

Motores DC de reluctancia variable. Control y aplicaciones

Variable reluctance DC motors. Control and applications

Moya Cajas Marcelo Xavier¹, Mejía Suarez Adriana Soledad², Delgado Parra David Ismael³.

RESUMEN:

El presente documento presenta una revisión bibliográfica sobre las características, ventajas, desventajas y aplicaciones de los motores DC de reluctancia variable dentro del campo de la eficiencia energética en sistemas eléctricos en la industria. El principio de reluctancia magnética comprende de un rotor de polos salientes construido únicamente de material ferromagnético que trata de alinearse de forma constante con el campo magnético generado por el estator. Su funcionamiento permite obtener temperaturas muy bajas en su bobinado aumentando la fiabilidad y duración tanto del bobinado como de los elementos mecánicos como los rodamientos. La tecnología de reluctancia variable permite manejar cargas parciales con una alta eficiencia mediante el rendimiento dinámico del sistema, lo cual se refleja en una reducción significativa de costos energéticos.

Palabras Clave: motores corriente continua; reluctancia; eficiencia; costo energético.

ABSTRACT:

The aim of this work is a literature review on the characteristics, advantages, disadvantages and applications of variable reluctance DC motors within the field of energy efficiency in electrical systems in industry. The magnetic reluctance principle comprises a protruding pole rotor constructed solely of ferromagnetic material that tries to align itself constantly with the magnetic field generated by the stator. Its operation allows to obtain very low temperatures in its winding increasing the reliability and duration of both the winding and mechanical elements such as bearings. Variable reluctance technology allows to handle partial loads with a high efficiency through the dynamic performance of the system, which is reflected in a significant reduction of energy costs.

Recibido 2 de enero de 2020; revisión aceptada 19 de abril de 2020

¹Estudiante Maestría Ecoeficiencia Industrial, UISEK, Ecuador. mjmoya.mee@uisek.edu.ec

²Estudiante Maestría Ecoeficiencia Industrial, UISEK, Ecuador. asmejia.mee@uisek.edu.ec

³Estudiante Maestría Ecoeficiencia Industrial, UISEK, Ecuador. didelgado.mee@uisek.edu.ec

Keywords: direct current engine; reluctance; efficiency; energy cost.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los motores eléctricos representan alrededor del 60 – 65% de la electricidad que se consume en la industria. Por lo tanto, el uso racional de la energía o la búsqueda del incremento en la eficiencia de los motores es uno de los retos más importantes de la industria. Se pueden obtener grandes ahorros de energía usando accionamientos variables que permitan controlar el par y velocidad que genera un motor, de forma general cerca del 40% de todos los motores nuevos que se instalan utilizan esta tecnología, [1].

En la actualidad se han incrementado los esfuerzos por los gobiernos, activistas y una gran presión por parte de los consumidores en reducir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero producto de la generación de energía eléctrica o del transporte. En este sentido la aplicación de motores de reluctancia variable permite disminuir el consumo de energía eléctrica y es una opción que se encuentra en desarrollo e investigación en el transporte eléctrico vehicular [2].

El motor DC de reluctancia variable o de paso requiere de un par de reluctancia para su operación. De forma simplificada el principio de funcionamiento se basa en el par reluctante que se genera sobre el rotor al enviar corriente a los polos del estator, lo que permite que los polos de la máquina se alineen generando el giro del motor. Este tipo de motores giran a velocidad síncrona lo cual representa una disminución en las pérdidas por deslizamiento en el rotor que puede llegar a ser de hasta el 30% de las pérdidas totales en la eficiencia de un motor [3].

El rotor de un motor de reluctancia no posee jaula de ardilla, tampoco imanes permanentes o devanados para excitación del campo. Su superficie lisa reduce pérdidas e incrementa la eficiencia haciendo que el rotor sea más compacto. Su vida útil se incrementa al tener la capacidad de mantener un nivel de potencia y torque sin incrementar su temperatura lo cual se traduce en menores periodos de lubricación. Su tamaño es más compacto que los motores de la misma potencia, en base a estas características existe un incremento de hasta el 40% en la densidad de potencia y el torque [1, 3].

2. METODOLOGÍA.

El presente trabajo cuenta con una revisión sistemática de 45 artículos científicos entre el año 2014 y 2018. De los 45 artículos revisados fueron seleccionados 21 considerando su índice de citas y el tema de aplicación. El análisis se basa en varias revistas especializadas indexadas en SCOPUS y Latin Index de los últimos 5 años.

Se utilizaron varios descriptores de búsqueda tales como: reluctancia variable, eficiencia, costo energético, motores de corriente continua.

I. MOTOR DE RELUCTANCIA VARIABLE

A. Características principales

El motor de reluctancia variable se encuentra compuesto por un rotor fabricado con láminas ferromagnéticas que no se encuentran imantadas lo cual forma un cilindro alrededor del eje central. El rotor se encuentra ranurado de forma longitudinal lo que permite formar polos o dientes que conlleva a una variación de la reluctancia en función de su posición angular. En la figura 1 se muestra las partes principales de un motor de reluctancia variable [4].

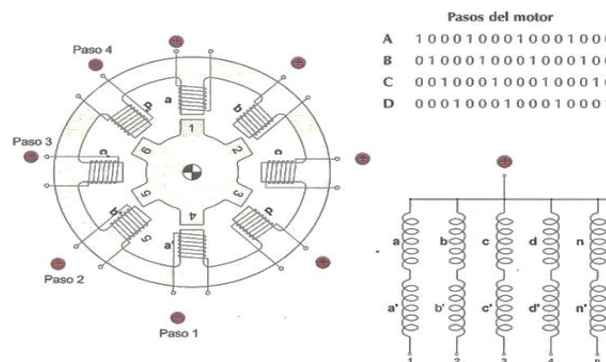


Figura 1. Motor DC de reluctancia Variable [5].

El estator al igual que el rotor está formado por material ferromagnético no imantado ranurado de forma longitudinal en donde se instalan las bobinas formando las fases y los polos del estator. La cantidad de dientes en el estator es mayor al número de dientes en el rotor, esto permite que un solo par de polos del estator puedan estar alineados con su par correspondiente en el rotor cada fase está compuesta de dos bobinados dispuestos a polos opuestos lo cual permite el movimiento del sistema. En la figura 2 se muestra un motor de dos polos en movimiento [6].

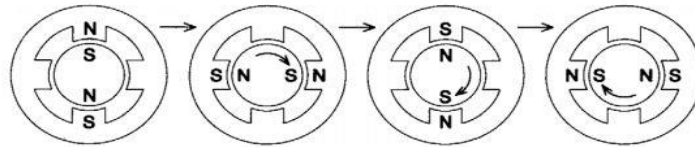


Figura 2. Motor DC de reluctancia Variable de dos polos en movimiento [5].

B. Funcionamiento

La operación de los motores de reluctancia variable en DC se la genera mediante interruptores de potencia que son dispositivos que se encargan de desconectar una carga eléctrica sea máxima o en vacío. Cada fase del sistema es alimentada con corriente siguiendo la siguiente lógica [7].

En la figura 4 se muestra que el ciclo empieza desde la posición en equilibrio del sistema en la que se encuentra la fase 1 activada. A continuación un paso se genera situando la fase 1 en 0 y la fase 2 en 1, en ese instante los polos del rotor cercanos a los polos de la fase del estator son atraídos para permitir la circulación del flujo magnético para generar el movimiento de rotación entre los polos hasta quedar alineados con lo que se genera un paso del rotor [8].

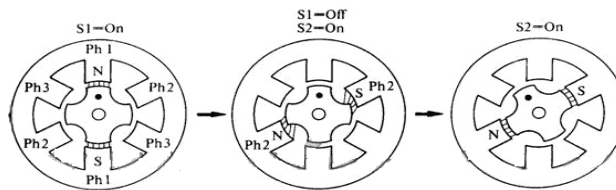


Figura 4. Conmutación Fase 1 a Fase 2 [5].

En la figura 5 se presenta el avance del rotor en sentido anti horario de un motor de reluctancia variable de cuatro polos que es el resultado de la secuencia de activación (Fase1 – Fase 2 – Fase 3 – Fase 1).

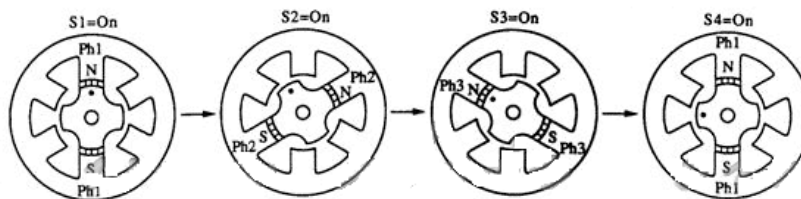


Figura 5. Secuencia de conmutación de un motor de reluctancia variable de 3 fases [5].

Considerando el diseño del motor presentado en la figura 5, se tienen 4 polos en su estator y tres fases en el rotor con lo que el número de pasos por vuelta del rotor es $3 \cdot 4 = 12$, y su ángulo de paso de $360^\circ / 12 = 30^\circ$. El ángulo de paso deseado se lo puede obtener generando varias combinaciones entre sus fases. En general para obtener ángulos de paso más pequeños se deben aumentar la cantidad de polos o dientes en el rotor para lo cual se debe ranurar los polos en varios dientes y permitir su alineación como se muestra en la figura 6 [1, 4].

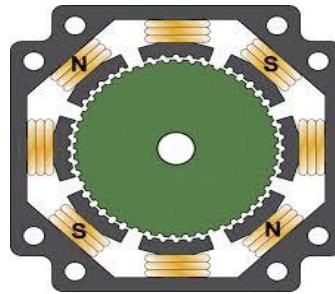


Figura 6. Ranurado de un motor de reluctancia variable [9]

C. Descripción del accionamiento.

Las configuraciones de una estructura magnética reluctante pueden ser diversas de acuerdo al número de polos del estator y del rotor y se identifican con la relación N_c/N_r [10]. Se debe de considerar que el número de polos en el rotor debe ser calculado de tal forma que impida en cualquier posición la alineación completa de los polos del estator o estáticos debido a que siempre va a existir algún polo en el rotor o rotórico que pueda llegar a alinearse [11], para lo cual se debe cumplir lo siguiente:

$$N_c = 2 \cdot k \cdot m \quad [1]$$

$$N_r = 2 \cdot k \cdot (m + 1) \quad [2]$$

m = número de fases.

k = número entero llamado multiplicidad.

$2k$ = número de polos por fase.

Frecuencia de conmutación:

$$f_s = N \cdot N_c / 60 \quad [3]$$

$$f_s = \text{Hz.}$$

n = número de revoluciones del motor en rev/min.

Ángulo de paso:

$$E = 360^\circ/m \cdot N_r \quad [4]$$

Número de pasos por revolución:

$$S = m \cdot N_r \quad [5]$$

En este contexto, el número e polos en el estator condiciona el número de fases en el motor, por lo tanto la estructura y el número de interruptores estáticos necesarios del convertidor [12]. Para generar un arranque o retroceso el número de fases deberá de ser de al menos 3. Como se muestra en la figura 7, sus configuraciones frecuentes son 6/4, 12/8, 8/6, y 16/12 [13].

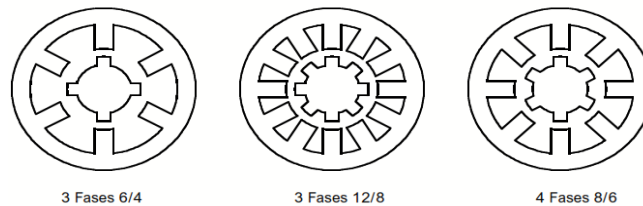


Figura 6. Configuraciones comunes motor de reluctancia variable.

D. Convertidor estático de energía.

El uso de un convertidor estático de potencia en motores de reluctancia variable cumple con dos funciones. Primero realiza la conmutación de las fases en el orden especificado en los lazos de control según la posición del rotor, para esto se requiere que exista una conmutación abriendo y cerrando los interruptores de estado sólido del que se encuentran conformados. En su mayoría se utilizan transistores tipo IGB en potencias superior a 1kW y tipo MOSFET para potencias menores. Segundo debe de asegurar la desmagnetización de cada fase del motor [11, 14, 15].

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Topologías de convertidores de potencia.

- Convertidor Unipolar: en la desmagnetización del circuito se requiere del apoyo de un diodo de libre circulación junto a una resistencia conectada en serie que obligue a la corriente a anularse aplicando un voltaje inverso en los bornes de la fase (Figura 7).

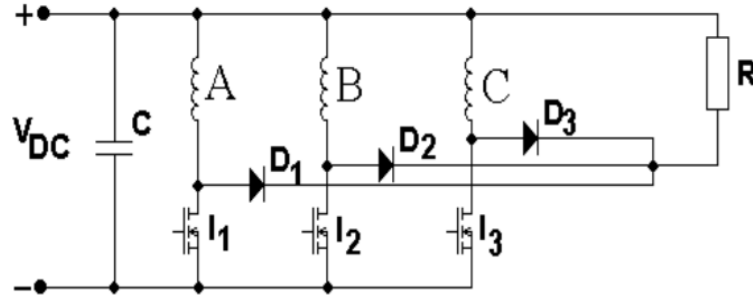


Figura 7. Conversor unipolar

- Convertidor Clásico: también conocido como convertidor en puente se encuentra conformado por dos interruptores en cada fase y un circuito de desmagnetización que se aplican a través de dos diodos que al abrirse aplican voltaje negativo del mismo valor de la tensión de alimentación (Figura 8).

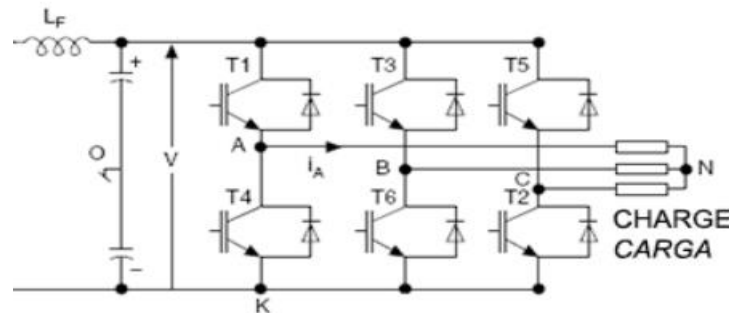


Figura 8. Conversor clásico.

- Convertidor Oulton: también conocido como convertidor con toma intermedia que funciona de forma adecuada con motores que posean un número de fases par (Figura 9).

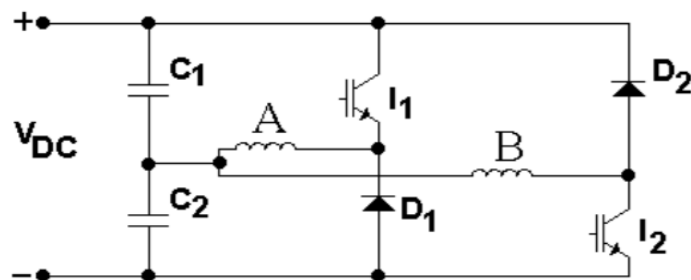


Figura 9. Conversor Oulton.

- Convertidor C-dump: conocido como convertidor de acumulación capacitivo, el cual permite una regulación entre el voltaje y la corriente que requiera el sistema (Figura 10) [14].

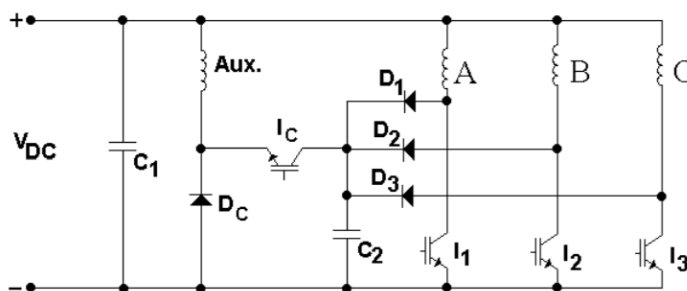


Figura 10. Conversor C-dump.

E. Estrategias de control.

Las estrategias de control para operar los motores de reluctancia variable se encuentran en una etapa elevada de investigación [16], de forma sintetizada se mencionan tres estrategias de control comunes para estos motores las cuales requieren de sensores o instrumentación que permitan determinar la posición y velocidad en la que se encuentra el motor en un instante determinado.

- Control de pulso único: permite el trabajo a un par constante, bajas velocidades, manteniendo constante el período de conducción.

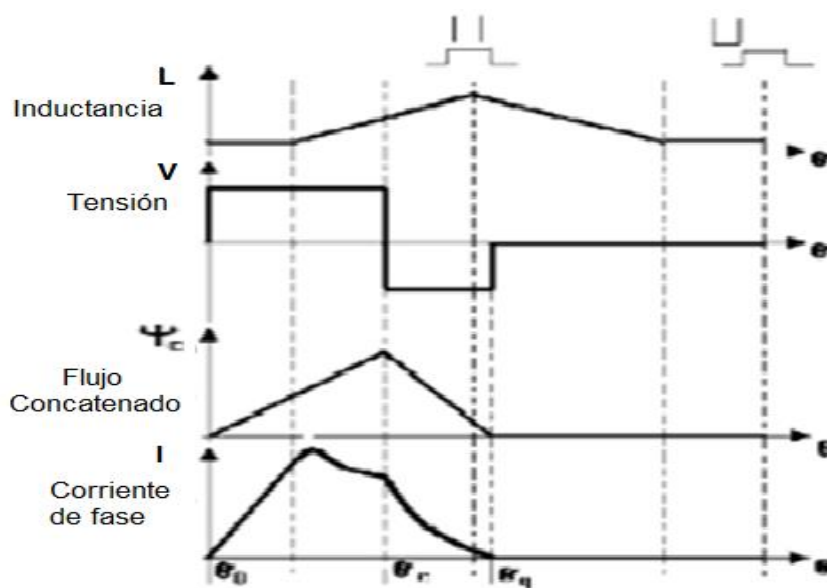


Figura 11. Pulso único.

Control PWM: permite realizar una regulación de voltaje respecto a una señal tipo triangular de referencia.

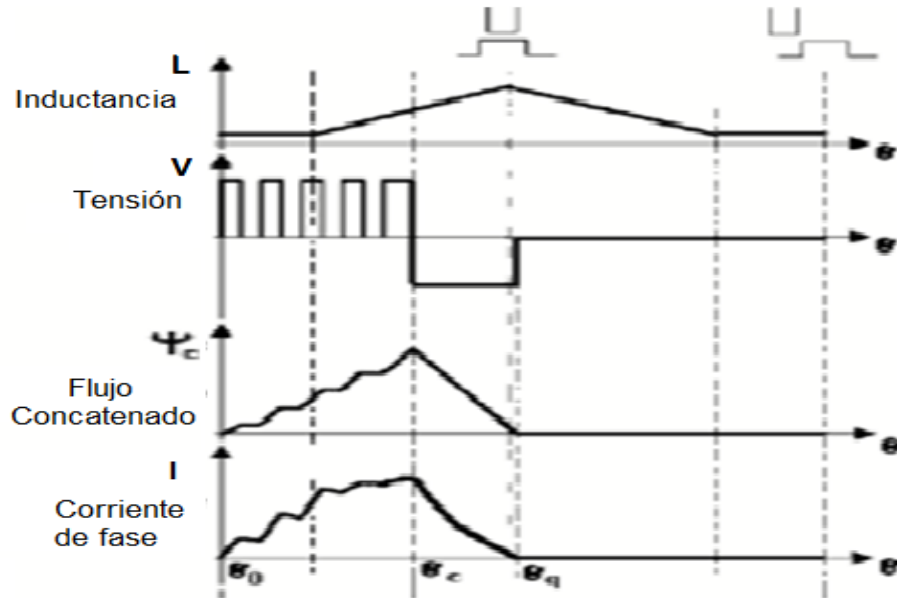


Figura 12. PWM.

- Control histéresis: se lo utiliza en los casos donde se requiera velocidades muy bajas, por lo que debido al bajo valor de la fuerza electromotriz y de las pérdidas en el hierro, es posible incrementar el par aumentando la corriente y manteniendo la tensión.

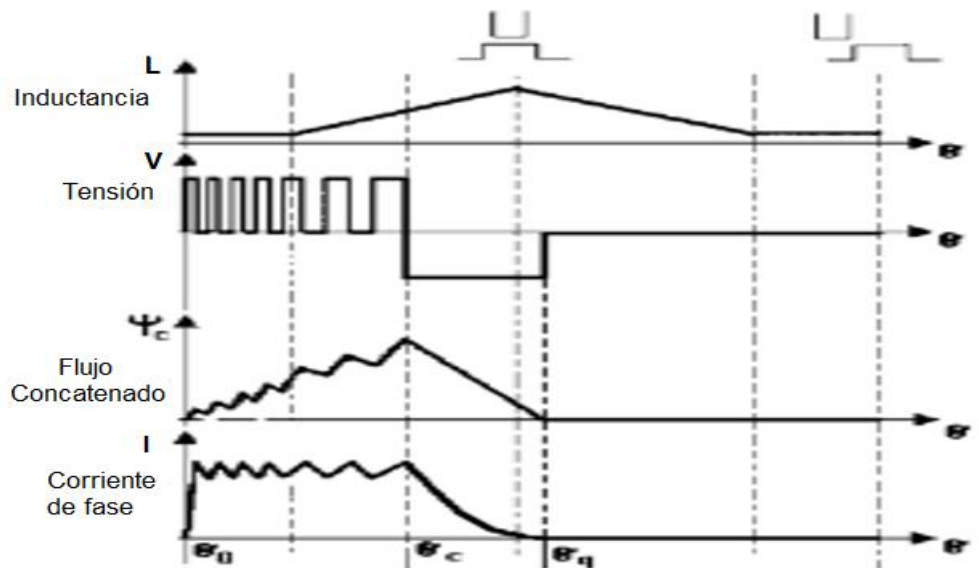


Figura 13. Histéresis.

Además de los métodos descritos, en la actualidad existen tres métodos de control que no requieren de sensores de posición que son:

- Métodos de control en lazo abierto: el motor trabaja como una máquina síncrona en la que la frecuencia es proporcional a la velocidad lo cual permite maximizar el rendimiento [13].
- Métodos basados en ecuaciones eléctricas que pueden ser de detección pasiva o detección activa.

Detección pasiva, se debe estimar la posición del rotor a partir del monitoreo en tiempo real de variables eléctricas como nivel de corriente, derivada del voltaje o corriente de fase, estimación del flujo magnético en tiempo real.

Detección activa, ingresa señales de prueba a una fase del motor que no se encuentre activada y analiza su respuesta para determinar la posición. Las señales que pueden ingresar son pulsos de diagnóstico, señales de modulación AM, FM, PM, fuerza contra electromotriz [13].

- Métodos basados en observadores de estado simulación del sistema motor como sensor [13].

II. VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN EL USO DE MOTORES DE RELUCTANCIA VARIABLE.

Los motores de reluctancia variable se caracterizan por tener una mayor precisión en cada desplazamiento y repetición, un error en el paso menor al 5%, excelente respuesta en arranque y parada, ángulo de rotación proporcional a los pulsos de entrada amplio rango de velocidades de rotación, torque constante, alto enfriamiento, puede trabajar a mayores temperaturas que un motor de escobillas o de imanes permanentes. En este contexto sus ventajas y desventajas se mencionan a continuación [13, 17].

Ventajas:

- Su construcción es sencilla y robusta.
- Los bobinados estáticos son concentrados.
- La ausencia de bobinados e imanes retóricos posibilita tener baja inercia y trabajar a velocidades elevadas.
- La mayoría de las pérdidas se concentran en el estator, lo que facilita la refrigeración y permite temperaturas de operación elevadas [18].
- En condiciones de falla, la tensión de circuito abierto es nula y las corrientes de cortocircuito son reducidas.
- El par es independiente del sentido de la corriente, lo que permite en ciertas aplicaciones la reducción del número de interruptores de estado sólido [6].

- La mayoría de convertidores estáticos utilizados en los accionamientos de reluctancia auto conmutados son tolerantes a faltas.
- Tiene un elevado rendimiento y buena relación par/volumen y par/inercia [19].
- La característica par/velocidad puede adaptarse a la medida de las necesidades del proceso.

Desventajas:

- Requiere de un número elevado de terminales y conexiones.
- El par motor presenta un notable rizado, consecuencia de su naturaleza pulsante.
- Es un accionamiento ruidoso.
- La estructura electromagnética ha de alimentarse mediante un convertidor estático y para su correcto funcionamiento necesita sensores de posición y reguladores electrónicos.
- Su diseño precisa de un estudio muy a fondo de su circuito magnético, una buena adaptación del convertidor estático y una adecuada estrategia de control [13].

III. APLICACIONES.

A partir de la década de los 70 las investigaciones y el desarrollo de los vehículos eléctricos alimentados con baterías tuvieron un fuerte impulso y desde ese momento empieza los mayores desarrollos y aplicaciones tecnológicas en el área de estudio. En la industria se pueden encontrar los motores desde brazos robóticos, robots de carga, exoesqueletos, cintas transportadoras, actuadores lineales y rotacionales para posicionar o trasladar objetos, estas aplicaciones han ido perfeccionando sus diferentes sistemas de control que le permita trabajar al motor en el rango recomendado u optimizado.

En los electrodomésticos, existen los robots de cocina, las lavadoras y secadoras de ropa que poseen este tipo de motores en su interior que les permiten ser más eficientes en el consumo de energía. En los sistemas de aire acondicionado y climatización tanto como para hogares como para industrias. En el transporte la mayoría de los vehículos eléctricos o híbridos se encuentran utilizando esta tecnología y las investigaciones se basan en como optimizar el uso de la energía almacenada para aumentar la eficiencia de un vehículo eléctrico o híbrido [20, 21].

4. CONCLUSIONES

- Los motores de reluctancia variable permiten mejorar el desempeño energético de una planta industrial ya que para el mismo torque en la carga requiere una menor potencia eléctrica traduciéndose en disminución de los costos energéticos.
- Los motores pueden trabajar a temperaturas elevadas debido a su diseño robusto, capacidad de ventilación y baja generación de campos magnéticos o desgaste por contacto asociados a imanes o escobillas de los motores convencionales.
- Los sistemas de control y la aplicación automotriz para vehículos híbridos o eléctricos se encuentran en pleno desarrollo ya que aún no se llega a encontrar la estrategia de control adecuada que maximice el rendimiento en cualquier condición de trabajo del motor.
- El sistema requiere de un sistema de control y equipos de electrónica de potencia que sean robustos y veloces para obtener el mejor desempeño de la maquinaria.

5. REFERENCIAS

- [1] P. R. Viego Felipe, J. R. Gómez Sarduy, and E. C. Quispe Oqueña, "Motores sincrónicos de reluctancia controlados con variadores de frecuencia: una aplicación para ahorrar energía," *Ingeniería Energética*, vol. 36, no. 1, 2015.
- [2] H. D. P. Ávila, L. A. N. Vega, and J. H. C. Morera, "Análisis multifísico de un motor de reluctancia conmutada de rotor exterior usando elementos finitos," *Tecnura*, vol. 19, pp. 151-156, 2015.
- [3] A. Omekanda, "Switched reluctance machines for EV and HEV propulsion: State-of-the-art," in *Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD), 2013 IEEE Workshop on*, 2013, pp. 70-74: IEEE.
- [4] G. Pellegrino, T. M. Jahns, N. Bianchi, W. L. Soong, and F. Cupertino, *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors: Tutorial Course Notes*. Springer, 2016.
- [5] W. Chapman, *Engineering modeling and design*. Routledge, 2018.
- [6] L. R. Huang, J. H. Feng, S. Y. Guo, J. X. Shi, W. Q. Chu, and Z. Q. Zhu, "Analysis of Torque Production in Variable Flux Reluctance Machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 4, pp. 1297-1308, 2017.

- [7] U. Jakobsen, K. Lu, P. O. Rasmussen, D. Lee, and J. Ahn, "Sensorless Control of Low-Cost Single-Phase Hybrid Switched Reluctance Motor Drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 3, pp. 2381-2387, 2015.
- [8] E. A. El-Hay, M. A. El-Hameed, and A. A. El-Fergany, "Performance enhancement of autonomous system comprising proton exchange membrane fuel cells and switched reluctance motor," *Energy*, vol. 163, pp. 699-711, 2018/11/15/ 2018.
- [9] A. M. Products. (2018). *Step Motors*. Available: <https://www.applied-motion.com/news/2015/10/how-does-step-motor-work>
- [10] J. F. Gieras, Z. J. Piech, and B. Tomczuk, *Linear synchronous motors: transportation and automation systems*. CRC press, 2016.
- [11] J. I. Perat Benavides, *Contribución al control de motores de reluctancia autoconmutados*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.
- [12] J. Evangeline S, S. Suresh Kumar, and J. Jayakumar, "Torque modeling of Switched Reluctance Motor using LSSVM-DE," *Neurocomputing*, vol. 211, pp. 117-128, 2016/10/26/ 2016.
- [13] P. Andrada *et al.*, "El motor de reluctancia autoconmutado," *Revista Técnica Industrial Especial Electricidad y Electrónica*, pp. 32-41, 2004.
- [14] R. Melício and V. M. F. Mendes, "Simulación de Convertidores de Potencia en Sistemas Eólicos," *Información tecnológica*, vol. 18, pp. 25-34, 2007.
- [15] O. Ellabban and H. Abu-Rub, "Switched reluctance motor converter topologies: A review," in *2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2014, pp. 840-846.
- [16] B. Singh, A. K. Mishra, and R. Kumar, "Solar Powered Water Pumping System Employing Switched Reluctance Motor Drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 5, pp. 3949-3957, 2016.
- [17] S. M. Castano and J. Maixe-Altes, "Design and sizing of a switched reluctance motor for an automotive application," *DYNA*, vol. 80, no. 181, pp. 81-90, 2013.
- [18] N. Niguchi, K. Hirata, A. Kohara, K. Takahara, and H. Suzuki, "Hybrid Drive of a Variable Flux Reluctance Motor and Switched Reluctance Motor," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 238-242.
- [19] Q. Yu, B. Bilgin, and A. Emadi, "Loss and Efficiency Analysis of Switched Reluctance Machines Using a New Calculation Method," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 3072-3080, 2015.

- [20] X. Ge, Z. Q. Zhu, R. Ren, and J. T. Chen, "A Novel Variable Reluctance Resolver with Nonoverlapping Tooth–Coil Windings," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 2, pp. 784-794, 2015.
- [21] W. Geng, Z. Zhang, K. Jiang, and Y. Yan, "A new parallel hybrid excitation machine: Permanent-magnet/variable-reluctance machine with bidirectional field-regulating capability," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 3, pp. 1372-1381, 2015.