



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i2.3794>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo Tipo Ensayo

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

Efficiency of electric motors in industrial machinery

Eficiência de motores elétricos em máquinas industriais

Aníbal Javier Chica-Tambaco ^I
anibal.chica.tambaco@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-5208-8713>

Pablo Luis Ortiz-Caicedo ^{II}
pablo.ortiz@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-7149-130X>

Christian Enrique Álava-Vélez ^{III}
christian.alava.velez@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-7911-062X>

Alex Andrés Gonzales-Vega ^{IV}
alex.gonzalez.vega@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3785-0442>

Correspondencia: anibal.chica.tambaco@utelvt.edu.ec

***Recibido:** 30 de febrero de 2024 ***Aceptado:** 18 de marzo de 2024 * **Publicado:** 10 de abril de 2024

- I. Universidad Técnica "Luis Vargas Torres" de Esmeraldas, Ecuador.
- II. Universidad Técnica "Luis Vargas Torres" de Esmeraldas, Ecuador.
- III. Universidad Técnica "Luis Vargas Torres" de Esmeraldas, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica "Luis Vargas Torres" de Esmeraldas, Ecuador

Resumen

Se realizó un estudio centrado en analizar la importancia de la eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial, bajo el enfoque de una revisión bibliográfica. Razón por la cual se indagó en diversas plataformas digitales de índole académica y científica para acceder a la información de interés para el desarrollo de la temática. Los resultados arrojados en los diversos documentos consultados indican que la industria es uno de los sectores económicos con alta demanda energética de combustibles fósiles, siendo un 65% del fluido eléctrico consumido por el uso de los motores eléctricos, de esta forma tiene una gran contribución en las emisiones de gases de efecto invernadero (GAI) responsables de la crisis climática actual. De ahí, la adherencia a la eficiencia energética en las industrias es fundamental, pues favorece además del factor económico, el estamento social y el ambiental. El avance tecnológico ha permitido la construcción de motores eléctricos de alta eficiencia energética que ofrecen resultados inmediatos en términos de reducción de energía y emisiones. El sector industrial proporciona múltiples beneficios y servicios a la sociedad actual, por ello, en el presente, debe asumir los criterios de responsabilidad social, económica y ambiental, orientados a un futuro con el mínimo impacto ambiental de la Industria y en este propósito el logro de la mayor eficiencia en los motores eléctricos en la maquinaria industrial se torna fundamental.

Palabras clave: Industria, motores eléctricos, eficiencia energética, medio ambiente.

Abstract

A study was carried out focused on analyzing the importance of the efficiency of electric motors in industrial machinery, under the approach of a bibliographic review. Reason why various digital platforms of an academic and scientific nature were investigated to access information of interest for the development of the topic. The results obtained in the various documents consulted indicate that the industry is one of the economic sectors with high energy demand for fossil fuels, with 65% of the electrical fluid consumed by the use of electric motors, thus having a great contribution in greenhouse gas emissions (GAI) responsible for the current climate crisis. Hence, adherence to energy efficiency in industries is essential, since it also benefits the economic, social and environmental factors. Technological advancement has allowed the construction of highly energy efficient electric motors that offer immediate results in terms of energy and emissions reduction. The industrial sector provides multiple benefits and services to today's society, therefore, in the present, it must assume the criteria of social, economic and environmental responsibility, aimed at a future with the minimum environmental impact of the Industry

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

and in this purpose the achievement. Greater efficiency in electric motors in industrial machinery becomes essential.

Keywords: Industry, electric motors, energy efficiency, environment.

Resumo

Foi realizado um estudo focado em analisar a importância da eficiência dos motores elétricos em máquinas industriais, sob o enfoque de uma revisão bibliográfica. Motivo pelo qual foram investigadas diversas plataformas digitais de caráter acadêmico e científico para acesso a informações de interesse para o desenvolvimento do tema. Os resultados obtidos nos diversos documentos consultados indicam que a indústria é um dos setores econômicos com elevada procura energética de combustíveis fósseis, sendo 65% do fluido elétrico consumido pela utilização de motores elétricos, tendo assim um grande contributo nas emissões de gases com efeito de estufa. (GAI) responsável pela actual crise climática. Assim, a adesão à eficiência energética nas indústrias é essencial, uma vez que beneficia não só o factor económico, mas também os factores sociais e ambientais. O avanço tecnológico tem permitido a construção de motores elétricos de alta eficiência energética que oferecem resultados imediatos em termos de energia e redução de emissões. O setor industrial proporciona múltiplos benefícios e serviços à sociedade atual, portanto, no presente, deve assumir os critérios de responsabilidade social, económica e ambiental, visando um futuro com o mínimo impacto ambiental da Indústria e neste propósito a conquista de Maior a eficiência em motores elétricos em máquinas industriais torna-se essencial.

Palavras-chave: Indústria, motores elétricos, eficiência energética, meio ambiente.

Introducción

La maquinaria industrial es una herramienta esencial que ha perfeccionado y optimizado las operaciones productivas en la industria mundial, en paralelo, estos equipos demandan un alto consumo eléctrico que en gran parte proveniente de fuentes primarias extraídas de combustibles fósiles o fuentes de energía no renovables, lo cual está muy relacionado con las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) vinculados con las afectaciones ambientales evidenciadas en el cambio climático y el calentamiento global que afecta a las regiones del mundo hoy.

Existen distintos tipos de gases de efecto invernadero y su contribución al calentamiento global varía. El dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), entre otros, están presentes en la atmósfera de manera natural, pero son también generados por las actividades humanas que contribuye a

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

su acumulación y aumenta el calentamiento de la Tierra, como consecuencia, se dan con más frecuencia fenómenos climáticos extremos como olas de calor, frío extremo, sequías e inundaciones, entre otros (Parlamento Europeo, 2023).

Según expone Lemos, (2021) el sector industrial es el principal consumidor de energía a nivel mundial, el alto consumo de este recurso se debe a la necesidad de transformar la materia prima en un producto o servicio. En concordancia, afirma Trianni, Cagno, & Accordini, (2019) los sistemas de motores eléctricos cubren una parte importante del consumo de energía industrial, siendo que, según el Portal de Ingenieros Españoles, un 46% de la electricidad mundial se utiliza para producir energía mecánica a través de sistemas accionados por motores eléctricos (Ingenieros.es, 2022). Coincidiendo con esto también el autor López, (2018) pone de manifiesto que el mayor consumo eléctrico en la industria se da en la fuerza motriz (motores eléctricos), que está entre el 46% y el 67% del consumo total; por tanto, es necesario implementar medidas como el cambio de motores estándar por motores de alta eficiencia.

Otro aspecto importante a destacar de acuerdo con Lemos, (2021) es que la energía para las actividades industriales se utiliza desde varias fuentes, tanto de sectores energéticos externos, es decir aquellos que provienen de fuentes exógenas que llegan hasta la planta como la electricidad, el gas natural, los combustibles líquidos, pero también internos como aquellos que se transforman o generan dentro de la planta. En tal sentido, recalca dicha autora, la utilización de recursos provenientes de combustibles fósiles convierte a la industria no solo es una gran generadora de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sino también de otros residuos especiales y peligrosos tanto para el ser humano como para el medio natural (Lemos, 2021).

Los motores eléctricos son máquinas rotatorias capaces de transformar energía eléctrica en energía mecánica. Estos motores son uno de los componentes más importantes en la industria de hoy en día y es que estos motores pueden adoptar múltiples tamaños, tienen poco peso y consiguen buenos resultados tanto de rendimiento como de par (Rico, 2019).

Su alimentación puede ser tanto mediante corriente continua como alterna lo que proporciona una de las grandes divisiones dentro de estos motores. Dentro de estos dos grupos existen también otras múltiples divisiones más relacionadas con la estructura interna o los métodos de accionamiento y control, existiendo así una gran cantidad de motores eléctricos que se adaptan a las distintas necesidades (Rico, 2019).

A medida que se incrementan las actividades productivas que fomentan el desarrollo en los diversos países del orbe, cada vez el consumo eléctrico para mover la economía mundial se vuelve esencial a la vez que crecen las restricciones de toda índole, especialmente las de tipo ambiental lo que obliga a que la industria

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

a incurrir en prácticas más eficientes (Zapata, Martínez, & Mosquera, 2018).

Dado que los sistemas de motores eléctricos representan una proporción tan grande del consumo total de electricidad (más del 50%), se podría lograr un gran potencial de ahorro mediante el uso de sistemas de motores energéticamente eficientes tanto en instalaciones nuevas como acelerando el reemplazo de motores viejos e ineficientes (de Almeida, Ferreira, & Fong, 2023). Según estima Roelof, Mikko, & Ritva, (2007) los motores de alta eficiencia pueden proporcionar importantes ventajas, como ayudar a reducir los costes energéticos y a limitar las emisiones de carbono.

Frente a este panorama, enfatizan de Almeida, Ferreira, & Fong, (2023) la eficiencia energética es una de las estrategias más poderosas para mitigar los impactos del cambio climático al reducir la demanda de energía, lo que a su vez reduce las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), así como la carga sobre la oferta de expansión de la generación renovable.

Desde esta perspectiva, es cada vez más importante en muchos países, en medio de una crisis ambiental global, mantener altos niveles de desarrollo industrial por las contribuciones económicas que otorga a las propias industrias, a la economía mundial, regional, nacional y local, lo cual, se traduce en evolución, crecimiento y bienestar para la población en muchas naciones, no obstante, también existe la demanda de que dichas actividades productivas deben acoger los principios del desarrollo sustentable, una noción que alude al desempeño eficaz de las empresas en términos económicos, medioambientales y sociales.

Teniendo en cuenta lo anterior, este ensayo científico se centra en analizar la importancia de la eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial, bajo el enfoque de una revisión bibliográfica.

Desarrollo

Los compromisos medioambientales del sector industrial en la construcción de un presente y futuro deseable para la sociedad de hoy que exige un entorno limpio y saludable, requiere asumir críticamente la implementación de los lineamientos de la eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial, dado que, tal y como se ha mencionado anteriormente, dichas herramientas son indispensables para efectuar las operaciones diarias requeridas, sin embargo, demandan un alto consumo energético, al mismo tiempo, la producción de GEI en el ámbito industrial representan un problema y una intranquilidad a escala global de gran relevancia, en este sentido, se viene advirtiendo desde diversas instancias de la necesidad de tomar las medidas correctivas o preventivas en el sector industrial, para minimizar los efectos contaminantes y nocivos que traen consigo las emisiones para el ser humano y para el ecosistema natural. En particular, todas las empresas tienen un objetivo en común, y ese es obtener el mayor nivel de

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

beneficios posibles y mejorar su competitividad. Este fin se consigue reduciendo los gastos en la empresa, y esto se puede lograr echando mano de la eficiencia energética, en función de que gran parte de los procesos que desempeñan demandan y consumen una gran cantidad de electricidad (Espada, 2015). En este sentido, como es de esperar, la industria ocupa gran parte de la demanda eléctrica empresarial ya que sus actividades requieren de mayor consumo diario, llegando prácticamente a las tres cuartas partes del consumo (Espada, 2015). Cabe agregar que para la consecución del objetivo de la eficiencia energética en las industrias necesitan consumir menos energía, y uno de los mecanismos que más consumen son los motores eléctricos, siendo un 65% de la energía eléctrica en la industria (Espada, 2015).

La adherencia de la eficiencia energética en las industrias favorece además del factor económico, que es el más evidente, también beneficia el aspecto ambiental, menos visible y tangible que el anterior, pero realmente mucho más importante en el interés de contribuir a la mitigación de la crisis ambiental global y las problemáticas que trae consigo y cuyas repercusiones se evidencian en la afectación de la calidad de vida de todos los habitantes del planeta. Es sabido que el problema ambiental tiene muchos responsables, entre ellos se encuentran el crecimiento insostenible de las industrias agresivas al medio ambiente, el uso de maquinarias pesadas y la falta de conciencia social en el uso y explotación de los combustibles fósiles, así como la explotación intensiva de los recursos minerales de la Tierra (Reynosa, 2015).

Dada la situación medioambiental actual, como avance positivo, los sistemas industriales productivos, en muchos países desarrollados, en desarrollo y de las economías emergentes están asumiendo el camino adecuado de desarrollo sostenible, necesario para acelerar y conseguir disminuir las emisiones y con ello la neutralidad de carbono, a la vez que se consigue el crecimiento económico del sector.

Todo lo anteriormente señalado está en línea con los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, en concreto, con el ODS 9 referido a la necesidad de construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación (Pacto Mundial, 2016). Hay determinadas empresas cuyo núcleo de negocio está más directamente ligado al ODS 9, como las del sector industrial, las cuales, entre otras muchas medidas, pueden adaptar la empresa a una economía baja en carbono, reduciendo las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), y la contaminación y promoviendo la eficiencia energética para contribuir al logro de dicho Objetivo global (Pacto Mundial, 2016).

Motores industriales de alta eficiencia

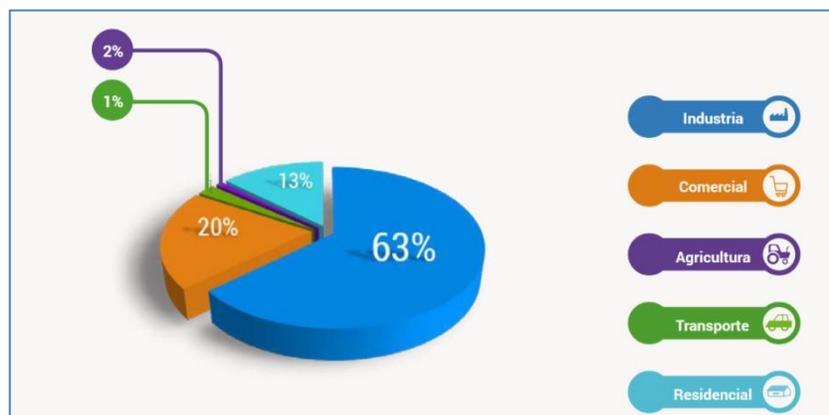
Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en trabajo mecánico y en la mayoría de los casos conforman sistemas más complejos. En aplicaciones industriales, los motores hacen parte de sistemas de

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

bombeo, aire comprimido, ventiladores, transporte de materiales y otros tipos de procesos. Estos equipos son responsables del 69% del consumo de energía eléctrica en la industria (CAF, 2018).

Si se atiende a la utilización de motores eléctricos por sectores, como se puede ver en la siguiente figura, el mayor potencial, con el 63%, se encuentra en la industria, seguido por un 20% en el sector comercial; 13% el sector residencial; 2% agricultura y 1% transporte (CAF, 2018).

Figura 1. Uso de motores por tipo de sector



Nota. Fuente: (CAF, 2018)

En el contexto de la sustentabilidad ambiental en los sistemas industriales productivos, relacionados con las nuevas realidades que se han venido configurando asociados el concepto de eficiencia energética, los motores eléctricos en maquinaria industrial deben ofrecer una eficiencia energética óptima. Según apuntan Caner, Temiz, Huner, & Uzun, (2012) la eficiencia del motor es la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada, generalmente expresada como porcentaje. Los motores energéticamente eficientes utilizan menos energía que los motores estándar para realizar la misma cantidad de trabajo. Se ha logrado una mayor eficiencia energética en los motores eléctricos mediante varias mejoras de diseño:

- 20% a 60% más cobre en devanados
- Un 35% más de acero eléctrico en los núcleos.
- Laminación más delgada.
- Acero eléctrico de mayor calidad.
- Diseño de barra de rotor más eficiente.
- Reducción de pérdidas por viento, fricción y carga perdida.
- Pérdidas de resistencia reducidas (I^2R) a través de un núcleo más largo.
- Entrehierro optimizado entre el rotor y el estator.

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

- Tolerancias de mecanizado más estrechas.

Los motores actuales se producen con índices de eficiencia más altos que los motores estándar, pero la decisión de reemplazar un motor existente se centra en los ahorros de costos reales que dependen de varios puntos clave, como la eficiencia operativa y el porcentaje de tiempo con cargas determinadas (Boubakri, Saad, & Chakroune, 2019).

En este sentido, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE, 2010) define la eficiencia de un motor como la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada. Conforme a la eficiencia pueden considerarse tres géneros de motores eléctricos: a) Motores de Eficiencia Estándar; b) Motores de Alta Eficiencia y; c) Motores de Eficiencia Premium. Así, los motores eléctricos tienen la máxima eficiencia, cuando las pérdidas permanentes o fijas son casi iguales a las pérdidas variables. La eficiencia se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia Eléctrica que entra} - \text{Pérdidas}}{\text{Potencia Eléctrica que entra}}$$

Los estándares de eficiencia de motores en la esfera internacional quedan definidos a través de las Organizaciones de Estándares de Motores como la International Electrotechnical Commission (IEC) mismas que establecen estándares de eficiencia que se adoptan en muchos países (Organización ISO) (Coll Vitoria, 2020). En cuanto a los motores eléctricos, el parámetro de referencia es la eficiencia, clasificado por primera vez por la norma IEC 60034-30-1:2008 (Muñoz, y otros, 2021).

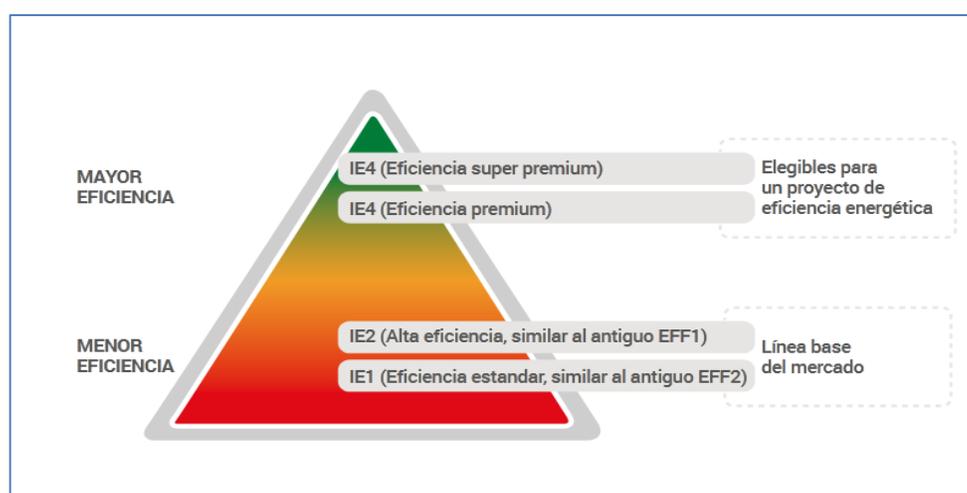
Las Normas Europeas (EN) 60034-30:2009 definen clases de eficiencia. La National Electrical Manufacturers Association (NEMA) establece estándares para la región estadounidense, las cuales en muchos casos se convierten en leyes (Coll Vitoria, 2020). Cabe agregar que el citado autor destaca que las normas IEC y NEMA miden la eficiencia de forma diferente, las eficiencias son similares, pero no iguales. Actualmente, el estándar IEC define cuatro clases de eficiencia, a saber, IE1, IE2, IE3 e IE4, y se espera que la próxima edición defina la clase de eficiencia IE5 (Muñoz, y otros, 2021). Con los estándares internacionales de eficiencia, cuanto mayor sea el número, mayor será la eficiencia del motor (Movimiento ABB, 2021).

En este sentido, la Eficiencia Estándar (IE1); generalmente se refiere a los motores utilizados antes de la década de 1990; la Eficiencia Alta (IE2), el término eficiente energéticamente en EE.UU aplica para la compra de motores nuevos a partir de 1997; la Eficiencia Premium, requerido en EEUU para compras de motores nuevos a partir del 2010 (Coll Vitoria, 2020).

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

De acuerdo con el estándar IEC, la eficiencia nominal de un motor depende de su potencia (medida en kW o HP), un motor de mayor eficiencia o rendimiento consume menos energía para desarrollar la misma potencia mecánica (CAF, 2018). En términos de eficiencia de motores, la eficiencia nominal, constituye la eficiencia promedio obtenida al probar un grupo representativo de motores. El requerimiento de los estándares es alcanzar o exceder la eficiencia nominal (Coll Viloría, 2020). Por su parte, la eficiencia mínima, garantizada, o mínima garantizada, sirve para tomar en cuenta las variaciones en el grupo (población). Permite pérdidas de hasta el 20% más que el nominal (Coll Viloría, 2020).

Figura 2. Clasificación de la eficiencia de motores con el estándar IEC



Nota. Fuente: (CAF, 2018)

Los motores energéticamente eficientes ofrecen resultados inmediatos en términos de reducción de energía y emisiones. El uso de motores de alta eficiencia en la industria podría reducir el 10% del consumo mundial de electricidad (Ingerieros.es, 2022). Los avances tecnológicos también han permitido que nuevas cargas (dispositivos, motores eléctricos, etc.) sean más eficientes, mediante mejoras en los materiales, procesos de fabricación, así como la introducción de nuevas tecnologías (Muñoz, y otros, 2021).

Los motores eléctricos han sido objeto de importantes mejoras de rendimiento en las últimas dos décadas, impulsadas por regulaciones de eficiencia mínima, una mayor conciencia de la importancia de la eficiencia energética y sus beneficios, así como por nuevos desarrollos tecnológicos acelerados por la competencia entre los fabricantes de motores (de Almeida, Ferreira, & Fong, 2023).

Con los recientes avances tecnológicos en materia de eficiencia energética, el potencial de mejora en la industria es significativo y está disponible ahora mismo. Existen soluciones de eficiencia energética que pueden ayudar a la industria a mitigar el cambio climático y a reducir los costes de la energía sin comprometer el rendimiento y la productividad (Ingerieros.es, 2022). En la última década, el progreso en

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

la tecnología de motores eléctricos ha sido excepcionalmente rápido, con la aparición de nuevas tecnologías energéticamente eficientes (Movimiento ABB, 2021).

Los motores de inducción están disponibles con eficiencias superiores a IE4, mientras que los motores de imán permanente y los motores SynRM están disponibles con eficiencias superiores al nivel IE5 (de Almeida, Ferreira, & Fong, 2023).

Motores de inducción

El motor de inducción es una de las innovaciones más importantes de la historia contemporánea y dio inicio oficialmente a la segunda revolución industrial al mejorar significativamente la eficiencia de la generación de energía. En el mundo industrial moderno, los motores de inducción se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones (El-Shahat, 2023).

El motor de inducción suele ser la primera opción para un controlador eléctrico debido a su diseño robusto, simple y extremadamente confiable, y a su bajo costo inicial. Acelera las inercias de carga elevada con mayor facilidad y rapidez y es más fiable en condiciones de carga transitoria que los motores síncronos (Stewart, 2019). Las ventajas de los motores de inducción son las siguientes: a) Los costos de mantenimiento, compra e instalación son menores y; b) hay muchas combinaciones de potencia nominal, clasificación de voltaje y gabinetes disponibles, lo que los convierte en la opción predominante para todo tipo de transmisiones de bombas, compresores, sopladores y ventiladores.

Mejorar la eficiencia de los motores de inducción es vital desde el punto de vista del ahorro de energía en la industria y en todas las categorías de la vida porque el desperdicio de energía equivale a un desperdicio de dinero sin beneficios. La maximización de la eficiencia supone un gran ahorro de energía eléctrica consumida por el motor y mejora el factor de potencia (El-Shahat, A & Ali, D, 2023).

Los recientes estudios encuentran que reemplazar un motor de inducción estándar por un motor de alta eficiencia puede reducir el consumo de energía hasta en un 40%. Existen varios avances en motores de inducción que incluyen, entre otros, eficiencia energética, variadores de frecuencia (VFD), motores de inducción de imán permanente (PM), control de par directo (DTC) y control inalámbrico (Thirugnanam, 2023).

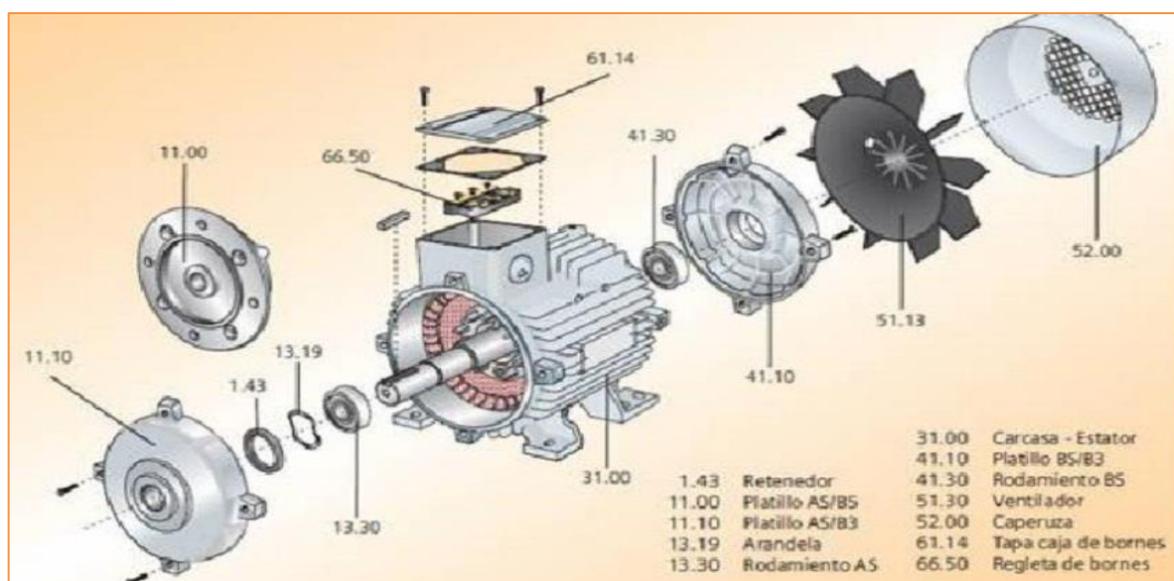
Un avance en los motores de inducción con alta eficiencia energética es el uso de variadores de frecuencia (VFD). Estos dispositivos permiten ajustar la frecuencia de la potencia suministrada al motor, lo que a su vez permite controlar la velocidad del motor (Thirugnanam, 2023). Se ha demostrado que los motores de inducción utilizados con VFD tienen una eficiencia energética mejorada en comparación con los motores tradicionales de velocidad constante puede generar ahorros de energía de hasta un 30%. Los variadores de

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

frecuencia (VFD) se utilizan para controlar la velocidad de los motores de inducción, permitiéndoles operar a diferentes velocidades según la aplicación. Esto puede generar importantes ahorros de energía, así como un mejor control y precisión (Thirugnanam, 2023).

Otro avance es el uso de motores de inducción de alta eficiencia, que están diseñados para tener menores pérdidas que los motores estándar. Estos motores suelen tener laminaciones de acero de mayor calidad, mejor aislamiento y diseño de devanado mejorado. El uso de motores de alta eficiencia puede suponer un ahorro energético de hasta un 10 % en comparación con los motores estándar (Thirugnanam, 2023).

Figura 3. Componentes del motor de inducción



Nota. Fuente: (Puerta & Arias, 2013)

Motor industrial de imanes permanentes

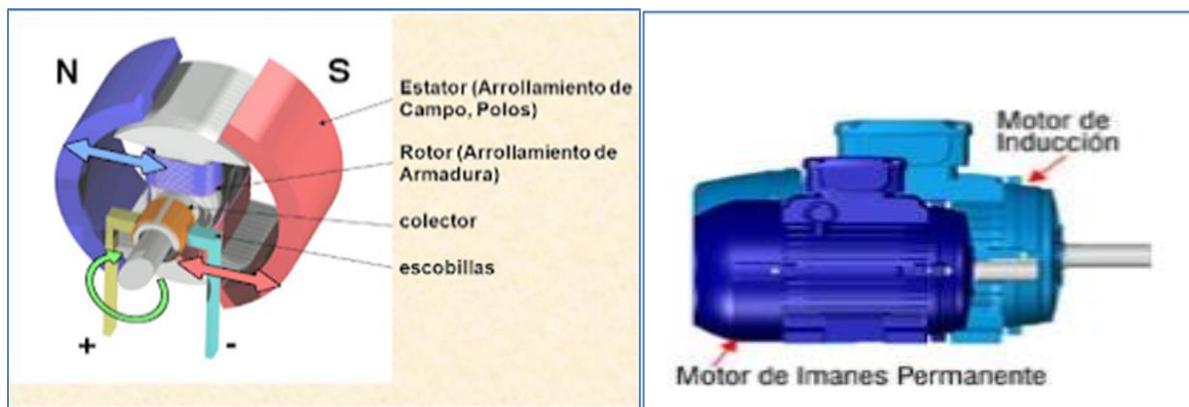
Con la introducción de nuevas tecnologías surgen nuevos escenarios como futuros sustitutos del motor de inducción convencional, como es el motor de imanes permanentes, que cambia el paradigma del motor de inducción convencional y sus características de funcionamiento (Muñoz, y otros, 2021). Inicialmente, la tecnología PMM (Permanent Magnet Motors) o Motor de Imanes Permanentes en los motores eléctricos se implementó en la bomba sumergible eléctrica extensible (ESP, por sus siglas en inglés), proporcionándoles mayor eficiencia y un tiempo de vida útil más prolongado. Hoy en día, esta tecnología ha extendido su uso a la industria, particularmente del sector petrolero (Aux Millan, 2024). Igualmente, los motores síncronos de imanes permanentes son los principales componentes de potencia de los vehículos eléctricos (Xu, Qiao, Zhang, Feng, & Wang, 2020). De acuerdo con estos mismos autores, el motor síncrono de imán permanente tiene las ventajas de alta eficiencia, pequeño volumen, alta densidad de potencia y amplio rango de regulación de velocidad (Xu, Qiao, Zhang, Feng, & Wang, 2020).

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

Los motores tradicionales emplean devanados de alambre para generar el campo magnético necesario y producir el torque en el rotor. La eficiencia de estos motores puede verse afectada por el desgaste de los devanados. En comparación, un motor PMM emplea imanes permanentes para generar el campo magnético, lo que contribuye a una mayor eficiencia y durabilidad (Aux Millan, 2024).

Estos motores se han implementado en las bombas ESP y, actualmente, su tecnología ha demostrado ser muy útil en los cabezales de completamiento PCP (Drive Head) y en las Unidades de Bombeo Mecánico (UBM) utilizadas en los sistemas de completamiento de bombeo mecánico SRP (Sucker Rod Pump), ya que proporciona menor consumo de energía, menos producción diferida por mantenimiento, daño en los sistemas de poleas y control de las partes mecánicas ante una posible pérdida de energía (Aux Millan, 2024).

Figura 4. Motor de imanes permanentes



Nota. Fuente: (Caro, 2017)

Algunas ventajas adicionales del uso de motores de imanes permanentes incluyen una mejora del factor de potencia, un mejor rendimiento dinámico y una mayor confiabilidad en comparación con los tipos rivales de motores eléctricos (Li, Chau, Lee, & Song, 2020). El motor de imán permanente es una estructura giratoria con conversión de energía compuesta por estator, rotor, devanado del estator, cojinete y otros componentes (Zhang, Ning, Yang, Wang, & Ma, 2022). El rápido desarrollo de materiales de imanes permanentes (PM) durante las últimas décadas ha permitido el diseño de motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) de alto rendimiento, que son los preferidos por muchos fabricantes de vehículos eléctricos (EV) (Vlachou, y otros, 2024).

Motor de reluctancia síncrona (SynRM)

El motor de reluctancia síncrono (SynRM) es un tipo de motor de corriente alterna (CA) conocido por su simplicidad y alta eficiencia. Funciona según el principio de reluctancia, que es una propiedad de los circuitos magnéticos. El término "síncrono" se refiere a la capacidad del motor para operar a una velocidad

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

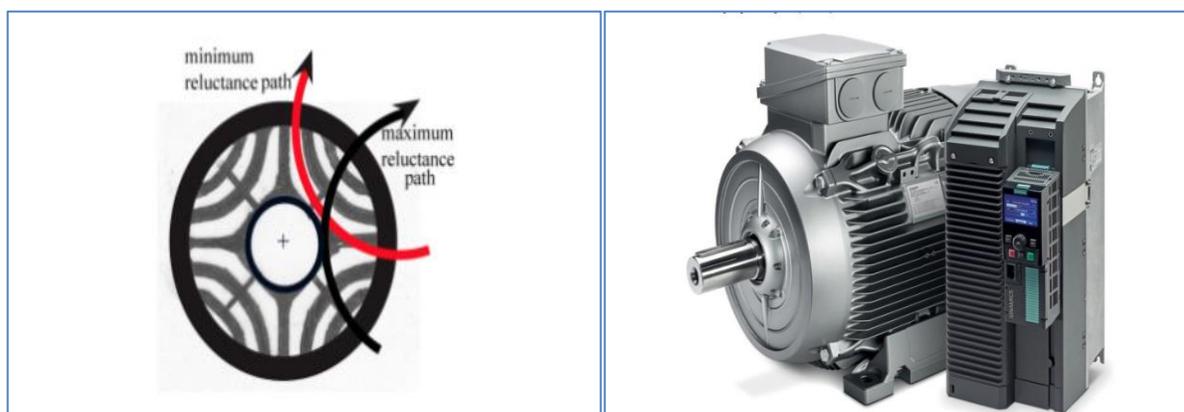
directamente proporcional a la frecuencia suministrada, manteniendo su rotación sincronizada con la frecuencia de la fuente de alimentación (Tharad, 2023). Los subtipos de motores de reluctancia incluyen: sincrónico, variable, cambiado y paso variable (Tharad, 2023).

El motor de reluctancia es posiblemente el motor síncrono más simple de todos; el rotor consiste simplemente en un conjunto de laminaciones conformadas de manera que tiende a alinearse con el campo producido por el estator (Hughes & Drury, 2019).

En los motores eléctricos de alta eficiencia utilizados en aplicaciones industriales se suelen emplear imanes permanentes que contienen tierras raras (REE) como el neodimio y el disprosio. Estos elementos están sujetos a las variaciones de precio propias de la demanda cambiante del mercado. Avances recientes de la tecnología de motores con accionamiento de velocidad variable (VSD) permiten ahora construir motores de alto rendimiento sin REE. Uno de ellos es el motor de reluctancia síncrono (SynRM), caracterizado por la elevada eficiencia energética, la fiabilidad y el mantenimiento sencillo. Otro es el motor de reluctancia síncrono (SynRM2) con ferrita, más eficiente y potente que el SynRM (Gyllensten, Secondo, Ikäheimo, & Tammi, 2016).

El motor de reluctancia síncrono (syncRM) tiene un devanado de estator trifásico con distribución de devanado sinusoidal similar al motor de inducción (IM) y al motor síncrono de imanes permanentes (PMSM). En el pasado, estos motores se optimizaban en cuanto a torque y tamaño de bastidor, pero hoy el énfasis está en la eficiencia (Pollefliet, 2018). Los motores síncronos de reluctancia tienen el mismo número de polos del estator y del rotor. Las proyecciones del rotor están dispuestas para introducir "barreras de flujo" internas. Se trata de orificios que dirigen el flujo magnético a lo largo del llamado eje directo (Pollefliet, 2018).

Figura 5. Motor de reluctancia



(a) Rutas de desgana en el rotor de syncRM

(b) Motor de reluctancia Simotics con carcasa de aluminio

Nota. Fuente: (Pollefliet, 2018)

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

La figura 5 (a) muestra el principio. Designamos la trayectoria de baja reluctancia magnética como el eje directo d del rotor y la trayectoria de alta reluctancia magnética es el eje de cuadratura q (fig. 21-21). Ambos ejes forman un ángulo de 90° (¡eléctrico!)

El syncRM tiene una construcción de rotor simple y robusta. El rotor es una pila de láminas de acero laminadas perforadas. Debido a la falta de jaula, la inercia del rotor es baja y las pérdidas del rotor son pequeñas, lo que contribuye a un buen nivel de eficiencia del syncRM. Esto alcanza valores del 90% a plena carga, lo que equivale al estándar de eficiencia IE4 (Pollefliet, 2018).

Los motores síncronos de reluctancia se pueden usar como reemplazos directos de los motores de inducción estándar IE3 y reducen las pérdidas de energía en el motor hasta en un 40 por ciento. La tecnología de reluctancia síncrona combina el rendimiento de los motores de imanes permanentes con la simplicidad y facilidad de servicio de los motores de inducción porque no incluyen materiales de tierras raras en los imanes permanentes. El rotor de un motor síncrono de reluctancia no tiene imanes ni devanados y prácticamente no sufre pérdidas de potencia. Y debido a que no hay fuerzas magnéticas en el rotor, el mantenimiento es tan sencillo como con los motores de inducción (Movimiento ABB, 2021).

Los SynRM funcionan mejor que los motores de inducción -IM- convencionales. Se pueden diseñar para un rendimiento elevado o para una densidad de potencia elevada con un tamaño menor al de un IM equivalente. Requieren menos mantenimiento, tienen una inercia reducida y son extremadamente fiables (Gyllensten, Secondo, Ikäheimo, & Tammi, 2016). El syncRM presenta también una excelente eficiencia para carga parcial, por lo que este motor es extremadamente adecuado para aplicaciones que frecuentemente están parcialmente cargadas, como ventiladores y bombas (Pollefliet, 2018).

En la actualidad, los nuevos motores síncronos de reluctancia (SynRM) se han diseñado asistidos por imanes permanentes (PMA-SynRM), este último con distintos tipos de imanes (de ferrita o de tierras raras), para mejorar las características operacionales de ese motor. Su uso fundamental es para cargas de velocidad variable accionados por accionamientos de frecuencia variable. Los motores PMA-SynRM poseen un costo capital superior a los SynRM. Por tanto, es necesario, en cada aplicación en las empresas en que van a operar, realizar un análisis económico estricto para determinar si resulta rentable la inversión (Viego, Gómez, & Padrón, 2020).

En los estudios desarrollados para valorar cuál variante resultaba más ventajosa desde el punto de vista económico: si utilizar un conjunto accionamiento-motor asíncrono o accionamiento-motor síncrono de reluctancia asistido por imán permanente de ferrita (ambos de la misma clase de eficiencia) para accionar bombas centrífugas. El segundo resultó más ventajoso, con una recuperación de la inversión de

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

menos de un año y un valor presente neto elevado (Viego, Gómez, & Padrón, 2020).

Los tipos de motores eléctricos desarrollados a la par del desarrollo tecnológico en la búsqueda de mayor eficiencia, constituyen algunos ejemplos representativos en este campo para mejorar la eficiencia energética en las maquinarias industriales y de otro tipo de aplicación en consonancia con las demandas de desarrollo actual.

Conclusiones

Es un hecho que el desarrollo económico a través del sector industrial no puede detenerse por las ventajas y beneficios que otorga a la calidad de vida de los seres humanos. Sin embargo, desde diversas vertientes, se ha puesto de manifiesto que la evolución económica y social de la humanidad debe hacerse con la conciencia de la protección ambiental, en aras de preservar la subsistencia planetaria.

Como se ha afirmado en párrafos anteriores, el estamento industrial es un gran consumidor de energía dada la naturaleza de los procesos que a bien debe desarrollar, siendo el uso de los motores eléctricos donde se ha calculado la mayor demanda del fluido eléctrico. De ahí, el avance tecnológico ha permitido el mejoramiento y la fabricación de motores eléctricos que ofrecen una mejor eficiencia energética, lo cual, debe tener en el presente y el futuro óptimas repercusiones basada en la consecución de las actividades industriales alineadas con la noción del desarrollo bajo condiciones sostenibles

El sector industrial proporciona múltiples beneficios y servicios a la sociedad actual, por ello, en el presente, debe asumir los criterios de responsabilidad social, económica y ambiental, orientados a un futuro con el mínimo impacto ambiental de la Industria y en este propósito el logro de la mayor eficiencia en los motores eléctricos en la maquinaria industrial se torna fundamental.

Referencias

- Aux Millan, J. (2024). Motores de Imanes Permanentes (PMM). <https://es.linkedin.com/pulse/motores-de-imanes-permanentes-pmm-julian-aux-millan-eqerc>.
- Boubakri, M., Saad, B., & Chakroune, S. (2019). Reliability Comparison Between Standard and High Efficiency Induction Motor Using Vector Control Method. *Modelling Measurement and Control A*; 92(2-4). DOI:10.18280/mmc_a.922-405, pp.31-36.
- CAF. (2018). Guía para la Evaluación de Elegibilidad de Financiación de Proyectos de Eficiencia Energética . Banco de Desarrollo de América Latina (CAF). <https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1304/GUIA%20->

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

%20Motores%20de%20Alta%20Eficiencia.pdf?sequence=1&isAllowed=y, pp.23.

- Caner, M., Temiz, I., Huner, E., & Uzun, H. (2012). Comparison of high efficiency and standard induction motors with different speed control methods. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research Special Issue* (2012). , pp.533-538 .
- Caro, I. (2017). Motor de imanes permanentes. <http://electrofacil-soltec.blogspot.com/2017/03/motor-de-imanes-permanentes.html>.
- CNEE. (2010). Curso Promotores de Ahorro y Eficiencia de Energía Eléctrica, Tema Motores Eléctricos. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), Guatemala. Guatemala. [https://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20\(AEE%20Motores%20de%20Inducci%C3%B3n\).pdf](https://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20(AEE%20Motores%20de%20Inducci%C3%B3n).pdf), pp.21.
- Coll Viloría, F. (2020). Gestión Energética de Motores Eléctricos de Inducción. https://www.andi.com.co/Uploads/20200909-%20MEI%20-%20AE%20-%20ANDI%20-%20V1%20-%202020%20-%203_637493259143852624.pdf, pp.66.
- de Almeida, A., Ferreira, F., & Fong, J. (2023). Perspectives on Electric Motor Market Transformation for a Net Zero Carbon Economy . *Energies* 2023, 16(3), 1248; <https://doi.org/10.3390/en16031248>. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1248>.
- El-Shahat, A & Ali, D. (2023). Introductory Chapter: Induction Motors (IMs) Efficiency Improvement Perspectives. En A. El-Shahat, *Induction Motors - Recent Advances, New Perspectives and Applications* (págs. pp.91-14). Purdue University West Lafayette. Doi.10.5772/intechopen.104031. Pages. 222. <https://www.intechopen.com/books/1002054>.
- El-Shahat, A. (2023). *Induction Motors - Recent Advances, New Perspectives and Applications*. Purdue University West Lafayette. DOI.10.5772/intechopen.10403. Pages 222. <https://www.intechopen.com/books/1002054>.
- Escobar-Sandoval, J. E., Chere-Quiñónez, B. F., & Joel, R. (2020). Uso del programa MATLAB/SIMULINK en la descripción de motores eléctricos de corriente alterna. Análisis documental. *Dominio de las Ciencias*, (5), 348-360.
- Espada, S. (2015). Motores Eléctricos Eficientes para el Sector Industrial. Universidad Carlos III de Madrid. España. Trabajo de Fin de Grado. <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/687c3323-4148-415f-8a1f-d93cafe357ea/content>, pp.70.
- Gyllensten, F., Isberg, P., Castagnini, A., Secondo, G., Ikäheimo, J., & Tammi, A. (2016). Motores

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

eléctricos sin tierras raras. Ingeniería Eléctrica.

https://www.editores.com.ar/sites/default/files/ie308_abb_motores_electricos.pdf, pp.58-60.

Hughes, A., & Drury, B. (2019). Synchronous, permanent magnet and reluctance motors and drives. In *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. Newnes. fifth edition. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03226-3>.

<https://www.sciencedirect.com/book/9780081026151/electric-motors-and-drives>.

Ingerieros.es. (2022). El uso de motores de alta eficiencia en la industria podría reducir el 10% del consumo mundial de electricidad . Portal de Ingenieros Españoles: Ingerieros.es.

<https://www.ingenieros.es/noticias/ver/el-uso-de-motores-de-alta-eficiencia-en-la-industria-podria-reducir-el-10-del-consumo-mundial-de-electricidad/8580>.

Lemos, C. (2021). El impacto de la eficiencia energética en el sector industrial. EOL Energía Online. Número de edición 1278. La Plata. Argentina. <https://energiaonline.com.ar/el-impacto-de-la-energia-en-el-sector-industrial/>.

Li, C., Chau, K., Lee, C., & Song, Z. (2020). A critical review of advanced electric machines and control strategies for electric vehicles. *Proc. IEEE*; Volume: 109, Issue: 6. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3041417. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9290029>, pp.1004–1028.

López Delgado, O. (2018). La eficiencia energética en la industria: una solución efectiva para ahorrar energía. *Letras ConCiencia TecnoLógica*, (13). <https://doi.org/10.55411/26652544.120>. <https://revistas.itc.edu.co/index.php/letras/article/view/120>, pp.31-38.

Movimiento ABB. (2021). Alcanzando la eficiencia IE5 con motores sin imanes. Nota técnicas ABB. Helsinki, Finlandia. [https://library.e.abb.com/public/7937f1c64860495989b3a7cad616e9cd/2\)ABB_EE_WhitePaper_SynRM_IE5.pdf?x-sign=ky8WadeZNMq0vKb7bsG5v1TIJcG1mvjZtQYqFQ+WlsJ+pwwFCsCtK1BGG1H7yP7y](https://library.e.abb.com/public/7937f1c64860495989b3a7cad616e9cd/2)ABB_EE_WhitePaper_SynRM_IE5.pdf?x-sign=ky8WadeZNMq0vKb7bsG5v1TIJcG1mvjZtQYqFQ+WlsJ+pwwFCsCtK1BGG1H7yP7y), pp.1-9.

Muñoz, J., De Lima, M., Ubiratan, H., Ortiz, E., Pereira, C., Mota, T., y otros. (2021). Assessing Energy Efficiency and Power Quality Impacts Due to High-Efficiency Motors Operating Under Nonideal Energy Supply. *IEEE*; Vol.9. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3109622. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9527219/authors#authors>, pp.121871-121882.

Pacto Mundial. (2016). ODS 9 Industria innovación e infraestructura. Pacto Mundial Red Española.

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

<https://www.pactomundial.org/ods/9-industria-innovacion-e-infraestructura/>.

- Parlamento Europeo. (2023). Cambio climático: gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Temas Parlamento Europeo.
<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20230316STO77629/cambio-climatico-gases-de-efecto-invernadero-que-causan-el-calentamiento-global>.
- Pollefliet, J. (2018). Electronic control of: Appliance- / SR- / Synchronous 3-phase- / & Induction servo-Motors. Power Electronics: Switches and Converters.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128146439/power-electronics>.
- Portocarrero-Rivas, F. F., Sosa-Rodríguez, R. A., & Chere-Quiñónez, B. F. (2023). Modelos de motores a diésel: un breve análisis comparativo. *Cadernos Latino-Americanos de Engenharia, Tecnologia e Ciências Aplicadas*, 2(1), 1-8.
- Puerta, J., & Arias, J. (2013). Libro digital de la máquina de inducción trifásica . Universidad Tecnológica de Pereira. Trabajo de titulación.
<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/d5b53066-eb7c-4f8c-a690-4fb59a650591/content>, pp.110.
- Quiñónez, B. F. C., Ortiz, N. P. V., de Souza, R. C. U., Quiñónez, L. V., Ponce, J. D. O., Peralta, A. J. M., & Bautista, J. D. M. (2022). Mejoras para la eficiencia energética de la Central Térmica Esmeraldas I / Improvements for the energy efficiency of the Esmeraldas I Thermal Power Plant. *Brazilian Journal of Development*, 8(1), 6978–6991. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-471>
- Reynosa, E. (2015). Crisis ambiental global. Causas, consecuencias y soluciones prácticas. Múnich: GRIN Verlag GmbH. Pág. 52. <https://www.academica.org/ern/16.pdf>.
- Rico Rivero, S. (2019). Banco educacional para accionamientos electrónicos de motores eléctricos. Universidad de Oviedo. Trabajo de Fin de Grado.
https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/51726/TFG_SaraRicoRivero.pdf?sequence=4&isAllowed=y, pp.56.
- Roelof, T., Mikko, H., & Ritva, E. (2007). Eficiencia de motores. Optimización del rendimiento durante la vida útil de los motores. *Revista ABB*.
https://library.e.abb.com/public/a55f18d60e20347bc125730200355903/81-84%202M746_SPA72dpi.pdf, pp.81-84.
- Stewart, M. (2019). Overview of commonly used drivers. *Surface Production Operations Volume IV* -

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

Pump and Compressor Systems: Mechanical Design and Specification.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809895-0.00012-0>.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128098950000120>, pp.857-897.

Tharad, V. (2023). Synchronous Reluctance Motor For Electric Vehicles.

<https://www.linkedin.com/pulse/synchronous-reluctance-motor-electric-vehicles-vijay-tharad/>.

Thirugnanam, P. (2023). Advances in induction motors. En A. El-Shahat, Induction Motors - Recent Advances, New Perspectives and Applications (pág. pp.125). Purdue University West Lafayette. DOI: 10.5772/intechopen.1001583. Pages 222.

<https://www.intechopen.com/books/1002054>.

Trianni, A., Cagno, E., & Accordini, D. (2019). Energy efficiency measures in electric motors systems: A novel classification highlighting specific implications in their adoption. Applied Energy; Volume 252, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113481>.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919311559>.

Ulloa-de Souza, R. C., Reyna-Tenorio, L. J., & Chere-Quiñónez, B. F. (2022). Cogeneración eléctrica a través de turbina de gas: una visión desde los empresarios en Manabí. Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies, 3(6), 237-250.

Viego, P., Gómez, J., & Padrón, E. (2020). Nuevos motores sincrónicos de alta eficiencia. Revista Universidad y Sociedad; Vol.12, No.2. Cienfuegos. Cuba.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000200205.

Vlachou, V., Sakkas, G., Xintaropoulos, F., Pechlivanidou, M., Kefalas, T., Tsili, M., y otros. (2024). Overview on Permanent Magnet Motor Trends and Developments. Energies, 17(2);

<https://doi.org/10.3390/en17020538>. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/538>, pp.538.

Xu, X., Qiao, X., Zhang, N., Feng, J., & Wang, X. (2020). Review of intelligent fault diagnosis for permanent magnet synchronous motors in electric vehicles. Advances in Mechanical Engineering;12(7). doi:10.1177/1687814020944323.

<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814020944323>.

Zapata, J., Martínez, J., & Mosquera, E. (2018). Eficiencia Energética de Motores Industriales Institución . Universitaria Pascual Bravo. Medellín. Colombia. Trabajo de titulación.

http://repositorio.pascualbravo.edu.co:8080/jspui/bitstream/pascualbravo/226/1/Rep_IUPB_Ing_Ele_Eficiencia.pdf, pp.74.

Zhang, D., Ning, Z., Yang, B., Wang, T., & Ma, Y. (2022). Fault diagnosis of permanent magnet motor

Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial

based on DCGAN-RCCNN. Energy Reports; Volume 8, Supplement 4,

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.226>.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722002268>, pp.616-626.

©2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).