



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: ARTÍCULO CIENTÍFICO

Título:

Desarrollo de un algoritmo de compensación reactiva para diferentes cargas del sector petrolero.

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

Autor:

Ing. Andagua Guanoluisa Evelyn Pamela

Tutor:

Ing. Jessica Nataly Castillo Fiallos MSc.

LATACUNGA –ECUADOR

2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “**Desarrollo de un algoritmo de compensación reactiva para diferentes cargas del sector petrolero**” presentado por la Ing. Andagua Guanoluisa Evelyn Pamela, 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



Ing. Jessica Nataly Castillo Fiallos MSc.
CC. 0604590216

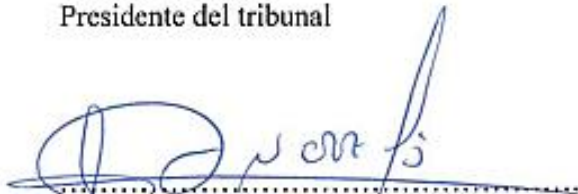
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Desarrollo de un algoritmo de compensación reactiva para diferentes cargas del sector petrolero”, 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



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



.....
MSc. Ing. Edwin Vinicio Cruz Loya
CC: 4710814920
Lector 2



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

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación con todo mi corazón a mi inolvidable padre, Humberto Andagua, quien hoy descansa junto al Creador, pero sigue siendo la guía que acompaña cada uno de mis logros. A mi madre, Marlene Guanoluisa y a mis hermanos Mishell, Belén y Carlos quienes han sido mi fuente constante de motivación e inspiración para superarme cada día. Y, de manera muy especial, a mi compañero de vida, Freddy Gutiérrez, por su amor, paciencia y por creer siempre en mí en este camino.

Evelyn Pamela Andagua Guanoluisa

AGRADECIMIENTO

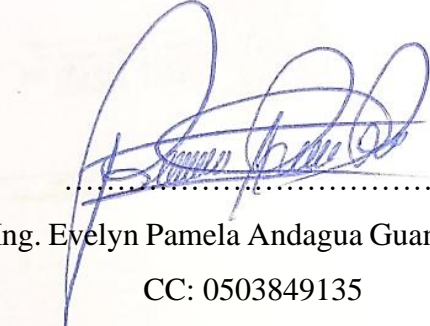
Agradezco a Dios por bendecirme con salud y vida, a mi madre Marlene Guanoluisa por su apoyo incondicional, y por ser el pilar de mi educación que hoy me ha permitido alcanzar este nuevo logro académico y personal., Finalmente, expreso mi gratitud a mi querida Alma Mater, la Universidad Técnica de Cotopaxi, por brindarme una formación académica de excelencia y las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional.

Evelyn Pamela Andagua Guanoluisa.

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



.....

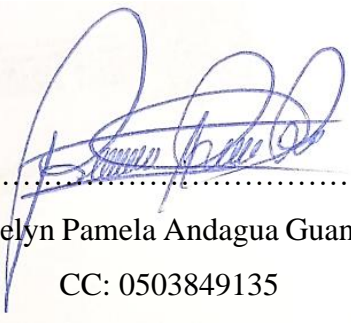
Ing. Evelyn Pamela Andagua Guanoluisa

CC: 0503849135

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

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Evelyn Pamela Andagua Guanoluisa', is written over a horizontal dotted line. The signature is fluid and cursive.

Ing. Evelyn Pamela Andagua Guanoluisa

CC: 0503849135

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Desarrollo de un algoritmo de compensación reactiva para diferentes cargas del sector petrolero, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.



Latacunga, junio 2026

.....
Ing. Walter Paul Rueda Flores, Mg.

CC: 0503689895

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Desarrollo de un algoritmo de compensación reactiva para diferentes cargas del sector petrolero

Autor: Andagua Guanoluisa Evelyn Pamela, Ing.

Tutor: Ing. Jessica Nataly Castillo Fiallos, M.Sc.

RESUMEN

Esta investigación describe el desarrollo de un algoritmo para la compensación de energía reactiva en una planta industrial del sector petrolero, ubicada en la región amazónica del Ecuador. La importancia de un suministro eléctrico de calidad es fundamental para el correcto funcionamiento de maquinaria y dispositivos industriales; Sin embargo, la incidencia de diversos factores como desequilibrios de voltaje, distorsiones armónicas y un bajo factor de potencia afectan negativamente la productividad y la eficiencia, contribuyendo directamente al aumento de los costos operativos. Para determinar la incidencia de estas condiciones, se realizó un análisis continuo del monitoreo eléctrico mediante un analizador trifásico Fluke 438-II durante un período de más de tres días, el cual arrojó parámetros claves como corriente, voltaje, potencia activa y reactiva, factor de potencia y distorsión armónica total, siguiendo los criterios técnicos de las normas internacionales IEEE 519 e ISO 50001. El análisis de los datos reveló deficiencias y desequilibrios en el bajo factor de potencia, afectando la calidad del sistema. eficiencia energética. En respuesta a este problema, se desarrolló un algoritmo en Python con una interfaz gráfica en PyQt5 para analizar, comprender y visualizar estos parámetros eléctricos, facilitando así la corrección y evaluación basada en el diseño e implementación de bancos de capacitores y otras medidas de compensación de potencia reactiva. El diseño modular del software facilitará su mantenimiento y actualización. La aplicación de este algoritmo optimizará el consumo de energía, asegurará el cumplimiento de estándares de calidad y mejorará la calidad del suministro eléctrico, promoviendo una operación eficiente, efectiva y segura en las instalaciones industriales del sector petrolero.

PALABRAS CLAVE: Magnitudes eléctricas, analizador de redes, costos de operación.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCION SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Title: Development of a Reactive Power Compensation Algorithm for Different Loads in the Oil Sector

Author: Andagua Guanoluisa Evelyn Pamela, Ing.

Tutor: Ing. Jessica Nataly Castillo Fiallos, M.Sc.

ABSTRACT

Abstract. This research describes the development of an algorithm for reactive power compensation at an industrial plant in the oil sector, located in Ecuador's Amazon region. The importance of a quality electricity supply is fundamental for the proper operation of industrial machinery and devices; however, the incidence of various factors such as voltage imbalances, harmonic distortions, and a low power factor negatively affect productivity and efficiency, directly contributing to increased operational costs. To determine the incidence of these conditions, a continuous analysis of the electrical monitoring was performed using a Fluke 438-II three-phase analyzer over a period of more than three days, which yielded key parameters such as current, voltage, active and reactive power, power factor, and total harmonic distortion, following the technical criteria of the international standards IEEE 519 and ISO 50001. The analysis of the data revealed deficiencies and imbalances in the low power factor, affecting the system's energy efficiency. In response to this issue, an algorithm was developed in Python with a graphical interface in PyQt5 to analyze, understand, and visualize these electrical parameters, thereby facilitating correction and evaluation based on the design and implementation of capacitor banks and other reactive power compensation measures. The modular design of the software will facilitate its maintenance and updating. The application of this algorithm will optimize energy consumption, ensure compliance with quality standards, and improve the quality of the electrical supply, promoting efficient, effective, and safe operation in the industrial facilities of the oil sector.

Keywords: Electrical quantities, network analyzer, operating costs.

AVAL DE TRADUCCIÓN

Nelson Wilfrido Guagchinga Chicaiza con cédula de identidad número: 0503246415, magister en la Enseñanza del idioma inglés como lengua extranjera, con número de registro de la SENESCYT: 1010-2019-2041252; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE COMPENSACIÓN REACTIVA PARA DIFERENTES CARGAS DEL SECTOR PETROLERO” de: Andagua Guanoluisa Evelyn Pamela, aspirante a Magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, junio 2026.



Atentamente,

Mg. Nelson Wilfrido Guagchinga Chicaiza

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	1
3. MATERIALES Y MÉTODOS	3
3.1 Analizador de redes y sus especificaciones técnicas	4
3.2 Variables medidas	4
3.3 Arquitectura de Código.	4
3.4 Análisis de corriente trifásica.	4
3.5 Marco matemático y estadístico para el análisis del desequilibrio de corriente trifásica.	5
3.6 Evaluador de Factor de potencia	5
3.7 Análisis de la calidad de la energía eléctrica	6
3.8 Modelo matemático para el análisis de calidad de energía	6
3.9 Análisis de potencia activa y reactiva	6
3.10 Modelo matemático.	7
3.11. Diagrama de flujo del sistema de análisis de distorsión armónica	7
3.12. Principales Contribuciones	8
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	8
4.1. Análisis de corriente trifásica	8
4.2. Variabilidad de ambas	9
4.3. Corrección del factor de Potencia	9
4.4. Análisis de Calidad de energía	10
4.5. Variabilidad de ambas	10
4.6. Comparación con enfoques existentes	11
4.7. Discusión	11
4.7. Limitaciones y trabajo futuro	11

5. CONCLUSIONES	11
6. REFERENCIAS	12

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Metodología de programación	5
FIGURA 2. Análisis de corriente	9
FIGURA 3. Potencia Reactiva y aparente	9
FIGURA 4. Corrección de factor de potencia.....	10

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de las cargas para el análisis eléctrico.....	16
--	----

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:	Desarrollo de un algoritmo de compensación reactiva para diferentes cargas del sector petrolero
Línea de investigación:	Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.
Proyecto de investigación asociado:	Desarrollar estrategias de planificación para sistemas eléctricos de distribución, alineadas con las políticas globales de transición energética, con el fin de mejorar la eficiencia, sostenibilidad y resiliencia del suministro eléctrico en Ecuador.
Grupo de Investigación:	Sistemas Eléctricos de Potencia
Red nacional o internacional:	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la región amazónica del Ecuador se ha desarrollado infraestructura industrial dedicada a la fabricación de equipos y estructuras metálicas para los sectores petrolero, energético e industrial en general. Principalmente produciendo artículos como sistemas de procesamiento de fluidos, tanques de alta presión y estructuras industriales, todos los cuales cumplen estrictamente con las normas técnicas ASME [1]. La planta requiere un suministro eléctrico confiable y de alta calidad, ya que la presencia de cualquier variación puede afectar directamente el rendimiento y la productividad del equipo [1][2].

Esta investigación se basó en el análisis de las variaciones en la calidad de la energía, como fluctuaciones de voltaje y distorsiones armónicas, que afectan directamente los procesos productivos de la planta. Estas perturbaciones pueden provocar problemas como daños en los equipos, fallos eléctricos, aumento de los costes de mantenimiento y deterioro de la calidad del producto. Además, se

identificaron factores específicos que afectan la calidad del suministro eléctrico en entornos industriales y sus repercusiones en la eficiencia operativa [3][4].

Dado el contexto actual enmarcado por la sostenibilidad, el consumo de energía en los sistemas eléctricos se ha convertido en una prioridad para las industrias modernas. Cabe destacar que este diagnóstico incluye un análisis exhaustivo de las instalaciones eléctricas [5]. Se analizan parámetros como factor de potencia, distorsiones armónicas y desequilibrios de tensión de fase, con el objetivo de proponer soluciones para mejorar la calidad, reducir pérdidas y maximizar el rendimiento operativo [6].

Además, los datos eléctricos se recopilaron utilizando un analizador de red trifásico de precisión, configurado en topología en estrella, que registró parámetros eléctricos en intervalos de un minuto durante más de siete días [7]. Con base en los datos se identificaron deficiencias en bajo factor de potencia, distorsión armónica total, desequilibrio de voltaje y sobretensiones transitorias, las cuales fueron evaluadas según criterios internacionales como IEEE 519 e ISO 50001. Se consideró pertinente validar parámetros como balanceo de carga, caída de voltaje en conductores y capacidad de transformación, asegurando así la calidad y continuidad del suministro eléctrico.

Entre los métodos empleados, se examina el factor de potencia para determinar la necesidad de implementar bancos de capacitores que corrijan valores bajos, minimizando así costos adicionales y pérdidas de energía [8]. Además, las pérdidas por desequilibrio, como consecuencia de variaciones de tensión entre fases, se analizan mediante índices específicos que determinan áreas críticas en la distribución de carga [9]. Estas mediciones apoyan el análisis del consumo de energía basado en datos de tiempo, corriente y voltaje, permitiendo la detección de patrones anormales y la formulación de soluciones personalizadas [10].

Cabe señalar que este estudio propone medidas concretas para optimizar el desempeño energético de las instalaciones industriales, como la corrección del factor de potencia mediante la implementación de bancos de capacitores [11][12], mejoras en los niveles de voltaje y prácticas responsables de consumo energético [13]. Estas alternativas no solo reducirán los costos operativos y el impacto

ambiental al mismo tiempo que mejorarán la calidad, sino que también alinearán las operaciones con estándares internacionales como ISO 50001 [14][15].

Este trabajo utiliza un nuevo software para el análisis de sistemas trifásicos en las diferentes fases. Muestra si alguna fase tiene un desequilibrio y qué lo causa.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Cuenta con una infraestructura de distribución eléctrica diseñada para abastecer diversos procesos productivos con cargas industriales de media y baja tensión. La fuente de alimentación principal incluye dos transformadores: uno de 600 kVA con conexión DyN5, que suministra 13200 V/440–250 V, y otro de 100 kVA con salidas de 440 V/220 V/127 V. La red de distribución utiliza conductores THHN, dimensionados para soportar corrientes de operación de diferentes longitudes.

Tabla 1. Datos de las cargas para el análisis eléctrico

	Carga	Potencia (hp)	Voltaje (V)	Distancia (m)	Calibre	Conductor
Transformador 1	Puente grúa	60	440	150	3*1 #1/0	AWG-THHN
	Compresor	50	440	100	3*1 #1/0	AWG-THHN
	Cortadora CNC	67	440	170	3*1 #1/0	AWG-THHN
	Dobladora	10	440	170	3*1 #12	AWG-THHN
	Extractor	3	440	150	3*1 #12	AWG-THHN
	Suelda	23	440	50	3*1#8	AWG-THHN
	Suelda	23	440	20	3*1#8	AWG-THHN
	Suelda	23	440	30	3*1#8	AWG-THHN
	Transformador 2	Fresadora	3	220	10	2*1#12
Roscadora		2	220	50	2*1#12	AWG-THHN
Fresadora		5	220	50	2*1#12	AWG-THHN
Suelda		16	220	70	2*1#8	AWG-THHN

	Herramientas Eléctricas	21	120	15	2*1#12	AWG-THHN
	Iluminación	16	120	15	2*1#12	AWG-THHN

3.1 Analizador de redes y sus especificaciones técnicas

Este dispositivo registra variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia, distorsión armónica total (THD) y armónicos individuales hasta el orden 50. Su frecuencia de muestreo programable y su memoria interna permitieron la recopilación de datos a intervalos de 1 minuto durante más de 3 días. Período y frecuencia de medición.

3.2 Variables medidas

Las principales variables medidas incluyeron voltajes, corrientes de línea y potencia activa, reactiva y aparente. También se registraron los valores de potencia fundamental según IEEE 1459-2010, junto con los factores de potencia, la distorsión armónica total (THD) para voltaje y corriente por fase y el índice de desequilibrio de potencia. La medición sistemática de estos parámetros proporcionó una base sólida para evaluar el comportamiento eléctrico y las desviaciones de estándares internacionales como IEEE 519-2014 e ISO 50001. Esto admite el diseño de un algoritmo de compensación de potencia reactiva ajustable a cargas variables perfiles.

3.3 Arquitectura de Código.

El código central se desarrolló en Python usando PyQt5 para crear un gráfico intuitivo interfaz que centraliza las funciones del algoritmo de compensación de potencia reactiva.

3.4 Análisis de corriente trifásica.

En esta sección se presenta una interfaz gráfica desarrollada en el software Python, donde se analizan corrientes trifásicas. Un paso importante consiste en cargar archivos en Excel formato que contiene la información, que luego se procesa y compila. Estos son corrientes RMS.

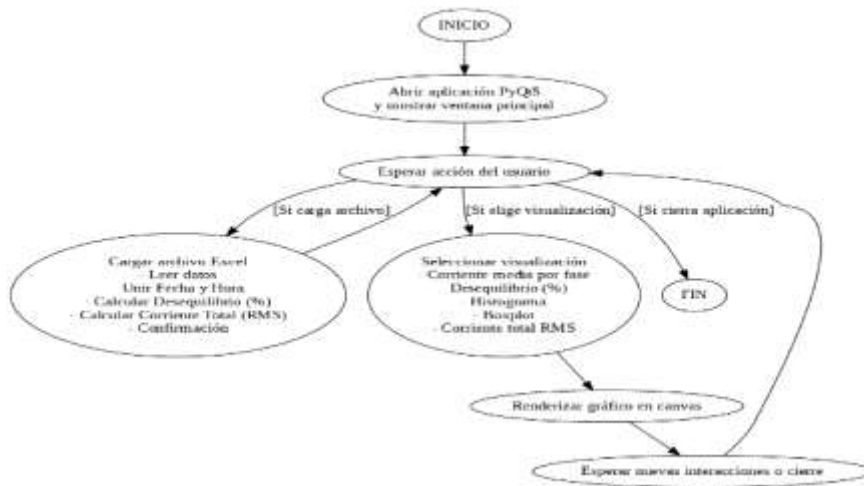


FIGURA 1. Metodología de programación

3.5 Marco matemático y estadístico para el análisis del desequilibrio de corriente trifásica.

Esta sección presenta las ecuaciones matemáticas, donde la Ecuación 1 describe la situación actual desequilibrio, y la Ecuación 2 calcula la métrica para identificar este desequilibrio [11].

Mientras que la Ecuación 3 sirve para identificar la carga trifásica total.

$$Desequilibrio = \frac{\mu_i}{\sigma_i} \times 100 \quad (1)$$

$$I_{total,i} = \sqrt{I_{A,i}^2 + I_{B,i}^2 + I_{C,i}^2} \quad (2)$$

$$I_{f,i} \text{ para } f \in \{A, B, C\} \quad (3)$$

3.6 Evaluador de Factor de potencia

La aplicación permite la carga dinámica de un archivo Excel que contiene información eléctrica. El usuario puede seleccionar un escenario (Max, Med o Min) y establecer un objetivo de PF. Después al validar los datos, el programa filtra las coincidencias dentro de un rango de tolerancia, calcula la duración total de estos períodos y muestra los resultados en un gráfico interactivo y un panel de texto.

$$Coincidencia_i = \begin{cases} 1 & \text{si } |FP_i - FP_{obj}| \leq \Delta \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

$$N_{coinc} = \sum_{i=1}^n Coincidencia_i \quad (5)$$

$$Duración = tmax - tmin \quad (6)$$

3.7 Análisis de la calidad de la energía eléctrica

El código desarrollado permite la determinación del desequilibrio de voltaje promedio, la identificación de tiempos fuera del rango regulatorio permitido de $\pm 8\%$ y la visualización gráfica de parámetros como voltaje entre fases, voltajes de fase promedio y voltaje neutro a tierra. Esta herramienta está diseñada para técnicos e ingenieros eléctricos y ofrece una experiencia interactiva e intuitiva para monitorear y evaluar el comportamiento eléctrico utilizando registros históricos.

3.8 Modelo matemático para el análisis de calidad de energía.

Estas métricas se calculan utilizando las siguientes expresiones matemáticas, en la ecuación (7). Se calcula la desviación porcentual de la tensión respecto del valor nominal $V_{nom}=254V$, para cada fase $f \in \{A,B,C\}$ y cada métrica $m \in \{Max, Med, Min\}$. usando la ecuación (8). Cabe señalar que el número total de horas de incumplimiento está determinado por la cantidad de registros que cumplen con esta condición. Además, la tensión neutro a tierra (N-G) se determina mediante la ecuación (9).

$$\Delta V_{f,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_{f,m,i} - V_{nom}}{V_{nom}} \right| \times 100 \quad (7)$$

$$V_{f,Med}(t) > 1.08 \cdot V_{nom} \circ V_{f,Med}(t) < 0.92 \cdot V_{nom} \quad (8)$$

$$VNG(t) \leq 3V \quad (9)$$

3.9 Análisis de potencia activa y reactiva.

Para analizar el comportamiento eléctrico de instalaciones industriales del sector petrolero se desarrolló una herramienta computacional basada en Python para evaluar la calidad de la energía.

3.10 Modelo matemático.

La ecuación (10) ayuda en el cálculo de la energía eléctrica, mientras que la ecuación (11) se utiliza para calcular el desequilibrio de potencia. Por otro lado, la Ecuación (12) determina el cumplimiento del estándar de desequilibrio, el cual se fija en 2%. Las ecuaciones (13) y (14) se utilizan para calcular el factor de potencia. Por otro lado, el Qc se calcula mediante la fórmula (15).

$$E = \frac{P * \Delta t}{1000} \quad (10)$$

$$\text{Desbalance \%} = \left(\frac{\sigma_{P_{\text{fase}}}}{\mu_{P_{\text{fase}}}} \right) \times 100$$

$$\text{Cumple Norma} \Leftrightarrow \text{Desbalance \%} \leq 2\% \quad (11)$$

$$\Delta P_{\text{máx}} = \max(P_{AN}, P_{BN}, P_{CN}) - \min(P_{AN}, P_{BN}, P_{CN}) \quad (12)$$

$$FC = \frac{P_{\text{med}}}{P_{\text{max}}} \quad (13)$$

$$\text{Horas fuera} = \sum_{i=1}^n [FP_i < FP_{\text{objetivo}}]$$

$$\text{Porcentaje fuera} = \frac{\text{Horas fuera}}{n} \times 100 \quad (14)$$

$$Q_c = P \cdot (\tan(\phi_{\text{actual}}) - \tan(\phi_{\text{objetivo}}))$$

$$\phi = \arccos(FP) \quad (15)$$

$$Q_c = \max(P \cdot (\tan(\phi_{\text{actual}}) - \tan(\phi_{\text{objetivo}})), 0) \quad (16)$$

3.11. Diagrama de flujo del sistema de análisis de distorsión armónica.

Esta investigación se basó en el estándar IEEE 519-2014. Para caracterizar la compensación se presentan las fórmulas (17) a (21).

$$\text{THD}_{\text{total}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (17)$$

$$\text{Desbalance}(\%) = \frac{\sigma(P_{\text{fase}})}{\mu(P_{\text{fase}})} \times 100 \quad (18)$$

$$E_{\text{activa}} = \sum \left(\frac{P_{\text{medido}} \cdot \Delta t}{1000} \right) [\text{kWh}] \quad (19)$$

$$E_{\text{reactiva}} = \sum \left(\frac{Q_{\text{medido}} \cdot \Delta t}{1000} \right) [\text{kVARh}] \quad (20)$$

$$\% \text{Mejora FP} = \left(\frac{\text{FP}_{\text{final}} - \text{FP}_{\text{inicial}}}{\text{FP}_{\text{inicial}}} \right) \times 100 \quad (21)$$

3.12. Principales Contribuciones

Las principales contribuciones de este trabajo de investigación son: Desarrollo de un algoritmo modular de compensación de potencia reactiva: Un algoritmo basado en Python con interfaz gráfica PyQt5 diseñado específicamente para instalaciones industriales del sector petrolero, que permite el análisis y la visualización en tiempo real de parámetros eléctricos. Marco integral de diagnóstico de la calidad de la energía: Integración de múltiples análisis (desequilibrio de corriente, factor de potencia, distorsión armónica, calidad de voltaje).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de corriente trifásica

El siguiente gráfico muestra el análisis de corriente trifásica, donde se observa el comportamiento de las corrientes en las fases A, B y C. La corriente se muestra en función del tiempo. Se observan fluctuaciones (variaciones) que pueden indicar desequilibrios entre las fases. Esta herramienta ha demostrado ser útil para evaluar el estado de los sistemas eléctricos.

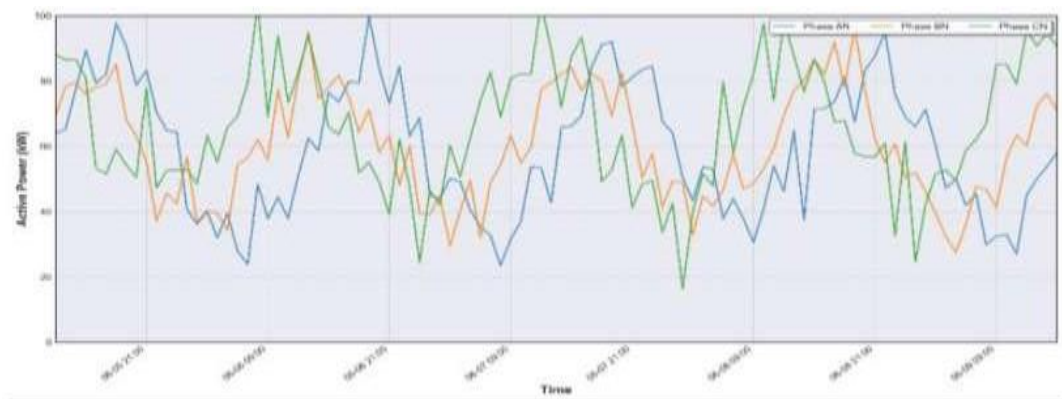


FIGURA 2. Análisis de corriente

4.2. Variabilidad de ambas

En un lapso de 4 minutos, se observan fluctuaciones en ambos parámetros, atribuidas a variaciones de carga. La variación entre la potencia aparente y la potencia reactiva sugiere la posibilidad de desequilibrios en la red eléctrica.



FIGURA 3. Potencia Reactiva y aparente

4.3. Corrección del factor de Potencia

En el análisis del factor de potencia para cada fase, bajo condiciones de baja demanda, se observa que el sistema se mantiene dentro del rango objetivo de $0,9 \pm$

0,01. Las fases A y C se encuentran mejor posicionadas dentro de este rango. Por otro lado, la fase B no cumple con este criterio, lo que indica un desequilibrio. Con respecto al umbral de 0,92, se observa un cumplimiento limitado.

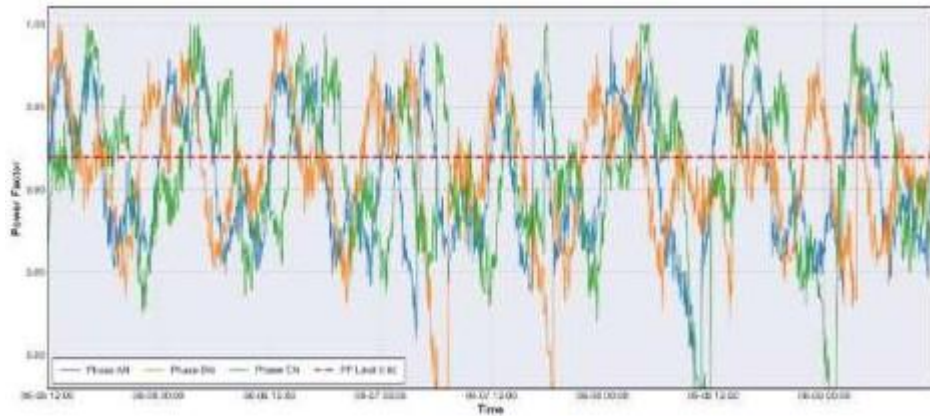


FIGURA 4. Corrección de factor de potencia

4.4. Análisis de Calidad de energía

El análisis de la calidad de la energía se centró en el comportamiento de los voltajes promedio de fase (A, B y C) durante varios días, del 6 al 9 de junio. Además, se observó que no se registraron horas con voltajes fuera del 8 % del valor nominal, lo que demuestra un buen desempeño en la regulación de voltaje. Las desviaciones máximas y mínimas de fase fueron inferiores al 3,6 %, lo que confirma la buena calidad de la energía.

4.5. Variabilidad de ambas

Se desarrolló con éxito un algoritmo modular en Python con interfaz gráfica en PyQt5 para el análisis y la compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos industriales. El monitoreo continuo con el analizador Fluke 438-II permitió identificar problemas relevantes como bajo factor de potencia, desequilibrios de voltaje y distorsiones armónicas, que afectan la eficiencia energética y la estabilidad del suministro en la refinería de petróleo. El sistema evaluado y las soluciones propuestas cumplen con los estándares internacionales, garantizando la calidad.

4.6. Comparación con enfoques existentes

A diferencia de los enfoques de algoritmos genéticos de (4) y los sistemas inteligentes D-STATCOM de (7), esta solución basada en Python ofrece un procesamiento en tiempo real superior, una interfaz PyQt5 intuitiva, menores costos de implementación y un mantenimiento más sencillo gracias a su estructura modular.

4.7. Discusión

La correcta implementación del banco de capacitores se logró gracias a las especificaciones requeridas por el software. Esto evita el sobredimensionamiento durante la implementación, asegurando así una compensación efectiva de la potencia reactiva.

4.7. Limitaciones y trabajo futuro

Como sugerencia para el trabajo futuro, se propone integrar un sistema SCADA en tiempo real para permitir la monitorización continua, junto con la incorporación de métodos de aprendizaje automático para la predicción y la detección de anomalías. Además, se puede integrar el IoT en el desarrollo de módulos para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

5. CONCLUSIONES

Además, la incorporación de técnicas de aprendizaje automático para el análisis predictivo de las alteraciones en la calidad de la energía constituye una forma de mejorar la adaptabilidad del sistema y la eficiencia en la gestión energética de las redes eléctricas industriales.

6. REFERENCIAS

- [1] J. Castillo, C. Eugenio, V. Medina y L. O. Freire, “Análisis estadístico del rendimiento académico de estudiantes que aspiran a ingresar a la universidad,” *Smart Innovation Systems and Technologies*, vol. 114, SIST, pp. 331–342, 2025.
- [2] Cañar PS, Cañar PS, Aguirre PU, Jaramillo FV. Discriminación y desigualdad salarial: explorando las brechas de género en Ecuador. *UPSE Scientific and Technological Journal* [Internet]. 21 de junio de 2021 [citado el 11 de enero de 2026];8(1):48–55. Disponible en: upse.edu.ec
- [3] Patra J, Pal N, Mohanta HC, Akwafo R, Mohamed HG. Un nuevo enfoque para el análisis estocástico de datos de huecos de tensión: estudio, representación y detección de la región de vulnerabilidad. *Sustainability* 2023, Vol 15, Página 4345 [Internet]. 28 de febrero de 2023 [citado el 11 de enero de 2026];15(5):5–20. Disponible en: mdpi.com.
- [4] Das D. Compensación de potencia reactiva para redes de distribución radial utilizando algoritmo genético. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* [Internet]. 1 de octubre de 2002 [citado el 11 de enero de 2026];24(7):573–81. Disponible en: sciencedirect.com.
- [5] Stanelyte D, Radziukynas V. Revisión de algoritmos de control de voltaje y potencia reactiva en redes de distribución eléctrica. *Energies (Basel)* [Internet]. 20 de diciembre de 2019 [citado el 11 de enero de 2026];13(1):58. Disponible en: mdpi.com.
- [6] Guzman, D., Brito, G., Naranjo, J.E., Garcia, C.A., Saltos, L.F.: Entorno de asistencia virtual para personas sordas basado en un guantelete electrónico. En: *Memorias de la 3.ª Reunión de Capítulos Técnicos de IEEE Ecuador (ETCM 2018)*, Ambato, Ecuador, pp. 1–6 (2018). doi.org.
- [7] Ioana G, Cazacu E, Stanculescu M, Puscasu S. Corrección del factor de potencia y mitigación de armónicos para una carga no lineal industrial pesada. *13.º Simposio Internacional sobre Temas Avanzados en Ingeniería Eléctrica, ATEE 2023*. 2023.
- [8] E. Segovia, L. O. Freire, C. Quinatoa y J. N. Castillo, “Reconfiguración óptima de redes de distribución de energía eléctrica,” *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 982, pp. 112–124, 2024.

- [9] Garcia, C.A., Naranjo, J.E., Alvarez-M., E., Garcia, M.V.: Entorno de formación virtual para la enseñanza de simulación y control de sistemas neumáticos. En: *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, vol. 11526, pp. 99–111. Springer, Cham (2019). doi.org
- [10] Geovanny I, Segovia R, Xavier J, Iza T, Iván C, Caiza Q, et al. Sistema de gestión de la energía en cumplimiento con la norma ISO 50001:2018, evaluación de la eficiencia energética en una industria textil. *Edwards Deming Technology Journal Science and Education* [Internet]. 28 de enero de 2023 [citado el 11 de enero de 2026];7(1). Disponible en: revista-edwardsdeming.com
- [11] J. N. Castillo, G. G. Carrillo, L. O. Freire y J. Culqui, “Técnicas de gestión y modelado de datos de fusión en la compensación de la calidad de la energía utilizando SAPF,” *Fusion Practice and Applications*, vol. 16, no. 2, pp. 8–21, 2024.
- [12] L. Gyugyi y E. C. Strycula, “Filtros activos de potencia de CA,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 529–535, sep. 1976.
- [13] H. Akagi, “Nuevas tendencias en filtros activos para el acondicionamiento de potencia,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322, nov./dic. 1996.
- [14] M. H. J. Bollen, “Comprendiendo los problemas de calidad de la energía: Huecos de tensión e interrupciones,” *IEEE Press*, Nueva York, NY, EE. UU., 2000, pp. 241–268.
- [15] A. E. Emanuel, “Armónicos en sistemas de potencia industrial,” *IEEE Transactions*.