013).

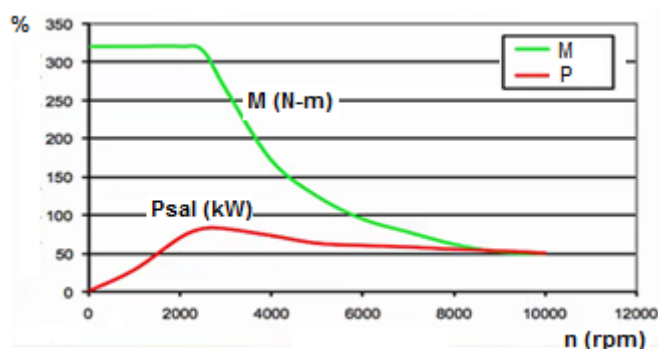


Figura 5. Características de salida de un PM-SynM

(M es el momento (N-m); P_{sal} es la potencia de salida (kW); y n la velocidad (rpm).

Fuente: (Hendershot, 2012)

Otro problema, lo constituye los elevados momentos parásitos. Se han desarrollado métodos para reducirlos, como el presentado en (Spargo et al., 2015), pero que complican y encarecen la fabricación.

3.2. Motor sincrónico de reluctancia

El aumento del costo de los imanes de tierras raras y la inseguridad de las fuentes de obtención de éstas, ha llevado a los productores a buscar alternativas para producir motores sincrónicos de “bajo costo”, sin sacrificar sensiblemente sus características operacionales. Dos variantes fundamentales son los Syn-RM (sin imanes) y los PMA-SynRM con imanes de ferrita.

El estator de los Syn-RM suele estar conformado por el mismo tipo de laminaciones y devanados que los IM (por lo ya mencionado anteriormente). En la Figura 6 se pueden observar dos motores de 4 polos, los cuales sólo difieren por el tipo de laminaciones del rotor.



Figura 6. Motores con las laminaciones colocadas.

a) motor asincrónico; b) motor sincrónico de reluctancia

Fuente: (ABB Motors y Generators, 2013)

En la Figura 7 se muestra una lámina de dos barreras de flujo por polo, para un motor de 4 polos, así como la lámina y la estructura general de un rotor de 4 barreras por polo, para un motor también de 4 polos.

El puente de acero electrotécnico en el núcleo del rotor, tiene que ser cuidadosamente dimensionado, debido a que ellos tienen impacto en el comportamiento del rotor y en la robustez del mismo.

El momento de reluctancia del Syn-RM es producido según el eje d del rotor (menor reluctancia) tiende a alinearse con el eje del campo magnético rotatorio del estator y ambos rotan a velocidad sincrónica.

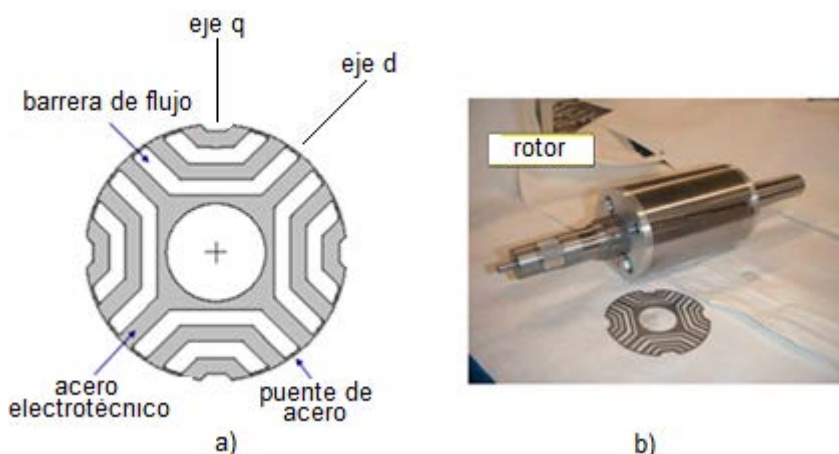


Figura 7. Laminación y estructura de general del rotor de un Syn-RM de 4 polos.

a) lámina de dos barreras; b) lámina y rotor de 4 barreras. Fuente: (Ometto et al., 2015)

La ecuación de momento está dada por la ecuación (1):

$$M = \frac{3}{2}p[(L_d - L_q)I_d I_q] \quad (1)$$

donde: p es el número de pares de polos; L_d y L_q son las inductancias en el eje d y q, respectivamente; e I_{ds} e I_{qs} son las corrientes en el eje d y q, respectivamente.

El diagrama por fase del Syn-RM (acción motora) se observa en la Figura 8.

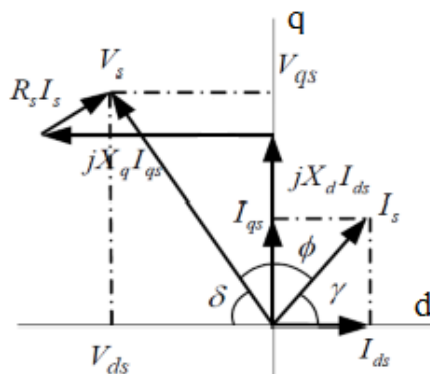


Figura 8. Diagrama fasorial por fase del Syn-RM.

Fuente: (Vartanian y Toliyat, 2009)

donde: V_s es la tensión en el estator (V); V_{ds} y V_{qs} son las proyecciones de la tensión V_s sobre los ejes d y q, respectivamente (V); I_s es la corriente en el estator (A); I_{ds} e I_{qs} son las proyecciones de la corriente I_s sobre los ejes d y q, respectivamente (A); R_s es la resistencia del estator (Ω); X_q y X_s son las reactancias en el eje q y d, respectivamente (Ω); y Φ es el ángulo de factor de potencia (rad).

En la Figura 8 se puede observar que el ángulo de factor de potencia Φ es elevado, por lo que $\cos \Phi$ será bajo.

La corriente I_s es elevada porque la componente de magnetización del rotor es producida por una componente adicional de la corriente del estator, lo que incrementa el costo del AFV.

En resumen, estos motores tienen como ventajas y desventajas fundamentales (Moghaddam et al., 2010):

Ventajas

Rotor sin devanado y sin imanes permanentes; buena aceleración; buen comportamiento en cuanto a la demagnetización durante la operación; bajo costo de fabricación; buena eficiencia; simplicidad de su construcción en comparación con los otros motores.

Desventajas

Momento menor; bajo factor de potencia; corriente elevada; altos momentos parásitos, que pueden reducirse, como ya se mencionó en el caso de los PM-SynM.

3.3. Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por imán permanente

Con el objetivo de mejorar las características operacionales del Syn-RM en cuanto a momento, factor de potencia, eficiencia y otras, se ha desarrollado el PMA-SynRM.

Para esto se añade una cantidad adecuada de imanes permanentes en las barreras de flujo del núcleo del rotor, preferiblemente los imanes de ferrita, que presentan menor costo. La cantidad, dimensiones y lugar de colocación, varían según la geometría del rotor, las características de operación deseadas y el costo de fabricación (que es una de las restricciones del diseño más importantes) (Guglielmi et al., 2013). En la Figura 9 a), se muestran dos láminas, que ejemplifican dos tipos de tamaño, número y colocación de las ferritas. En la Figura 9 b) se observa un rotor con los imanes de ferrita colocados.

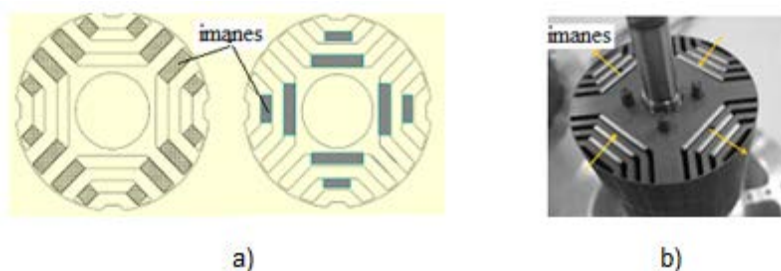


Figura 9. a) Tamaño número y colocación de las ferritas; b) ejemplo de un rotor.
Fuente: (Ometto et al., 2015)

3.3.1. Efecto de los imanes permanentes

El momento producido por los imanes permanentes se determina de la ecuación (1), añadiendo el término $\lambda_{PM}I_{ds}$, como se observa en la ecuación (2) (Vartanian y Toliyat, 2009):

$$M = \frac{3p}{2} \{ (L_d - L_q) I_{ds} I_{qs} + \lambda_{PM} I_{ds} \} \quad (2)$$

donde; λ_{PM} son las concatenaciones de flujo provocadas por los imanes permanentes (Wb-vuelta).

La Figura 10 muestra el diagrama fasorial de acción motora, donde la fuerza contra electromotriz está dada por la ecuación (3).

$$E_{PM} = p\omega_s \lambda_{PM} \quad (3)$$

donde: ω_s es la velocidad sincrónica (rad/s)

En el caso del Syn-RM, V_d es siempre negativo y V_s queda en el segundo cuadrante (ver Figura 8). Sin embargo, para el PMA-SynRM en que aparece E_{PM} , según sea su valor, V_s se desplazará más o menos hacia el primer cuadrante y, en consecuencia, Φ y $\cos\Phi$ variarán. Por ejemplo, si E_{PM} aumenta (en el sentido positivo), Φ disminuye y $\cos\Phi$ aumenta (ver Figura 10). La densidad de momento puede mejorarse en aproximadamente 45 % usando ferrita y en un 100% utilizando NdFeB (Lendenmann et al., 2011).

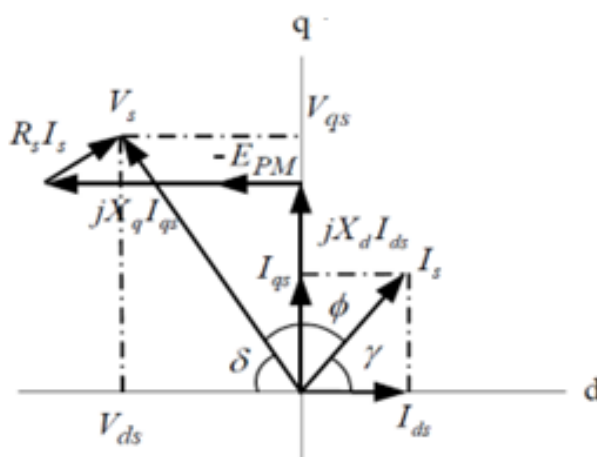


Figura10. Diagrama fasorial de acción motor de PMA-SynRM.
Fuente: (Vartanian y Toliyat, 2009)

En resumen, los principales beneficios de adoptar el PMA-SynRM con ferrita, en lugar del Syn-RM, son los siguientes: buena densidad del momento y de la potencia por unidad de volumen; incremento del factor de potencia, lo que reduce el tamaño y costo

del AFV (Vartanian et al., 2012); bajo costo de la ferrita; mejor eficiencia; simplicidad de su construcción en comparación PM-SynM.

Sin embargo, estas máquinas presentan potenciales desventajas: costo algo mayor que el PM-SynM y algunas dificultades en su fabricación; riesgo de demagnetización de los imanes de ferritas; altos momentos parásitos, que pueden reducirse igual que para las anteriores máquinas sincrónicas.

3.4. Comparación entre el PMA-SynRM y el PM-SynM

En (Ometto et al., 2015) se lleva a cabo una comparación de un PMA-SynRM de imanes de ferrita, con dos PM-SynM que utilizan imanes NdFeB. Uno de ellos (PM-SynM-1) tiene la misma longitud de núcleo (100 mm) que el PMA-SynRM, mientras que el otro (PM-SynM-2) tiene una longitud de núcleo de 91 mm. Este último es un diseño especial llamado compacto.

El PMA-SynRM y los PM-SynM comparados poseen iguales: laminaciones del estator (láminas y número de ranuras); acero electrotécnico (400-50 AP); ancho del entrehierro; número de vueltas del devanado y secciones transversales rectangulares de los conductores; temperaturas del devanado y de los imanes.

En la Tabla 1 se muestran las características fundamentales de las máquinas comparadas. En la figura 11 se presentan las características de momento y potencia contra velocidad.

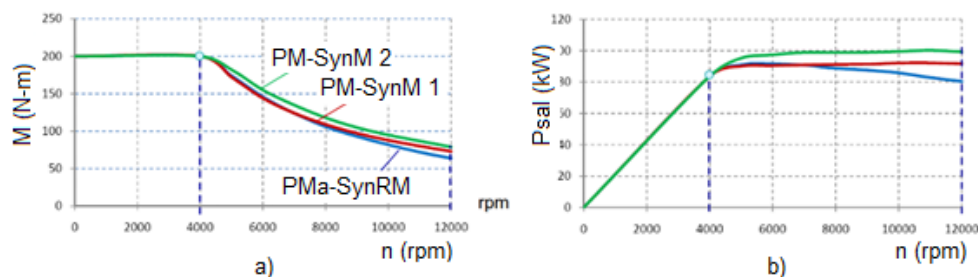
Tabla 1. Características fundamentales de los motores comparados

<i>Características fundamentales</i>	<i>PMA-SynRM</i>	<i>PM-SynM-1</i>	<i>PM-SynM-2</i>
Tipo de imán	Ferrita	NdFeB	NdFeB
Longitud del núcleo (mm)	100	100	91
Diámetro exterior del estator (mm)	240	240	240
<i>A la velocidad base de 4000 rpm</i>			
Momento (Nm)	200	200	200
Potencia de salida (kW)	83,8	83,8	83,8
Corriente por fase (A)	161	150	161
Factor de potencia	0,89	0,94	0,90
Eficiencia (%)	95,7	96,2	95,9
<i>A la velocidad máxima de 12000 rpm</i>			
Momento (Nm)	64	73	79
Potencia de salida (kW)	80,4	91,7	99,3
<i>Costos capitales</i>			
Costos relativos (%)	---	+ 45 %	+ 40 %

Analizando los resultados que se observan, se puede señalar que:

- ✓ Los motores PM-SynM poseen los mayores factores de potencia (ver Tabla 1) y esto permite que la capacidad del accionamiento sea más reducida.

- ✓ Por encima de la velocidad base y hasta la máxima de 12000 rpm, los PM-SynM muestran un buen comportamiento con un momento y una potencia superior al PMA-SynRM(ver Figura 11).
- ✓ De todas formas, como se puede observar en la Tabla 1 y en la Figura 11, el PMA-SynRM presenta una buena eficiencia, y otras buenas características operacionales, como lo es la capacidad de operación a momento y potencia constante.
- ✓ Los PMA-SynRM poseen un costo mucho menor que los PM-SynM, lo que significa una ventaja importante para su aplicación en los EV.



Fuente: (Ometto et al., 2015)

El análisis de los resultados mostrados, evidencian que la marcada reducción de los costos de los PMA-SynRM con imanes de ferrita (con 0,5 puntos porcentuales de diferencia en la eficiencia no se recupera una mayor inversión) y sus aceptables características operacionales (aunque no sean las mejores) constituyen una superior solución que el uso generalizado actualmente de los PM-SynM en los EV.

4. CONCLUSIONES

1. Se llevó a cabo una comparación de las características operacionales y de costo de tres tipos de motores sincrónicos sin devanados en el rotor (Syn-RM, PMA-SynRM con imanes de ferrita y PM-SynM en dos variantes de longitud de núcleo: 91 y 100 mm). En todos los casos, se consideró que existía un AFV adecuado para la operación de cada motor.
2. Se demostró que los PMA-SynRM con imanes de ferrita, aseguran buenas características operacionales con altas densidades de momento y de potencia, alta eficiencia, buen factor de potencia (según exigen los motores para los vehículos eléctricos) y muy importante, un costo más reducido, por lo que pueden ser considerados la mejor alternativa técnico económica.
3. Se evidenció que los problemas de altos momentos parásitos que presentan los motores analizados, pueden ser reducidos con diseños especiales del estator, pero esto significa mayor costo.

REFERENCIAS

ABB Motors and Generators, Low voltage IE4 synchronous reluctance motor, drive package for pump and fan applications., Library ABB, June 2013, pp. 1-46, Recuperado de:

<http://www.abb.com/product/seitp322/4c7b92aedbcfd1d6c1257899002d9ecf.aspx?productLanguage=es&country=00>

- Barcaro, M., Bianchi N., Magnussen F., Permanent-magnet optimization in permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor for a wide constant-power speed range., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 6, Jun. 2011, pp. 2495-2502.
- Guglielmi, P., Boazzo, B., Armando, E., Pellegrino, G., Vagati, A., Permanent-magnet minimization in pm-assisted synchronous reluctance motors for wide speed range., *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, No. 1, 2013, pp. 31-41.
- Hendershot, J.R., *Electric Machine Design., Tutorial Lectures, Part 31, 2012*, pp.1-15 Recuperado de: <http://www.motor-engineer.net/engineering-center/learn/tutorial-electric-machine-design-13>
- Lendenmann, H., Moghaddam, R.R., Tammi, A., Thand, L.E., Motoring ahead. Synchronous motors controlled by variable-speed drives are bringing higher efficiency to industrial applications., *ABB Review*, No. 1, January 2011, pp. 56-61.
- Moghaddam, R.R., Magnussen, F., Sadarangani, C., Theoretical and experimental reevaluation of synchronous reluctance machine., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1, 2010, pp. 6-13.
- Ometto, A., Parasiliti, F., and Villani, M., Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motors for Electric Vehicle Applications., 9th International Conference, Energy Systems in Motor Driven Systems (EEMODS), Helsinki, Sep. 2015, pp. 1-39.
- Saber, A.Y., Venayagamoorthy, G.K., Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 4, April 2011, pp. 1229 – 1238.
- Spargo, C.M., Mecrow, B.C., Widmer, J.D., Application of fractional slot concentrated windings to synchronous reluctance motor, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.51, No. 2, 2015, pp. 1446 – 1455.
- Vartanian, R., Toliyat, H.A., Design and comparison of an optimized permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor with an induction motor (Pma-SynRM) with identical NEMA Frame stators., 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, IEEE Conference Publications, 2009, pp. 107-112.
- Vartanian, R., Toliyat., Akin, B., Poley, R., Power factor improvement of synchronous reluctance motors (SynRM) using permanent magnets for drive size reduction., *Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Orlando, Florida, USA, IEEE, 2012, pp. 628-633.