

CONESCAPANHONDURAS2025paper126.pdf

 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Document Details

Submission ID

trn:oid:::14348:477760909

Submission Date

Jul 31, 2025, 10:22 PM CST

Download Date

Aug 12, 2025, 6:27 PM CST

File Name

CONESCAPANHONDURAS2025paper126.pdf

File Size

748.4 KB

6 Pages




5,230 Words

29,409 Characters

24% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 23%  Internet sources
- 15%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags




0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

23%  Internet sources
15%  Publications
0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	www.coursehero.com	2%
2	Internet	hdl.handle.net	1%
3	Internet	www.researchgate.net	1%
4	Publication	Jonathan Munoz Tabora, Maria Emilia De Lima Tostes, Ubiratan Holanda Bezerra, ...	<1%
5	Internet	trepo.tuni.fi	<1%
6	Publication	Danilo Ferreira de Souza, Pedro Paulo Fernandes da Silva, Ildo Luis Sauer, Aníbal ...	<1%
7	Publication	Quraan, Laith Ghazi Mohammad Al. "Switched Reluctance Motor Drive Optimizati...	<1%
8	Publication	Anton Dianov, Alecksey Anuchin. "Offline Measurement of Stator Resistance and ...	<1%
9	Internet	journal.sobraep.org.br	<1%
10	Publication	Igor Sirotic, Marinko Kovacic, Stjepan Stipetic. "Methodology and Measurement S...	<1%
11	Internet	repositorio.utfpr.edu.br	<1%

12	Internet	www.sdewes.org	<1%
13	Internet	repositorio.unal.edu.co	<1%
14	Internet	www.hisour.com	<1%
15	Internet	ache-pub.org.rs	<1%
16	Internet	www.politesi.polimi.it	<1%
17	Internet	researchr.org	<1%
18	Publication	Siham Mencou, Majid Ben Yakhlef, El Bachir Tazi. "Single-neuron adaptive double-...	<1%
19	Internet	repository.up.ac.za	<1%
20	Publication	Felipe J. Torres, Juan P. Ramirez-Paredes, Mario A. Garcia-Murillo, Israel Martinez-...	<1%
21	Internet	www.eurekaselect.com	<1%
22	Internet	www.grafiati.com	<1%
23	Internet	www.wbk.kit.edu	<1%
24	Internet	doria.fi	<1%
25	Internet	www.sciencegate.app	<1%

26	Publication	Eryong Zhang, Fengshuo He, Yong Lu, Binlong Li. "Electromagnetic-thermal coupl...	<1%
27	Internet	repositorio.usp.br	<1%
28	Internet	www.nature.com	<1%
29	Internet	issuu.com	<1%
30	Internet	itec-ap.ces.org.cn	<1%
31	Internet	www.isotools.us	<1%
32	Internet	journal.trunojoyo.ac.id	<1%
33	Internet	upcommons.upc.edu	<1%
34	Publication	Bryan R. Jovel-Zelaya, Gerson O. Vargas-Godoy, Wilfredo C. Flores, Harold R. Cham...	<1%
35	Internet	es.slideshare.net	<1%
36	Internet	core.ac.uk	<1%
37	Internet	publikationen.bibliothek.kit.edu	<1%
38	Internet	www.cigrecolombia.org	<1%
39	Internet	www.clubensayos.com	<1%

40	Internet	1library.co	<1%
41	Internet	sftp.asee.org	<1%
42	Internet	www.linguee.com	<1%
43	Internet	www.sapiensman.com	<1%
44	Internet	www.semanticscholar.org	<1%
45	Internet	www.iie.org.mx	<1%
46	Internet	www.powershow.com	<1%
47	Internet	www.revista.ufpe.br	<1%
48	Internet	aulavirtual.aido.es	<1%
49	Internet	docplayer.es	<1%
50	Internet	go.gale.com	<1%
51	Internet	home.coqui.net	<1%
52	Internet	pesquisa.bvsalud.org	<1%
53	Internet	publications.jrc.ec.europa.eu	<1%

54	Internet	repositorio.lamolina.edu.pe	<1%
55	Internet	rionegro.gov.ar	<1%
56	Internet	www.econstor.eu	<1%
57	Internet	www.rackspace.com	<1%
58	Publication	Israel Zamudio Ramírez. "Diagnóstico de fallos electromecánicos en motores eléc...	<1%
59	Internet	scholarworks.uark.edu	<1%
60	Publication	da Costa Gonçalves, Pedro Filipe. "Fault-Tolerant Predictive Control of PMSGs in O...	<1%

Evaluación de las nuevas Tecnologías en Eficiencia de Motores Eléctricos para Aplicaciones Industriales

Resumen—Este estudio evalúa los avances tecnológicos en motores eléctricos de inducción de jaula de ardilla, enfocándose en su eficiencia energética y aplicabilidad en países en desarrollo como Honduras. A través de una revisión bibliométrica basada en la metodología PRISMA, se analizan tendencias en diseño, materiales y variadores de velocidad (VSD). Los motores IE3 e IE4, clasificados por la norma IEC 60034-1:2014, muestran reducciones significativas en pérdidas energéticas y emisiones de CO₂. En Honduras, la adopción del estándar IE3 como mínimo obligatorio marca un avance hacia la sostenibilidad. Los VSD optimizan el consumo energético hasta un 50% en aplicaciones de carga variable, prolongando la vida útil del motor. El análisis del ciclo de vida revela que materiales de mayor calidad en motores IE3 incrementan la energía incorporada, pero mejoran la eficiencia operativa. Se identifican tendencias en inteligencia artificial y control predictivo para mejorar el rendimiento. Los resultados sugieren que la implementación de VSD y motores de alta eficiencia es viable para optimizar el consumo energético en Honduras, promoviendo beneficios económicos y ambientales.

Palabras clave—Ciclo de vida, eficiencia, jaula de ardilla, motores de inducción, motores eléctricos, variadores de velocidad.

I. INTRODUCCIÓN

A. Consideraciones generales

En el actual contexto de la transición energética mundial, la eficiencia de los sistemas eléctricos industriales se ha convertido en un factor clave para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)[1]. Los motores eléctricos de inducción de jaula de ardilla representan aproximadamente el 53% del consumo eléctrico global, donde su elevado nivel de participación en la demanda eléctrica a nivel mundial los posiciona como un elemento prioritario de análisis para evaluar el impacto potencial de la transición hacia motores de mayor eficiencia, particularmente aquellos clasificados bajo la norma IE4, en el marco de las políticas de eficiencia energética y sostenibilidad[2].

La International Electrotechnical Commission (IEC), a través de la norma IEC 60034-1:2014, ha establecido una clasificación de eficiencia energética para motores eléctricos trifásicos de inducción, conocida como IE (International Efficiency), que comprende cuatro niveles: IE1 (Eficiencia Estándar), IE2 (Eficiencia Alta), IE3 (Eficiencia Premium) e IE4 (Eficiencia Super Premium). Esta clasificación busca armonizar los criterios de eficiencia energética a nivel internacional y promover la adopción de tecnologías más eficientes.

En este contexto, Honduras ha dado un paso importante en su transición energética, especialmente en el sector de motores eléctricos, al establecer Requisitos Mínimos de Desempeño Energético (Minimum Energy Performance Standards, MEPS)[3]. A partir de la aprobación del Reglamento Técnico Hondureño RTH 29.06.06.23, se ha definido la clase de eficiencia IE3 (Premium) como el nivel mínimo obligatorio para la fabricación, importación y comercialización de motores eléctricos en el país. Este avance resulta especialmente relevante para países en desarrollo como Honduras, donde históricamente ha predominado el uso de motores de baja eficiencia, mayoritariamente clasificados como IE0 (motores no reglamentados) e IE1.

Con base en lo anterior, la evaluación del impacto de la migración tecnológica hacia motores de mayor eficiencia (IE3 e IE4) se vuelve necesaria y prioritaria, no solo desde el punto de vista técnico y económico, sino también ambiental[4]. La sustitución de motores ineficientes por equipos más eficientes reduce significativamente las pérdidas energéticas, mejora el rendimiento operativo de los sistemas eléctricos, y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al consumo de electricidad[5].

B. Motivación y Objetivos

En Honduras, la transición de motores eléctricos de baja eficiencia (IE0 e IE1) hacia clases superiores (IE3 e IE4) es fundamental para reducir el consumo energético y atender objetivos ambientales. No obstante, esta migración tecnológica requiere un análisis detallado de los beneficios y limitaciones asociados, especialmente en lo referente al uso de tecnologías como los *Variable Speed Drives (VSD)*[4]. Las nuevas tecnologías existentes en el mercado, la eficiencia, y el comportamiento en el ciclo de vida y la integración de nuevas tecnologías deben ser evaluados para fundamentar políticas públicas y normativas técnicas en el marco de la transición energética nacional.

Este estudio tiene como objetivo analizar los avances tecnológicos en motores eléctricos y su impacto en la eficiencia energética, con énfasis en su aplicabilidad en países en desarrollo. La revisión de literatura fue estructurada con base en cuatro preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el estado actual de la investigación en eficiencia de motores eléctricos?
- ¿Cómo influye el análisis del ciclo de vida en su evaluación técnico-económica?
- ¿Qué nuevas tecnologías están siendo aplicadas en la industria para mejorar su rendimiento?
- ¿Cuál es el impacto de los VSD en la eficiencia de los motores de inducción de jaula de ardilla?

Los hallazgos permitirán identificar tendencias clave y recomendaciones para futuras actualizaciones de la norma en Honduras.

II. METODOLOGÍA

Revisión de literatura: motores eléctricos

Para el desarrollo del estudio, se utilizó como referencia un enfoque metodológico basado en la recolección, procesamiento y discusión de datos, representado en la Fig.1. La metodología incluye, en las etapas 1 y 2, la recolección de datos enfocada en identificar literatura relevante y el procesamiento de datos para analizar la calidad de la energía en motores eléctricos de alta eficiencia. Las palabras clave utilizadas fueron “Electric Motors”, “High Efficiency” y términos relacionados con diseño y rendimiento. Tras definir los criterios de selección, que incluyen palabras clave relevantes, ámbito de estudio y bases de datos como The Lens e IEEE Xplore, se estableció una base inicial de documentos. En las etapas 3 y 4, en la etapa 5, se procesaron los datos seleccionados para el análisis, y finalmente, en la etapa de discusión de resultados, se evaluaron los hallazgos y se redactaron artículos científicos basados en los enfoques utilizados

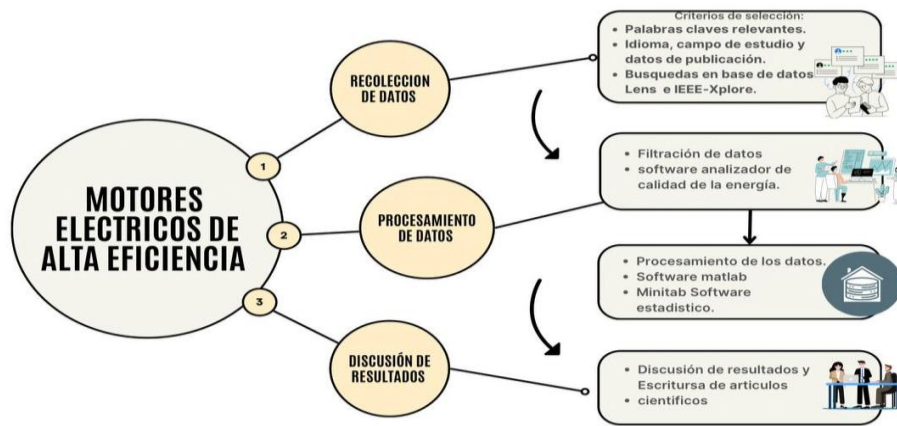


Fig.1. Flujo de Trabajo para la Investigación de Motores Eléctricos de Alta Eficiencia

A. ¿Cuál es el estado actual de la investigación en eficiencia de motores eléctricos?

El estado actual de la investigación se enfoca en optimizar el diseño de motores de inducción (IMs) mediante técnicas como el uso de materiales de alta conductividad, ajustes en la geometría del rotor y la implementación de controladores avanzados para minimizar pérdidas [6]. Se destaca el desarrollo de modelos computacionales para simular el rendimiento energético y la validación experimental de motores de eficiencia premium (IE3 e IE4). Además, se exploran integraciones con energías renovables y sistemas de gestión inteligente para mejorar la eficiencia en aplicaciones industriales[7].

Globalmente cada año se venden alrededor de 30 millones de motores eléctricos nuevos para uso industrial, y existen aproximadamente 300 millones de motores instalados en la industria, comercio y residencias [7]. Se realizó un análisis de publicaciones de los últimos 14 años relacionados con el estudio de la eficiencia de los motores eléctricos, su ciclo de vida y así mismo la implementación de tecnologías nuevas como los VDS La Figura 2 muestra los países con MEPS en el mundo y donde se observa que Honduras ha definido la clase IE3 como la clase mínima de eficiencia para motores trifásicos jaula de ardilla.

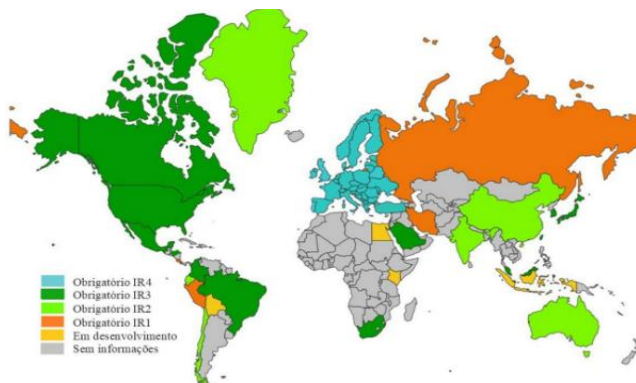


Fig. 2. Requisitos mínimos de eficiencia energética en el mundo.

El levantamiento de resultados mostró que países como India y varias naciones asiáticas lideran en la generación de conocimiento e innovación en este campo. India lidera con el 21.02% de las publicaciones, seguida por Rusia (16.56%) y Bulgaria (6.37%). China ocupa el cuarto lugar (5.10%)[8]. Estos países han enfocado sus esfuerzos en mejorar la eficiencia energética y la integración de tecnologías avanzadas en motores eléctricos, promoviendo regulaciones más estrictas y el desarrollo de normativas enfocadas en la sostenibilidad. En contraste, Honduras se posiciona como uno de los pioneros en Centroamérica en abordar esta temática, con la

oportunidad de establecer una normativa que impulse exclusivamente la implementación de motores de eficiencia IE4 en futuras ediciones de la reglamentación. La adopción de esta normativa representaría un avance significativo en la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental, alineando al país con las tendencias globales en optimización de motores eléctricos.

Una evaluación de las principales palabras claves abordando nuevas tendencias fue además realizada utilizando de esta vez la plataforma SCOPUS. Para ese objetivo, se definieron y emplearon las palabras clave más relevantes en función del tema central del trabajo, entre las cuales se incluyeron: "induction motors" AND "permanent magnet motors" OR "asynchronous motors" OR "synchronous motors" AND "energy" AND "efficiency" AND "power quality" AND "diagnostics" AND NOT "electrical" AND "vehicles" AND NOT "traction motor". Las búsquedas se realizaron en la base de datos académica Scopus y LENS

Un análisis importante basado en la información recopilada es la identificación de las palabras clave más relevantes dentro de los estudios analizados. Para este propósito, se utilizó el software VOSviewer para generar un mapa temático de palabras clave, según la cantidad de veces que fueron citadas en los estudios, así como las conexiones con otros estudios y términos clave, como se muestra en la Fig.3. Para definir y clasificar el universo de palabras clave, se realizó un proceso de agrupamiento en el software, el cual resultó en tres áreas principales: motores de inducción, diagnóstico de fallas, motores síncronos, motores de imanes permanentes, calidad de la energía y eficiencia energética, todas las cuales se abordarán en la revisión sistemática en las siguientes subsecciones.

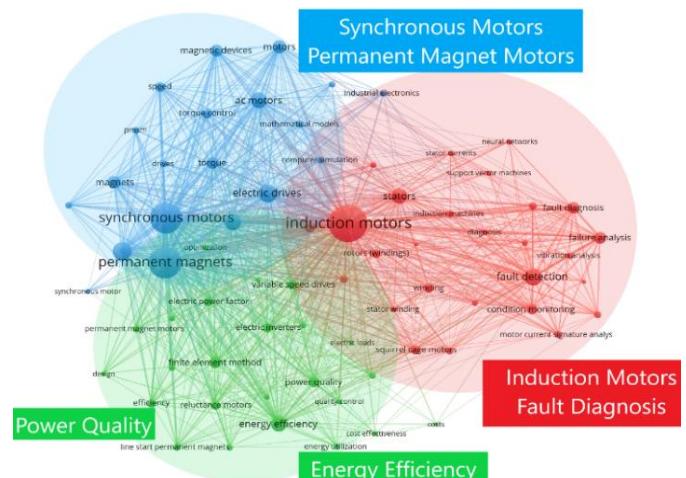


Fig.3. Análisis Comparativo de Motores Síncronos e Inducción: Eficiencia Energética y Diagnóstico de Fallas

Las revisiones bibliográficas basadas en el análisis de palabras clave como se muestra en la Fig.3 permiten comprender el desarrollo y los desafíos en torno a los motores eléctricos de inducción. En este contexto, los estudios relacionados con la eficiencia energética, el control de velocidad mediante variadores de frecuencia (VSD) y la integración de nuevas tecnologías han sido ampliamente explorados. La investigación sobre el ciclo de vida de los motores de inducción abarca desde su diseño y fabricación hasta su operación y reciclaje, destacando la necesidad de estrategias que optimicen su rendimiento y reduzcan su impacto ambiental. Además, la implementación de VSD ha demostrado mejorar significativamente la eficiencia de estos motores al ajustar dinámicamente su velocidad y reducir pérdidas energéticas. Por otro lado, la incorporación de inteligencia artificial, control predictivo y técnicas avanzadas de gestión han emergido como soluciones clave para mejorar la fiabilidad y el desempeño de los motores eléctricos de inducción, asegurando su adaptación a las exigencias de la industria moderna [9].

B. ¿Cómo influye el análisis del ciclo de vida en su evaluación técnico-económica?

En esta sección se realiza una comparativa del ciclo de vida (LCA) de motores de inducción de jaula de ardilla con clases de eficiencia IE1, IE2 e IE3 según lo definido por la IEC 60034-30-1:2014. Para el estudio se tomó como modelo un motor de 11 kW que opera 3236 h/año durante 15 años en el sector industrial [10].

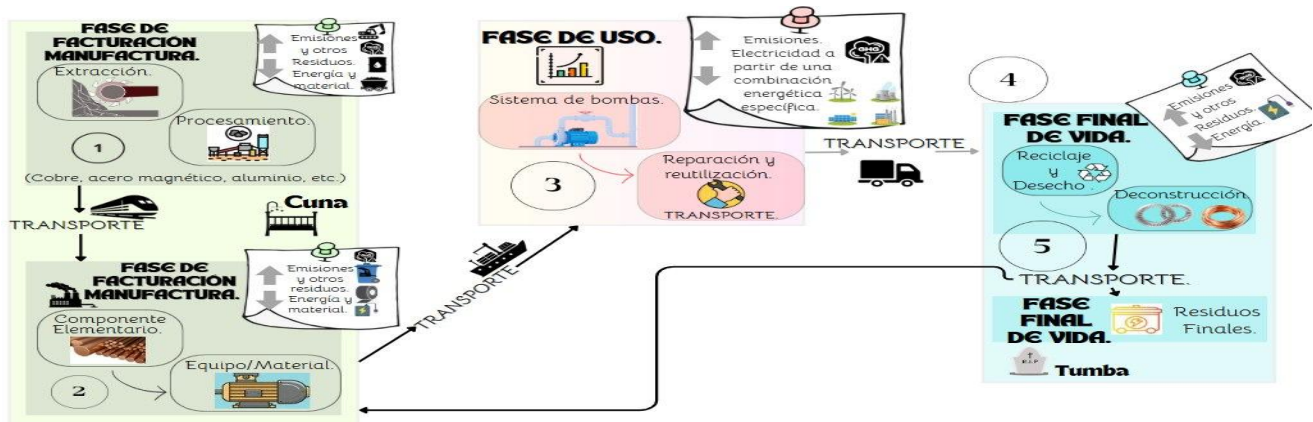


Fig. 4. Ciclo de vida de motores eléctricos.

TABLA I: LISTA DE MATERIALES PARA UN MOTOR DE 11KW PARA CADA EFICIENCIA ANALIZADA [10]-[13].

Material	IE1 [kg]	IE2 [kg]	IE3 [kg]
Acero eléctrico	39.6	52.8	48.4
Otros aceros	10.45	11	9.7
Hierro Fundido	14.3	11	38.1
aluminio	9.9	12.1	3.7
Cobre	7.04	9.9	11.2
Total	81.29	96.8	111.1

Los valores de eficiencia para un motor de 11 kW, 50Hz, 4 polos, según IEC 60034-30-1 [1] son: IE1 (89.4%), IE2 (91.0%), IE3 (92.4%). Para este estudio se tomó un consumo anual de energía para 3236 h de operación [1], calculado como:

$$\text{Energía (kWh)} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Eficiencia}} \times \text{Tiempo} \quad (1)$$

Donde:

Potencia (P): 11 kW

Eficiencia (η): depende del tipo de motor

Tiempo de operación (t): 3,236 horas anuales

TABLA II: RESUMEN DEL CÁLCULO DE ENERGÍA PARA CADA TIPO DE MOTOR

Tipo de motor	Potencia en kW	Eficiencia	Tiempo de operación en horas por año	Energía (kw)
IE1	11	89.40%	3236	39816.55
IE2	11	91.00%	3236	39116.48
IE3	11	92.40%	3236	38523.81

TABLA III: CONSUMO DE LOS MOTORES EN KW A 15 AÑOS EN LEMPIRAS.

Tipo de Motor	Consumo en kWh por tipo de motor en 15 años	Precio del kWh en (HNL)	Costo de operación en (HNL)
IE1	597248.25	L	5.2358 L 3,127,072.39
IE2	586747.2	L	5.2358 L 3,072,090.99
IE3	577857.15	L	5.2358 L 3,025,544.47

Los motores IE3, a pesar de tener un mayor impacto en la producción visto en la tabla I, donde se requieren más materiales para su fabricación, reducen el consumo de energía en un 4.4% en comparación con IE1 y un 2.1% en comparación con IE2, lo que conduce a reducciones de emisiones (25 toneladas CO₂ frente a IE1) y ahorros de costos (101,527.92 HNL frente a IE1) durante 15 años

C. ¿Qué nuevas tecnologías están siendo aplicadas en la industria para mejorar su rendimiento?

El desarrollo de motores eléctricos de alta eficiencia ha sido un pilar clave en la evolución de la movilidad eléctrica y la sostenibilidad industrial. Esta evolución ha sido también observada en motores eléctricos para aplicaciones industriales, donde actualmente han sido definidas cuatro clases de eficiencia (IE1, IE2, IE3 e IE4), con base en el Standard 60034-30-1:2014. Entre las mejoras experimentadas entre la clase IE1 a la IE4 se encuentran la optimización del bobinado del estator[14], la implementación de chapas de acero con menores pérdidas específicas, mejoras en los sistemas de aislamiento térmico [14],[15] y la introducción de imanes permanentes en el rotor para eliminar pérdidas en la jaula, como es el caso de los motores Line Start Permanent Magnet Motor (LSPM)[16],[17]. En los últimos años la simulación computacional ha permitido optimizar la eficiencia y el desempeño de los motores eléctricos, impulsando nuevas tecnologías para motores eléctricos en movilidad eléctrica y consecuentemente en el sector industrial [18].

De forma paralela a estos desarrollos, la investigación de nuevos materiales ha cobrado relevancia. Recientemente se ha incorporado materiales novedosos y avanzados que posean mejores propiedades mecánicas, electromagnéticas y térmicas. Un ejemplo es observado en el estudio en [18], que presentó una resina híbrida nano cerámica orgánica/inorgánica como alternativa al recubrimiento convencional en chapas de acero al silicio para

motores eléctricos, debido a su preparación esta resina ofrece alta conductividad térmica, resistencia a la corrosión y propiedades autoadhesivas. Los ensayos demostraron que el nuevo recubrimiento mejora la protección relativa en un 88.89%, superando ampliamente el 38.89% de los recubrimientos comerciales [18]. Esto resulta especialmente relevante en aplicaciones industriales, donde los motores eléctricos operan en espacios reducidos o de difícil acceso, lo que complica las tareas de mantenimiento.

Para impulsar las nuevas tecnologías de movilidad eléctrica, se han diseñado y aplicado diferentes tipos de motores eléctricos, incluidos los motores de inducción, los motores de reluctancia conmutada (SRM) [19], los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) [20], y los motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) [13]. Estos avances han podido contribuir a superar las limitaciones de los motores de inducción de jaula de ardilla tradicionales.

Los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) destacan por optimizar el campo magnético generado entre el rotor y el estator y es gracias a su operación síncrona, que elimina las corrientes en el rotor durante el funcionamiento, se logran menores pérdidas energéticas y temperaturas de operación más bajas, lo que permite alcanzar niveles superiores de eficiencia[21].

Otras tecnologías, como el motor de reluctancia síncrona, optimizan el flujo magnético mediante un diseño avanzado del rotor, logrando así mayor eficiencia. Además, innovaciones como el motor síncrono de conexión directa (Direct Online Synchronous Motor) están abriendo nuevas oportunidades y aplicaciones en la industria para estas tecnologías. La Tabla X presenta un análisis comparativo entre los motores SynRM, PMSM y SCIM, destacando sus tecnologías, aplicaciones, ventajas y desventajas, con el objetivo de evaluar la eficiencia y rendimiento de estos

Tabla IV: APLICACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS MOTORES ELÉCTRICOS

Tecnologías	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Synchronous Reluctance Motor (SynRM) 	-Bombas, ventiladores, compresores y sistemas de aire acondicionado en plantas industriales [16]. -Sistemas de accionamiento de velocidad variable en cintas transportadoras y maquinaria de manufactura [20].	-No utiliza imanes permanentes, lo que reduce pérdidas por corrientes de Foucault [16]. -Bajas pérdidas en el núcleo: Especialmente con materiales como SMC, ideales para alta frecuencia. [20] -Con el nuevo diseño del rotor se han optimizado las líneas de flujo reduciendo así las pérdidas en el núcleo del rotor.	-Comparado con PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), es decir, Motor Síncrono de imanes permanentes, ofrece menos torque por unidad de volumen [16]. -Cuando se usa SMC (soft-magnetic composite), la permeabilidad es menor que en aceros al silicio [20]
Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) 	-Bombas y compresores [22]. -Sistemas de propulsión en embarcaciones eléctricas[22] -Drones (aplicaciones agrícolas y otras)	-Mayor torque y eficiencia debido a los imanes permanentes [22] -Operación silenciosa y baja vibración [22]. -Alta eficiencia (90-94% en motores sin hierro) y alta eficiencia en rangos de potencia específicos (0.5-50 kW) [23]	-Uso de tierras raras (imanes permanentes) incrementa el costo [22]. -Riesgo de desmagnetización por altas temperaturas [22]. -Mayor costo en motores sin hierro (~600 USD vs ~400 USD para IC-PMSM) [23]
Squirrel Cage Induction Motor (SCIM) 	-Compresores, Cintas transportadoras [24]. -Aplicaciones de control con alta precisión en torque y velocidad [25]. -Ascensores y grúas [26].	-Fabricación sencilla utilizando tecnología estándar de motores de inducción [24]. -Puede utilizarse en estrategias de control avanzadas gracias a la posibilidad de modelado detallado [25]. -Construcción simple, sin escobillas ni anillos rozantes [26].	-En algunos diseños, alcanzar la velocidad síncrona puede ser complicado o imposible debido al fenómeno de Görges [24]. -Su rendimiento puede verse afectado por variaciones térmicas (especialmente en la resistencia del rotor) [25]. Requiere modelado preciso para optimización (e.g., circuito equivalente o FEM)- Sensibilidad a va [26].

D. ¿Cuál es el impacto de los VSD en la eficiencia de los motores de inducción de jaula de ardilla?

Los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla representan la tecnología dominante en aplicaciones industriales, debido a su robustez, bajo costo y mantenimiento reducido. En este contexto, los variadores de velocidad (VSD) se han convertido en una herramienta esencial para mejorar su eficiencia energética. Su implementación permite adaptar la velocidad de operación del motor según la carga, en lugar de operar a velocidad constante, como ocurre en los sistemas tradicionales sin embargo, dichos motores usados en las operaciones de la industria rara vez operan al 100% de su capacidad debido a sus diseños con márgenes de seguridad [27]. En la Figura 5 se presenta la relación entre el ahorro de energía del motor al reducir la velocidad del mismo.

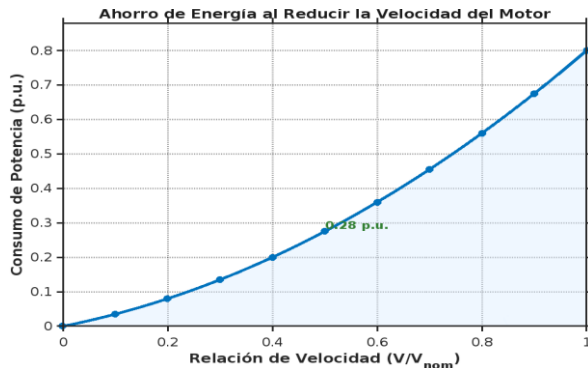


Fig. 5 La relación entre la potencia del motor y la velocidad de rotación[29]

Uno de los beneficios más relevantes del uso de VSD es su capacidad para reducir significativamente el consumo energético en aplicaciones denominadas cargas variables como, ventiladores, bombas y compresores. En estos casos, al disminuir la velocidad del motor, el consumo energético puede reducirse hasta un 50%, debido a la relación cubica entre la velocidad y la potencia requerida [28]. La Figura 5 ilustra los ahorros esperados al reducir la velocidad del motor. Además, los VSD permiten un arranque suave, lo que evita las corrientes de pico típicas de los arranques directos (de hasta 6-7 veces la corriente nominal), reduciendo el estrés térmico y mecánico sobre el motor y los componentes del sistema. Esto se traduce en una mayor vida útil del motor y en una operación más estable de la red eléctrica.

Estudios recientes indican que, incluso considerando estas pérdidas adicionales, el uso de VSD puede mejorar la eficiencia energética general de los motores de jaula de ardilla en un rango del 20% al 60%, dependiendo del perfil de carga y de las condiciones de operación [4]. Además, desde el 1 de julio de 2021, los VSD están incluidos dentro del alcance del Reglamento (UE) 2019/1781, que establece requisitos mínimos de eficiencia energética. Este reglamento aplica a VSD trifásicos estándar con potencias nominales entre 0,12 kW y 1000 kW, y tensiones nominales superiores a 100 V hasta 1000 V inclusive. Conforme a esta normativa, las pérdidas de potencia de los VSD utilizados en este rango deben cumplir, como mínimo, con los niveles de eficiencia definidos por el estándar IE2.

Con el objetivo de analizar el impacto de los variadores de velocidad (VSD) en la eficiencia de los motores de inducción de jaula de ardilla, con un enfoque en los ahorros energéticos demostrados en diversas aplicaciones industriales se presenta la Tabla IV que muestra una evaluación del ahorro energético obtenido mediante el uso de VSD en diferentes escenarios.

Los resultados de este análisis, respaldados por los datos de ahorro energético presentados en la Tabla IV, sugieren la viabilidad y el potencial de los variadores de velocidad (VSD) para el sector industrial de Honduras. La implementación de esta tecnología podría facilitar una transición hacia una mayor eficiencia energética y una operación más sostenible de los motores de inducción de jaula de ardilla en el país. Los significativos ahorros demostrados en diversas aplicaciones industriales subrayan la oportunidad para Honduras de optimizar su consumo energético, lo que redundaría en beneficios económicos y una menor huella ambiental.

TABLA V: EVALUACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE VSD EN APLICACIONES INDUSTRIALES

Artículo	Motor/aplicación	Consumo sin VSD	Consumo con VSD	Ahorro energético
[30]	Motor-bomba 3φ sistema agua	2466 kWh	1521 kWh	38.32%
[31]	Motor-bomba alta presión	0.37 kWh	0.294 kWh	35.14%
[32]	Motor-Acoplamiento de ventilador industrial	0.537 kWh	0.372 kWh	30.72%

III. CONSIDERACIONES FINALES

El análisis del ciclo de vida (LCA) demuestra ser una herramienta esencial para la evaluación técnico-económica de los motores eléctricos de inducción. Aunque los motores de clase IE3 requieren una mayor cantidad de materiales en su fabricación, lo que incrementa su energía incorporada y sus emisiones en la etapa de producción, estos compensan su impacto inicial mediante una operación más eficiente. A lo largo de su vida útil de 15 años, los motores IE3 reducen el consumo energético y las emisiones de CO₂ en comparación con los motores IE1 e IE2, generando además ahorros significativos en costos operativos. Esta evidencia subraya la viabilidad económica y ambiental de migrar hacia motores más eficientes, aportando beneficios tangibles tanto para los usuarios industriales como para las políticas de sostenibilidad energética.

El panorama tecnológico de los motores eléctricos ha evolucionado notablemente gracias a la integración de nuevos materiales, simulaciones computacionales avanzadas y diseños innovadores. Tecnologías como los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM), los motores de reluctancia síncrona (SynRM) y los motores LSPM están revolucionando la eficiencia energética en aplicaciones industriales. Estas soluciones permiten mejorar significativamente el torque, reducir pérdidas por corrientes parásitas y disminuir la temperatura de operación, al mismo tiempo que enfrentan desafíos como el uso de tierras raras o los costos elevados. La investigación en recubrimientos avanzados y materiales autoadhesivos también ha fortalecido la durabilidad de estos sistemas. En conjunto, estas innovaciones amplían las posibilidades de aplicación en entornos industriales exigentes, posicionando a los motores de alta eficiencia como un componente clave en la transición energética global.

Los variadores de velocidad (VSD) han demostrado ser una tecnología altamente eficaz para optimizar la eficiencia energética de los motores de inducción de jaula de ardilla. Al permitir la regulación de la velocidad del motor según la demanda de carga, los VSD logran una reducción del consumo energético de hasta un 50% en aplicaciones de carga variable, como bombas, ventiladores y compresores. Además, su capacidad de proporcionar arranques

suaves minimiza el desgaste mecánico y térmico, extendiendo la vida útil del motor y reduciendo las perturbaciones en la red eléctrica. Los estudios presentados respaldan el potencial de los VSD para promover la eficiencia energética en la industria hondureña, lo que representa una oportunidad concreta de reducir la huella ambiental y los costos operativos en el mediano y largo plazo.

IV REFERENCES

- [1] C. Fortea *et al.*, «Evaluation of the effectiveness of energy sustainability measures through the dynamic energy consumption model», *Front. Energy Res.*, vol. 12, p. 1383314, ago. 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1383314.
- [2] J. R. Gómez, E. C. Quispe, R. D. P. Castrillón, y P. R. Viego, «Identification of Technoeconomic Opportunities with the Use of Premium Efficiency Motors as Alternative for Developing Countries», *Energies*, vol. 13, n.º 20, p. 5411, oct. 2020, doi: 10.3390/en13205411.
- [3] J. M. Tabora, M. E. De Lima Tostes, E. O. De Matos, U. H. Bezerra, T. M. Soares, y B. S. De Albuquerque, «Assessing Voltage Unbalance Conditions in IE2, IE3 and IE4 Classes Induction Motors», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 186725-186739, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3029794.
- [4] V. Goman, V. Prakht, V. Kazakbaev, y V. Dmitrievskii, «Comparative Study of Induction Motors of IE2, IE3 and IE4 Efficiency Classes in Pump Applications Taking into Account CO2 Emission Intensity», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 23, p. 8536, nov. 2020, doi: 10.3390/app10238536.
- [5] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, y J. Fong, «Perspectives on Electric Motor Market Transformation for a Net Zero Carbon Economy», *Energies*, vol. 16, n.º 3, p. 1248, ene. 2023, doi: 10.3390/en16031248.
- [6] M. J. Akhtar y R. K. Behera, «Optimal design of stator and rotor slot of induction motor for electric vehicle applications», *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 9, n.º 1, pp. 35-43, mar. 2019, doi: 10.1049/iet-est.2018.5050.
- [7] A. Esteban Bravo, E. S. Torres, y G. A. Ramos L., «Transient overvoltage analysis in low voltage VSDs based on computational model», en *2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Lake Buena Vista, FL, USA: IEEE, oct. 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ias.2013.6682598.
- [8] P. Dinolova, V. Ruseva, y O. Dinolov, «Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations», *Energies*, vol. 16, n.º 20, p. 7136, oct. 2023, doi: 10.3390/en16207136.
- [9] E. R. C. D. Silva, H. Razik, L. M. R. Baccarini, M. B. D. R. Corrêa, y C. B. Jacobina, «Application of Some Artificial Intelligence Techniques in Induction Motor Fault Diagnosis», *Eletrônica Potência*, vol. 16, n.º 3, pp. 241-248, ago. 2011, doi: 10.18618/rep.20113.241248.
- [10] D. F. De Souza *et al.*, «Environmental impacts of electric motor technologies: Life cycle approach based on EuP Eco-Report», *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 111, p. 107741, ene. 2025, doi: 10.1016/j.eiar.2024.107741.
- [11] «Informe de ajuste tarifario 3er trimestre 2025.», Comisión Reguladora de Energía Eléctrica., Tegucigalpa, 3er trimestre 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cree.gob.hn/>
- [12] A. de Almeida, A. Saki, J. Fong, y N. Quaresma, «Deliverable D2.4 – Analysis of end-of-life practice for electric motors».
- [13] M. Torrent, E. Martínez, y P. Andrada, «Assessing the environmental impact of induction motors using manufacturer's data and life cycle analysis», *IET Electr. Power Appl.*, vol. 6, n.º 8, pp. 473-483, sep. 2012, doi: 10.1049/iet-epa.2012.0021.
- [14] «BLDC Motors - A Survey of Topologies, Control & Applications», *Int. J. Eng. Res.*, vol. 5, n.º 03.
- [15] H. Karkkainen, L. Aarniovuori, M. Niemela, y J. Pyrhonen, «Converter-Fed Induction Motor Efficiency: Practical Applicability of IEC Methods», *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 11, n.º 2, pp. 45-57, jun. 2017, doi: 10.1109/mie.2017.2693421.
- [16] Y. Guo, G. Lei, y J. Zhu, «Characterization of Advanced Magnetic Materials for Developing High-Power-Density High-Efficiency Electric Motors for Driving Electric Vehicles», en *2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Xi'an, China: IEEE, oct. 2024, pp. 863-868, doi: 10.1109/itec-asia-pacific63159.2024.10738533.
- [17] Y. Guo *et al.*, «Designing High-Power-Density Electric Motors for Electric Vehicles with Advanced Magnetic Materials», *World Electr. Veh. J.*, vol. 14, n.º 4, p. 114, abr. 2023, doi: 10.3390/wevj14040114.
- [18] J. Y. Leong, «Review on Circularity in the Electric Vehicle (EV) Industry», *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, n.º 9, p. 426, sep. 2024, doi: 10.3390/wevj15090426.
- [19] S. Kocan, P. Rafajdus, R. Bastovansky, R. Lenhard, y M. Stano, «Design and Optimization of a High-Speed Switched Reluctance Motor», *Energies*, vol. 14, n.º 20, p. 6733, oct. 2021, doi: 10.3390/en14206733.
- [20] Y. Du y J. Xu, «The Robust Observer for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor», en *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Jeju: IEEE, oct. 2018, pp. 1547-1550, doi: 10.23919/icems.2018.8549299.
- [21] H. Karkkainen, L. Aarniovuori, M. Niemela, J. Pyrhonen, y J. Kolehmainen, «Technology comparison of induction motor and synchronous reluctance motor», en *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing: IEEE, oct. 2017, pp. 2207-2212, doi: 10.1109/iecon.2017.8216371.
- [22] T. Wu y J. Zhu, «A Novel Thermal Analysis Method of Tubular PM Linear Motors Based on Transfer-Learning».
- [23] P. Ruhland, A. Matveev, K. Nielsen, K. Kvinneland, S. Coutandin, y J. Fleischer, «New Production Techniques for Electric Motors in High Performance Lightweight Applications», en *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Ludwigsburg, Germany: IEEE, dic. 2020, pp. 1-8, doi: 10.1109/edpc51184.2020.9388183.
- [24] «Modeling of the Squirrel-Cage Induction Motor Having Symmetrically Distributed Groups of Broken Cage Bars», en *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 187-196, doi: 10.1007/978-3-319-11248-0_15.
- [25] O. A. Morfin *et al.*, «The Squirrel-Cage Induction Motor Model and Its Parameter Identification Via Steady and Dynamic Tests», *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 46, n.º 3, pp. 302-315, feb. 2018, doi: 10.1080/15325008.2018.1445140.
- [26] S. F. Contreras, C. A. Cortes, y M. A. Guzmán, «Modelling of squirrel cage induction motors for a bio-inspired multi-objective optimal design», *IET Electr. Power Appl.*, vol. 11, n.º 4, pp. 512-523, abr. 2017, doi: 10.1049/iet-epa.2016.0672.
- [27] I. Al-Bahadly, «Energy Saving with Variable Speed Drives in Industry Applications».
- [28] R. Carlson, «The Correct Method of Calculating Energy Savings to Justify Adjustable-Frequency Drives on Pumps».
- [29] M. Sadek, R. El-Maghraby, y M. Fathy, «Evaluation of variable speed drives to improve energy efficiency and reduce gas emissions: Case study», *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, vol. 29, n.º 2, pp. 111-118, 2023, doi: 10.2298/ciceq220318018s.
- [30] R. N. Rachmadita, F. W. N. Rahman, E. Setiawan, A. I. Juniani, y L. Jagad, «Energy Saving Opportunities in 3-Phase Induction Motors with Variable Speed Drive (V.S.D.) Drives», vol. 11, 2024.
- [31] M. A. E. Salama, N. M. El-Naggar, y S. Abu-Zaid, «Energy saving analysis for pump-motor set in water purification plant using variable speed drive», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, nov. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-75601-z.
- [32] G. Abhiram, M. M. K. D. Manathunga, K. Raveendran, y N. S. Withanage, «Performance Analysis of High-Efficiency Motor and Variable Speed Drive in Black Tea Processing Machinery», *J. Biosyst. Eng.*, vol. 45, n.º 4, pp. 310-317, dic. 2020, doi: 10.1007/s42853-020-00071-w.