Implementación de control inteligente para la mejora del factor de potencia y calidad de la energía.

Implementation of intelligent control for power factor and power quality improvement.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos* (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx.

José Ángel Zepeda Hernández (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
jose.zh@tuxtla.tecnm.mx.

Osbaldo Ysaacc García Ramos (3), Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
osbaldo.gr@tuxtla.tecnm.mx.

Alexis de Jesús Flores García (4). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
alexis.fg@tuxtla.tecnm.mx.

Karlos Velázquez Moreno (5). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
karlos.vm@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 26, 2025; aceptado en diciembre 19, 2025.

Resumen.

En el proyecto se aborda el diseño de un sistema de control inteligente y análisis de calidad de energía para compensación del factor de potencia, basado en un banco de capacitores, utilizando un controlador lógico programable (PLC) y un sistema de monitoreo inteligente (PAC). Además, se utiliza un sistema HMI (Interfaz Máquina Hombre) para el monitoreo de variables de operación del banco de capacitores y variables eléctricas de la instalación general. Las variables monitoreadas incluyen potencia real (KW), potencia activa (KVA), potencia reactiva (KVAR), factor de potencia (FP), voltaje línea a neutro (V), voltaje línea a línea (V), frecuencia (Hz), y corriente en cada fase (I). Estos datos sirven como herramienta para mejorar la eficiencia energética, la reducción de costos, el cumplimiento de normativas y la gestión efectiva del consumo de energía eléctrica. Este proyecto tiene la ventaja de la comunicación en tiempo real basada en el protocolo Industrial Ethernet (Profinet) para el monitoreo y control del proceso..

Palabras claves: Banco de capacitores, calidad de la energía, control inteligente, factor de potencia, protocolo industrial ethernet.

Abstract.

This project addresses the design of an intelligent control system and energy quality analysis for power factor compensation, based on a capacitor bank, using a programmable logic controller (PLC) and an intelligent monitoring system (PAC). Furthermore, an HMI (Human-Machine Interface) system is used for monitoring the capacitor bank's operating variables and general electrical installation variables, such as real power (KW), apparent power (KVA),

reactive power (KVAR), power factor (PF), line-to-neutral voltage (V), line-to-line voltage (V), frequency (Hz), and current in each phase (I). These data will serve as a tool to improve energy efficiency, reduce costs, ensure compliance with regulations, and effectively manage electricity consumption in various applications. This project benefits from real-time communication based on the Industrial Ethernet (Profinet) protocol for process monitoring and control.

Keywords: Capacitor bank, industrial ethernet protocol, intelligent control, power factor, power quality.

1. Introducción.

La globalización y las políticas públicas relacionadas con líneas prioritarias han generado una competitividad a nivel mundial, especialmente en la industria, buscando la independencia energética para el uso eficiente de la energía y alcanzar el estándar de calidad en los procesos de suministro eléctrico para operar equipos de manera eficiente y sin daño. Muchos equipos de alta tecnología son sensibles a los cambios en los parámetros de suministro, por lo que es crucial supervisar estos parámetros para atender inmediatamente cualquier variación que pueda causar fallas en el funcionamiento de los equipos industriales.

Actualmente, muchas empresas industriales enfrentan problemas eléctricos y de funcionamiento de máquinas, a menudo debido al bajo factor de potencia causado por cargas inductivas como motores, transformadores y generadores (Montoya-Londoño et al., 2018).

Un bajo factor de potencia expone a las compañías a inconvenientes como pérdidas en las líneas de distribución, sobrecarga en transformadores, y un incremento en la caída de voltaje, lo que resulta en un suministro inadecuado a las cargas, además de implicar multas por parte de la compañía suministradora de energía eléctrica (Saucedo Martínez et al., 2008).

Elevar el FP reduce las pérdidas de energía en las redes de distribución, contribuyendo a la disminución de emisiones de CO2. La Comisión Reguladora de Energía penaliza a las empresas con un FP por debajo de 0.9, por lo que su corrección ofrece beneficios económicos y medioambientales (AMERIC., s.f.).

Este proyecto propone el desarrollo e integración de los subsistemas necesarios para un Sistema de Control Inteligente y Analizador de la Calidad de Energía para la compensación del Factor de Potencia, utilizando un banco de capacitores automático, un Controlador Lógico Programable (PLC) y un Sistema de Monitoreo Inteligente (PAC), complementado con un HMI para el análisis del sistema, con el objetivo de lograr la eficiencia energética. El proyecto también forma parte de una iniciativa para construir prototipos didácticos para la formación de recursos humanos de alta calidad y el auto-equipamiento de laboratorios especializados, en este caso en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

2. Métodos.

El diseño y construcción de este banco de pruebas se realizó mediante las siguientes fases de desarrollo:

Revisión bibliográfica y análisis de requerimientos:

Se analizó la teoría sobre calidad de energía, factor de potencia, compensación con bancos de capacitores, normativas eléctricas y estándares de la industria. También se identificaron herramientas como PLC y PAC.

Diseño del sistema:

Se desarrollaron el esquema eléctrico y los diagramas de conexión, así como el diseño de la estructura física y el gabinete para entornos industriales.

Construcción del banco de capacitores automático:

Los capacitores se integraron con el PLC y sensores de medición para la adquisición de datos de tensión, corriente, factor de potencia y armónicos.

Desarrollo de sistema de monitoreo y control:

Se creó un sistema de adquisición de datos en tiempo real mediante el PAC con una interfaz de usuario intuitiva para la visualización de parámetros eléctricos y el estado del sistema de compensación.

Validación y pruebas del sistema:

Se realizaron pruebas experimentales para evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones operativas, analizando los datos para verificar la efectividad del banco de capacitores.

3. Desarrollo.

Para la construcción del prototipo, se utilizaron componentes industriales para asegurar robustez y confiabilidad. Los componentes clave incluyen el Siemens SENTRON PAC 3220, contactores trifásicos, interruptores termomagnéticos, clemas, TC tipo Donut, condensadores, switch ethernet, botoneras y selector.

Diagrama de potencia y control.

El diseño del sistema se realizó con el software ePLAN v2022. La capacidad de los capacitores se calculó para compensar 25 KVAR inductivos en el sistema, dividida en 5 pasos, resultando en un valor de referencia de 79.8 uF (4.6 kVA/240V). La Figura 1 muestra la etapa de potencia junto con el SENTRON PAC 3220.

El diagrama que muestra el controlador Siemens S7-1200 con los elementos de potencia se presenta en la Figura 1.

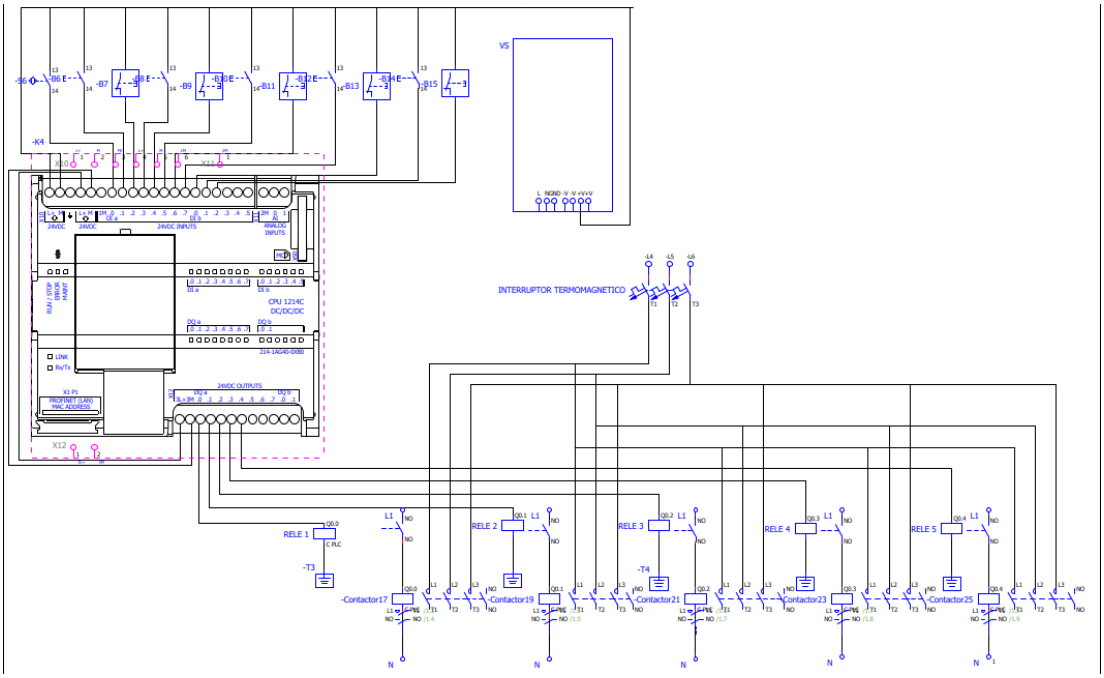

Figura 1. Diagrama de control del sistema automático de corrección de f.p. (autoría propia).

Dimensionamiento del banco de capacitores (3φ en Δ).

Datos del sistema a compensar:

- Potencia reactiva: Q_{tot} = 25 kVAr (inductiva).
- Número de pasos: N = 5 ⇒ $Q_{paso} = \frac{Q_{tot}}{N}$ = 2 kVAr.
- Sistema trifásico, conexión de capacitores en Δ.
- Tensión línea–línea: V_{LL} = 240 V.
- Frecuencia: f = 60 Hz.
- ω = 2πf = 2π(60) = 376.99 rad/s.

Relación Q–C para banco 3φ en Δ.

En una conexión Δ, cada capacitor está sometido a V_{LL} y la potencia reactiva total es:

$$Q_{3\varphi,\Delta} = 3\,\omega\,C_{\varphi}{V_{LL}}^{2}$$ -------- Ecuación 1.

donde C_{φ} es la capacitancia de cada capacitor (cada rama del triángulo).

Despejando: $$C_{\varphi} = \frac{Q_{3\varphi,\Delta}}{3\,\omega\,C_{\varphi}{V_{LL}}^{2}}$$ -------- Ecuación 2.

Cálculo de capacitancia por paso.

Primero, la potencia por paso:

$$Q_{paso} = \frac{Q_{tot}}{N} = \frac{25\ kVAr}{5} = 5\ kVAr$$ -------- Ecuación 3.

Aplicando (2):

$$C_{\varphi} = \frac{5000}{[3(376.99)(240^2)]} = \frac{5000}{[3(376.99)(57600)]} = 7.67532 \times 10^{-5} F = 76.75\ \mu F$$ -------- Ecuación 4.

Resultado (por paso, Δ):

Cada paso de 5 kVAr requiere 3 capacitores de C ≈ 76.7 µF (uno por rama de Δ).

Capacitancia equivalente total (todos los pasos conectados).

Como los pasos se conectan en paralelo (por fase) al ir entrando:

$$Q_{\varphi,total} = NQ_{\varphi,paso} = 5(76.70) = 383.5\ \mu F$$-------- Ecuación 5.

Reactivo y corriente por capacitor (rama de Δ).

Cada paso aporta Q_{paso}= 5000 VAr; por simetría, por rama:

$$Q_{rama} = \frac{Q_{paso}}{3} = \frac{5000}{3} = 1666.7\ VAr$$-------- Ecuación 6.

La corriente RMS en cada capacitor (rama) es:

$$I_{rama} = \frac{Q_{rama}}{V_{LL}} = \frac{1666.7}{240} = 6.94\ A$$ -------- Ecuación 7.

La reactancia capacitiva por rama:

$$X_C = \frac{1}{(\omega\ Q_{\varphi,paso})} = \frac{1}{[(376.99)(76.70 \times 10^{-6})]} = 34.58\ \Omega$$-------- Ecuación 8.

Corriente de línea por paso y total.

Para un sistema trifásico balanceado, la potencia reactiva se relaciona como:

$$Q = \sqrt{3} V_{LL} I_L \quad (para\ carga\ puramente\ reactiva,\ \ sin\varphi = 1)$$ -------- Ecuación 9.

Luego:

$$I_{L,paso} = \frac{Q_{paso}}{\sqrt{3}\, V_{LL}} = \frac{5000}{\sqrt{3}(240)} = 12.02\ A$$ -------- Ecuación 10.

Con todos los pasos conectados:

$$I_{L,tot} = \frac{Q_{tot}}{\sqrt{3}\, V_{LL}} = \frac{25000}{\sqrt{3}(240)} = 60.1\ A$$-------- Ecuación 11.

Tabla 1. Resumen numérico.

Q_{tot}	25 kVAr
N	5 pasos
Q_{paso}	5 kVAr
$C_{\varphi,paso}\Delta$	76.7 µF por rama (3 por paso)
$C_{\varphi,total}$	383.5 µF por rama (si entran los 5 pasos)
$I_{L,paso}$	12.02 A
$I_{L,tot}$	60.1 A
I_{rama} (por capacitor, paso)	6.94 A
X_C (por capacitor, paso)	34.58 Ω

Construcción del banco de capacitores automático e instalación del sistema de monitoreo.

El prototipo fue construido en un gabinete metálico IP65 de 500x500x250mm acondicionado para los capacitores y componentes eléctricos y de control. La Figura 2 muestra la distribución exterior del gabinete y la Figura 3 muestra el montaje de los capacitores, el sistema de control y las protecciones.

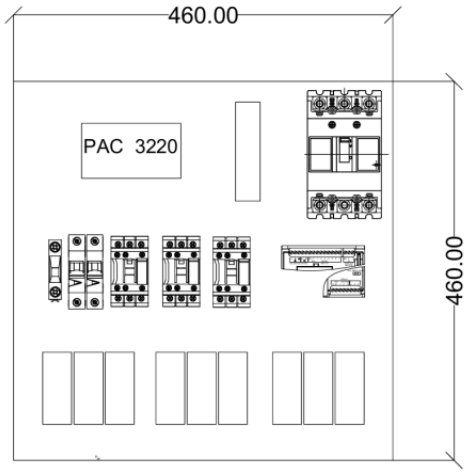

Figura 2. Distribución exterior del gabinete y dimensiones para el montaje de capacitores.

Figura 3. Instalación del banco de capacitores y cableado del sistema de control.

Resultados.

Se implementó un sistema de control con el PLC Siemens S7-1200 y el software TIA PORTAL V17, con modos de operación Manual y Automático. El sistema fue probado en el Beneficio Seco de café de la Finca Nuevo México para la corrección del factor de potencia debido a los motores instalados para el proceso de producción de café.

- La realizó una programación del sistema (manual/automático) en TIA PORTAL V17, cuya autoría está en proceso de registro en INDAUTOR.
- Se generó un modelo 3D del sistema de control en ePLAN 2022 (Figura 4) para posible patente o modelo de utilidad.
- En las pruebas in situ, se logró corregir el factor de potencia hasta 0.99, monitoreado con el SENTRON PAC 3220 (Figura 5).

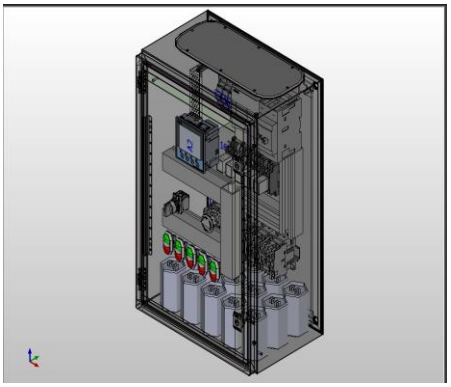

Figura 4. Instalación del banco de capacitores y cableado del sistema de control.

Figura 5. Mejora del f.p. hasta 0.99 en las pruebas in situ en el Beneficio Seco de café de la Finca Nuevo México.

Conclusiones.

Los resultados demuestran la fiabilidad de aplicar esta tecnología para la corrección del factor de potencia. El sistema tiene la capacidad de adaptarse a las necesidades de empresas o productores que utilizan equipos que afectan la calidad de la energía y el valor óptimo del FP.

La implementación de este sistema en granjas agrícolas podría ser de gran beneficio, permitiendo el escalamiento del prototipo para optimizar el uso de energía, disminuir costos de operación y generar valor agregado. Las pruebas en sitio confirmaron la corrección del factor de potencia hasta 0.99, lo que se espera resulte en una reducción del consumo de energía. Es fundamental que la implementación se personalice a las necesidades de cada cliente, con los cálculos adecuados para una compensación correcta.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto 23109.25-P de la convocatoria de apoyo a Proyectos de Desarrollo Tecnológico e Innovación 2025 y las facilidades del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez para la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas.

AMERIC. (s.f.). *El control del factor de potencia y sus adecuaciones para el cumplimiento del Código de Red*. Recuperado de https://socio.americ.org.mx/el-control-del-factor-de-potencia-y-sus-adecuaciones-para-el-cumplimiento-del-codigo-de-red

Montoya-Londoño, J. A. y J. M. Ramírez-Salazar (2018). *Análisis y Mejora del Factor de Potencia en Instalaciones Industriales*. Revista Energética, vol. 14, núm. 2, pp. 15-28.

Saucedo Martínez, D. y J.L. Texis Villagran (2008). *Factores que afectan la calidad de la energía y su impacto en el factor de potencia* (Tesis). Instituto Politécnico Nacional, 2008.

Información de los autores.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos, Maestro en Ciencias en Ing. Mecatrónica e Ingeniero en Electrónica en el ITTG. Cuenta con certificaciones CSWA, CSWP, CSWP Avanzado de SolidWorks. Es acreedor al premio de desempeño a la excelencia EGEL 2018 y miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas del Estado de Chiapas. Profesor con Perfil Deseable e integrante del Cuerpo Académico en formación "Sistemas de Control Inteligentes".

José Ángel Zepeda Hernández, Ingeniero Industrial Eléctrico, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Catedrático e investigador en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del ITTG. Profesor de tiempo completo con Perfil Deseable y Líder del Cuerpo Académico en formación "Sistemas de Control Inteligentes".

Osbaldo Ysaac García Ramos, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Docente con 13 años de experiencia y cursos de especialización en Mecatrónica en Alemania, Austria y México. Profesor de tiempo completo con Perfil Deseable e integrante del Cuerpo Académico en formación "Sistemas de Control Inteligentes".

Alexis de Jesús Flores García, Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG 2010); Maestro en Ciencias en Optomecatrónica por el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. (CIO 2014). Docente en el departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del (ITTG). Es profesor con perfil deseable PRODEP. Colaborador del cuerpo académico en formación “Sistemas de control inteligentes”.

Karlos Velázquez Moreno, Ingeniero Industrial Eléctrico de Profesión, Maestro en Ciencias en Administración, Catedrático y actualmente se desempeña como Jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, imparte asignaturas en el área de Ingeniería Eléctrica y también es Unidad de Verificación de Instalaciones Eléctricas.