



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: ARTÍCULO CIENTÍFICO

Título:

Análisis de Calidad de la Energía del Sistema Eléctrico de una Empresa de
Procesamiento de Cárnicos.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad mención
Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:

Ing. Erazo Vizcaino Brayan Argenis

Tutor:

Ing. Freire Martínez Luigi Orlando MSc.

LATACUNGA –ECUADOR

2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación **“Evaluación de modelos de optimización convexos para minimizar pérdidas en el sistema de distribución”** presentado por el Ing. Erazo Vizcaino Brayan Argenis para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, junio de 2026

.....

M.Sc. Freire Martínez Luigi Orlando

CC. 0502529589

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Análisis de Calidad de la Energía del Sistema Eléctrico de una Empresa de Procesamiento de Cárnicos”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, junio 2026

.....
Msc. Ing. Walter Paul Rueda Flores
CC: 0503689895
Presidente del tribunal

.....
Msc. Ing. Cruz Loya Edwin Vinicio
CC: 1710814920
Lector 2

.....
Msc. Ing. Sixto Fidel Aimacaña Quishpe
CC: 0503425209
Lector 3

DEDICATORIA

Dedico este informe de investigación en primer lugar, a mis padres Roberto Vaca y Dedico este proyecto de titulación, en primer lugar, a Dios, Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia; a Él le agradezco la fortaleza en tiempos difíciles y la esperanza al iniciar cada nuevo ciclo.

A mi familia, por el apoyo y amor que me han otorgado a lo largo de todo mi proceso educativo; esta tesis es un reflejo de su cariño y respaldo incondicional.

A mi madre María, por respaldarme moralmente con sus consejos y no dejarme decaer en tiempos difíciles y a mi hermano Jeyson por ser un apoyo e inspiración de vida.

Y a todas las personas que me acompañaron y estuvieron presentes en este periodo de mi vida.

Brayan Argenis Erazo Vizcaino

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios, por darme la vida, la salud y la capacidad intelectual para culminar esta etapa. Porque en los momentos de duda y fatiga, Él fue mi refugio y mi fortaleza.

A mi tutor de tesis, Ing. Freire Martínez Luigi Orlando MSc., por su guía técnica y su gran paciencia. A la Universidad Técnica de Cotopaxi, por la oportunidad que me permitió para culminar con este gran meta.

A mis padres y familia, que me apoyaron y también oraron por mí. A mis hermanos en la fe, que intercedieron en esta etapa de mi vida. Finalmente, a todos los que de una u otra forma contribuyeron en este trabajo. Que Dios les bendiga abundantemente.

Brayan Argenis Erazo Vizcaino

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, junio 2026

.....
Ing. Brayan Argenis Erazo Vizcaino
CC: 0502956139

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, junio 2026

.....
Ing. Brayan Argenis Erazo Vizcaino
CC: 0502956139

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Análisis de Calidad de la Energía del Sistema Eléctrico de una Empresa de Procesamiento de Cárnicos, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, junio 2026

.....
Msc. Ing. Walter Paul Rueda Flores
CC:2300657570

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Análisis de Calidad de la Energía del Sistema Eléctrico de una Empresa de Procesamiento de Cárnicos

Autor: Erazo Vizcaino Brayán Argenis, Ing.

Tutor: Freire Martínez Luigi Orlando, M.Sc.

RESUMEN

Mantener niveles adecuados de calidad de la energía es un desafío persistente en los sistemas industriales, lo que impacta directamente en los costos operativos y la confiabilidad. Se detectaron deficiencias en la calidad de la energía en una fábrica de embutidos en Latacunga, Ecuador, donde el equipamiento eléctrico principal consta de dos transformadores de distribución (125-500 kVA), incluyendo varios problemas como bajo factor de potencia y distorsión armónica. Durante un período de monitoreo de siete días, utilizando el analizador de redes Fluke 435-II, se registraron 5,168,640 mediciones discretas a intervalos de un minuto, cumpliendo con las normas IEEE 519-2014, IEC 61000-4-30 [1] y la regulación ARCONEL 035/19. Utilizando Python, se implementó un modelo multiobjetivo para minimizar las penalizaciones financieras, la distorsión armónica y las pérdidas técnicas mediante la inserción de filtros pasivos LC y compensación de potencia reactiva.

Para el transformador de 125 kVA, se estableció una corrección del factor de potencia de 0.84 a 0.95 utilizando un banco de capacitores automático de 30 kVAR con una inversión de USD 3,500, eliminando las penalizaciones regulatorias y resultando en un período de recuperación de 8.1 meses. El transformador de 500 kVA presentó desafíos más complejos, con un THD-I del 53.1%, superando los límites de la norma IEEE 519-2014 en un 254%. La implementación de filtros pasivos sintonizados H3 (180 Hz) y H5 (300 Hz) redujo la distorsión de corriente a niveles conformes (<15%), disminuyó el factor de pérdidas armónicas de 6600 a 1874 (una reducción del 71.6%) y redujo las pérdidas totales del sistema en un 48.3%. El análisis económico mediante el mapeo de Pareto reveló que las modificaciones al transformador de 125 kVA ofrecen una rentabilidad superior, generando el 56.7% del ahorro anual total con una inversión de capital de solo el 43.2%. Ambas soluciones técnicas aseguran el cumplimiento de las normativas nacionales e internacionales y ofrecen beneficios económicos, destacando un ahorro anual combinado de USD 2,813 y un retorno total de la inversión en un plazo de dos años.

PALABRAS CLAVE: Calidad de la energía, factor de potencia, distorsión armónica, potencia.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Title: Power Quality Analysis of the Electrical System of a Meat Processing Company

Author: Erazo Vizcaino Brayan Argenis, Ing.

Tutor: Freire Martínez Luigi Orlando, M.Sc.

ABSTRACT

Maintaining adequate power quality levels is a persistent challenge in industrial systems, directly impacting operating costs and reliability. Power quality deficiencies were detected at a sausage factory in Latacunga, Ecuador, where the main electrical equipment consists of two distribution trans-formers (125-500 kVA), including several problems such as low power fac-tor and harmonic distortion.

During a seven-day monitoring period, using the Fluke 435-II network analyzer, 5,168,640 discrete measurements were detected at one-minute intervals, complying with IEEE 519-2014, IEC 61000-4-30 [1] and ARCONEL 035/19 standards.

Using Python, a multi-objective model was implemented to minimize financial penalties, harmonic distortion, and technical losses by inserting passive LC filters and reactive power compensation.

For the 125 kVA transformer, a power factor correction of 0.84 to 0.95 was established using a 30 kVAr automatic capacitor bank with an investment of US\$3,500, eliminating regulatory penalties and resulting in a payback period of 8.1 months. The 500 kVA transformer presented more complex challenges, with a THD-I of 53.1%, exceeding the limits of the IEEE 519-2014 standard by 254%. The implementation of tuned passive filters H3 (180 Hz) and H5 (300 Hz) reduced current distortion to compliant levels (<15%), de-creased the harmonic loss factor from 6600 to 1874 (a 71.6% reduction), and reduced total system losses by 48.3%. Economic analysis using Pareto mapping revealed that the modifications to the 125 kVA transformer offer superior profitability, generating 56.7% of the total annual savings with a capital investment of only 43.2%. Both technical solutions ensure compliance with national and international standards and offer economic benefits, notably combined annual savings of USD 2,813 and a total return on investment within two years.

KEY WORDS: Power quality, power factor, harmonic distortion, power.

AVAL DE TRADUCCIÓN

Yo, Marco Paúl Beltrán Semblantes con cédula de identidad número: 0502666514 Magíster en Lingüística Aplicada en la enseñanza del Idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT ; 1020-2021-2354162: CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE UNA EMPRESA DE PROCESAMIENTO DE CÁRNICOS” de: Erazo Vizcaino Brayan Argenis, aspirante a Magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, junio del 2026.

Atentamente,

Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	1
3. MATERIALES Y MÉTODOS	3
3.1 Metodología de la evolución de los modelos convexos	3
3.2 Formulación matemática del modelo de optimización	4
3.3 Modelo Flujo de Potencia Óptimo No Lineal (OPF-NL)	4
3.4 Análisis de la no linealidad del modelo flujo de potencia óptimo	4
3.5 Propiedades matemáticas para la convexidad de funciones no lineales	5
3.6 Definición uno conjunto convexo	6
3.7 Definición dos conjunto convexo	6
3.8 Definición tres función convexa	7
3.9 Formulación matemática de modelos convexos	9
3.10 Modelo basado en la aproximación cónica de segundo orden	8
4. RESULTADOS Y DISCUSION	¡Error! Marcador no definido.
5. CONCLUSIONES	10
6. REFERENCIAS	11

ÍNDICE DE FIGURAS

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	1
3. MATERIALES Y MÉTODOS	3
3.1 Diseño del estudio y medición de datos	3
3.2 Procesamiento computacional	4
3.3 Análisis estadístico	4
3.4 Parámetros regulatorios y tarifarios	4

Tabla 1. Parámetros regulatorios y tarifarios.	4
3.5 Modelo de optimización matemática	5
3.6 Validación del modelo	6
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	6
FIGURA 1. Indicadores de calidad de la energía: Factor de Potencia, THD-V y THD-I para los transformadores de 125 kVA y 500 kVA).....	6
3.7 Transformador de 125 kVA: Compensación reactiva.....	6
Tabla 2. Resumen estadístico y compensación reactiva – Transformador de 125 kVA.	7
3.8 Transformador de 500 kVA: Mitigación de armónicos	7
Tabla 3. Análisis armónico, diseño de filtros y balance reactivo – Transformador de 500 kVA.	8
3.9 Evaluación de pérdidas técnicas y análisis económico	8
Tabla 4. Resumen técnico-económico y validación del modelo – Transformador de 500 kVA.	8
3.10 Análisis de Pareto para la priorización de inversiones	9
FIGURA 2. Análisis de Pareto y priorización de inversiones según la eficiencia relativa).	9
3.11 Comparación con enfoques existentes	9
3.12 Discusión.....	9
3.12 Limitaciones y trabajo futuro	10
5. CONCLUSIONES	10
6. REFERENCIAS	11

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:	Análisis de Calidad de la Energía del Sistema Eléctrico de una Empresa de Procesamiento de Cárnicos
Línea de investigación:	Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.
Proyecto de investigación asociado:	Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.
Grupo de Investigación:	Sistemas Eléctricos de Potencia
Red nacional o internacional:	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)

2. INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía eléctrica suministrada a las instalaciones industriales se ha convertido en un determinante crítico de la eficiencia eléctrica, la vida útil de los equipos y los costos de producción en los entornos de manufactura modernos [2]. Estos entornos dependen cada vez más de cargas no lineales, entre las cuales los variadores de frecuencia (VFD), las fuentes de alimentación conmutadas y los sistemas de control electrónico, entre otros, requieren prioridad [3]. Estos componentes introducen distorsión armónica y degradan el factor de potencia, comprometiendo la confiabilidad del sistema eléctrico y generando pérdidas de energía evitables [4].

La norma IEEE 1159-2019 establece los fenómenos electromagnéticos que afectan las formas de onda de voltaje y corriente, los cuales tienen impactos adversos en generadores, redes de distribución y equipos de uso final [5]. Para reducir estos efectos, las normas técnicas internacionales, principalmente la IEEE 519-2014 y la serie IEC 61000, establecen límites cuantitativos para la distorsión armónica, las fluctuaciones de voltaje y el factor de potencia [6]. En Ecuador, el marco regulatorio

ARCONEL 035/19 complementa estas normas internacionales al definir los límites permisibles de calidad de la energía; de lo contrario, se establecen penalizaciones por incumplimiento.

La empresa de embutidos, ubicada en Latacunga, Ecuador, opera con dos transformadores, uno con una capacidad nominal de 125 kVA y el otro con una capacidad nominal de 500 kVA (13.8 kV/220 V, grupo de conexión DYn5), los cuales alimentan cargas críticas como calderas de vapor, compresores de refrigeración, sistemas de almacenamiento en frío y líneas de producción automatizadas, con una capacidad total instalada de 395.1 kW [6]. La operación simultánea de motores de inducción y variadores de frecuencia crea un entorno desafiante para la calidad de la energía, caracterizado por un consumo excesivo de potencia reactiva, así como por una inyección significativa de armónicos, lo que resulta en altas pérdidas técnicas y una menor confiabilidad del sistema [7].

Las evaluaciones realizadas bajo los protocolos regulatorios ARCERNR 002/20 identificaron magnitudes eléctricas fuera de la norma [8], incluyendo parpadeo de voltaje o flicker (Pst) que supera la unidad en el 18% de las ventanas de medición, una distorsión armónica total que alcanza el 36% durante los períodos pico de producción y un factor de potencia promedio de 0.84, sustancialmente por debajo del mínimo regulatorio de 0.92 [9]. Evaluaciones detalladas posteriores utilizando las metodologías ARCONEL 005/18, EN 50160 e IEEE 519-2014 documentaron distorsiones armónicas de corriente que van desde el 29.61% hasta el 216.94% para armónicos individuales, con componentes predominantemente de orden impar (3.º, 5.º, 7.º, 9.º y 11.º), los cuales identifican magnitudes fuera de la norma [10].

Se presentan varios enfoques para optimizar la calidad de la energía en entornos industriales. En [9], se propone un modelo multiobjetivo para optimizar la potencia reactiva mediante la incorporación de agrupamientos espaciales y temporales de carga en instalaciones de energía renovable, demostrando una reducción del 12% al 18% en las desviaciones de voltaje. Según [12], se desarrollan estrategias operativas utilizando dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission System) para mejorar la integración en la red de clústeres de energía renovable, logrando una mejora del 22% en los índices de estabilidad de voltaje. En [11], se emplea el

algoritmo genético NSGA-II junto con métodos AHP (Analytic Hierarchy Process), así como la Correlación de Importancia entre Criterios (CRITIC), para coordinar inversores multifuncionales, mitigando así los armónicos y corrigiendo simultáneamente los desequilibrios de voltaje, reportando una reducción del 15% al 25% en la distorsión armónica total [12].

Utilizando el método de decisión multicriterio CRITIC para sistemas de subtransmisión, se optimizó la ubicación de la compensación de potencia reactiva, reduciendo las pérdidas técnicas en un 14.3% y mejorando los perfiles de voltaje en un 8.7% [13]. Calvopiña y Naranjo investigaron el despacho óptimo de potencia reactiva incorporando restricciones de carga en la línea de transmisión mediante técnicas de programación no lineal, demostrando que la compensación reactiva coordinada [14] puede minimizar simultáneamente las pérdidas de potencia activa [15]. Estos estudios establecen la viabilidad técnica de los enfoques basados en la optimización, pero no han abordado los desafíos específicos de las instalaciones de procesamiento de alimentos con cargas mixtas de motores y variadores de frecuencia [16].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Diseño del estudio y medición de datos

Se realizó un estudio observacional analítico en la empresa Embutidos La Madrileña (Latacunga, Ecuador) durante siete días consecutivos de operación normal [17]. Se instaló un analizador trifásico Fluke 435-II en la red de baja tensión de los transformadores de 125 kVA y 500 kVA, registrando variables eléctricas con una resolución de un minuto, logrando un total de 5,168,640 registros distribuidos en 1,472 parámetros por columna (1). La selección del intervalo y del período se basa en la norma IEC 61000-4-30 para estudios de calidad de la energía industrial de Clase A [18].

3.2 Procesamiento computacional

El análisis de datos se implementó en Python 3.x integrando NumPy 1.24 para el cálculo numérico, Pandas 2.0 para las estructuras de DataFrame, SciPy 1.11 para el análisis estadístico y Matplotlib para la visualización [19]. El procesamiento siguió cinco etapas: importación y carga optimizada de registros; preprocesamiento con normalización de unidades y corrección por interpolación lineal; cálculo de magnitudes RMS, potencia activa/reactiva/aparente y factor de potencia; evaluación de desequilibrios, distorsión armónica y eficiencia; y aplicación del modelo de optimización multiobjetivo [20].

3.3 Análisis estadístico

Para cada parámetro eléctrico, se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana, moda), dispersión (desviación estándar σ , coeficiente de variación CV) y forma de la distribución (asimetría, curtosis). Un CV < 10% indica una operación estable según la norma IEEE 1159-2019. En [21], la detección de valores atípicos (outliers) empleó el método del Rango Intercuartílico (IQR) a través de las ecuaciones:

$$\text{Lower limit} = Q1 - 1.5 \times IQR \quad (1)$$

$$\text{Upper limit} = Q3 + 1.5 \times IQR \quad (2)$$

donde $IQR = Q3 - Q1$ define el rango intercuartílico. La integridad de los datos se evaluó según la norma IEEE 1159-2019, alcanzando el 100% (umbral mínimo: 95%).

3.4 Parámetros regulatorios y tarifarios.

La Tabla 2 presenta los valores de referencia utilizados para la evaluación técnico-económica, basados en el pliego tarifario vigente y las normas ARCONEL 035/19, IEEE 519-2014 e IEC 61000-2-12.

Tabla 1. Parámetros regulatorios y tarifarios.

Parámetro	Valor	Norma / Referencia
Costo de energía activa	0.12 USD / kWh	Pliego tarifario
Costo de demanda máxima	8.50 USD / kW - mes	Pliego tarifario
Factor de potencia mínimo	0.92	ARCONEL 035/19

Límite de THD-V	5.0%	IEEE 519-2014
Límite de TDD	8.0%	IEEE 519-2014
Variación de voltaje	±10%	IEC 61000-2-2
Desequilibrio máximo	2.0%	IEC 61000-2-12

3.5 Modelo de optimización matemática

El modelo multiobjetivo minimiza simultáneamente los costos económicos y las distorsiones eléctricas a través de la función objetivo:

$$F_{L,C,R,H} = \alpha * C_{pen} + \beta * C_{filter}(L, C, R) + \gamma * THD_{res} + \delta * TDD_{res} \quad (3)$$

donde $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ son factores de ponderación; C_{pen} es el costo de la penalización por bajo factor de potencia; C_{filter} es la inversión en componentes pasivos; THD_{res} y TDD_{res} son las distorsiones residuales. El costo de la penalización se determina mediante:

$$C_{pen} = Facturación_{mensual} \times B_{pf} \times 12 \quad (4)$$

$$B_{pf} = \begin{cases} \frac{0.92}{P_{fcurrent}} - 1 & \text{If } P_{fcurrent} < 0.92 \\ 0 & \text{If } P_{fcurrent} \geq 0.92 \end{cases} \quad (5)$$

$$C_{filter} = CL \times L + CC \times C + CR \times R + C_{instalación} \quad (6)$$

Las restricciones técnicas incluyen: frecuencia de resonancia $f_{res} \neq f_h$ para evitar la resonancia con los armónicos presentes; corriente del filtro $I_{filter} \leq I_{rated}$; potencia reactiva efectiva $Q_{eff} \leq Q_{filter}^{max}$; y límites constructivos $L_{min} \leq L \leq L_{max}, C_{min} \leq C \leq C_{max}, R_{min} \leq R \leq R_{max}$ [22]. El factor de pérdidas armónicas cuantifica el aumento de pérdidas debido a corrientes de orden superior:

$$FHL = 1 + \sum_{h=2}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2 \quad (7)$$

El período de recuperación (PBP) se calcula mediante:

$$PBP = \frac{Inversión_{total}}{Ahorro_{mensual} + Ahorro_{pérdidas}} \quad (8)$$

3.6 Validación del modelo

La validación empleó cuatro criterios:

(1) Análisis de sensibilidad del factor de ponderación: $S\alpha = \frac{\partial F}{\partial \alpha} \times \frac{\alpha}{F}$; (2)

Condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) para verificar la optimización; (3)

Error relativo porcentual $\varepsilon_r = \frac{|Value_{measured} - Value_{predicted}|}{Value_{measured}} \times 100$; (4) Índice de

mejora de pérdidas: $\eta_{improvement} = \frac{F_{HL, initial} - F_{HL, final}}{F_{HL, initial}} = 100$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra los diagramas de caja (boxplots) del factor de potencia, THD-V y THD-I para ambos transformadores. El transformador de 500 kVA exhibe una mayor variabilidad y niveles significativamente más altos de distorsión de voltaje y corriente, mientras que el de 125 kVA mantiene un rendimiento más uniforme respetando las normas de calidad de la energía.

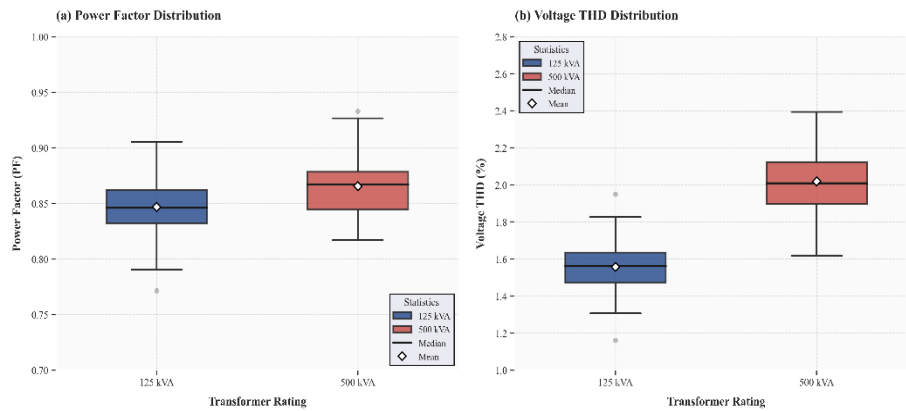


FIGURA 1. Indicadores de calidad de la energía: Factor de Potencia, THD-V y THD-I para los transformadores de 125 kVA y 500 kVA).

3.7 Transformador de 125 kVA: Compensación reactiva

El análisis estadístico del factor de potencia durante 10,080 minutos reveló una $\mu = 0.8398$, una desviación estándar $\sigma = 0.050$ y un coeficiente de variación $CV = 5.8\%$, lo que indica una operación estable. Las condiciones iniciales mostraron una potencia activa de 107.5 kW, una potencia reactiva de 69.45 kVAr y una potencia aparente de 128.0 kVA, resultando en un factor de potencia de 0.8398, por debajo

del mínimo regulatorio de 0.92 [23]. La Tabla 3 consolida las estadísticas del factor de potencia y el análisis técnico-económico de la compensación reactiva implementada. La implementación del banco de capacitores automático de 40 kVAr (pasos de 10 + 10 + 10 + 10 kVAr) elevó el factor de potencia a 0.950, reduciendo la potencia aparente a 113.16 kVA y eliminando las penalizaciones por bajo factor de potencia. El THD-V medio de 1.57% se mantiene dentro de los límites regulatorios (5% según IEEE 519-2014).

Tabla 2. Resumen estadístico y compensación reactiva – Transformador de 125 kVA.

Parámetros	Valor	Componente	USD
FP Medio	0.839	Banco de capacitores de 40 kVAr	1,800
Desviación estándar	0.050	Regulador automático de FP	350
CV	5.83%	Protección y tableros	900
Valores atípicos	0.82%	Ingeniería	210
FP Inicial	0.84		
FP Final	0.95		
Q Inicial	69.45 kVAr		
Q Final	33.79 kVAr		
Inversión total			3,500 \$
Payback			8.1 months

3.8 Transformador de 500 kVA: Mitigación de armónicos

El transformador de 500 kVA opera con una utilización promedio del 20% y máxima del 30%, sin registros de sobrecarga, clasificándose como subutilizado según la norma IEEE Std C57.12.00-2010. Sin embargo, presenta una severa distorsión armónica con un THD-I del 53.1%, superando en un 254% el límite del 15% establecido en la norma IEEE 519-2014 [23]. La Tabla 4 integra el análisis armónico individual, el diseño de filtros pasivos y el balance completo de potencia reactiva.

Los armónicos H3 (43%) y H5 (25%) son característicos de los variadores de frecuencia de 6 pulsos sin filtrado de entrada. El H3 se origina por el desequilibrio de la carga monofásica y la saturación parcial del transformador. El H5 proviene de los rectificadores trifásicos en los sistemas de refrigeración y bombeo. Se diseñaron filtros pasivos sintonizados H3 (180 Hz) y H5 (300 Hz) con una potencia de 4.0 kVAr cada uno, un factor de calidad $Q=50$ e impedancias nominales de 0.108Ω y 0.065Ω respectivamente. La compensación de potencia reactiva total de 23 kVAr

(8 kVAr de los filtros + 15 kVAr del banco de capacitores) elevó el factor de potencia a 0.950 [24].

Tabla 3. Análisis armónico, diseño de filtros y balance reactivo – Transformador de 500 kVA.

Armónico	Medido	Límite	Exceso
H3	43.0%	4.0%	975%
H5	25.0%	4.0%	525%
H7	15.2%	4.0%	280%
H9	8.5%	1.5%	467%
H11	5.3%	2.0%	165%
Balance de Potencia Reactiva			
Parámetro	Condición Inicial	Condición Final	
Potencia activa (P)	86.0 kW	86.0 kW	
Potencia reactiva (Q)	51.0 kVAr	28.0 kVAr	
Potencia aparente (S)	100.0 kVA	90.5 kVA	
Factor de potencia	0.860	0.950	
Compensación por filtros	-	8.0 kVAr	
Banco de capacitores	-	15.0 kVAr	
Compensación total	-	23.0 kVAr	

Fuente: Elaboración propia. Armónicos H3/H9: cargas monofásicas; H5/H7: VFDs/rectificadores.

3.9 Evaluación de pérdidas técnicas y análisis económico

La Tabla 3 presenta el análisis completo de pérdidas técnicas, la inversión y la validación del modelo matemático para el transformador de 500 kVA. La reducción del factor F_{HL} de 6.600 a 1.874 (mejora del 71.6%) disminuye las pérdidas armónicas de 1.540 kW a 0.240 kW, reduciendo las pérdidas totales en un 48.3%. El ahorro anual de energía de 11,388 kWh representa USD 1,366, con un período de recuperación de 21 meses [25].

Tabla 4. Resumen técnico-económico y validación del modelo – Transformador de 500 kVA.

Concepto	Valor Actual	Valor Proyectado	Mejora (%)
Pérdidas Técnicas			
Pérdidas a Plena Carga (F_{HL})	6.600 kW	1.874 kW	71.6
Pérdidas armónicas	1.540 kW	0.240 kW	87.7
Pérdidas totales	3.015 kW	1.715 kW	48.3
Ahorro de energía	-	11,388 kWh/año	-
Ahorro económico	-	1,366 USD/año	-
Inversión y Economía			
Inversión total	-	3,540 USD	-
Ahorro mensual	-	169.7 USD	-
Período de recuperación	-	1.75 años (21 meses)	-

Fuente: Elaboración propia.

3.10 Análisis de Pareto para la priorización de inversiones

La Figura 2 detalla que el transformador de 125 kVA, con una inversión de USD 3,500 (43.2% del total), genera el 56.7% del ahorro anual, logrando una eficiencia relativa de 1.487. En cambio, el transformador de 500 kVA, con USD 3,540 (56.8%), aporta el 43.3% del ahorro, con una eficiencia de 0.456. Además, la validación del modelo mediante las condiciones KKT confirmó la existencia de óptimos locales, con errores relativos de 0.65% y 1.87%, ambos menores al 5%.

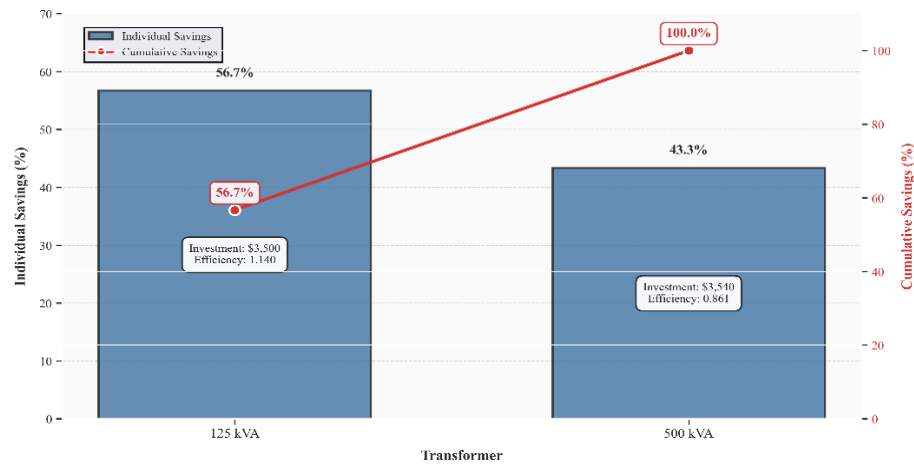


FIGURA 2. Análisis de Pareto y priorización de inversiones según la eficiencia relativa).

3.11 Comparación con enfoques existentes

A diferencia de las soluciones basadas en filtros activos o dispositivos FACTS, que requieren una infraestructura de control avanzada e integración SCADA, el filtro pasivo LC propuesto logra una mitigación armónica comparable (reducción del 71.6% en F_{HL}). Mientras que los métodos descritos de optimización multiobjetivo demuestran reducciones de THD del 12% al 25%, este diseño ofrece una excelente relación calidad-precio (inversión de USD 3,540, recuperación en 21 meses), siendo altamente adecuado para entornos industriales.

3.12 Discusión

El sistema de monitoreo implementado procesó 5,168,640 registros a lo largo de siete días, cumpliendo con las normas IEEE 1159-2019 e IEC 61000-4-30 Clase A. Un coeficiente de variación menor al 10% confirma la estabilidad operativa, mientras que la detección de valores atípicos mediante el método IQR identificó

eventos transitorios sin comprometer la calidad estadística (menos del 2% de valores atípicos). La validación mediante cuatro criterios complementarios demostró que el modelo multiobjetivo propuesto constituye una solución óptima y confiable. El análisis de sensibilidad confirmó la consistencia entre los factores de ponderación y los problemas específicos: $S\alpha = 1.847$ at 125 kVA refleja el impacto económico del bajo factor de potencia, mientras que $S\gamma = 2.134$ at 500 kVA demuestra el predominio de la distorsión armónica.

3.12 Limitaciones y trabajo futuro

Aunque el enfoque propuesto demuestra un impacto social significativo y relevancia práctica (logrando una reducción anual de energía de 11,388 kWh en un sistema industrial de 500 kVA, equivalente a evitar aproximadamente 5.1 toneladas de emisiones de CO₂ al año, al tiempo que reduce las pérdidas técnicas en un 48.3%), su implementación se evalúa actualmente bajo condiciones operativas específicas. El trabajo futuro debería centrarse en validar la metodología en una gama más amplia de perfiles de carga industrial y factores de emisión de la red, de forma paralela con los entornos regulatorios. Además, incluso si se garantiza el cumplimiento normativo, se necesita más investigación para evaluar el rendimiento a largo plazo, la escalabilidad y la integración con tecnologías emergentes de redes inteligentes (Smart grids), particularmente en economías en desarrollo donde el marco de código abierto podría reducir aún más las barreras técnicas y económicas para su adopción [26].

5. CONCLUSIONES

Este artículo presenta un análisis de la energía eléctrica en transformadores industriales de 125 kVA y 500 kVA, identificando problemas como bajo factor de potencia y distorsión armónica. Se desarrolló un modelo matemático multiobjetivo para minimizar de forma simultánea los costos económicos, las distorsiones eléctricas y las pérdidas técnicas mediante el diseño óptimo de filtros pasivos LC y sistemas de compensación de potencia reactiva. Este modelo fue validado con errores relativos inferiores al 2%. En el transformador de 125 kVA, el factor de potencia se corrigió de 0.84 a 0.95. En el transformador de 500 kVA, el THD-I se

redujo a los valores regulatorios, lo que resultó en ahorros de energía y una clara priorización de la inversión bajo escenarios de recursos limitados.

6. REFERENCIAS

- [1] D. K. Nishad, A. N. Tiwari, S. Khalid, S. Gupta, and A. Shukla, “AI-based hybrid power quality control system for electrical railway using single phase PV-UPQC with Lyapunov optimization,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 2641, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-85393-5.
- [2] Z. Oubrahim, Y. Amirat, M. Benbouzid, and M. Ouassaid, “Power Quality Disturbances Characterization Using Signal Processing and Pattern Recognition Techniques: A Comprehensive Review,” *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2685, 2023, doi: 10.3390/en16062685.
- [3] O. Castañeda and W. Castañeda, “Análisis de la calidad de la energía con relación a la calidad del producto e influencia de los armónicos de corriente dentro del área de concesión de CNEL-Milagro,” *Revista Técnica “Energía”*, vol. 6, no. 1, 2010.
- [4] D. Monga, “Determinación de los Indicadores de Calidad de la Energía para el Caso de un Usuario Conectado en Media Tensión,” *Revista Técnica “Energía”*, vol. 20, no. 1, pp. 9–15, 2023.
- [5] L. Qu, S. Zhang, H. C. Lin, N. Chen, and L. Li, “Multiobjective Reactive Power Optimization of Renewable Energy Power Plants Based on Time-and-Space Grouping Method,” *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 3556, 2020, doi: 10.3390/en13143556.
- [6] L. Li, J. Qin, H. Hu, Q. Zhang, and L. Luo, “Optimized operational approach for multi-type reactive power compensation to enhance the grid integration strength of new energy clusters,” *Front Energy Res.*, vol. 11, p. 1342770, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1342770.
- [7] Y. Lin, J. Lan, W. Wang, Y. Zhang, Y. Xiang, and L. Qin, “A multifunctional inverter power quality coordinated optimization strategy based on comprehensive evaluation,” *Front Energy Res.*, vol. 12, p. 1431874, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1431874.
- [8] A. N. Chiguano Velasco, J. N. Castillo Fiallos, C. I. Quinatoa Caiza, and E. F. Guanochanga Collaguazo, “Modelling and multi-criteria analysis of the

sustainability dimensions for the green vehicle routing problem,” *Digital Science*, vol. 7, no. 2, pp. 64–81, 2023.

- [9] H. Zhou, J. Liang, X. Du, and M. Wu, “Multi-Timescale Reactive Power Optimization and Regulation Method for Distribution Networks Under a Multi-Source Interaction Environment,” *Processes*, vol. 12, no. 10, p. 2254, 2024, doi: 10.3390/pr12102254.
- [10] E. Cazacu, G. Ioana, M. Stănculescu, and L. Petrescu, “Active Power Filter Solution to the Harmonic Issues Caused by a Nonlinear Industrial Load,” in *10th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, 2023, pp. 10–6.
- [11] W. T. Huang, L. R. Chen, N. C. Yang, S. Fang, C. M. Dinis, and G. N. Popa, “Aspects Regarding of Passive Filters Sustainability for Non-Linear Single-Phase Consumers,” *Sustainability*, vol. 16, no. 7, pp. 16–9, 2024, doi: 10.3390/su16072776.
- [12] R. T. Marler and J. S. Arora, “Survey of multi-objective optimization methods for engineering,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 26, no. 6, pp. 369–95, 2004, doi: 10.1007/s00158-003-0360-7.
- [13] A. N. Chiguano Velasco, J. N. Castillo Fiallos, C. I. Quinatoa Caiza, and E. F. Guanochanga Collaguazo, “Optimización de la compensación reactiva en sistemas eléctricos utilizando el método CRITIC,” *Ciencia Digital*, vol. 7, no. 2, pp. 64–81, 2023.
- [14] X. Tang, D. Zhang, and H. Chai, “Synthetical Optimal Design for Passive-Damped LCL Filters in Islanded AC Microgrid,” *Journal of Energy and Power Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 1–21, 2021, doi: 10.21926/jept.2103031.
- [15] D. Monga, “Determinación de los Indicadores de Calidad de la Energía para el Caso de un Usuario Conectado en Media Tensión,” *Revista Técnica “Energía”*, vol. 20, no. 1, pp. 9–15, 2023.
- [16] P. Remigio-Carmona, J. J. González-De-la-rosa, O. Florencias-Oliveros, J. M. Sierra-Fernández, J. Fernández-Morales, and M. J. Espinosa-Gavira, “Current Status and Future Trends of Power Quality Analysis,” *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2328, 2022, doi: 10.3390/en15072328.

- [17] IEEE Power & Energy Society, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” *IEEE Std 519-2014*, pp. 5–8, 2014.
- [18] International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and Measurement Techniques—Power Quality Measurement Methods,” *IEC Std 61000-4-30*, pp. 12–40, 2022.
- [19] E. F. Fuchs and M. A. S. Masoum, *Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives*. London: Academic Press, 2023, pp. 14–28.
- [20] M. S. Almutairi and S. Hadjiloucas, “Harmonics Mitigation Based on the Minimization of Non-Linearity Current in a Power System,” *Designs*, vol. 3, no. 2, pp. 29–35, 2019, doi: 10.3390/designs3020029.
- [21] M. Ayaz, S. M. H. Rizvi, and M. Akbar, “Dynamic Power Factor Correction in Industrial Systems: An Automated Capacitor Bank Control Approach,” in *2nd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Control, and Telecommunication Engineering (ETECTE)*, 2023, pp. 20–45.
- [22] H. Hu, Z. He, and S. Gao, “Passive filter design for China high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 505–14, 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2359005.
- [23] J. C. Das, “Passive Filters - Potentialities and Limitations,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 1, pp. 232–41, 2004, doi: 10.1109/TIA.2003.821666.
- [24] W. Guambo, B. P. Corrales, L. O. Freire, and M. D. Albarracin, “Performance Evaluation of a Predictive and PID Control Applied to a Didactic Flow Regulation Process,” *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 265, pp. 559–70, 2022
- [25] J. N. Castillo, V. F. Resabala, L. O. Freire, and B. P. Corrales, “Modeling and sensitivity analysis of the building energy consumption using the Monte Carlo method,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 518–24, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.11.178.
- [26] J. N. Castillo, G. G. Carrillo, L. O. Freire, and B. P. Corrales, “Energy modeling and simulation of a building to perform sensitivity analysis of energy

consumption,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 659–64, 2022, doi:
10.1016/j.egy.2022.11.185.