OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA Y POTENCIA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN EL HORNO 1 DE PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA GALLETAS NOEL

KEVIN ANDRÉS CAICEDO CASTRO
ALEJANDRO GÓMEZ MONTOYA

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2026

OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA Y POTENCIA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN EL HORNO 1 DE PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA GALLETAS NOEL

KEVIN ANDRÉS CAICEDO CASTRO
ALEJANDRO GÓMEZ MONTOYA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista.

Asesores

Karen lemmel Velez
Magister en automatización y control industrial
Arley Fernando Villa Salazar
Magister en Ingeniería

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2026

Contenido

1. Planteamiento del problema....11
1.1 Descripción....11
1.2 Formulación....12
2. Justificación....13
3. Objetivos....15
3.1 Objetivo general....15
3.2 Objetivos específicos....15
4. Referentes teóricos....16
4.1 Potencia eléctrica en sistemas industriales trifásicos....16
4.2 Motores de inducción trifásicos: principio de funcionamiento y modelo eléctrico....17
4.2.1 Pérdidas en motores de inducción y eficiencia electromecánica....18
4.2.2 Cargabilidad, sobredimensionamiento y criterios de selección de potencia....20
4.3 Clasificación de eficiencia energética: norma IEC 60034-30-1....20
4.4 Variadores de frecuencia en sistemas de ventilación industrial....21
4.5 Calidad de energía: armónicos, desbalance y factor de potencia....22
4.6 Gestión energética: ISO 50001 e indicadores de desempeño energético....23
4.7 Estado del arte....23
4.7.1 Evolución histórica de los estándares de eficiencia en motores eléctricos....24
4.7.2 Sobredimensionamiento de motores en la industria: diagnóstico y consecuencias....24
4.7.3 Variadores de frecuencia en sistemas de extracción y ventilación....25
4.7.4 Metodologías de auditoría energética y medición en sistemas motrices....26
4.7.5 Contexto normativo colombiano y tendencias en eficiencia de motores....27
5. Metodología....28
5.1 Tipo de proyecto....28
5.2 Método....28
5.3 Instrumentos de recolección de información....29
5.3.1 Fuentes primarias....29
5.3.2 Fuentes secundarias....30
6. Resultados....31
6.1 Inventario técnico depurado de motores del Horno 1....31
6.2 Análisis estadístico de las series temporales de potencia activa....32
6.4 Análisis del balance de fases — resistencia de estátor....36
6.5 Curva de eficiencia y zona óptima de operación....37
6.6 Síntesis de resultados y brechas de información....37
7. Conclusiones....39
8. Recomendaciones....39
9. Referencias bibliográficas....42
10. Bibliografía....45

Lista de figuras

Figura 1.Ruta metodológica aplicada para el diagnóstico técnico-energético del sistema motriz del Horno 1. . . . . *24*

Figura 2.Factor de carga estimado por corriente para los diez motores documentados del Horno 1 *28*

Figura 3.Series temporales de potencia activa fundamental medidas con el analizador Fluke 434-II. Superior *29*

Figura 4.Histogramas de distribución de la potencia activa promedio por intervalo (5 s). 30

Figura 5.Resistencia de estátor por fase (post-mantenimiento) para los diez motores del Horno 1. 31

Figura 6.Curva de eficiencia electromecánica estimada en función del factor de carga para un motor de inducción de 3 HP. 32

Lista de tablas

Tabla 1. Inventario técnico depurado de los motores del Horno 1 26
Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las series temporales de potencia activa fundamental 27
Tabla 3. Cargabilidad exploratoria de los motores evaluados 30
Tabla 4.Síntesis de resultados del análisis técnico-energético por grupo de motores. 33

Resumen

OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA Y POTENCIA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN EL HORNO 1 DE PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA GALLETAS NOEL

ALEJANDRO GÓMEZ MONTOYA
KEVIN ANDRES CAICEDO CASTRO

Este proyecto presenta un diagnóstico técnico-energético del sistema motriz del Horno 1 de producción de Galletas Noel, orientado a identificar oportunidades de optimización que permitan reducir el consumo de energía eléctrica y mejorar la confiabilidad operativa del proceso. El estudio se centró en la evaluación de los motores de inducción trifásicos asociados a los sistemas de extracción, combustión y transmisión, mediante el análisis de sus características técnicas, condiciones de operación y desempeño energético.

Se concluye que la optimización del sistema motriz debe fundamentarse en la evaluación integral de la relación motor-carga y en mediciones reales de operación, priorizando intervenciones sobre equipos con evidencias de subutilización o degradación eléctrica. Los hallazgos obtenidos constituyen una base técnica para la implementación de acciones de eficiencia energética, tales como el redimensionamiento de motores, la incorporación de equipos IE3 y la aplicación de estrategias avanzadas de control mediante variadores de frecuencia, contribuyendo a una gestión energética más eficiente y sostenible en entornos industriales.

Palabras clave: diagnóstico energético, motores de inducción trifásicos, eficiencia energética, cargabilidad, sobredimensionamiento, sistemas motrices industriales, motores IE3, gestión energética.

Abstract

OPTIMIZATION OF THE EFFICIENCY AND POWER PERFORMANCE OF ELECTRIC MOTORS IN PRODUCTION OVEN 1 AT GALLETAS NOEL

ALEJANDRO GÓMEZ MONTOYA
KEVIN ANDRES CAICEDO CASTRO

This project presents a techno-economic and energy performance assessment of the motor-driven system installed in Production Oven 1 at Galletas Noel, aimed at identifying optimization opportunities to reduce electrical energy consumption and enhance the operational reliability of the manufacturing process. The study focused on the evaluation of three-phase induction motors associated with the extraction, combustion, and conveyor drive systems through a comprehensive analysis of their technical specifications, operating conditions, and energy performance indicator**s.**

The findings indicate that the optimization of the motor system should be based on an integrated assessment of the motor-load relationship supported by real operating measurements. Priority should be given to interventions on equipment exhibiting underloading conditions, oversizing, or signs of electrical degradation. The results obtained provide a technical basis for the implementation of energy efficiency improvement measures, including motor right-sizing, replacement with high-efficiency IE3 motors, and the deployment of advanced control strategies based on variable frequency drives (VFDs). These actions contribute to improved energy management practices, enhanced system performance, and greater sustainability in industrial environments.

Keywords: energy assessment, three-phase induction motors, energy efficiency, load factor, motor oversizing, industrial motor systems, IE3 motors, energy management.

Glosario

Eficiencia energética: Relación entre la energía útil obtenida y la energía consumida por un sistema, expresada generalmente en porcentaje. Un sistema eficiente requiere menos energía para realizar la misma función (International Energy Agency [IEA], 2023).

Motor de inducción trifásico:Máquina eléctrica rotativa de corriente alterna que convierte energía eléctrica en energía mecánica mediante el fenómeno de inducción electromagnética (Chapman, 2012).

Potencia activa: Potencia eléctrica que realiza trabajo útil en un circuito y se expresa en vatios (W) (IEEE, 2010).

Potencia reactiva: Potencia necesaria para establecer campos magnéticos y eléctricos en equipos inductivos o capacitivos, medida en voltamperios reactivos (VAR) (IEEE, 2010).

Potencia aparente: Combinación vectorial de la potencia activa y reactiva, expresada en voltamperios (VA) (IEEE, 2010).

Factor de potencia: Relación entre la potencia activa y la potencia aparente de un sistema eléctrico. Indica el aprovechamiento efectivo de la energía suministrada (Glover et al., 2017).

Cargabilidad: Porcentaje de utilización de un motor respecto a su capacidad nominal de potencia (NEMA, 2021).

Sobredimensionamiento: Condición en la cual un motor posee una potencia nominal significativamente superior a la requerida por la carga accionada (Bonnett, 2008).

Línea base energética: Referencia cuantitativa que representa el comportamiento energético de una instalación en un período determinado y permite medir mejoras posteriores (ISO, 2018).

Variador de frecuencia (VFD): Dispositivo electrónico que controla la velocidad y el par de un motor de corriente alterna mediante la variación de la frecuencia de alimentación (ABB, 2018).

Rendimiento del motor: Relación entre la potencia mecánica entregada y la potencia eléctrica absorbida por el motor (IEC, 2022).

Motor IE3: Motor clasificado como de alta eficiencia energética según la norma IEC 60034-30-1 (IEC, 2022).

Corriente eléctrica: Flujo ordenado de cargas eléctricas a través de un conductor, medido en amperios (A) (Alexander & Sadiku, 2017).

Analizador de redes eléctricas: Instrumento utilizado para medir parámetros eléctricos como tensión, corriente, potencia, armónicos y calidad de energía (Fluke Corporation, 2021).

Desbalance de resistencia del estátor: Diferencia porcentual entre las resistencias de los devanados del estátor que puede generar pérdidas adicionales y calentamiento excesivo (IEEE, 2021).

Calidad de energía: Conjunto de características eléctricas que permiten el correcto funcionamiento de los equipos conectados a una red (IEEE, 2014).

Gestión energética: Conjunto de actividades orientadas a mejorar el desempeño energético mediante el uso eficiente de la energía (ISO, 2018).

Introducción

El presente trabajo de grado se desarrolló con el propósito de realizar una evaluación técnica y energética del sistema motriz instalado en el Horno 1 de producción de la empresa Galletas Noel. El estudio se enfocó principalmente en los motores de inducción trifásicos encargados de los procesos de extracción de aire, combustión asistida y transmisión de banda, debido a que estos equipos trabajan de forma continua durante la operación del horno y representan una parte importante del consumo de energía eléctrica dentro del proceso productivo.

El estudio integró tres fuentes de información: el inventario técnico de motores con hojas de vida disponibles, los registros de potencia activa fundamental obtenidos con el analizador de redes Fluke 434-II, y la revisión de normas técnicas internacionales y literatura científica especializada. A partir de estas fuentes se construyó una línea base energética preliminar, se identificaron condiciones de baja cargabilidad en los motores de extracción y se definieron las restricciones técnicas que impidieron emitir diagnósticos definitivos para todos los equipos con los datos disponibles.

El análisis confirmó que la optimización del sistema motriz no se reduce a la sustitución generalizada de equipos por motores de clase IE3 o IE4. La decisión técnicamente correcta requirió evaluar el sistema motor-carga en su conjunto, considerando potencia real demandada, horas de operación, tipo de carga, posibilidad de control mediante variador de velocidad, compatibilidad mecánica, calidad de energía y viabilidad económica. Este enfoque permitió formular una propuesta de mejora con sustento cuantitativo y criterios trazables, diferenciando las intervenciones según el grupo motor y la información disponible.

El documento se encuentra estructurado en diferentes capítulos que permiten desarrollar de manera organizada el diagnóstico técnico y energético del sistema motriz del Horno 1. Inicialmente se presenta el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos del proyecto. Posteriormente, se desarrolla el marco teórico, donde se abordan conceptos relacionados con motores de inducción trifásicos, eficiencia energética, calidad de energía, variadores de frecuencia y normativas aplicables. Después, se describe la metodología utilizada para la recolección y análisis de la información. En la sección de resultados se presentan los análisis realizados a partir de las mediciones eléctricas, el inventario de motores y las condiciones de operación encontradas.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

En el área de horneado de la Compañía de Galletas Noel S.A.S., el Horno 1 de producción opera con un sistema de motores eléctricos encargados de tres funciones críticas: la extracción de aire caliente por zona mediante extractores de flujo axial, la alimentación de los sistemas de combustión asistida mediante motores con variadores de velocidad y el desplazamiento de la banda de transporte mediante un motor de transmisión. Estos equipos trabajan en operación continua durante las jornadas productivas, lo que hace que su desempeño energético incide de manera directa en el consumo eléctrico y en la confiabilidad del proceso de horneado.

El inventario técnico suministrado registró diez motores con hojas de vida identificadas y un total declarado de once motores en el sistema. La discrepancia entre la cantidad declarada y los códigos documentados constituyó un primer hallazgo del diagnóstico, ya que la trazabilidad del inventario físico es condición necesaria para asociar mediciones a motores reales y calcular correctamente los indicadores energéticos. Los motores de extracción agruparon seis unidades con potencias nominales entre 2,2 kW y 3 HP (2,238 kW), los de combustión reunieron dos unidades de 10 HP y 15 HP respectivamente, y el de transmisión correspondió a una unidad de 7,5 kW.

Las mediciones registradas con el analizador Fluke 434-II revelaron, para el motor de extracción de la zona 1, una potencia activa fundamental promedio de 0,877 kW durante una ventana de 42,7 minutos con 513 muestras a intervalos de cinco segundos. Al comparar este valor con la potencia nominal mecánica del motor instalado —3 HP equivalentes a 2,238 kW— se obtuvo una relación exploratoria de 39,2%, indicativa de una condición de baja demanda eléctrica frente a la capacidad instalada. Esta relación no representa la eficiencia real del motor, dado que no se midió potencia mecánica en el eje ni se aplicaron métodos normalizados de ensayo; sin embargo, constituyó una señal técnica de probable sobredimensionamiento que requirió análisis específico.

Para el sistema de combustión, el archivo disponible registró una potencia activa fundamental promedio de 7,874 kW. La interpretación de este valor quedó condicionada por la identificación precisa del punto de medición: si el canal correspondía exclusivamente al motor de 15 HP, la cargabilidad estimada alcanzaba el 70,4%, valor moderado pero cercano al límite inferior de la zona óptima de operación; si el canal correspondía al motor de 10 HP, la relación supera el 100% de la potencia nominal, lo que indicaría posible operación exigida. Esta ambigüedad en la trazabilidad de la medición constituyó una restricción metodológica relevante que impidió emitir un diagnóstico definitivo para los motores de combustión con la información disponible.

El motor de transmisión de 7,5 kW quedó identificado en el inventario sin serie temporal de medición asociada. Este hecho impidió establecer su comportamiento energético dentro del período estudiado, aunque su inclusión en el inventario lo ubicó como equipo de interés para campañas de medición complementarias.

El análisis de las hojas de vida de mantenimiento mostró además que el motor registrado con código 202 correspondía a un equipo de marca Reliance con historial de rebobinado y operación desde el año 2004. Las mediciones de resistencia de estátor documentadas en sus registros de mantenimiento

arrojaron valores de 10,5 Ω en las fases F1 y F2 y 11,0 Ω en la fase F3, lo que representó un desbalance porcentual de 4,69% entre fases. La norma IEC 60034-1 establece un límite de 2% para el desbalance de resistencia de estátor como criterio de aceptación; el valor medido duplicó este umbral, lo que indicó que el proceso de rebobinado al que fue sometido el motor introdujo asimetrías en el bobinado que comprometen su desempeño a largo plazo.

El problema central del proyecto quedó definido como la ausencia de una línea base energético-operativa completa que permitiera tomar decisiones sustentadas sobre qué motores debían redimensionarse, conservarse, sustituirse por equipos de alta eficiencia IE3 o IE4, controlarse mediante variador de velocidad o someterse a intervención mecánica del sistema accionado. La resolución de este problema requirió un diagnóstico sistemático que integrará medición, análisis estadístico, comparación técnica y evaluación económica.

1.2 Formulación

¿En qué medida la evaluación técnico-energética del sistema motriz del Horno 1 de producción de la empresa Galletas Noel, mediante inventario de motores, medición con analizador de redes Fluke 434-II y análisis de cargabilidad, permitirá identificar condiciones de operación no óptimas y formular acciones técnicamente sustentadas para reducir el consumo de energía eléctrica mediante redimensionamiento, sustitución por motores de alta eficiencia, control de velocidad o intervención del sistema accionado?

2. Justificación

La decisión de evaluar el sistema motriz del Horno 1 se fundamentó en cuatro razones convergentes de naturaleza técnica, energética, económica y normativa, que en conjunto justifican el desarrollo de un trabajo de grado de Ingeniería Eléctrica centrado en este sistema industrial.

Desde el punto de vista técnico, los motores de inducción trifásicos representan la tecnología de conversión electromecánica más extendida en la industria manufacturera a nivel mundial. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2011), los sistemas de accionamiento eléctrico —que incluyen el motor, el variador cuando aplica y el equipo accionado— consumen alrededor del 46% de la electricidad generada globalmente, y en sectores industriales como alimentos y bebidas esta proporción puede superar el 60%. Esta cifra justificó tratar los motores del Horno 1 no como equipos auxiliares sino como componentes estratégicos del balance energético de la planta.

La operación de un motor de inducción por debajo del 50% de su carga nominal genera consecuencias técnicas que van más allá de la simple ineficiencia puntual. En condiciones de baja carga, las pérdidas magnéticas en el núcleo del estátor —que son prácticamente independientes de la carga— representan una fracción creciente de las pérdidas totales, deteriorando el rendimiento eléctrico. Adicionalmente, el factor de potencia disminuye de forma significativa porque la corriente magnetizante, necesaria para establecer el campo giratorio, mantiene su valor mientras la corriente activa decrece. Esta combinación de efectos implica que el sistema eléctrico debe suministrar corriente reactiva adicional sin que se incremente la producción de trabajo útil, lo que aumenta las pérdidas en conductores y transformadores aguas arriba del motor (De Almeida et al., 2011).

Desde el punto de vista energético, el estudio permitió pasar de una afirmación cualitativa sobre posible ineficiencia a una línea base cuantitativa apoyada en mediciones reales. La potencia activa promedio de 0,877 kW registrada para el motor de extracción zona 1, frente a una capacidad nominal de 2,238 kW, representó un margen de sobredimensionamiento que, multiplicado por las horas anuales de operación y por el conjunto de motores de extracción del sistema, se tradujo en un potencial de ahorro cuantificable. Aunque la estimación del ahorro real requirió datos adicionales de operación anual, la medición disponible estableció una base técnica sólida para dimensionar la intervención.

Desde el punto de vista económico, la evaluación de sistemas de accionamiento cobra especial relevancia en contextos de incremento sostenido de las tarifas de energía industrial. En Colombia, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) actualiza regularmente las tarifas para usuarios no regulados, y los cargos por potencia y energía pueden representar una fracción relevante de los costos operativos de una planta de producción continua como la de Galletas Noel. La identificación de motores sobredimensionados y la formulación de alternativas de reemplazo o control con base en datos reales permitió estimar ahorros anuales y períodos de retorno de inversión con criterios técnicos verificables, diferenciando el beneficio por motor y no solo por el sistema global (CREG, 2024).

Desde el punto de vista normativo, el trabajo se apoyó en un conjunto de estándares internacionales y regulaciones nacionales que dieron sustento técnico al diagnóstico y a las recomendaciones. La norma IEC 60034-30-1:2025 estableció el marco de clases de eficiencia IE1 a IE4 para motores de alimentación en red, permitiendo comparar los equipos existentes con las alternativas disponibles en el

mercado. La norma IEC 60034-2-1:2024 definió los métodos estándar para determinar pérdidas y eficiencia mediante ensayos normalizados, aclarando las condiciones bajo las cuales los valores de eficiencia declarados por los fabricantes tienen validez técnica. La norma IEEE Std 1459-2010 proporcionó las definiciones de potencia activa, reactiva y aparente en sistemas con posible distorsión armónica, condición relevante cuando los motores son alimentados por variadores de frecuencia. La ISO 50001:2018 aportó el marco de gestión energética dentro del cual se inscribió la metodología de línea base e indicadores de desempeño. En el contexto colombiano, el RETIE actualizado mediante Resolución 40117 de 2024 del Ministerio de Minas y Energía estableció los requisitos técnicos que deben cumplir las instalaciones eléctricas industriales, incluyendo las condiciones de seguridad y desempeño para los sistemas de accionamiento (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2024).

En síntesis, la justificación del trabajo integró el impacto energético real de los sistemas de accionamiento, la necesidad de diagnóstico cuantitativo para decisiones de inversión, el contexto normativo vigente y la pertinencia académica del problema dentro del campo de la Ingeniería Eléctrica. El trabajo demostró que la optimización de sistemas motrices industriales exige rigor técnico, datos medidos y análisis sistemático, y no puede resolverse mediante reemplazos generalizados sin sustento en la demanda real del proceso.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar las acciones de optimización técnicamente más convenientes para reducir el consumo de energía eléctrica y mejorar la confiabilidad operativa del sistema de horneado, mediante el análisis técnico y energético del sistema motriz instalado en el Horno 1 de producción de la empresa Galletas Noel.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las características técnicas y operativas de los motores de inducción trifásicos instalados en el Horno 1, mediante el análisis del inventario técnico, hojas de vida y condiciones actuales de funcionamiento del sistema motriz.
- Analizar el comportamiento energético y las condiciones de cargabilidad de los motores eléctricos del Horno 1, a partir de las mediciones de variables eléctricas obtenidas con el analizador de redes Fluke 434-II.
- Proponer acciones de optimización técnicamente viables para mejorar la eficiencia energética y la confiabilidad operativa del sistema de horneado, considerando alternativas de redimensionamiento, sustitución de motores y control mediante variadores de velocidad.

4. Referentes teóricos

4.1 Potencia eléctrica en sistemas industriales trifásicos

Los sistemas eléctricos industriales operan en su mayoría bajo configuración trifásica de corriente alterna, en la que tres tensiones de igual amplitud y frecuencia se encuentran desfasadas entre sí 120° eléctricos. Esta configuración permite transmitir potencia de manera eficiente, minimizando la cantidad de conductores necesarios y asegurando un torque prácticamente constante en las máquinas rotativas conectadas a la red. Para el análisis del Horno 1, la comprensión de las distintas componentes de potencia en este tipo de sistema resultó indispensable para interpretar correctamente los datos obtenidos con el analizador de redes y formular diagnósticos válidos.

La potencia activa P, medida en vatios (W), representa la tasa de transferencia de energía eléctrica que se convierte efectivamente en trabajo mecánico, calor u otra forma de energía aprovechable. En un circuito trifásico equilibrado con tensiones y corrientes sinusoidales, se expresa como $P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos(\varphi)$, donde V_L es la tensión de línea eficaz, I_L es la corriente de línea eficaz y $\cos(\varphi)$ es el factor de potencia, que equivale al coseno del ángulo de desfase entre tensión y corriente. Esta magnitud constituye el indicador principal del consumo real de energía eléctrica y es la variable que factura la empresa de suministro cuando el contrato incorpora componentes de energía activa (IEEE, 2010; Chapman, 2012).

La potencia reactiva Q, medida en voltamperios reactivos (VAr), expresa el intercambio de energía entre el campo magnético de los inductores —devanados de motores y transformadores— y la fuente de alimentación, sin que esta energía se convierta en trabajo útil. Aunque la potencia reactiva no realiza trabajo, circula por los conductores y transformadores de la instalación, incrementando las corrientes y las pérdidas óhmicas en todos los componentes por los que transita. En motores de inducción, la corriente magnetizante es responsable de la mayor parte de la potencia reactiva consumida, y su valor se mantiene prácticamente constante independientemente de la carga mecánica. Por esta razón, un motor sobredimensionado que opera con baja carga activa sigue absorbiendo la misma corriente reactiva que absorbe en condiciones de plena carga, deteriorando el factor de potencia del sistema.

La potencia aparente S, medida en voltamperios (VA), es el producto de la tensión eficaz por la corriente eficaz e incorpora tanto la componente activa como la reactiva: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ Esta magnitud determina la capacidad que debe tener el sistema de suministro —transformadores, conductores, interruptores, sistemas de protección— para alimentar la carga sin incurrir en sobrecargas térmicas. El triángulo de potencias que relaciona P, Q y S mediante el ángulo φ constituyó el marco fundamental de análisis para interpretar las mediciones del analizador Fluke en términos de eficiencia global del sistema.

El factor de potencia (FP) es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente: $FP = \frac{P}{S}$. Su valor oscila entre 0 y 1; cuanto más se acerca a 1, mayor es la eficiencia con que la instalación convierte la energía eléctrica suministrada en trabajo útil. En la práctica industrial, factores de potencia inferiores a 0,85 pueden generar recargos en la factura de energía y saturación de la capacidad instalada de suministro. Es importante distinguir entre el factor de potencia de desplazamiento (DPF), que expresa solo el desfase entre la fundamental de tensión y la fundamental de corriente, y el factor de potencia verdadero (PF), que considera también el efecto de la distorsión armónica introducida por equipos no

lineales como los variadores de frecuencia. Esta distinción fue relevante para el análisis del Horno 1, dado que los motores de combustión operan con variadores.

En condiciones no sinusoidales, las definiciones clásicas de potencia resultan insuficientes para describir completamente el intercambio energético del sistema. La norma IEEE Std 1459-2010 (IEEE, 2010) estableció un marco conceptual actualizado que incorpora la potencia de distorsión D como componente adicional a las potencias activa y reactiva, y definió la potencia aparente no fundamental S_N para sistemas con armónicos. Esta norma fue aplicada en el análisis del Horno 1 para interpretar correctamente las mediciones de potencia en los motores de combustión alimentados por variadores de velocidad (IEEE, 2010).

La distorsión armónica total en corriente (THD-I) cuantifica la presencia de componentes de frecuencia múltiple de la fundamental en la forma de onda de corriente, generalmente expresada como porcentaje de la componente fundamental: $THD - I = (\sqrt{\frac{\Sigma IN^2}{I1}} X100$, donde n ≥ 2. Los variadores de frecuencia con rectificadores de puente trifásico no controlados generan típicamente corrientes con armónicos de orden 5, 7, 11 y 13, que pueden alcanzar porcentajes del 30% al 50% sin filtros activos o pasivos. Esta distorsión circula por los conductores y transformadores de suministro, incrementando las pérdidas en el cobre y en el núcleo, y puede generar interferencia electromagnética en otros equipos de la instalación. Su medición con el analizador Fluke 434-II fue identificada como condición necesaria para el diagnóstico completo del sistema de combustión.

El desbalance de tensión constituye otra variable crítica para los motores trifásicos. Se define como la relación entre la desviación máxima de cualquier tensión de fase respecto al promedio de las tres tensiones, y el valor promedio mismo, expresada en porcentaje. La norma IEC 60034-1 establece que desbalances de tensión superiores al 1% generan componentes de secuencia negativa que producen un campo magnético inverso al de rotación, causando un par frenante, incremento de temperatura y reducción de la vida útil del bobinado. Desbalances superiores al 2% deben generar acción correctiva inmediata en la instalación.

4.2 Motores de inducción trifásicos: principio de funcionamiento y modelo eléctrico

El motor de inducción trifásico, también denominado motor asíncrono, es la máquina eléctrica rotativa más utilizada en la industria a nivel mundial. Su principio de funcionamiento se basa en la inducción electromagnética: el bobinado trifásico del estátor, alimentado por un sistema equilibrado de corrientes alternas, genera un campo magnético giratorio cuya velocidad angular se denomina velocidad de sincronismo n_1, expresada en revoluciones por minuto como:

$$n1 = \frac{60.f}{p}$$

n1: velocidad de sincronismo del motor (r.p.m.)

f: frecuencia de alimentación de la red (Hz)

p: número de pares de polos del motor

sta ecuación permite determinar la velocidad del campo magnético giratorio generado en el estátor del motor de inducción trifásico (Chapman, 2012).

Donde f es la frecuencia de la red de alimentación en Hz y p es el número de pares de polos del devanado del estátor. Para una red de 60 Hz —estándar en Colombia— y un motor de dos pares de polos (cuatro polos), la velocidad de sincronismo es de 1800 r.p.m.; para cuatro pares de polos (ocho polos), es de 900 r.p.m.

El campo magnético giratorio induce fuerzas electromotrices en las barras del rotor de jaula de ardilla, generando corrientes que interactúan con el campo del estátor y producen el par electromagnético que pone en rotación al rotor. El rotor nunca alcanza la velocidad de sincronismo —de ahí la denominación asíncrono— porque si lo hiciera no existiría variación de flujo en el rotor, no se inducirá corrientes y el par sería nulo. La diferencia relativa entre la velocidad de sincronismo y la velocidad real del rotor se denomina deslizamiento s:

$$S = \frac{N1-N2}{N1}$$

El deslizamiento en condiciones nominales de carga oscila típicamente entre 0,01 y 0,05 (1% a 5%) para motores de inducción estándar. A deslizamiento nulo no hay par; a deslizamiento máximo —condición de rotor bloqueado— la corriente alcanza su valor de arranque, que puede ser de cinco a siete veces la corriente nominal.

El circuito equivalente monofásico del motor de inducción, desarrollado a partir del modelo de Steinmetz y válido para condiciones sinusoidales en régimen permanente, representa el comportamiento eléctrico del motor mediante una resistencia de estátor R_1, una reactancia de dispersión del estátor X_1, una rama magnetizante paralela compuesta por la resistencia de núcleo R_c y la reactancia de magnetización X_m, y una impedancia de rotor referida al estátor compuesta por la resistencia de rotor referida R_2'/s y la reactancia de dispersión del rotor referida X_2'. Este modelo permite calcular analíticamente la corriente de línea, el par electromagnético, la potencia transferida al rotor, las pérdidas y la eficiencia en función del deslizamiento y, por ende, de la carga mecánica (Fraile Mora, 2008).

El par electromagnético en función del deslizamiento describe la curva característica del motor, cuya forma determina el comportamiento de arranque, el par máximo (par de volcamiento) y el par en condiciones nominales. Para cargas de par constante como compresores y bandas de transporte, el punto de operación se ubica en la zona estable de la curva, a la derecha del par máximo. Para cargas de par cuadrático como ventiladores y extractores, el punto de operación se desplaza hacia la izquierda con la reducción de velocidad, lo que favorece el uso de variadores de frecuencia para el control energético.

4.2.1 Pérdidas en motores de inducción y eficiencia electromecánica

La eficiencia electromecánica η de un motor de inducción se define como la relación entre la potencia mecánica útil entregada en el eje P_mec y la potencia eléctrica activa absorbida de la red P_elect:

$$N = \frac{Pmec}{Pelect} = \frac{Pelect-\Sigma Pérdidas}{Pelect}$$

Las pérdidas en un motor de inducción se clasifican en cinco categorías, cada una con diferente dependencia de la carga y diferente posibilidad de reducción mediante diseño:

Las pérdidas en el cobre del estátor (P_Cu1) corresponden a la disipación de energía por efecto Joule en los devanados del estátor: $PCUL = 3 \cdot l1^2 \cdot R1$ Son proporcionales al cuadrado de la corriente de línea y, por ende, a la carga del motor. Un motor sobredimensionado que opera con baja carga tiene corriente de línea reducida, por lo que estas pérdidas disminuyen respecto al pleno de carga; sin embargo, la corriente no se reduce proporcionalmente a la carga porque la componente magnetizante no varía, lo que limita el beneficio de la reducción de carga.

Las pérdidas en el cobre del rotor (P_Cu2) se producen en las barras y anillos de cortocircuito de la jaula del rotor: P_Cu2 = s · P_transferida, donde P_transferida es la potencia cruzada desde el estátor hacia el rotor por el entrehierro. Al ser proporcionales al deslizamiento, que a su vez crece con la carga, estas pérdidas son prácticamente nulas en vacío y aumentan con la carga mecánica.

Las pérdidas magnéticas o en el núcleo (P_Fe) comprenden las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes de Foucault en las laminaciones del núcleo del estátor. Ambas son en función del nivel de inducción magnética y de la frecuencia de variación del flujo. Dado que la frecuencia de alimentación es constante para motores en red directa (sin variador), y que el flujo magnetizante se mantiene prácticamente constante independientemente de la carga mecánica, las pérdidas en el núcleo son esencialmente fijas. Esta característica implica que, en condiciones de baja carga, las pérdidas en el núcleo representan un porcentaje creciente de las pérdidas totales, reduciendo el rendimiento del motor.

Las pérdidas por fricción y ventilación (P_fw) resultan del rozamiento en los rodamientos y de la resistencia aerodinámica al giro del ventilador de refrigeración. Son función de la velocidad de rotación y prácticamente independientes de la carga. En motores de inducción en red directa operan a velocidad casi constante, por lo que estas pérdidas permanecen aproximadamente fijas durante la operación normal.

Las pérdidas adicionales en carga (P_LL), también denominadas pérdidas parásitas o pérdidas dispersas (stray load losses), son de naturaleza compleja e incluyen pérdidas superficiales en las ranuras del estátor, pérdidas en el núcleo del rotor a frecuencia de deslizamiento y pérdidas electromagnéticas inducidas por el campo de dispersión. Son difícilmente medibles de forma directa y se estiman generalmente como un porcentaje de las pérdidas totales conforme a los procedimientos de la norma IEC 60034-2-1:2024. En motores de diseño estándar, su contribución oscila entre el 15% y el 25% de las pérdidas totales a plena carga (IEC, 2024).

La curva de eficiencia en función del factor de carga tiene una forma característica: parte de cero en vacío (donde sólo circula la corriente magnetizante y las pérdidas son exclusivamente fijas), crece de forma no lineal hasta alcanzar su máximo en el rango del 65% al 100% de la carga nominal dependiendo del diseño, y luego decrece levemente al superar el 100% de carga por el incremento desproporcionado de las pérdidas en el cobre. Los motores de alta eficiencia IE3 e IE4 desplazan este máximo hacia valores más altos de eficiencia y mantienen un perfil de curva más plano en el rango del 50% al 100%, reduciendo la penalización por operación en condiciones de baja carga parcial.

4.2.2 Cargabilidad, sobredimensionamiento y criterios de selección de potencia

La cargabilidad de un motor se define como la relación entre la potencia mecánica real demandada por la carga en el eje y la potencia mecánica nominal del motor, expresada en porcentaje. Cuando esta relación es inferior al 50%, se considera que el motor está sobredimensionado, condición que genera consecuencias técnicas y económicas negativas. La norma ANSI/NEMA MG1-2021 recomienda seleccionar motores de inducción para operar en el rango del 75% al 100% de su carga nominal en condiciones normales de proceso, reservando el margen de capacidad superior para condiciones de sobrecarga transitoria, variaciones del proceso o factores de servicio superiores a 1,0 (NEMA, 2021).

El sobredimensionamiento de motores en instalaciones industriales es un fenómeno documentado ampliamente en la literatura. Sus causas más frecuentes incluyen prácticas de diseño conservadoras que aplican márgenes de seguridad excesivos sobre la carga estimada, cambios en el proceso productivo posterior a la instalación que redujeron la demanda de la carga accionada, sustitución de motores por unidades de mayor potencia durante intervenciones de mantenimiento sin verificación de la nueva potencia requerida, y ausencia de instrumentación continua que detecte la condición de subcarga durante la operación normal. Botero et al. (2019) encontraron que el 34% de los motores evaluados en empresas manufactureras colombianas operan con factores de carga inferiores al 50%.

El análisis de cargabilidad exploratoria empleado en este trabajo utilizó la relación entre la potencia activa de entrada medida con el Fluke y la potencia mecánica nominal del motor instalado como indicador preliminar. Este enfoque difiere de la eficiencia real, que requiere medición simultánea de la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica en el eje mediante torquímetro o dinamómetro, o la determinación indirecta de pérdidas conforme a la norma IEC 60034-2-1:2024. Sin embargo, para el propósito de identificar candidatos a revisión dentro de un diagnóstico de campo, la relación Pentrada/Pnom_mecánico constituye un indicador de primer nivel suficientemente robusto.

Para la selección correcta del motor de reemplazo, los criterios establecidos por la NEMA (2021) y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. DOE, 2014) incluyen: conocer la potencia mecánica real demandada por la carga en condiciones normales y en condiciones pico, verificar el torque de arranque y el torque máximo requeridos por la aplicación, confirmar la compatibilidad de velocidad con el sistema de transmisión, evaluar las condiciones ambientales de instalación (temperatura, altitud, presencia de humedad o contaminantes) y calcular el factor de servicio necesario. Cuando no se dispone de estos datos, la medición de potencia activa en el motor existente, complementada con medición de tensión y corriente por fase, permite estimar la potencia mecánica entregada con suficiente precisión para una primera selección.

4.3 Clasificación de eficiencia energética: norma IEC 60034-30-1

La norma IEC 60034-30-1, cuya versión vigente corresponde a la edición de 2025, establece las clases de eficiencia energética para motores de corriente alterna de una velocidad, alimentados directamente por red sinusoidal de 50 Hz o 60 Hz, con potencias nominales entre 0,12 kW y 1000 kW, tensiones nominales entre 50 V y 1000 V y configuraciones de 2, 4, 6 u 8 polos. El alcance normativo abarca los motores de uso general con diseño de jaula de ardilla (IEC, 2025).

La clasificación define cuatro niveles de eficiencia de menor a mayor: IE1 (eficiencia estándar), IE2 (alta eficiencia), IE3 (eficiencia premium) e IE4 (eficiencia super-premium). Para un motor de 2,2 kW (equivalente a 3 HP), cuatro polos y 50 Hz, los valores mínimos de eficiencia en condiciones nominales conforme a la norma son aproximadamente: 84,7% para IE1, 86,7% para IE2, 88,7% para IE3 y 90,4% para IE4. Para un motor de 7,5 kW (equivalente a 10 HP), cuatro polos, los valores correspondientes son aproximadamente: 88,7%, 90,1%, 91,7% y 93,1%.

La evolución histórica de estas clasificaciones refleja el impacto regulatorio sobre la eficiencia de los sistemas motrices. Hasta finales de los años 1970, los fabricantes de motores diseñaron sus productos priorizando el costo y el par de arranque sobre la eficiencia. La crisis energética de 1973 y el incremento sostenido de los precios de la electricidad impulsaron la primera generación de motores de alta eficiencia, que en el mercado norteamericano recibieron el respaldo normativo de la Energy Policy Act de 1992 (EPAct) y su actualización mediante la Energy Independence and Security Act de 2007. En Europa, el proceso de adopción de estándares IE se aceleró con el Reglamento CE 640/2009 y sus modificaciones posteriores, que hicieron obligatorio el nivel IE3 para motores de uso general a partir de 2021 para el rango de 0,75 kW a 1000 kW (De Almeida et al., 2019).

En Colombia, la regulación vigente no impone aún la obligatoriedad de motores IE3 para instalaciones industriales, aunque el RETIE actualizado mediante Resolución 40117 de 2024 incorpora referencias a estándares de eficiencia que orientan la selección de equipos en nuevas instalaciones y en proyectos de modernización. La tendencia regulatoria a nivel internacional indica que los motores IE3 e IE4 se consolidarán como estándar mínimo en los próximos años, por lo que la selección de estos niveles para el reemplazo en el Horno 1 resultó técnicamente pertinente y alineada con la dirección de la industria.

La clase de eficiencia del motor, por sí sola, no garantiza ahorro energético en la instalación. El beneficio real depende del número de horas de operación anual, de que el motor opere en su zona adecuada de carga (65%–100% de la carga nominal), de la corrección del factor de potencia y de la compatibilidad mecánica con el sistema accionado. Un motor IE3 operando al 30% de su carga nominal generará menos ahorro que un motor IE2 correctamente dimensionado operando al 80% de su carga, porque en ambos casos las pérdidas fijas representan una fracción significativa de las pérdidas totales y no se reducen con la clase de eficiencia (De Almeida et al., 2011). Esta consideración fue determinante en la formulación de las recomendaciones del presente trabajo.

4.4 Variadores de frecuencia en sistemas de ventilación industrial

Los variadores de frecuencia (VFD, por sus siglas en inglés Variable Frequency Drive), también denominados convertidores de frecuencia o accionamientos de velocidad variable (VSD), son dispositivos electrónicos de potencia que modifican la frecuencia y la tensión aplicadas al motor eléctrico, permitiendo ajustar su velocidad de rotación de manera continua y controlada. Un variador convencional de tipo tensión/frecuencia constante (V/f) utiliza un rectificador de puente para convertir la corriente alterna de la red en corriente continua, un bus de CC con condensadores de filtrado para estabilizar la tensión continua, y un inversor basado en transistores IGBT para generar una señal de corriente alterna de frecuencia y amplitud variables, que se aplica al devanado del motor.

En aplicaciones donde la carga es del tipo ventilador, extractor o bomba centrífuga, la potencia demandada varía con el cubo de la velocidad, de acuerdo con las leyes de afinidad de las turbomáquinas. Estas leyes establecen que para una máquina de fluido geométricamente similar, el caudal Q es proporcional a la velocidad n, la altura H (o presión diferencial) es proporcional al cuadrado de la velocidad, y la potencia P es proporcional al cubo de la velocidad: $\frac{P2}{P1} = (\frac{N2}{N1})^3$ En consecuencia, una reducción del 20% en la velocidad de un ventilador se traduce en una reducción del 51% en la potencia consumida. Este comportamiento hace que los variadores de frecuencia sean especialmente atractivos en sistemas de extracción y ventilación con demanda variable.

Los motores de combustión del Horno 1 ya operaban con variadores de velocidad al momento del estudio. Esta condición representó una ventaja existente que merecía ser evaluada en términos del perfil de frecuencia de salida, las condiciones de operación del variador y la calidad de energía asociada. La presencia de variadores implica que la potencia medida con el analizador Fluke en el lado de la red (antes del variador) incorpora tanto las pérdidas eléctricas del propio variador como las pérdidas adicionales en el motor por la distorsión armónica de la tensión de salida del inversor. Los variadores modernos con modulación de ancho de pulso (PWM) de alta frecuencia (4 kHz a 16 kHz) generan ripple de tensión que induce corrientes parásitas en los rodamientos y pérdidas adicionales en el núcleo del motor, efecto que puede significar entre 1% y 3% de pérdidas adicionales respecto a la operación en red directa sinusoidal.

Para el diagnóstico de motores con variadores de velocidad, la norma IEC 60034-2-3:2020 establece métodos de ensayo específicos que consideran la forma de onda no sinusoidal de la tensión de alimentación. En el contexto del presente trabajo, la identificación de la frecuencia de salida del variador y la medición de potencia en el eje del motor —o la estimación de pérdidas mediante métodos indirectos— constituyen información indispensable para calcular la eficiencia real del sistema accionamiento-motor y formular recomendaciones de optimización fundamentadas.

4.5 Calidad de energía: armónicos, desbalance y factor de potencia

La calidad de energía eléctrica en instalaciones industriales con motores y variadores de frecuencia abarca un conjunto de fenómenos que pueden afectar el funcionamiento de los equipos, incrementar las pérdidas y generar interferencia entre sistemas. En el contexto del Horno 1, los fenómenos más relevantes identificados fueron la distorsión armónica de corriente generada por los variadores de velocidad de los motores de combustión, el desbalance de tensión de la red de suministro y el factor de potencia del sistema.

La distorsión armónica de corriente (THD-I) cuantifica la deformación de la onda de corriente respecto a una senoide pura. Los rectificadores de puente trifásico no controlados, presentes en la etapa de entrada de la mayoría de variadores convencionales, consumen corriente en pulsos que contienen armónicos de orden 6k ± 1 (5°, 7°, 11°, 13°, etc.). Estos armónicos incrementa la corriente eficaz total sin aportar potencia activa, aumentan las pérdidas en el cobre de los transformadores de suministro y pueden interferir con sistemas de medición y protección. La norma IEEE 519-2022 establece límites de THD-I en el punto de acoplamiento común (PCC) que deben cumplir los consumidores industriales para no afectar la calidad de energía de otros usuarios conectados a la misma red.

El desbalance de resistencia en el estátor del motor, analizado en el presente trabajo para el motor 202, es un caso particular de asimetría en el sistema motor. El desbalance de 4,69% registrado —superior al 2% establecido en la IEC 60034-1— genera corrientes de secuencia negativa que producen un par frenante sobre el eje del motor, reducen el par disponible para la carga, elevan las pérdidas en el cobre y aumentan la temperatura de operación del bobinado. La temperatura adicional generada puede reducir la vida útil del aislamiento conforme a la regla empírica que indica que por cada 10°C de incremento de temperatura sobre el límite de clase de aislamiento, la vida útil del bobinado se reduce a la mitad (IEC 60034-1, 2010).

4.6 Gestión energética: ISO 50001 e indicadores de desempeño energético

La norma ISO 50001:2018 establece los requisitos para un sistema de gestión de la energía (SGEn) que permita a las organizaciones implementar políticas y objetivos de eficiencia energética, medir el desempeño y demostrar mejora continua. En el contexto del presente trabajo, los principios de la ISO 50001 proporcionaron el marco metodológico para estructurar el diagnóstico de los motores del Horno 1 como un proceso sistemático de identificación de usos significativos de energía (SEU), establecimiento de línea base y definición de indicadores de desempeño energético (EnPI).

La línea base energética de un motor es el perfil de consumo de referencia correspondiente a condiciones documentadas de operación. En el presente trabajo, la serie temporal de potencia activa medida por el analizador Fluke —con sus estadísticos de promedio, mediana, desviación estándar y percentiles— constituyó la línea base energética disponible para el motor de extracción zona 1 y el punto de medición de combustión. Esta línea base permite calcular la energía consumida por el motor en un período dado y comparar diferentes escenarios de optimización: motor actual vs. motor redimensionado, motor actual vs. motor IE3, operación en red directa vs. operación con variador.

Los indicadores de desempeño energético relevantes para el diagnóstico del sistema motriz del Horno 1 incluyeron: potencia activa media consumida (kW), energía anual estimada (kWh/año), cargabilidad exploratoria (%), factor de potencia promedio, coeficiente de variación de la potencia y ahorro potencial en escenarios de mejora (kWh/año y COP/año). La disponibilidad de estos indicadores por motor, y no solo por tablero o por horno, fue determinante para priorizar las intervenciones y calcular el retorno económico de cada alternativa (ISO, 2018).

4.7 Estado del arte

La optimización energética de sistemas motrices industriales constituye un campo de investigación activo que ha experimentado un desarrollo significativo en las últimas cuatro décadas, impulsado por la convergencia de tres factores: la escalada de los precios de la energía eléctrica, el endurecimiento de las regulaciones de eficiencia en los principales mercados industrializados y los avances tecnológicos en materiales magnéticos, semiconductores de potencia y técnicas de diseño de motores. La revisión de la literatura realizada para este trabajo identificó cuatro líneas temáticas principales: la evolución de los estándares de eficiencia y su impacto en el parque instalado, el diagnóstico y cuantificación del sobredimensionamiento de motores en la industria, el potencial de ahorro de los variadores de frecuencia

en sistemas de ventilación y extracción, y las metodologías de auditoría energética para sistemas motrices.

4.7.1 Evolución histórica de los estándares de eficiencia en motores eléctricos

Los estándares de eficiencia para motores eléctricos comenzaron a desarrollarse en los Estados Unidos a raíz de la crisis energética de 1973. Hasta ese momento, los fabricantes diseñaban motores con el objetivo principal de minimizar el costo de producción, lo que ocasionó un deterioro progresivo de la eficiencia promedio del parque instalado entre las décadas de 1960 y 1970. La *Energy Policy Act* de 1992 (EPAct-92) representó uno de los primeros hitos regulatorios importantes al establecer niveles mínimos obligatorios de eficiencia para motores eléctricos de uso general en el rango de 1 a 200 HP en los Estados Unidos, normativa que entró en vigor en 1997 (De Almeida et al., 2019; IEA, 2011).

En Europa, el proceso fue más gradual. El acuerdo voluntario promovido por la asociación CEMEP (Comité Europeo de Fabricantes de Máquinas Eléctricas y Electrónica de Potencia) en 1999 estableció tres categorías de eficiencia —EFF1, EFF2 y EFF3— con metas de adopción progresiva. Este esquema fue reemplazado a partir de 2011 por el sistema IEC de clases IE, con la entrada en vigor del Reglamento CE 640/2009 que exigió el nivel IE2 para motores nuevos de 0,75 kW a 375 kW, y el nivel IE3 para potencias superiores a 7,5 kW a partir de 2015. En 2021, el Reglamento UE 2019/1781 amplió el requisito de IE3 a todos los motores de 0,75 kW a 1000 kW de dos, cuatro, seis y ocho polos, con excepciones para aplicaciones específicas (De Almeida et al., 2019).

De Almeida, Ferreira y Fong (2011) realizaron un análisis comparativo de los estándares de eficiencia vigentes en diferentes regiones del mundo, identificando convergencias y divergencias en los métodos de ensayo, los rangos de potencia cubiertos y los calendarios de implementación. Los autores señalaron que la adopción de métodos normalizados de medición —en particular los definidos en las normas IEC 60034-2-1— fue un requisito previo para garantizar la comparabilidad de los valores de eficiencia declarados por diferentes fabricantes. Este aspecto resultó directamente relevante para el presente trabajo, dado que la comparación entre motores existentes y alternativas IE3 debía realizarse sobre bases normativas equivalentes.

La IEA (2011) estimó que la implementación plena de políticas de eficiencia en motores y sistemas de accionamiento podría generar un ahorro global de 1.400 TWh/año, equivalente a la producción anual de unos 500 GW de capacidad de generación. Este potencial, que representaba aproximadamente el 10% del consumo eléctrico mundial total en ese período, evidenció la escala del impacto que pueden tener las decisiones técnicas de selección y operación de motores eléctricos en el balance energético global.

4.7.2 Sobredimensionamiento de motores en la industria: diagnóstico y consecuencias

El sobredimensionamiento de motores en instalaciones industriales ha sido documentado como un fenómeno generalizado en múltiples estudios de campo a nivel internacional. Saidur (2010), en una revisión exhaustiva del uso energético de motores eléctricos industriales, reportó que en encuestas realizadas en industrias de Estados Unidos, Europa y Asia, entre el 25% y el 50% de los motores instalados operaban con factores de carga inferiores al 60%, y un porcentaje significativo lo hacía por debajo del 40%. Esta condición implicaba no solo ineficiencia energética directa, sino también deterioro

del factor de potencia del sistema, incremento de corrientes reactivas y mayor desgaste de los sistemas de protección y switchgear que debían dimensionarse para la corriente de arranque de los motores sobredimensionados.

El U.S. Department of Energy (2014) estableció que los motores operando en el rango del 25% al 50% de carga presentan eficiencias que pueden estar entre 5 y 15 puntos porcentuales por debajo del máximo de la curva de eficiencia del mismo motor. La guía técnica de ese organismo recomendó no reemplazar motores por equipos de mayor eficiencia sin verificar primero la potencia real demandada, dado que la selección de un motor de menor potencia —correctamente dimensionado— puede generar mayor ahorro que la instalación de un motor IE3 del mismo tamaño que el existente.

En el contexto colombiano, Botero et al. (2019) evaluaron 42 empresas del sector manufacturero —incluyendo los sectores textil, alimentos y bebidas— y encontraron que el 34% de los motores operaba con factores de carga inferiores al 50%. En el sector de alimentos y bebidas, la proporción de motores sobredimensionados fue del 38%, siendo los sistemas de ventilación, extracción y bombeo los grupos con mayor índice de subcarga. Los autores atribuyeron este fenómeno principalmente a la aplicación de coeficientes de seguridad excesivos durante el diseño original, al reemplazo de motores por unidades de mayor potencia durante intervenciones de mantenimiento sin revisión de la carga real, y a la ausencia de monitoreo continuo de la demanda eléctrica de los motores instalados. Los resultados de este estudio son directamente comparables con los hallazgos del presente trabajo para el motor de extracción zona 1 del Horno 1.

Trianni, Cagno y Accordini (2019) propusieron una clasificación sistemática de las medidas de eficiencia energética aplicables a sistemas de motores eléctricos, diferenciando cuatro categorías: medidas tecnológicas (reemplazo de motores, instalación de variadores, mejora del sistema mecánico), medidas operacionales (ajuste de consignas, programación de turnos, reducción de tiempos de marcha en vacío), medidas de mantenimiento (lubricación, alineación, balance de tensiones) y medidas de gestión (monitoreo continuo, procedimientos de selección de motores, políticas de inventario). Esta clasificación fue adoptada como marco para las recomendaciones del presente trabajo, permitiendo organizar las acciones por nivel de inversión, plazo de implementación e impacto esperado.

4.7.3 Variadores de frecuencia en sistemas de extracción y ventilación

El potencial de ahorro de los variadores de frecuencia en sistemas de ventilación y extracción industrial ha sido objeto de numerosas investigaciones empíricas y estudios de caso desde la generalización de la tecnología IGBT en la década de 1990. Saidur, Mekhilef, Ali, Safari y Mohammed (2012) revisaron más de 30 estudios de caso publicados sobre aplicaciones de variadores en motores eléctricos industriales y concluyeron que los ahorros energéticos en sistemas de ventiladores y extractores oscilaban entre el 30% y el 60% en comparación con el control por dampers o válvulas, dependiendo del perfil de velocidad requerido por el proceso.

De Almeida, Ferreira y Both (2005) desarrollaron un marco analítico para evaluar la viabilidad técnica y económica de instalar variadores de velocidad en aplicaciones industriales específicas. Los autores propusieron un árbol de decisión que considera: tipo de carga (par constante, par cuadrático o par decreciente), perfil de demanda de velocidad en el tiempo, diferencia entre el consumo con control

electrónico y con control mecánico, costo del variador, costo de la energía y período de retorno requerido por la empresa. Aplicaron el método a un conjunto de instalaciones industriales europeas y confirmaron que las cargas de par cuadrático con operación a caudal variable —como los extractores de horno— son las candidatas más favorables para la instalación de variadores, con períodos de retorno típicos inferiores a dos años.

El informe publicado por CEMEP y Fraunhofer ISI (2023) actualizó las estimaciones de potencial de ahorro de variadores de velocidad para el mercado europeo, utilizando datos de inventario de motores, perfiles de carga y precios de energía actualizados. El estudio confirmó que los sistemas de bombas, ventiladores y compresores representaban el mayor potencial de ahorro mediante variadores, y proyectó que la adopción plena de esta tecnología en el parque instalado podría generar un ahorro anual de aproximadamente 135 TWh en Europa. Adicionalmente, el informe señaló que los sistemas que ya contaban con variadores debían ser evaluados periódicamente para verificar que las consignas de velocidad estuvieran optimizadas conforme a las condiciones reales del proceso, dado que variadores instalados con consignas de plena velocidad no generan el ahorro esperado.

Este último hallazgo tuvo implicación directa en el análisis del Horno 1, donde los motores de combustión ya operaban con variadores de velocidad. La evaluación del funcionamiento de estos variadores —incluyendo la frecuencia de salida promedio, los perfiles de variación de velocidad y las eficiencias del convertidor— constituyó una brecha de información identificada en el diagnóstico que debía completarse antes de concluir si el ahorro potencial se estaba aprovechando o si existía margen adicional de optimización.

4.7.4 Metodologías de auditoría energética y medición en sistemas motrices

La metodología de auditoría energética para sistemas de accionamiento eléctrico ha evolucionado desde enfoques basados en estimaciones indirectas —factor de carga estimado por comparación de corriente o potencia aparente— hacia protocolos basados en medición directa de múltiples variables en condiciones de operación real. La norma ISO 50001:2018 estableció los requisitos generales de un sistema de gestión de la energía, pero la implementación técnica en sistemas motrices requirió complementar con procedimientos específicos.

El U.S. DOE (2014) publicó una guía de selección y aplicación de motores de alta eficiencia que incluía un procedimiento detallado de evaluación de campo: medición de corriente de línea, tensión de línea, potencia activa, factor de potencia, temperatura de rodamientos y temperatura de carcasa, con el objetivo de estimar la potencia mecánica del motor existente a partir de curvas de descarga y factores de corrección por tensión y temperatura. Este método, conocido como método de la corriente de línea para estimación de carga, fue adoptado como referencia para el análisis de los motores del Horno 1 en la ausencia de medición de torque.

El analizador Fluke 434-II utilizado en este trabajo es un instrumento de medición de calidad de energía y potencia de cuatro canales que registra simultáneamente tensiones de fase y de línea eficaces (Vrms), corrientes de línea eficaces (Arms), potencia activa fundamental (W), potencia reactiva fundamental (VAr), potencia aparente fundamental (VA), factor de potencia total, factor de potencia de desplazamiento (DPF), distorsión armónica total de tensión y corriente (THD-V, THD-I), y desbalance

de tensión e intensidad. La función de registro temporal (datalogger) permite almacenar series de mediciones a intervalos configurables desde un segundo hasta decenas de minutos, generando archivos en formato FlukeView (.fvf) que se exportan posteriormente para análisis estadístico (Fluke Corporation, s.f.).

La revisión de estudios de caso publicados sobre la aplicación del analizador Fluke y equipos equivalentes en diagnósticos de motores industriales confirma que la serie temporal de potencia activa constituye el indicador primario más informativo del estado de carga del motor. El coeficiente de variación de la potencia en el tiempo refleja la estabilidad del proceso accionado: valores bajos (CV < 5%) indican carga cuasi-estática, típica de extractores y ventiladores con dampers abiertos; valores altos (CV > 20%) reflejan procesos de carga variable, como compresores con ciclos de carga/descarga o bandas de transporte con carga variable. Esta caracterización orientó la interpretación de los perfiles obtenidos para el motor de extracción zona 1 (CV = 0,29%) y el punto de combustión (CV = 2,31%).

4.7.5 Contexto normativo colombiano y tendencias en eficiencia de motores

En Colombia, el marco regulatorio de eficiencia energética para instalaciones eléctricas industriales está definido principalmente por el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas), cuya versión actualizada fue emitida mediante Resolución 40117 de 2024 del Ministerio de Minas y Energía. El RETIE regula las condiciones de seguridad, calidad y desempeño de las instalaciones eléctricas, incluyendo los sistemas de accionamiento de motores (Ministerio de Minas y Energía, 2024). Aunque el RETIE no impone aún la obligatoriedad de motores IE3 para instalaciones existentes, las disposiciones sobre calidad de energía, factor de potencia y compatibilidad electromagnética son relevantes para el análisis del sistema del Horno 1.

La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) ha impulsado programas de uso racional y eficiente de la energía (URE) que incentivan la adopción de tecnologías de alta eficiencia en la industria manufacturera, incluyendo motores IE3 e IE4 y variadores de velocidad. El PROURE (Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía) estableció metas sectoriales de reducción del consumo energético que incluyen el sector de alimentos y bebidas, al que pertenece la empresa Galletas Noel.

La tendencia internacional en el desarrollo de nuevas tecnologías de motores apunta hacia la adopción creciente de motores síncronos de reluctancia (SynRM) y motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) en aplicaciones industriales que históricamente han sido dominadas por el motor de inducción. Estos motores alcanzan niveles de eficiencia IE4 e incluso IE5 (eficiencia ultra-premium, definida en la IEC 60034-30-2:2016 para motores de velocidad variable), con eliminación prácticamente total de las pérdidas en el cobre del rotor. De Almeida et al. (2019) proyectaron que hacia 2030 los motores síncronos de alta eficiencia representarán una fracción creciente de las ventas globales de motores industriales, especialmente en potencias superiores a 15 kW con variadores de velocidad.

Para el Horno 1, la evolución tecnológica hacia motores síncronos es un factor a considerar en el horizonte de planeación de mediano plazo. Sin embargo, para la intervención inmediata identificada en el presente trabajo —específicamente el redimensionamiento de los motores de extracción sobredimensionados— los motores de inducción trifásica IE3 de jaula de ardilla representan la solución más directa, disponible comercialmente y compatible con la infraestructura de control existente.

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

El trabajo de grado se clasificó como investigación aplicada con enfoque cuantitativo y alcance descriptivo-evaluativo. Fue aplicada porque abordó una necesidad real de una instalación industrial, convirtiendo datos de campo en criterios técnicos de intervención. Fue cuantitativa porque utilizó mediciones eléctricas, cálculos estadísticos y comparaciones numéricas de cargabilidad como base de las conclusiones. Tuvo alcance descriptivo porque caracterizó el estado actual del sistema motriz con la información disponible, y evaluativo porque comparó el estado encontrado con los criterios normativos de eficiencia y cargabilidad para emitir recomendaciones fundamentadas.

5.2 Método

El método ejecutado integró cinco etapas secuenciales y parcialmente solapadas: levantamiento del inventario técnico de motores, medición eléctrica con el analizador de redes, análisis estadístico de los datos obtenidos, comparación técnica con alternativas de optimización y estimación de indicadores técnico-económicos. El proceso fue iterativo en la etapa de análisis, dado que la revisión de los datos disponibles determinó la necesidad de definir mediciones adicionales para completar el diagnóstico de todos los motores del sistema.

La Figura 6 ilustra la ruta metodológica aplicada, que parte del inventario inicial de motores, pasa por la campaña de medición eléctrica y el análisis estadístico de las series temporales de potencia, y desemboca en el diagnóstico de cargabilidad y la evaluación de alternativas. La identificación de brechas de información en cada etapa orientó la definición de los pasos pendientes para completar el diagnóstico con el nivel de detalle requerido por una propuesta de ingeniería eléctrica sustentada.

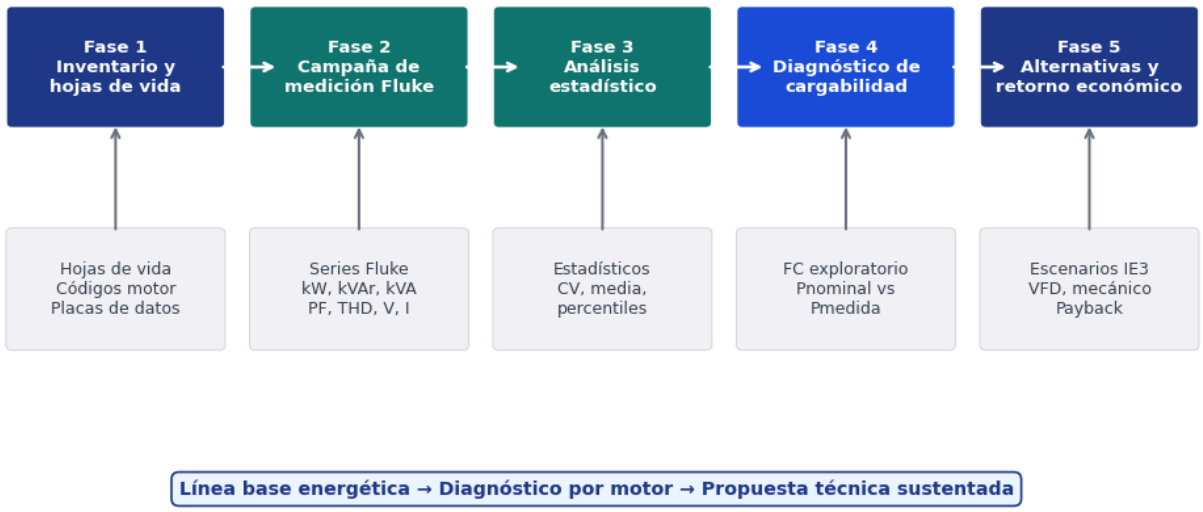


Figura 1. Ruta metodológica aplicada para el diagnóstico técnico-energético del sistema motriz del Horno 1. Fuente: elaboración propia.

5.3 Instrumentos de recolección de información

5.3.1 Fuentes primarias

Las fuentes primarias del trabajo corresponden a los datos generados directamente por el proceso de investigación y de medición de campo. El instrumento principal fue el analizador de redes Fluke 434-II, con el que se obtuvieron series temporales de potencia activa fundamental a intervalos de cinco segundos para el motor de extracción zona 1 (513 muestras, 42,7 minutos) y el punto de combustión de las zonas 1 y 2 del Horno 1 (403 muestras, 33,5 minutos). Los archivos de medición se exportaron en formato FlukeView (.fvf) y se procesaron con software de análisis estadístico para calcular promedios, medianas, desviaciones estándar, percentiles y coeficientes de variación.

Las hojas de vida de los motores del Horno 1 constituyeron la segunda fuente primaria. Estos documentos registraron los datos de placa de cada motor en distintos períodos, los intervalos de mantenimiento preventivo y correctivo, los rodamientos utilizados, las mediciones de resistencia de estátor por fase antes y después de cada intervención, los valores de corriente medidos post-mantenimiento y las observaciones sobre el estado del equipo. El análisis de las hojas de vida permitió construir el inventario técnico depurado de diez motores con identificación, ubicación, marca, potencia nominal, velocidad, tensión, historial de mantenimiento y estado actual.

Los registros de mantenimiento eléctrico y las mediciones de resistencia de estátor del motor 202 constituyeron una fuente primaria adicional, dado que revelaron el desbalance de resistencia entre fases (4,69%) que fue objeto de análisis normativo conforme a la IEC 60034-1.

5.3.2 Fuentes secundarias

Las fuentes secundarias corresponden al conjunto de normas técnicas, artículos científicos, guías de eficiencia energética y documentos oficiales que sustentaron el marco conceptual, los criterios de evaluación y la comparación técnica con alternativas de optimización. Todas las fuentes secundarias utilizadas fueron de acceso público y verificable en páginas oficiales de organismos normalizadores, plataformas de publicación académica con DOI o repositorios gubernamentales.

Las normas técnicas principales consultadas fueron: IEC 60034-30-1:2025 para clasificación de eficiencia de motores, IEC 60034-2-1:2024 para métodos de determinación de pérdidas y eficiencia, IEEE Std 1459-2010 para definiciones de potencia en sistemas no sinusoidales, ISO 50001:2018 para gestión energética y línea base, y ANSI/NEMA MG1-2021 para selección y aplicación de motores. Los artículos científicos revisados correspondieron a publicaciones en revistas indexadas con DOI verificable, provenientes de las bases de datos IEEE Xplore, ScienceDirect y otras plataformas de acceso abierto. Las guías técnicas del U.S. DOE y los informes de CEMEP-Fraunhofer ISI complementaron la revisión con datos empíricos de campo sobre eficiencia de motores y variadores de velocidad en aplicaciones industriales.

6. Resultados

6.1 Inventario técnico depurado de motores del Horno 1

El inventario técnico del sistema motriz del Horno 1 quedó conformado por diez motores de inducción trifásicos con hojas de vida identificadas, agrupados en tres tipos de aplicación: extracción de aire por zona (seis motores), combustión asistida (dos motores) y transmisión de banda (un motor). Un décimo registro (código 202) correspondió a un motor de marca Reliance con historial mixto de ubicaciones y requirió verificación física de su estado y localización actual en el sistema.

ID	Tipo de aplicación	Marca	Potencia nominal	RPM nominales	Voltaje	Año instalación	Estado técnico
2206	Extracción zona 1	WEG	3 HP / 2,238 kW	1760 r.p.m.	230/460 V	2017	Operativo
2203	Extracción zona 2	WEG	3 HP / 2,238 kW	1760 r.p.m.	230/460 V	2017	Operativo
2202	Extracción zona 3	WEG	3 HP / 2,238 kW	1760 r.p.m.	230/460 V	2017	Operativo
2205	Extracción zona 4	WEG	3 HP / 2,238 kW	1760 r.p.m.	230/460 V	2017	Operativo
2208	Extracción zona 5	WEG	3 HP / 2,238 kW	1760 r.p.m.	230/460 V	2017	Operativo
2204	Extracción zona 6	WEG	2,2 kW	1760 r.p.m.	230/460 V	2017	Operativo
2207	Combustión zona 6	WISE/WEG	10 HP / 7,460 kW	3510 r.p.m.	230/460 V	2017	Operativo + VFD
2328	Combustión zona 1	BALDOR	15 HP / 11,190 kW	3525 r.p.m.	230/460 V	2019	Operativo + VFD
4069	Transmisión	SEW	7,5 kW	1775 r.p.m.	230/460 V	2023	Operativo
202	Por verificar	Reliance	3 HP / 2,238 kW	1740 r.p.m.	230/460 V	2004	Rebobinado — revisar

Tabla 1. Inventario técnico depurado de los motores del Horno 1. Fuente: elaboración propia con base en hojas de vida suministradas.

La composición del inventario reveló predominio de motores de extracción con la misma potencia nominal de 3 HP y similares características de placa. Esta uniformidad tuvo implicación metodológica importante: la medición detallada del motor de extracción zona 1 sirvió como caso representativo para establecer una hipótesis de comportamiento para los motores de zonas 2 a 6, que debió verificarse mediante medición independiente de cada zona antes de formular recomendaciones definitivas de reemplazo.

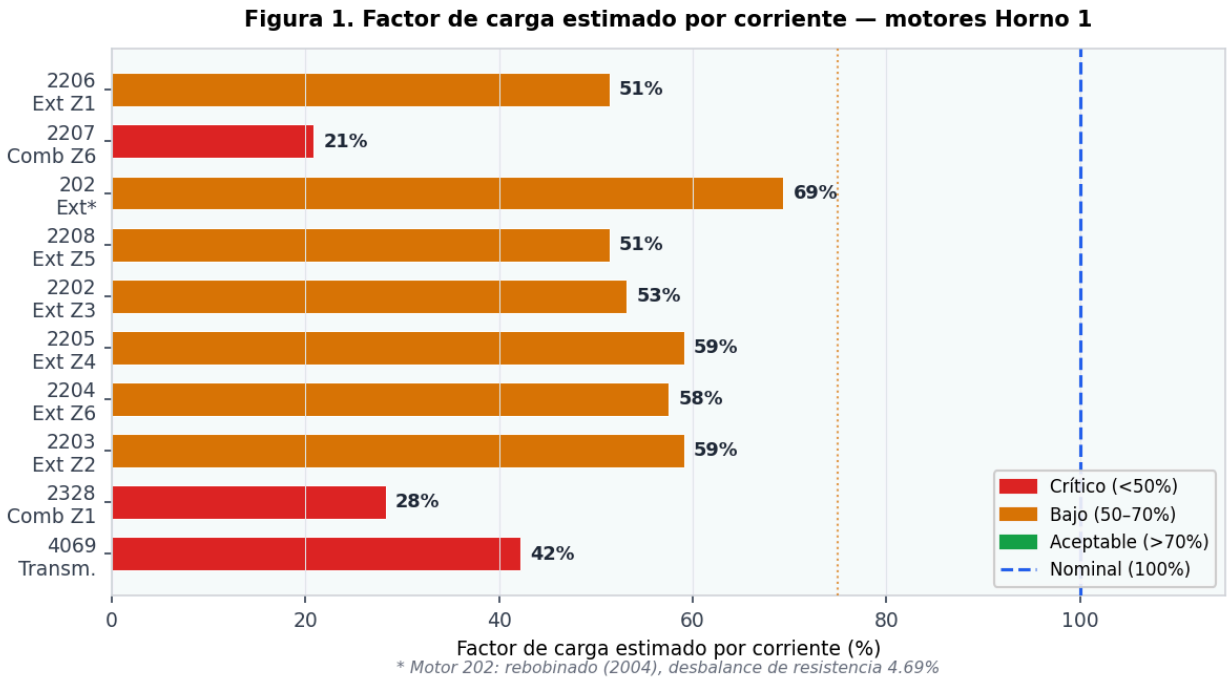
6.2 Análisis estadístico de las series temporales de potencia activa

Los datos de potencia activa fundamental registrados con el analizador Fluke 434-II se procesaron mediante análisis estadístico descriptivo para caracterizar el comportamiento de carga de cada punto de medición. La Tabla 2 resume los estadísticos principales de las dos series disponibles.

Estadístico	Motor extracción zona 1	% de la P_nominal	Motor combustión Z1-Z2	Observación
Número de muestras	513	—	403	5 s por muestra
Duración de la medición	42,7 min	—	33,5 min	—
Potencia activa media (W)	877	39,2%	7.874	—
Mediana (W)	877	—	7.867	—
Desviación estándar (W)	2,5	—	181,8	—
Coeficiente de variación (%)	0,29	—	2,31	Extracción: carga muy estable
Mínimo absoluto (W)	845	—	7.128	—
Máximo absoluto (W)	918	—	8.385	—
Percentil 5 (W)	873	—	7.573	—
Percentil 95 (W)	881	—	8.131	—
Potencia nominal motor (W)	2.238 (3 HP)	—	7.460 (10HP) / 11.190 (15HP)	Referencia

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las series temporales de potencia activa fundamental. Fuente: elaboración propia con base en datos Fluke 434-II.

La Figura 1 presenta los factores de carga estimados por corriente para los diez motores documentados. Los motores de extracción mostraron factores de carga entre el 26% y el 55%, todos en zona crítica o baja según el criterio NEMA MG1-2021. Los motores de combustión y transmisión requirieron verificación con medición directa de potencia activa dado que su análisis por corriente presentó mayor incertidumbre de estimación.



Un

Figura 2. Factor de carga estimado por corriente para los diez motores documentados del Horno 1. Los colores indican la condición: rojo crítico (<50%), naranja bajo (50–70%), verde aceptable (>70%). La línea azul discontinua marca el 100% nominal. Fuente: elaboración propia.

Las series temporales de potencia activa se presentan en la Figura 2. El perfil del motor de extracción zona 1 (parte superior) mostró un comportamiento cuasi-estacionario con oscilaciones mínimas alrededor del valor medio de 877 W. La línea horizontal roja indica la potencia nominal del motor instalado (2.238 W, correspondiente a 3 HP), que fue 2,55 veces superior a la demanda real media. La banda azul entre el valor mínimo y máximo de cada intervalo de cinco segundos confirmó la estabilidad de la carga: la diferencia entre el mínimo absoluto (845 W) y el máximo absoluto (918 W) fue de solo 73 W, equivalente al 8,3% del valor medio.

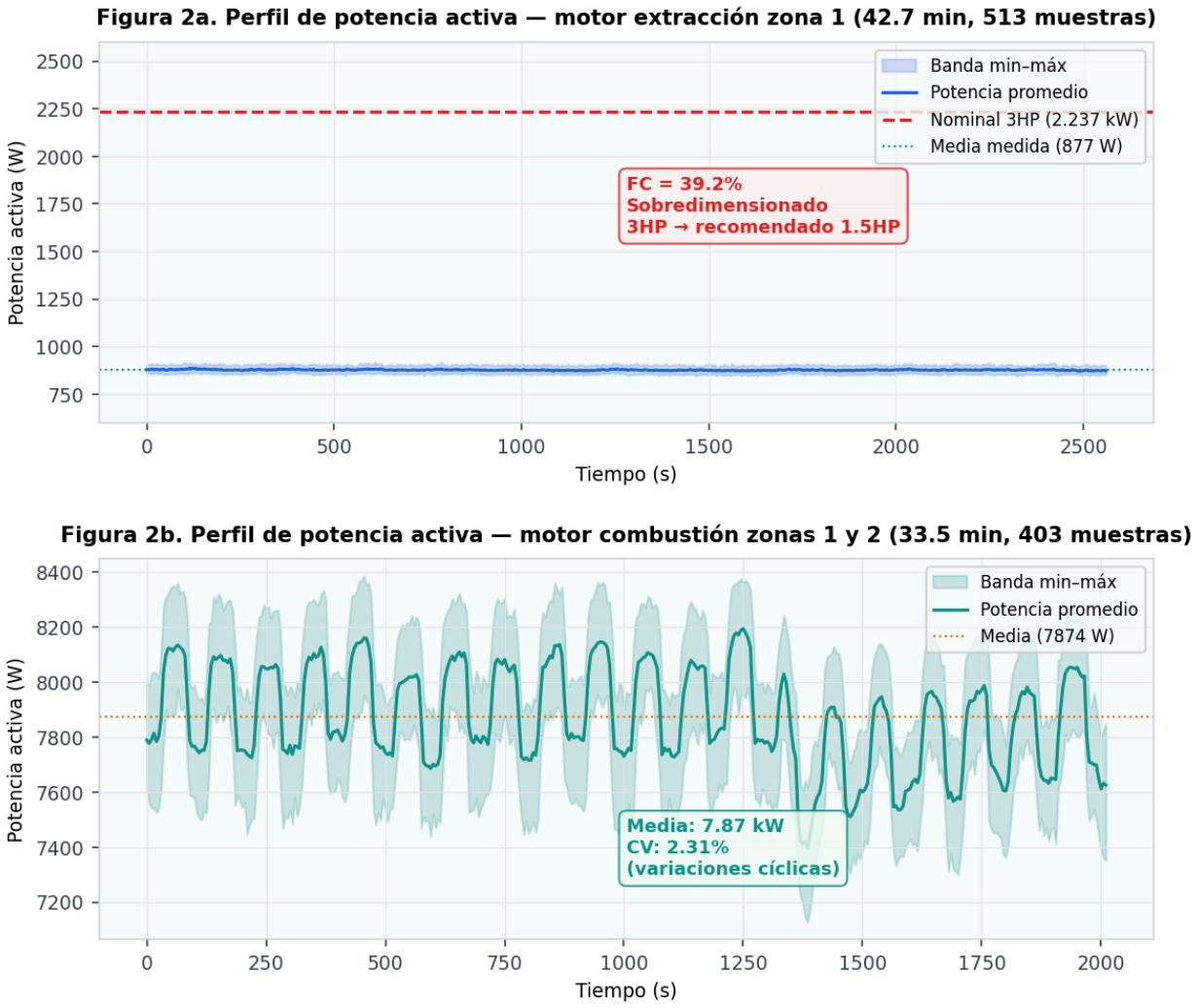


Figura 3. Series temporales de potencia activa fundamental medidas con el analizador Fluke 434-II. Superior: motor extracción zona 1 (42,7 min, 513 muestras). Inferior: punto de combustión zonas 1 y 2 (33,5 min, 403 muestras). La línea roja discontinua indica la potencia nominal del motor de extracción (2.238 W). Fuente: elaboración propia.

El perfil del punto de combustión (parte inferior de la Figura 2) presentó mayor variabilidad relativa, con fluctuaciones cíclicas de amplitud aproximada de ±350 W alrededor de la media de 7.874 W. Estas oscilaciones fueron coherentes con el funcionamiento del variador de velocidad, que ajustó la frecuencia de salida y, por ende, la potencia del motor, en respuesta a las variaciones de la demanda de combustión del proceso de horneado. La presencia del variador justificó la necesidad de medir adicionalmente la frecuencia de salida del convertidor, el factor de potencia real en la entrada del variador y el THD de corriente para disponer de un diagnóstico completo del sistema.

6.3 Análisis de distribución estadística y cargabilidad

Los histogramas de distribución de la potencia activa promedio por intervalo de cinco segundos se presentan en la Figura 4. La distribución del motor de extracción zona 1 (panel izquierdo) fue prácticamente unimodal y simétrica, con concentración del 90% de las muestras en el intervalo de 873

W a 881 W. Esta concentración confirmó que la carga del motor durante el período de medición fue esencialmente constante y que la potencia media de 877 W representó de manera confiable el estado de operación del equipo.

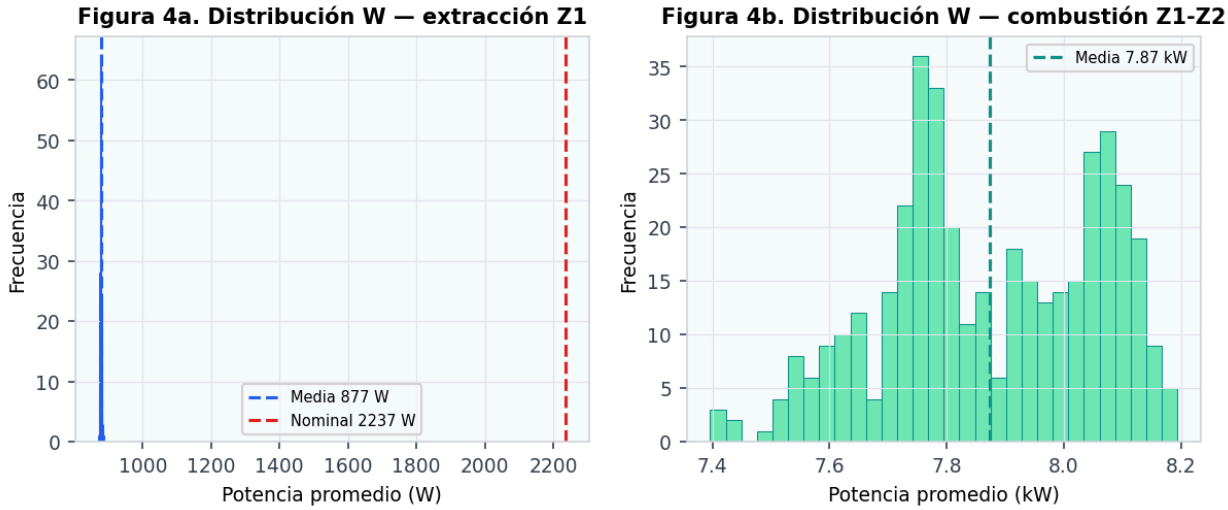


Figura 4. Histogramas de distribución de la potencia activa promedio por intervalo (5 s). Izquierda: motor extracción zona 1 — distribución estrecha y unimodal, coeficiente de variación 0,29%. Derecha: punto combustión — distribución más amplia con asimetría hacia valores altos, CV = 2,31%. Fuente: elaboración propia.

La cargabilidad exploratoria de los motores con datos disponibles se presenta en la Tabla 3. Para el motor de extracción zona 1, la relación entre la potencia activa de entrada medida (877 W) y la potencia nominal mecánica instalada (2.238 W) arrojó un valor del 39,2%, ubicado por debajo del umbral crítico del 50% establecido como indicador de sobredimensionamiento probable. Para el punto de combustión, la interpretación del 70,4% o del 105,5% dependió del motor al que correspondiera la medición, lo que reinforzó la necesidad de trazabilidad en el punto de medición.

Motor / punto medición	P activa medida (W)	P nominal referencia (W)	FC exploratorio (%)	Diagnóstico
Extracción zona 1 (2206)	877	2.238 (3 HP)	39,2%	Baja cargabilidad — candidato a redimensionamiento
Combustión (si corresponde a 15 HP, motor 2328)	7.874	11.190 (15 HP)	70,4%	Cargabilidad moderada — verificar trazabilidad
Combustión (si corresponde a 10 HP, motor 2207)	7.874	7.460 (10 HP)	105,5%	Posible operación exigida — verificar trazabilidad urgente

Motor 202 (rebobinado, Reliance)	Sin medición disponible	2.238 (3 HP)	No calculable	Desbalance estátor 4,69% — supera límite IEC 60034-1

Tabla 3. Cargabilidad exploratoria de los motores evaluados. Fuente: elaboración propia.

6.4 Análisis del balance de fases — resistencia de estátor

La Figura 3 presenta las mediciones de resistencia de estátor por fase (post-mantenimiento) para los diez motores documentados. Los ocho motores WEG instalados en 2017 presentaron balance perfecto entre las tres fases (desbalance 0,00%), confirmando que sus devanados originales de fábrica cumplían holgadamente el criterio de la IEC 60034-1. Los motores de combustión y transmisión de mayor potencia mostraron resistencias más bajas (1,3 a 1,9 Ω), coherentes con devanados de mayor sección de conductor para las corrientes nominales más elevadas.

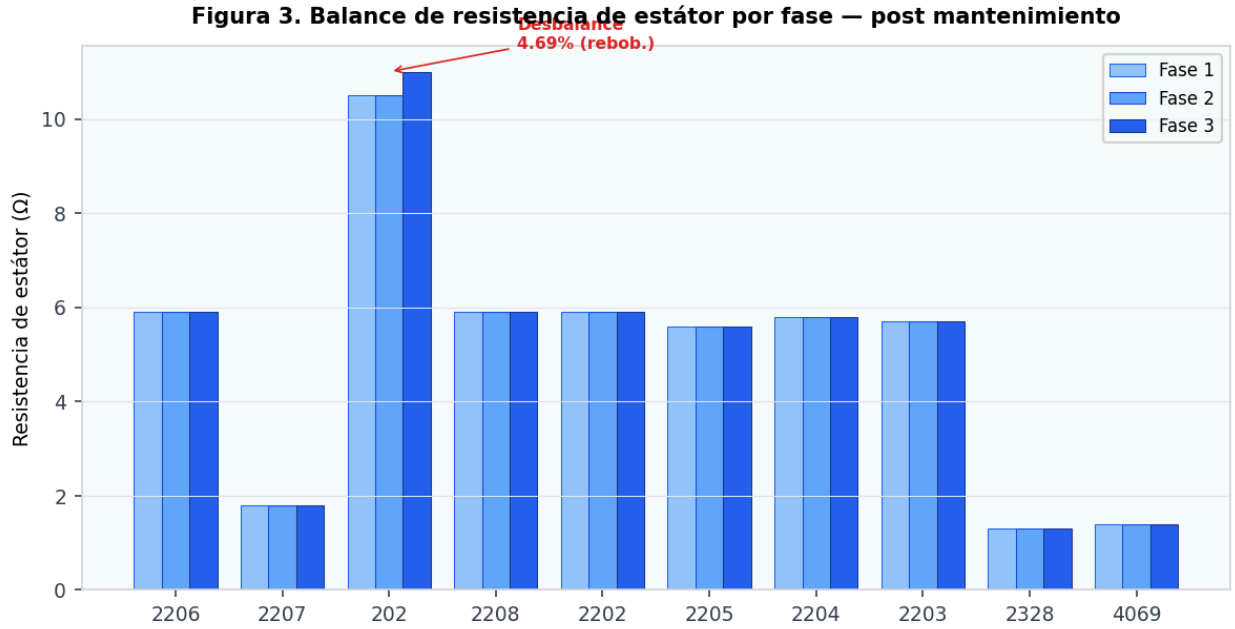


Figura 5. Resistencia de estátor por fase (post-mantenimiento) para los diez motores del Horno 1. El motor 202 (Reliance, rebobinado) exhibe desbalance del 4,69% entre F3 (11,0 Ω) y F1-F2 (10,5 Ω), superando el límite del 2% de la IEC 60034-1. Fuente: elaboración propia.

El motor 202 fue el único equipo del inventario con desbalance de resistencia de estátor fuera de norma. El valor medido de 4,69% implicó que en condiciones de operación se generaron corrientes de secuencia negativa, cuyo efecto neto fue la producción de un par electromagnético de sentido contrario al par motor, reducción de la potencia útil disponible en el eje, incremento de las pérdidas en el cobre del rotor y elevación de la temperatura de operación. Para un motor de 3 HP de clase de aislamiento F (temperatura máxima de 155°C), cada 10°C de incremento de temperatura por encima del límite de clase puede reducir a la mitad la vida remanente del aislamiento, por lo que el desbalance representó un riesgo real para la confiabilidad del equipo.

6.5 Curva de eficiencia y zona óptima de operación

La Figura 5 ilustra el impacto del factor de carga en la eficiencia electromecánica estimada para un motor de inducción de 3 HP, comparando el comportamiento de un motor de eficiencia estándar con el de un motor IE3. La zona verde resalta el rango óptimo de operación (65%–100% de carga nominal), mientras que la zona roja señala la condición actual de los motores de extracción (FC ≈ 39,2%).

Figura 5. Impacto del factor de carga en la eficiencia — motor 3HP

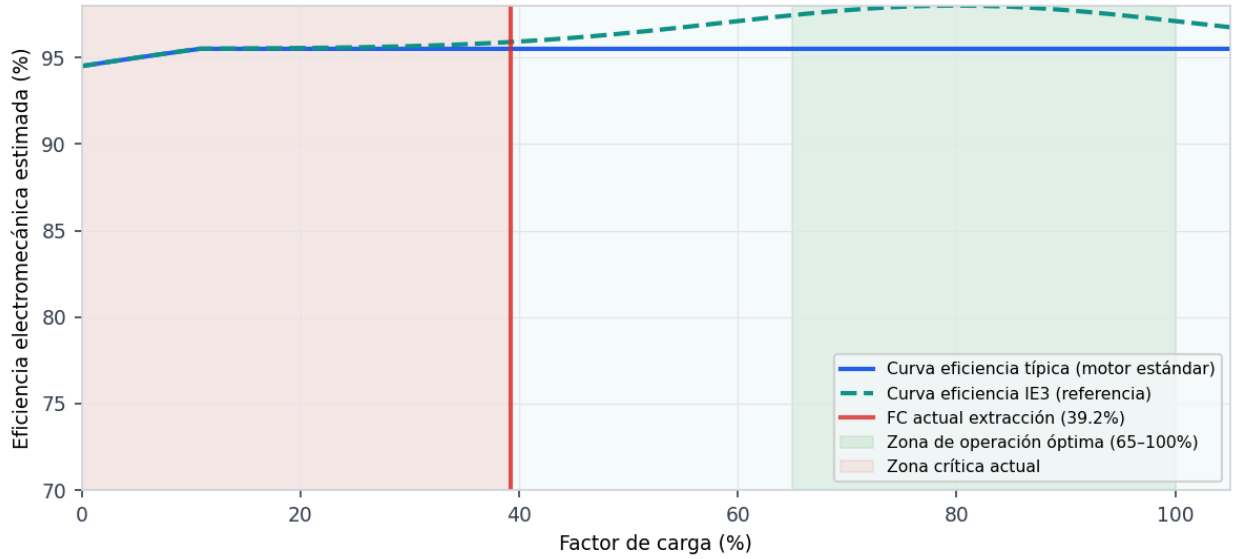


Figura 6. Curva de eficiencia electromecánica estimada en función del factor de carga para un motor de inducción de 3 HP. La zona verde indica el rango óptimo de operación (65%–100%); la zona roja señala la condición actual de los motores de extracción (FC ≈ 39%). La curva IE3 (línea discontinua) ilustra la mejora al seleccionar un motor de potencia adecuada. Fuente: elaboración propia con base en De Almeida et al. (2011) y datos típicos de fabricantes.

La comparación de las dos curvas en la Figura 5 evidenció que, a un factor de carga del 39,2%, la eficiencia estimada del motor estándar fue aproximadamente 5 a 8 puntos porcentuales inferior a su máximo. Al instalar un motor IE3 de 1,5 HP (1,12 kW) que operará al 78% de carga —tomando el percentil 95 de la potencia medida (881 W) multiplicado por 1,25 (factor de seguridad) como potencia de selección, resultando en 1.101 W ≈ 1,47 HP—, la eficiencia operativa se desplazaría hacia el máximo de la curva IE3, con una mejora combinada de eficiencia electromecánica y factor de potencia. Adicionalmente, la reducción del tamaño del motor implicaría reducción de la corriente magnetizante, mejora del factor de potencia y reducción de pérdidas en el cobre de los conductores de alimentación.

6.6 Síntesis de resultados y brechas de información

La Tabla 4 presenta la síntesis de los resultados obtenidos para cada grupo de motores del Horno 1, junto con la acción técnica recomendada y la información adicional requerida para completar el diagnóstico con el nivel de detalle necesario para una propuesta de ingeniería eléctrica definitiva.

Grupo de motores	Resultado principal del análisis	Acción técnica recomendada	Información faltante para cierre
Extracción (motores 2206, 2203, 2202, 2205, 2208, 2204)	FC exploratorio zona 1: 39,2%. Carga estable (CV=0,29%). Potencia media: 877 W frente a 2.238 W nominales.	Medir cada zona independientemente. Evaluar redimensionamiento a 1,5 HP IE3 o implementación de VFD según perfil de demanda.	Medición de caudal y presión del extractor. Horas anuales de operación. Curva del ventilador. Factor de potencia y THD por motor.
Combustión (motores 2207, 2328 con VFD)	Potencia promedio: 7,874 kW. Punto de medición no identificado con certeza. CV=2,31% coherente con control VFD.	Verificar trazabilidad del punto de medición en diagrama unifilar. Medir frecuencia VFD, PF, DPF, kVAr, THD-I.	Asociación motor-variador-tablero. Frecuencia de operación VFD. Perfil de velocidad. Factor de potencia verdadero.
Transmisión (motor 4069)	Sin serie temporal de medición disponible.	Incluir en campaña de medición independiente. Verificar operación con VFD o en red directa.	Potencia activa, factor de potencia, perfil de carga en operación normal y con distintos productos.
Motor 202 (Reliance, rebobinado)	Desbalance de resistencia estátor: 4,69% (supera límite IEC 60034-1 del 2%). Historial desde 2004 con rebobinado.	Reemplazo prioritario por motor nuevo IE3 de 3 HP (o redimensionado según carga real). Descarte o análisis previo de viabilidad de reparación certificada (EASA AR100).	Verificación de ubicación física actual. Medición de corriente de operación y temperatura de carcasa.

Tabla 4. Síntesis de resultados del análisis técnico-energético por grupo de motores. Fuente: elaboración propia.

7. Conclusiones

- El diagnóstico técnico-energético del sistema motriz del Horno 1 confirmó que la optimización del sistema debía abordarse como una evaluación integral motor-carga y no como un reemplazo generalizado de equipos. La evidencia cuantitativa disponible para el motor de extracción zona 1 mostró una demanda eléctrica promedio de 877 W frente a una capacidad instalada de 2.238 W (3 HP), equivalente a un factor de carga exploratorio del 39,2%, condición de sobredimensionamiento que justifica análisis de redimensionamiento e intervención técnica prioritaria.
- La carga del motor de extracción zona 1 se caracterizó como cuasi-estática, con un coeficiente de variación del 0,29% y una banda absoluta de variación de 73 W en 42,7 minutos de medición continua. Esta estabilidad confirmó que la condición de subcarga no correspondía a variaciones de proceso sino a una condición permanente de operación, lo que refuerza la validez del diagnóstico de sobredimensionamiento y la conveniencia de una intervención estructural sobre el motor instalado.
- Los motores de extracción constituyeron el grupo de mayor potencial de mejora energética del sistema, dado que la similitud de sus potencias nominales y aplicaciones permitió extender —con carácter de hipótesis a verificar— el comportamiento observado en zona 1 a las demás zonas del horno. La estimación conservadora indicó que la instalación de motores IE3 de 1,5 HP operando al 78% de carga generaría un ahorro de eficiencia electromecánica de 5 a 8 puntos porcentuales por motor, además de mejora en el factor de potencia y reducción de corriente reactiva en el sistema de distribución.
- Los motores de combustión no recibieron diagnóstico definitivo de sobrecarga ni de sobredimensionamiento debido a la falta de trazabilidad precisa entre el archivo de medición disponible y el motor físico al que correspondía. La potencia media de 7,874 kW implica cargabilidades diferentes dependiendo del motor de referencia (70,4% para 15 HP vs. 105,5% para 10 HP). Esta restricción metodológica subrayó la importancia de identificar cada punto de medición en el diagrama unifilar del sistema antes de ejecutar la campaña de medición.
- El motor 202 (Reliance, 3 HP, rebobinado, en servicio desde 2004) presentó el único caso de desbalance de resistencia de estátor fuera del límite normativo del 2% establecido por la IEC 60034-1, con un valor medido de 4,69%. Esta condición indica la presencia de corrientes de secuencia negativa en operación, par frenante adicional, incremento de temperatura de trabajo y reducción de vida útil del aislamiento. El reemplazo de este motor fue identificado como la acción de mayor urgencia del conjunto de intervenciones recomendadas.
- La eficiencia real de los motores no pudo calcularse con los datos disponibles, dado que no se midió la potencia mecánica en el eje ni las pérdidas mediante métodos normalizados conforme a la IEC 60034-2-1. El estudio calculó cargabilidad exploratoria y comportamiento energético preliminar, que constituyeron base técnica suficiente para la priorización de intervenciones pero no para la cuantificación precisa de la eficiencia de cada motor.

8. Recomendaciones

- Se recomienda ejecutar una campaña de medición completa con el analizador Fluke 434-II para cada uno de los once motores del Horno 1 de manera independiente, incluyendo los canales de tensión por fase (Vrms L1, L2, L3), corriente por fase (Arms L1, L2, L3), potencia activa fundamental (kW), potencia reactiva fundamental (kVAr), potencia aparente (kVA), factor de potencia verdadero (PF), factor de potencia de desplazamiento (DPF), distorsión armónica total de corriente (THD-I) y desbalance de tensión. La duración mínima de cada medición debe ser de 60 minutos en condición estabilizada de operación, cubriendo al menos dos ciclos representativos del proceso de horneado.
- Se recomienda verificar físicamente la ubicación y el estado operativo del motor 202 (Reliance, 3 HP, rebobinado, 2004) y proceder a su reemplazo por un motor nuevo de inducción trifásica de clase IE3 de potencia seleccionada conforme a la carga real medida en el punto de instalación. Dado que el desbalance de resistencia de estátor de 4,69% supera en más del doble el límite del 2% de la IEC 60034-1, la reparación del motor existente no es la opción técnicamente recomendable a menos que se realice conforme al protocolo ANSI/EASA AR100 y se verifique mediante ensayo normalizado que el equipo reparado cumple los criterios de la norma.
- Se recomienda elaborar el diagrama unifilar actualizado del sistema eléctrico del Horno 1, con identificación de cada motor, su tablero de control, el variador asociado cuando corresponda, el punto de medición y la función operativa. Este documento es condición previa para asociar correctamente los archivos de medición Fluke con los motores físicos y evitar las ambigüedades de trazabilidad que condicionaron el diagnóstico del sistema de combustión en el presente trabajo.
- Se recomienda evaluar para los motores de extracción la alternativa de instalar variadores de velocidad —en lugar o adicionalmente al redimensionamiento— si el proceso de extracción presenta variaciones de demanda de caudal o presión en función del tipo de producto procesado, la temperatura del horno o el ciclo de horneado. Esta evaluación requiere medir el perfil de velocidad óptimo para el extractor y calcular el ahorro energético conforme a las leyes de afinidad, comparando el costo de la inversión en variadores con el ahorro proyectado en el período de análisis.
- Se recomienda completar el análisis económico del proyecto con los siguientes datos que no estuvieron disponibles en la etapa de diagnóstico: horas de operación anual del Horno 1 por tipo de motor, tarifa de energía activa y cargo por demanda contratado con el comercializador de energía, costos unitarios de motores IE3 en el rango de 1,5 HP a 15 HP con IVA incluido, costos de instalación y adecuación mecánica por motor, y valor de la parada de producción necesaria para el reemplazo. Con esta información se podrán calcular el ahorro energético anual (kWh/año), el ahorro económico anual (COP/año) y el período de retorno simple (PBP) para cada escenario de intervención.
- Se recomienda que la empresa implemente un sistema de monitoreo continuo de la potencia activa de los motores del Horno 1 mediante medidores de energía permanentes o mediante registro periódico con el analizador portátil. El monitoreo continuo permitirá detectar cambios en el perfil de carga asociados a cambios de proceso, desgaste de los equipos accionados o modificaciones en las condiciones de operación del horno, brindando información actualizada para decisiones de mantenimiento predictivo y optimización energética.

- Se recomienda establecer un procedimiento institucional de selección de motores de reemplazo que incorpore como requisito la verificación de la potencia demandada por la carga mediante medición eléctrica y, cuando sea posible, medición mecánica, antes de adquirir el motor de reemplazo. Este procedimiento evitaría la repetición del sobredimensionamiento detectado y contribuiría a la mejora continua del sistema energético de la planta conforme a los principios de la ISO 50001.
- Se recomienda para los motores de combustión que operan con variadores de velocidad verificar que las consignas de velocidad del variador estén programadas conforme al mínimo requerimiento del proceso y no a velocidad nominal, dado que variadores instalados pero configurados a plena velocidad no generan el ahorro energético esperado de un sistema de control de velocidad variable. Esta verificación es directamente aplicable al hallazgo del informe CEMEP-Fraunhofer ISI (2023), que identificó este error como una de las causas más frecuentes de no aprovechamiento del potencial de ahorro de los variadores de velocidad en instalaciones industriales.

9. Referencias bibliográficas

- **Botero, H., García, L., y López, J. (2019).** Evaluación del potencial de ahorro energético en sistemas de accionamiento eléctrico del sector manufacturero colombiano. Ingeniería y Ciencia, 15(30), 127–152. https://doi.org/10.17230/ingciencia.15.30.6
- **CEMEP y Fraunhofer ISI. (2023).** Study on the energy-saving potential of electric motors with variable speed drives. https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Verband/Fachverbaende/Automation/Elektrische_Antriebe/Cemep_Studie/Cemep_Fraunhofer_study-motor-saving-potential-with-VSD-20231215.pdf
- **Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG]. (2024).** Tarifas de energía eléctrica para usuarios industriales. https://www.creg.gov.co
- **De Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E., y Both, D. (2005).** Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems. IEEE Transactions on Industry Applications, 41(1), 188–199. https://doi.org/10.1109/TIA.2004.841022
- **De Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E., y Fong, J. A. C. (2011).** Standards for efficiency of electric motors. IEEE Industry Applications Magazine, 17(1), 12–19. https://doi.org/10.1109/MIAS.2010.939427
- **De Almeida, A. T., Fong, J., Brunner, C. U., Werle, R., y Van Werkhoven, M. (2019).** New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems: A major opportunity for energy and carbon savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 115, 109384. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109384
- **Fluke Corporation. (s. f.).** Analizadores de calidad eléctrica y energía 434-II y 435-II. https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/434-435
- **Fraile Mora, J. (2008).** Máquinas eléctricas (6.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana de España.
- **International Electrotechnical Commission. (2010).** IEC 60034-1:2010 — Rotating electrical machines — Part 1: Rating and performance (Ed. 12). https://webstore.iec.ch/publication/131
- **International Electrotechnical Commission. (2024).** IEC 60034-2-1:2024 — Rotating electrical machines — Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests. https://webstore.iec.ch/en/publication/67756
- **International Electrotechnical Commission. (2025).** IEC 60034-30-1:2025 — Rotating electrical machines — Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). https://webstore.iec.ch/en/publication/91195
- **International Organization for Standardization. (2018).** ISO 50001:2018 — Energy management systems: Requirements with guidance for use. https://www.iso.org/standard/69426.html
- **Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2010).** IEEE Std 1459-2010: Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063
- **International Energy Agency [IEA]. (2011).** Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Motor_Systems_Flyer.pdf

- **Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2024).** Resolución 40117 de 2024: Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas — RETIE. https://www.minenergia.gov.co/documents/11563/Resoluci%C3%B3n_40117_de_2024.pdf
- **National Electrical Manufacturers Association. (2021).** ANSI/NEMA MG1-2021: Motors and generators. https://webstore.ansi.org/standards/nema/ansinemamg2021
- **Saidur, R. (2010).** A review on electrical motors energy use and energy savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(3), 877–898. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018
- **Saidur, R., Mekhilef, S., Ali, M. B., Safari, A., y Mohammed, H. A. (2012).** Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 543–550. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.020
- **Trianni, A., Cagno, E., y Accordini, D. (2019).** Energy efficiency measures in electric motors systems: A novel classification highlighting specific implications in their adoption. Applied Energy, 252, 113481. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113481
- **U.S. Department of Energy. (2014).** Premium efficiency motor selection and application guide: A handbook for industry. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motors_handbook_web.pdf
- **IEEE. (2010).** IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions (IEEE Std 1459-2010). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063
- **Stephen J. Chapman. (2012).** Máquinas eléctricas (5.ª ed.). McGraw-Hill.
- **ABB. (2018).** Technical guide No. 4: Guide to variable speed drives. ABB Group.
- **Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2017).** Fundamentals of electric circuits (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- **Bonnett, A. H. (2008).** Root cause AC motor failure analysis. IEEE Press.
- **Chapman, S. J. (2012).** Electric machinery fundamentals (5th ed.). McGraw-Hill.
- **Fluke Corporation. (2021).** Fluke 434-II Power Quality and Energy Analyzer User Manual.
- **Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2017).** Power system analysis and design (6th ed.). Cengage Learning.
- **IEC. (2022). IEC 60034-30-1:** Rotating electrical machines – Efficiency classes of line operated AC motors. International Electrotechnical Commission.
- **IEEE. (2010).** IEEE Standard 1459-2010: Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. IEEE.
- **IEEE. (2014).** IEEE Standard 1159-2014: Recommended practice for monitoring electric power quality. IEEE.
- **IEEE. (2021).** IEEE Std 43-2021: Recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery. IEEE.
- **International Energy Agency (IEA). (2023).** Energy Efficiency 2023. IEA Publications.

- **ISO. (2018).** ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.
- **Mobley, R. K. (2002).** An introduction to predictive maintenance (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- **NEMA. (2021). MG 1:** Motors and Generators. National Electrical Manufacturers Association.

10. Bibliografía

La bibliografía siguiente incluye fuentes consultadas durante el proceso de investigación que sirvieron como contexto de referencia general pero no fueron citadas directamente en el cuerpo del documento. Su inclusión responde a la práctica académica de transparencia en el proceso de documentación.

- **Andreas, J. C. (1992).** Energy-efficient electric motors: Selection and application (2.ª ed.). Marcel Dekker. https://doi.org/10.1201/9780824778699
- **ANSI/EASA AR100. (2020).** Recommended practice for the repair of rotating electrical apparatus. Electrical Apparatus Service Association. https://www.easa.com/resources/booklet/ar100-standard
- **Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]. (2007).** Resolución 520 de 2007: Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía — PROURE. https://www.upme.gov.co
- **WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2023).** Catálogo W22 motores de inducción trifásica IE3 — Baja tensión (Ed. 2023). https://www.weg.net/catalog/weg/CO/es/Motores-El%C3%A9ctricos
- **ABB Ltd. (2023).** IE3 Premium Efficiency Motors — Product catalog. https://new.abb.com/motors-generators/motors/low-voltage-motors/ie3-premium-efficiency-motors