



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

**“ANÁLISIS DE FALLAS EN EL BANCO DE CORRECCIÓN DE FACTOR
DE POTENCIA EN LA PLANTA DE PINTURA EN LA EMPRESA CIAUTO
CIA LTDA”**

**PROPUESTA DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DE TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMECÁNICO**

AUTORES:

Glenda Margoth Telenchana Quilligana

Stalin Israel Toapanta Andrango

TUTOR:

Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C.

LATACUNGA, AGOSTO 2026

Latacunga, agosto de 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **Telenchana Quilligana Glenda Margoth** y **Toapanta Andrango Stalin Israel** declaramos ser autores del proyecto de titulación "ANÁLISIS DE FALLAS EN EL BANCO DE CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA EN LA PLANTA DE PINTURA EN LA EMPRESA CIAUTO CIA LTDA.", siendo el Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C. tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.



Telenchana Quilligana Glenda Margoth
CC: 1805643903

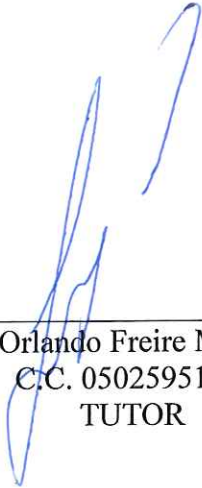


Toapanta Andrango Stalin Israel
CC: 0550624043

Latacunga, 12 de agosto de 2026

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“ANÁLISIS DE FALLAS EN EL BANCO DE CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA EN LA PLANTA DE PINTURA EN LA EMPRESA CIAUTO CIA LTDA.”**, propuesto por los estudiantes Telenchana Quilligana Glenda Margoth y Toapanta Andrango Stalin Israel de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C..
C.C. 050259517-6
TUTOR

Latacunga, agosto de 2026

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

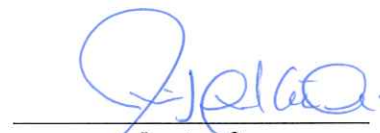
Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título **“ANÁLISIS DE FALLAS EN EL BANCO DE CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA EN LA PLANTA DE PINTURA EN LA EMPRESA CIAUTO CIA LTDA.”**, propuesto por los estudiantes **Telenchana Quilligana Glenda Margoth y Toapanta Andrango Stalin Israel** de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, me permito indicar que el o la estudiante ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, además de validar el funcionamiento de la propuesta tecnológica, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad presencial en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,



Lector 1 (presidente)
Ing. Jefferson Porras
CC: 0704400449



Lector 2
Ing. Luis Cruz
CC: 0502595176



Lector 3
Ing. Carlos Pacheco
CC: 0503072902

Ambato, 11 de agosto de 2026

CERTIFICACIÓN

Por medio del presente, CIAUTO CIA LTDA, a través de la Coordinación de Mantenimiento, certifica que ha recibido, analizado y evaluado la propuesta técnica denominada:

“Propuesta técnica para la mejora del factor de potencia mediante la reconfiguración del banco automático de capacitores en el tablero principal de 380 V de la Planta de Pintura de CIAUTO CIA LTDA.”

Luego del análisis realizado por el personal técnico competente, se determina que la propuesta presenta viabilidad técnica y operativa, considerando las condiciones actuales de la instalación eléctrica, la infraestructura existente y los requerimientos de compensación de potencia reactiva y corrección del factor de potencia.

De acuerdo con el análisis efectuado, CIAUTO CIA LTDA considera viable la implementación de la propuesta, cuya ejecución será realizada exclusivamente por la empresa, a través del personal técnico y las áreas que determine internamente, conforme a sus procedimientos y políticas de seguridad, operación y mantenimiento.

La ejecución estará sujeta a la planificación interna, disponibilidad de recursos y condiciones operativas de la empresa.

El presente certificado deja constancia de que la propuesta ha sido analizada y considerada técnicamente viable, y que su implementación corresponde exclusivamente a CIAUTO CIA LTDA.

Para constancia de lo expuesto, se expide el presente certificado a solicitud de la parte interesada.



Telenchana Quilligana Glenda Margoth
Universidad Técnica de Cotopaxi
C.I.1805643903



Toapanta Andrango Stalin Israel
Universidad Técnica de Cotopaxi
C.I.0550624043

CERTIFICA:



Ing. Miguel Angel Taipe Guaman
Coordinador de Mantenimiento
CIAUTO CIA LTDA
C.I.1715636211

CIAUTO
CIA LTDA

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por darme vida, salud, sabiduría y fortaleza para superar cada desafío y culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mis padres, María Quilligana y Ángel Telenchana, por su esfuerzo y apoyo incondicional; a mis hermanos, Byron y Rocío Telenchana, por sus consejos y motivación; y a mis sobrinos, Sebastián e Ian Cayambe, por su cariño y alegría.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, especialmente a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA) y a sus docentes, por los conocimientos y enseñanzas brindados durante mi formación académica.

A CIAUTO CIA LTDA., por la apertura y las facilidades brindadas para desarrollar mi trabajo de titulación, y a su personal por compartir sus conocimientos y experiencia.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, con su amistad, consejos y palabras de aliento, estuvieron presentes durante este camino y contribuyeron al cumplimiento de esta meta.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

Telenchana Quilligana Glenda Margoth

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con amor y gratitud, a Dios, por ser mi guía y fortaleza, y por darme la sabiduría y perseverancia necesarias para alcanzar esta meta.

A mis padres, María Quilligana y Ángel Telenchana, por su amor incondicional, sacrificios y enseñanzas. Gracias por creer en mí y enseñarme que, con esfuerzo y constancia, los sueños pueden hacerse realidad.

A mis hermanos, Byron y Rocío Telenchana, por su cariño, consejos y apoyo constante; y a mis sobrinos, Sebastián e Ian Cayambe, por llenar mi vida de alegría y motivarme a seguir superándome. Que este logro sea un ejemplo para ustedes de que vale la pena luchar por cada sueño.

De manera especial, a B. Y., por acompañarme en este camino, creer en mí y brindarme su apoyo y palabras de aliento en los momentos que más lo necesité. Gracias por ser parte de esta etapa.

A mi familia y a quienes estuvieron a mi lado, les dedico con profundo cariño este logro, fruto de años de esfuerzo y perseverancia.

*“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece.”
Filipenses 4:13*

Telenchana Quilligana Glenda Margoth

AGRADECIMIENTO

Agradezco este logro, en primer lugar, a Dios por regalarme un día más de vida y permitirme alcanzar una meta más en mi vida.

También a mi madre y a mis hermanas, quienes con su amor incondicional me apoyaron en cada etapa de este proceso.

Gracias por ser mi fuerza y mi pilar fundamental, gracias por su apoyo incondicional, su paciencia y por creer en mí en cada momento del proceso.

Este logro lleva el nombre de cada uno de ustedes.

Toapanta Andrango Stalin Israel

DEDICATORIA

A Dios por ser fuente de sabiduría y fortaleza que me dio salud y vida permitiendo culminar esta etapa de vida con perseverancia.

A mi madre y hermanas que son mi pilar fundamental. Gracias por su apoyo incondicional, sus consejos y por ser partícipes de cada etapa de este proceso.

Este logro está dedicado a ustedes, porque sin su sacrificio y amor nada de esto sería posible.

Toapanta Andrango Stalin Israel

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TEMA: “ANÁLISIS DE FALLAS EN EL BANCO DE CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA EN LA PLANTA DE PINTURA EN LA EMPRESA CIAUTO CIA LTDA.”

Autores: Telenchana Quilligana Glenda Margoth
Toapanta Andrango Stalin Israel

RESUMEN

La presente investigación analiza las fallas que afectan el funcionamiento del banco de corrección del factor de potencia de la planta de pintura de CIAUTO CIA LTDA. El estudio se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, considerando la inspección técnica de los componentes, la revisión del sistema de medición y control y el análisis de los parámetros eléctricos obtenidos durante una campaña de medición con el analizador de redes Fluke 435-II. El diagnóstico determinó una capacidad nominal instalada de 105 kVAr frente a una capacidad registrada aproximada de 99.4 kVAr. Asimismo, se identificó anomalías en las conexiones de los transformadores de corriente, relacionadas con diferencias entre las lecturas del controlador DUCATI DUCA-LCD96 y el analizador de redes. El análisis eléctrico evidenció que el factor de potencia varía según las condiciones de carga, con valores entre 0.97 y 0.98 durante la producción y valores inferiores a 0.94 en baja demanda, con un promedio aproximado de 0.79. A partir del diagnóstico se planteó la reestructuración del banco a una capacidad nominal de 130 kVAr, distribuida en seis escalones de 5, 10, 25, 25, 40 y 25 kVAr. Para la condición de baja demanda se determinó un requerimiento de compensación de 4.89 kVAr, por lo que se seleccionó un capacitor de 5 kVAr. Mediante la simulación en DIgSILENT PowerFactory se evaluó esta capacidad, obteniéndose un incremento del factor de potencia de 0.73 a 0.98 para la condición analizada. La propuesta incorpora escalones de respaldo y reutiliza componentes existentes, estableciendo una alternativa técnica acorde con las condiciones identificadas.

Palabras clave: análisis de fallas, factor de potencia, banco de capacitores, compensación reactiva, simulación eléctrica.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES
THEME: “FAULT ANALYSIS IN THE POWER FACTOR CORRECTION BANK AT
THE PAINTING PLANT OF CIAUTO CIA LTDA.”

Authors: Telenchana Quilligana Glenda Margoth,

Toapanta Andrango Stalin Israel

ABSTRACT

This research analyzed the failures affecting the operation of the power factor correction bank in the paint plant of CIAUTO LTD. The study was conducted using a quantitative approach, including a technical inspection of the bank, verification of the measurement system, and analysis of the electrical parameters obtained during a measurement campaign with the Fluke 435-II power quality analyzer. The diagnosis determined a nominal installed capacity of 105 kVAr, compared to a recorded capacity of 99.4 kVAr. In addition, inadequate connections in the current transformers were identified, associated with differences between the readings of the DUCATI DUCA-LCD96 panel analyzer and the Fluke 435-II. The electrical analysis showed that the power factor varied according to load conditions, reaching values between 0.97 and 0.98 during production and an average of 0.79 under low demand. Based on these results, it was proposed to restructure the bank to a nominal capacity of 130 kVAr, distributed in six steps of 5, 10, 25, 25, 40, and 25 kVAr. For the low-demand condition, a compensation requirement of 4.89 kVAr was determined, and a 5 kVAr capacitor was selected. Simulation in DIgSILENT PowerFactory allowed evaluation of this step, resulting in an increase in the power factor from 0.73 to 0.98 for the analyzed condition. The proposal incorporates backup steps and reuses existing components, improving the adaptation of the bank to the identified operating conditions.

Keywords: failure analysis, power factor, capacitor bank, reactive compensation, electrical simulation.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y
APLICADAS
CARRERA: INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

Nombre del estudiante:

Telenchana Quilligana Glenda Margoth

Toapanta Andrango Stalin Israel

AVAL DE TRADUCCIÓN- Profesional Externo

Stalyn Alejandro Ávila Herrera con cédula de identidad número: 1803467131 Licenciada/o; Magíster en: Master of Arts (MA) in Educational Technology and TESOL con número de registro de la SENESCYT: 7037R-14-13699; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **“ANÁLISIS DE FALLAS EN EL BANCO DE CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA EN LA PLANTA DE PINTURA EN LA EMPRESA CIAUTO CIA LTDA.”** de: **Glenda Margoth Telenchana Quilligana y Stalin Israel Toapanta Andrango**, egresados de la carrera de Electromecánica, perteneciente a la Facultad de Ciencias de Ingeniería y Aplicadas.

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, agosto 2026

.....
Lic. Stalyn Alejandro Ávila Herrera, MA
CI: 1803467131

Índice General

<i>AGRADECIMIENTO</i>	<i>iv</i>
<i>DEDICATORIA</i>	<i>v</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>viii</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>ix</i>
<i>Índice de Tablas</i>	<i>xiii</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>xiv</i>
1 INFORMACIÓN GENERAL	1
2 INTRODUCCIÓN	2
2.1 Situación problemática.....	3
2.2 Formulación del problema	4
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	4
2.3.1 Objeto de investigación	4
2.3.2 Campo de acción	4
2.4 BENEFICIARIOS.....	4
2.4.1 Directo:	4
2.4.2 Indirecto:.....	4
2.5 JUSTIFICACIÓN	4
2.6 OBJETIVOS	5
2.6.1 General	5
2.6.2 Específicos.....	5
2.6.3 Sistema de tareas	6
3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	8
3.1 Sistemas eléctricos industriales.....	8
3.2 Parámetros eléctricos	8
3.2.1 Corriente eléctrica.....	8
3.3 Potencia eléctrica	9
3.3.1 Potencia Activa (P)	9
3.3.2 Potencia reactiva (Q)	9
3.3.3 Potencia aparente (S).....	9
3.3.4 Triangulo de potencia	10

3.4	Factor de potencia	10
3.4.1	Resolución ARCONEL.....	10
3.4.2	Causas del bajo factor de potencia.....	11
3.4.3	Efectos del bajo factor de potencia	12
3.4.4	Efectos del bajo factor de potencia en la red externa.....	13
3.4.5	Penalizaciones	14
3.4.6	Beneficios de corregir el factor de potencia	15
3.5	Corrección del factor de potencia	15
3.5.1	Métodos de corrección.....	16
3.6	Mediciones de parámetros eléctricos	17
3.6.1	Analizadores de redes de panel.....	18
3.6.2	Analizador trifásico de calidad de energía.....	19
3.7	Fallas en bancos de corrección del fp	20
3.7.1	Fallas eléctricas más comunes	20
3.7.2	Causas de las fallas	21
4	<i>MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS</i>	22
4.1	Procedimiento para el diagnóstico	22
4.2	Caracterización del sistema eléctrico	23
4.3	Inspección técnica del banco de corrección del factor de potencia.....	24
4.4	Levantamiento de cargas eléctricas.....	24
4.5	Plan de medición de parámetros eléctricos	25
4.5.1	Instalación y configuración del analizador de redes Fluke 435-II	25
4.6	Verificación del sistema de medición.....	25
4.7	Procesamiento y evaluación de los registros.....	27
4.7.1	Criterios derivados del diagnóstico para formular la propuesta.....	27
4.8	Cálculo de la compensación de potencia reactiva.....	27
4.9	Dimensionamiento de los elementos.....	31
4.10	Procedimiento para la evaluación económica de la propuesta.....	32
5	<i>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</i>	34
5.1	Diagnóstico del banco de corrección del factor de potencia.....	34
5.1.1	Análisis del banco de capacitores	34
5.2	Análisis del sistema de medición	35

5.2.1	Comparación de las lecturas del controlador DUCATI DUCA-LCD96 y el analizador Fluke 435-II	35
5.2.2	Análisis de los transformadores de corriente	36
5.3	Análisis de las cargas instaladas	36
5.4	Análisis de los parámetros eléctricos	36
5.4.1	Análisis de la tensión	37
5.4.2	Análisis de la corriente	37
5.4.3	Análisis de la Potencia Activa	38
5.4.4	Análisis del factor de potencia.....	39
5.5	Fallas identificadas durante el diagnostico	42
5.6	Propuesta de reestructuración del banco de capacitores	43
5.6.1	Distribución funcional de los bloques	43
5.6.2	Distribución de componentes existentes y requeridos	44
5.7	Evaluación técnica de la propuesta	45
5.7.1	Evaluación de la compensación requerida	46
5.7.2	Validación analítica del escalón 5kVAr	47
5.7.3	Validación de la propuesta mediante simulación en DIgSILENT PowerFactory	48
5.8	Evaluación económica de la propuesta	50
5.8.1	Inversión requerida	50
5.8.2	Análisis de las penalizaciones y periodo de recuperación	50
5.9	Discusión de resultados.....	52
6	<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	53
6.1	Conclusiones	53
6.2	Recomendaciones	53
7	<i>Referencias</i>	54
8	<i>Anexos.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>

Índice de Tablas

Tabla 1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO.....	2
Tabla 2. Sistema de tareas.....	6
Tabla 3: Levantamiento de cargas de la planta de pintura.....	24
Tabla 4: parámetros establecidos para la campaña de medición	25
Tabla 5: Parámetros considerados para el cálculo de compensación	28
Tabla 6: Dimensionamiento de los elementos del banco de capacitores.....	31
Tabla 7: Capacidad de los bloques del banco de capacitores	35
Tabla 8: Análisis estadístico del factor de potencia total durante el periodo de medición	40
Tabla 9: Fallas identificadas durante el diagnóstico del banco de capacitores.....	42
Tabla 10: Restructuración propuesta del banco de capacitores	44
Tabla 11: Distribución de capacitores para la reestructuración del banco.....	44
Tabla 12: Comparación entre la configuración actual y propuesta del banco de capacitores ..	45
Tabla 13:Evaluación de la capacidad de compensación propuesta	46
Tabla 14. Comparación de los escenarios simulados con y sin el capacitor de 5 kVAr	49
Tabla 15: Evaluación económica de los componentes considerados en la propuesta	50
Tabla 16: Relación entre la inversión requerida y las penalizaciones	51

Índice de Figuras

Figura 1. Triangulo de potencias.	10
Figura 2. Efecto del fp sobre la corriente nominal.	13
Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento aplicado para el análisis del banco de corrección del factor de potencia.....	23
Figura 4. Conexión de los transformadores de corriente.....	27
Figura 5. Comportamiento de la tensión RMS línea–línea durante un día representativo de medición.	37
Figura 6. Comportamiento de la corriente eléctrica en las líneas de alimentación de la planta de pintura.....	38
Figura 7. Variación de la potencia activa demandada por la planta de pintura durante la jornada de producción	39
Figura 8. Comportamiento del factor de potencia total durante un día	40
Figura 9. Comportamiento del factor de potencia por fase durante un día representativo de medición	41
Figura 10. Comparación del factor de potencia inicial y estimado con la incorporación del escalón de 5 kVAr.....	47
Figura 11. Simulación del sistema a las 19:00 h sin la incorporación del capacitor de 5 kVAr	48
Figura 12. Simulación del sistema a las 19:00 h con la incorporación del capacitor de 5 kVAr	49

1 INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Análisis de fallas en el banco de corrección de factor de potencia en la planta de pintura en la empresa CIAUTO CIA LTDA.

Modalidad de Titulación:

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIÓN PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	X
	Patente, modelo de utilidad. Certificado de propiedad intelectual	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual	
Examen de indicadores de RDA		

Equipo de Trabajo: Telenchana Quilligana Glenda Margoth, Toapanta Andrango Stalin Israel.

Tutor: Ing. Luigi Orlando Freire Martínez M.Sc.

Área de Conocimiento:

En el presente proyecto de investigación se trabajó en el área 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctrica y 3310 Tecnología Industrial. De manera específica, el desarrollo se vinculó con los campos de 3306.02y 3310.04, tal como se detalla en la Tabla 1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO.

Tabla 1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO

07 ingeniería Industrial y Construcción	071 ingeniería y Profesiones Afines	0713 electricidad y energía
		0714 electrónica y automatización
		0715 mecánica y metalurgia

Línea de investigación: repotenciación e innovación tecnológica y/o equipos electromecánicos a través de la optimización integral del mantenimiento (OIM) en la provincia de Cotopaxi.

- **Sublíneas de investigación de la Carrera:** eficiencia energética e integración de fuentes renovables.

2 INTRODUCCIÓN

Si una instalación eléctrica opera con un bajo factor de potencia genera tanto un consumo significativo en energía, así como otras implicaciones de gran importancia [1]. El ingeniero que tiene más conocimiento en el área técnica le preocupa el problema del factor descrito, toda vez que ello genera pérdidas relevantes en el sistema eléctrico [2].

En general, para que suceda lo mencionado en el párrafo anterior, el elemento de instalación debe intercambiar energía reactiva con la red, siendo este intercambio de tipo inductivo [3]. Por lo general, en las instalaciones industriales, se utilizan receptores de tipo inductivo (motores, transformadores, lámparas, etc.) [4]. Además, un receptor que opere con un bajo factor de potencia, genera un consumo intenso para una determinada potencia activa [5].

Un factor de potencia que se aleja de la unidad significa que aumenta su intensidad en la línea de suministro para la misma potencia activa, por ello, las empresas suministradoras de electricidad penalizan a través de sobre costos, presentados como multas en la facturación del suministro [6].

Por lo tanto, es necesario compensar, por medio del factor de potencia y banco de condensadores para evitar mayores costos [7]. El banco de capacitador estabiliza el factor de potencia sobre cada variación que presenta una carga [8], lo que es el efecto que genera un dispositivo capaz de almacenar una carga eléctrica; redundando en una ventaja inmediata, toda vez que elimina causales penalizadas [9].

En el mundo contemporáneo, existe una demanda sobre el uso de compensadores de potencia de tipo reactiva en un sistema industrial [10], toda vez que son fuentes generadoras de VARS, porque suministran la energía de magnetización requerida para los devanados de los motores para su funcionamiento [11].

Aunque los bancos de capacitores son una manera simple y eficiente, éstos pueden presentar problemas de sobrecalentamiento, resonancias y altas tensiones de conmutación [12]. Entre las fallas más comunes se encuentran problemas en contactores, la presencia de armónicos, desbalance de cargas, fallos en transformadores de corriente y errores en los sistemas de control automático [13].

Ante la falta de métodos para el diagnóstico de la efectividad de la compensación; y, predicción de operaciones críticas de bancos de capacitadores existen averías que impiden que el factor de potencia no se corrija de manera efectiva [14]. Es necesario conocer la naturaleza del problema, realizar análisis y desarrollar métodos y técnicas para satisfacer los requerimientos y normas nacionales de la medición de los problemas mencionados [15].

Por esta razón, el estudio de fallas en bancos de corrección sobre el factor de potencia en una planta de pintura en la compañía CIAUTO se convierte en una herramienta clave para detectar las causas y establecer mantenimiento preventivo y correctivo que aseguren un funcionamiento seguro del sistema eléctrico.

En virtud de descrito, los autores plantean como objetivo examinar las principales fallas de que ocurren en un banco de corrección en el factor de potencia, identificando sus causas, consecuencias y soluciones técnicas.

2.1 Situación problemática

CIAUTO CIA LTDA. desarrolla actividades de ensamblaje de vehículos que requieren el funcionamiento continuo de diferentes procesos industriales. Dentro de sus instalaciones, la planta de pintura dispone de un banco automático de capacitores destinado a mantener el factor de potencia dentro de las condiciones requeridas durante la operación del sistema eléctrico.

A pesar de contar con este sistema de corrección, se identificaron registros de factor de potencia inferiores al límite establecido, condición que ocasionó penalizaciones en la facturación eléctrica. Esta situación evidenció la necesidad de determinar por qué el banco instalado no mantenía una respuesta adecuada bajo las diferentes condiciones de carga de la planta.

La presencia de un bajo factor de potencia no permitió atribuir inicialmente el problema a un componente específico, por lo que fue necesario considerar la evaluación del banco de capacitores, su sistema de medición y control, las conexiones asociadas y el comportamiento de los principales parámetros eléctricos. De esta manera, el problema se centró en identificar las condiciones que afectan el funcionamiento del sistema de corrección y que limitan su capacidad para responder ante las variaciones de carga de la planta de pintura.

2.2 Formulación del problema

¿Qué condiciones afectan el funcionamiento del banco de corrección del factor de potencia de la planta de pintura de CIAUTO CIA LTDA. y limitan su respuesta ante las diferentes condiciones de operación del sistema eléctrico?

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto de investigación

Banco automático de corrección del factor de potencia de la planta de pintura de la empresa CIAUTO CIA LTDA.

2.3.2 Campo de acción

- 3306 ingeniería y Tecnología eléctrica
- 3306.02 Aplicaciones eléctricas

2.4 BENEFICIARIOS

2.4.1 Directo:

El personal de la planta de pintura de la empresa CIAUTO.

2.4.2 Indirecto:

El personal de diferentes áreas de la planta de pintura, así como los operarios, clientes y futuros investigadores o estudiantes.

2.5 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica por la necesidad de analizar el funcionamiento del banco de corrección del factor de potencia instalado en la planta de pintura de CIAUTO CIA LTDA.,

debido a que se registraron valores de factor de potencia inferiores al límite establecido y penalizaciones asociadas a esta condición.

Desde el ámbito normativo y económico, la Resolución ARCONEL-029/25 establece un factor de potencia de referencia de 0.94 para la aplicación de penalizaciones en la facturación eléctrica. Este criterio permite disponer de un valor de comparación para evaluar las condiciones registradas en la instalación y determinar la importancia de mantener una adecuada operación del sistema de corrección.

Desde el punto de vista técnico, el estudio permite evaluar los componentes del banco de capacitores, el sistema de medición y control, así como el comportamiento de los parámetros eléctricos bajo las diferentes condiciones de operación de la planta. Esta evaluación permite identificar las condiciones que afectan el funcionamiento del sistema y disponer de información sustentada en mediciones e inspecciones realizadas directamente en la instalación.

Finalmente, los resultados obtenidos proporcionan una base técnica para plantear una estrategia de mejora acorde con las condiciones identificadas, considerando el aprovechamiento de los componentes existentes que presenten características compatibles con los requerimientos establecidos para el banco de corrección del factor de potencia.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 General

Analizar las fallas del banco de corrección del factor de potencia de la planta de pintura de la empresa CIAUTO CIA LTDA, mediante el diagnóstico del sistema, y la fundamentación de una estrategia de mejora.

2.6.2 Específicos

Indagar las normativas y criterios técnicos aplicables a los bancos de corrección del factor de potencia en sistemas eléctricos, como fundamento para la definición de los parámetros de evaluación.

Determinar las fallas que afectan el funcionamiento del banco a partir de la evaluación de sus componentes, el sistema de medición y los parámetros eléctricos.

Establecer una estrategia técnica para el banco de corrección del factor de potencia con base en las fallas identificadas durante el diagnóstico, orientada a resolver las condiciones que afectan su operatividad.

2.6.3 Sistema de tareas

En la tabla 2. Sistema de tareas, se visualiza todas las actividades de la presente investigación:

Tabla 2. Sistema de tareas

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados previstos	Técnicas, instrumentos y medios
Indagar las normativas y criterios técnicos aplicables a los bancos de corrección del factor de potencia en sistemas eléctricos, para la definición de los parámetros de evaluación.	Revisar bibliografía técnica y normativa sobre bancos de capacitores, factor de potencia, armónicos y protección.	Base teórica y normativa para la definición de los parámetros de evaluación.	Artículos científicos, normas IEE e Iec, base de datos académicos, gestores bibliográficos.
	Sistematización de los principales modos de falla, causas y efectos operativos en sistemas industriales.		
Determinar las fallas que afectan el funcionamiento del banco a partir de la evaluación de sus componentes, el sistema de medición y los parámetros eléctricos.	Realizar la inspección técnica de componentes (capacitores, contactores, fusibles y protecciones) y la verificación del	Diagnóstico integral del estado operativo del banco e identificación de las causas principales de fallo y deficiencias en la	Inspección técnica visual, datos de placa, diagrama unifilar y analizador de calidad de energía (Fluke 435-II / PowerLogic).

	sistema de medición.	compensación del factor de potencia.	
	Procesar y analizar los parámetros eléctricos (potencia activa, reactiva, factor de potencia y armónicos) obtenidos durante la campaña de medición en la planta de pintura.		
Establecer una estrategia técnica para el banco de corrección del factor de potencia con base en las fallas identificadas durante el diagnóstico, orientada a resolver las condiciones que afectan su operatividad.	Reestructurar el esquema eléctrico del banco definiendo la especificación técnica de capacitores, contactores de maniobra	Propuesta técnica de reestructuración del banco de corrección del factor de potencia. Evaluar el impacto de la compensación reactiva capacitiva en la red de 380 V de la Planta de Pintura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda.	Tabla y diagrama unifilar de reestructuración del banco de capacitores con especificaciones de los bloques y software de simulación eléctrica PowerFactory.
	Modelar la red eléctrica en software especializado para comprobar el alcance del factor de potencia requerido 0.94.		

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Sistemas eléctricos industriales

En el entorno industrial, un sistema eléctrico constituye la piedra angular de un sistema de producción y operación de una instalación fabril y de manufactura. Este sistema tiene un papel fundamental en la operación de fábricas, plantas de producción y otros entornos industriales [16].

El correcto funcionamiento es crucial para mantener la operatividad de los procesos productivos y asegurar la seguridad de los trabajadores [17]. Los sistemas eléctricos industriales requieren un mantenimiento regular para garantizar su funcionamiento confiable [16].

3.2 Parámetros eléctricos

3.2.1 Corriente eléctrica

La corriente eléctrica se refiere a la velocidad en la que un flujo de electrones viaja de un punto de un circuito eléctrico a otro [18].

3.2.1.1 Tipos de corriente

Se clasifican según su naturaleza:

3.2.1.1.1 Corriente continua (CC)

Este tipo de corriente se refiere al flujo de cargas eléctricas cuyo sentido no cambia en el tiempo. Dicho de otra forma, se produce por una diferencia en la potencia eléctrica (voltaje), cuyos terminales de menor y mayor potencial no pueden intercambiarse. Así, esta corriente siempre circula en el mismo sentido [19].

3.2.1.1.2 Corriente alterna (CA)

Este tipo de corriente, en contraste a la continua, tiene un sentido y dirección cíclico. En ese sentido, matemáticamente se la puede describir por medio de ondas senoidales. Por lo que esta corriente es mucho más eficiente que la continua. Además, su difusión yace a finales del siglo XIX [19].

3.2.1.1.3 Corriente trifásica

Este tipo de corriente es la más común, toda vez que consiste en tres corrientes alternas con la misma amplitud y frecuencia. Cada una de estas corrientes tienen un orden determinado y se identifican por fases. Además, este sistema es eficaz y el más utilizado por la sociedad [19].

3.2.1.1.4 Corriente monofásica

Esta corriente se obtiene al tomar una fase de corriente trifásica con un cable neutro. Esto permite que se aproveche la transmisión energética en una baja tensión (230 voltios). Pese a que se utiliza en diversos países, muchos aparatos domésticos de alta potencia no funcionan con esta corriente [19].

3.3 Potencia eléctrica

La potencia eléctrica es una magnitud de energía eléctrica en que un dispositivo o sistema produce o consume en cada unidad de tiempo. Representa la velocidad con la que fluye la energía dentro de un circuito [20]. De esta manera, se deduce que la unidad industrial de esta medida es el kilovatio-hora, lo cual equivale a la energía empleada por un dispositivo [21].

3.3.1 Potencia Activa (P)

Esta potencia se representa con el carácter P y se mide en vatios [W]. La potencia activa se transforma en potencia mecánica, calor o luz [22]. Además, esta potencia es la única que se consume en un circuito; por consiguiente, es la que un generador aporta al circuito [23].

3.3.2 Potencia reactiva (Q)

La potencia reactiva proporciona flujo magnético imprescindible para que funcione un equipo, esta energía no es facturada y tampoco la aprovecha el usuario. Esta potencia se representa con el carácter Q y se mide en voltamperios reactivos [VAR] [24]. Pese a que no realiza trabajo útil, sirve para generar un campo magnético mediante bobinas como transformadores, motores y condensadores [25]. El análisis de la energía reactiva es crucial para identificar su impacto en el consumo energético y los costes asociados [26].

3.3.3 Potencia aparente (S)

La potencia aparente se define como la potencial total que alimenta un circuito. Dicho de otra forma, es la suma de la potencia reactiva y activa, ambas se transmiten por medio de los conductores [23]. En un sistema eléctrico, esta potencia se calcula al multiplicar la tensión y la corriente.

La potencia aparente es una combinación vectorial entre la potencia de tipo activa y reactiva. Su cálculo se representa con el carácter S y se mide en volts por amperes, o voltamperios [VA] [27].

3.3.4 Triángulo de potencia

Como se observa en la Figura 1, los tres elementos de circuitos que constituyen la potencia consumida en un circuito de CA pueden ser representados por los tres lados de un triángulo rectángulo, conocido comúnmente como triángulo de potencia.

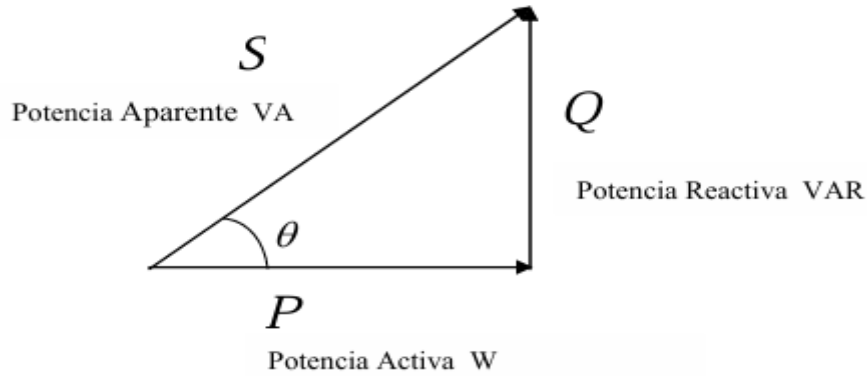


Figura 1. Triángulo de potencias.

3.4 Factor de potencia

Este factor constituye una medida crucial en un sistema eléctrico. Esta medida representa el nivel de eficiencia del uso de la energía eléctrica. Por consiguiente, se lo define por dos conceptos elementales (poder activo y poder aparente). Este factor relaciona la energía que se transforma en trabajo con la energía que un dispositivo y/o circuito consume. Este factor se encuentra determinado por el coseno ($\cos \theta$) del respectivo ángulo que forma la potencia activa (P) con la aparente total (S) [22].

3.4.1 Resolución ARCONEL

En Ecuador, la resolución 074/17 dictada por el ARCONEL, en el 2018, estableció un valor mínimo al factor de potencia de 0.92. [28]. No obstante, el incremento del límite mínimo del factor de potencia se produjo en julio del 2025, alcanzando el factor de potencia a 0.94 bajo la resolución N°. ARCONEL-029/25. Si este factor es inferior al determinado, se aplicará una penalización consistente en el pliego tarifario correspondiente según la categoría y grupo de tarifa [29]. Esto conlleva una mayor demanda de factor de potencia para realizar el trabajo necesario [30].

3.4.1.1 Resolución Nro. ARCENNR 002/20

En función de lo determinado por la Administración Pública, la medición de campañas deberá observar lo siguiente:

- Para la campaña de medición se deberá fijar un plan anual, el cual determinará la cantidad y los puntos en el que se realizará la medición.
- Disponer e instalar el equipo de medida, así como los analizadores de red encargados de evaluar la calidad del producto.
- Medida en cada fase, registrar y almacenar el dato medido.
- Retirar el equipo para medir los datos.
- Calcular el índice de calidad del producto.
- Verificar el cumplimiento del índice fijado por la autoridad administrativa.

Periodicidad:

El periodo de medición, registro y almacenamiento del valor descrito correspondiente a cada punto seleccionada se realizará mínimo de siete días continuos. La frecuencia tendrá un intervalo de 5 a 10 minutos.

La selección de puntos descritos se realizará conforme el siguiente detalle:

El reglamento define cinco grupos para la selección de puntos de evaluación. El grupo 1 tiene en cuenta todas las barras de salida de las estaciones de distribución AV/MT con una evaluación anual. El grupo 2 incluye todos los consumidores que funcionan con alta tensión, también cada año. El grupo 3 incluye el 0.15% de los transformadores de distribución con al menos cinco unidades, evaluados mensualmente. El grupo 4 corresponde al 0.5% de los consumidores de media tensión, de los cuales al menos cinco durante las evaluaciones mensuales. Finalmente, el grupo 5 incluye el 0.01% de los consumidores de baja tensión, siendo evaluados al menos siete cada mes [31].

Para cada grupo, se valorará que se cumpla con lo determinado respecto del nivel de voltaje

3.4.2 Causas del bajo factor de potencia

Un ínfimo factor de potencia se origina por las cargas inductivas ya que son cargas no lineales. Estas cargas requieren potencia reactiva, lo que provoca un desfase que afecta tanto la corriente como el voltaje [32].

Para una mejor comprensión, se describen las razones de la generación de bajo factor de potencia:

Sistemas de iluminación basados en descargas eléctricas: las lámparas de vapor con mercurio, los tubos florecientes y otros dispositivos tienen un factor de potencia del 60%; sin embargo; en la actualidad se emplean balastos compensadores que incrementan este porcentaje hasta el 90% [33].

Motores de inducción: son una primera causa de bajo factores de potencia, especialmente en el caso de motores fraccionales, en el caso de motores de bajo costo o no bien construidos y en el caso de motores sobredimensionados o poco cargados [34]. El factor de potencia cambia notablemente con el cambio de carga; cuando la carga está completa, el factor de potencia se aproxima a su máximo, pero cuando la carga disminuye, también lo hace significativamente [35].

Transformadores de corriente sobredimensionados: la precisión de los transformadores de tensión está sujeta a las cargas en el secundario y a su factor de potencia, así como a la temperatura. En los transformadores capacitivos, también depende de la frecuencia. Estos pueden causar descenso en el factor de potencia dentro de las redes eléctricas porque, al estar sobredimensionados, trabajan cerca del límite máximo que tienen; esta puede dar lugar a un consumo más alto de energía reactiva y, consecuentemente, a un menor fp [36].

Hornos de arco eléctrico: son una de las fuentes más complejas para controlar y que afectan el funcionamiento del sistema eléctrico, ya que requieren mucha potencia de manera escalonada e inmediata debido a su naturaleza [37], durante su conexión y desconexión, esta exigencia de potencia disminuye repentinamente, la acción de esta carga provoca alteraciones en las variables eléctrica [38].

3.4.3 Efectos del bajo factor de potencia

El factor de potencia es una media importante en el sistema eléctrico comercial e industrial. Este factor sugiere que una parte considerable de energía proporcionada no fue empleada de forma eficiente [39]. Este fenómeno puede tener varios efectos perjudiciales en los sistemas eléctricos como:

- **Perdidas de energía:** un factor de potencia bajo significa más transferencia de energía en el sistema. Esto aumenta la pérdida de calor en conductores y equipos eléctricos,
- **Disminución de la capacidad de transmisión:** el bajo factor de potencia reduce la capacidad de transmisión efectiva en las líneas de transmisión y distribución.

- **Eficiencia de los equipos eléctrico:** los aparatos eléctricos como los motores y los transformadores, funcionan con mayor eficiencia cuando tienen un factor de potencia apropiado. Sin embargo, si el factor de potencia es bajo, estos dispositivos son menos eficientes y consumen más energía [40].
- **Transformadores:** Los transformadores; y, los cables de distribución en una instalación eléctrica industrial se encuentran sobrecargados y las pérdidas se incrementan (en proporción al cuadrado de la corriente) [1].

3.4.4 Efectos del bajo factor de potencia en la red externa

En el caso de una potencia que se consume de manera uniforme, el factor de potencia sería menor como se observa en la figura 2; mientras que, la potencia aparente sería mayor, así como la corriente en la red. En ese sentido, la corriente por carga será el doble de la corriente útil. De la misma forma, con un factor de potencia constante, la corriente de red aumentará; mientras que, el factor de potencia disminuirá [36]. Lo descrito deduce que el transformador y los cables de distribución se encuentran sobrecargados y las pérdidas aumentará, tal y como se demuestra en la siguiente gráfica:

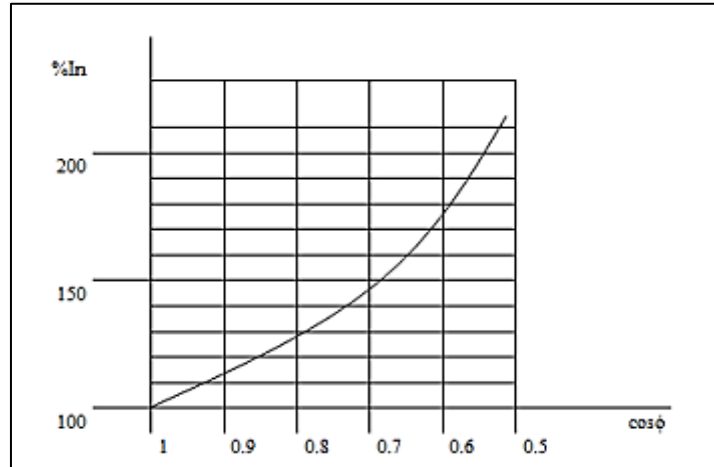


Figura 2. Efecto del fp sobre la corriente nominal.

La instalación eléctrica que opere con un factor inferior de potencia a la unidad, ocasionaría una afectación a su red de electricidad, independientemente de si tiene alta o baja tensión. Sumado a ello, también existen otras consecuencias concomitantes, como lo es la disminución del factor de potencia.

El exceso de corriente producto de un inferior factor de potencia, deviene en que cada generador, transformador y línea de distribución, trabaje con determinada sobrecarga y

disminuye la vida útil. Esto se debe a que cada equipo tiene una estructura diseñada para cada valor de corriente [41].

Una manera en que cada compañía suministradora reflexione sobre la utilidad industrial de generar o controlar el consumo energético, es por medio de un cargo en su demanda, con un valor de USD/kVA.

3.4.5 Penalizaciones

Las empresas que proveen energía tienden a sancionar a los clientes con un factor de potencia bajo, porque eso implica generar más potencia reactiva, lo cual incrementa los costos operativos del sistema eléctrico [42].

En la práctica, una instalación con un factor de potencia bajo paga más por el uso intensivo de energía, aunque no consuma más kWh. La magnitud de las sanciones puede ascender a cientos o inclusive miles de dólares anualmente, en función del tamaño de la industria. Este sobre costo se muestra claramente en la factura, sobre todo en el suministro empresarial e industrial [43].

Cuando el factor de potencia sea inferior a 0.94, el suministro energético deberá cobrar a cada consumidor un recargo o multa. Para tal efecto, la imposición del tarifario se fijará conforme la siguiente ecuación planteada:

$$P_{B_{FP}} = \begin{cases} P_{B_{FP}} = 0 & \text{si } FP_r \geq 0.94 \\ P_{B_{FP}} = B_{FP} * FSPEEi & \text{si } FP_r < 0.94 \rightarrow B_{FP} = \frac{0.94}{FP_r} - 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

$P_{B_{FP}}$ = El complemento económico se aplica si el fp registrado es inferior al límite establecido de 0.94.

FP_r = Valor obtenido mediante medición o cálculo eléctrico utilizado para verificar el cumplimiento de un límite específico.

B_{FP} = Un factor que define el porcentaje adicional utilizado para la liquidación debido a un menor factor de potencia.

$FSPEEi$ = El valor inicial de la factura eléctrica antes de aplicar el correspondiente recargo por bajo factor de potencia.

Si costo el correspondiente al fp registrado o calculado dentro del plazo de uso es menor a 0.60, todo consumidor de categoría general que tenga medición de energía reactiva, la compañía distribuidora le suspenderá el SPPE, previa notificación oportuna; hasta que, el usuario adecúe las instalaciones cuando el factor de potencia supere el límite determinado [44].

3.4.6 Beneficios de corregir el factor de potencia

La mejora del factor de potencia en una instalación no sólo disminuye el recargo por factor de energía, sino que también puede conllevar la disminución del consumo energético y otros beneficios como los cargos por demanda, incremento de la carga en las capacidades de transporte reducidas la mejora de la tensión, la disminución y los circuitos existentes de las pérdidas del sistema de potencia [45].

Las ventajas que ocasiona la eficiencia del factor de potencia son las siguientes:

- **Mejora el perfil de voltaje:** Un sistema eléctrico tiene una resistencia inductiva interna. Por este motivo, sus cambios de potencia reactiva en la carga tienen un efecto negativo cuando se regula la tensión [46].
- **Reduce las pérdidas de potencia:** Si se realiza una corrección del fp, se reduce de manera significativa la pérdida del tipo I^2R en la potencia de transmisión entre el punto de compensación y el de generación se reduce considerablemente [46].
- **Libera capacidad en el sistema:** Si se conectan capacitadores al sistema, aquellos suministran una potencia reactiva que exige la carga, aumentando el factor de potencia. Dicho de otra forma, si existe un nivel bajo de corriente, se deberá utilizar una potencia activa alta. Así, los bancos de capacitadores deberán emplear una carga; o, bien, agregar una carga adicional a su sistema de energía [46].
- **Reducir la factura de la compañía eléctrica:** trabajar con un bajo factor de potencia supone absorber una corriente superior a la estrictamente necesaria para obtener el mismo resultado útil (la potencia activa) [47].
- **Incrementar la capacidad útil de transmisión de energía del sistema eléctrico:** un factor de potencia incorrecto conlleva un deterioro de su efecto en el sistema de distribución. A medida que la potencia pérdida aumenta, pueden ocurrir caídas de tensión, los cuales tienen el potencial de sobrecalentar y provocar fallos prematuros en el motor y otros equipos [47].

3.5 Corrección del factor de potencia

La corrección del factor de potencia no reduce directamente el consumo eléctrico total de un dispositivo o sistema, pero sí fomenta la eficiencia de los sistemas eléctricos, lo que indirectamente ocasiona a un menor consumo de energía reactiva [48]. La finalidad de corregir el factor de potencia es disminuir la energía reactiva utilizada para así minimizar el consumo

excesivo de energía y reducir el costos o factura económica proporcionada por las empresas eléctricas [49].

3.5.1 Métodos de corrección

El factor de potencia de una instalación, dependiendo de su tamaño y sus características, se puede corregir; ya sea usando motores síncronos que inyecten potencia reactiva, o bien por el uso de condensadores [50].

Si bien es cierto que no existen reglas, ni especificaciones para la forma en que se instale un banco condensador, la instalación se determinará en cualquier punto debido a que es preciso si la evaluación de su ejecución es práctica y económica [51]. Existen los siguientes métodos de corrección, dependiendo de la ubicación del banco de capacitador:

3.5.1.1 Corrección distribuida

La corrección distribuida se obtiene al conectar un banco de condensador, de forma directa, a un terminal de carga en la que amerita la potencia reactiva. Esta compensación se implementa si su potencia tiene una alta carga, con referencia a la potencia total. Esto implica que se debe omitir la corriente reactiva en los conductores de la estación, pero esta compensación de cargas es costosa [52].

3.5.1.2 Corrección centralizada

La compensación centralizada implica que se conecta un banco de capacitadores, de tal manera, que abarque todas las cargas. Dicho de otra forma, la compensación es el punto de inicio de toda conexión de instalación. Esta compensación es útil cuando se obtiene diversas cargas, y precisamente, una de ellas opera en determinadas horas del día. En ese sentido, la solución de la compensación es costosa, sin perjuicio de que subutilizada [52].

3.5.1.3 Corrección por grupos

La corrección por grupos implica que se conecte un banco de capacitadores en grupos de cargas. De manera general, estos grupos se juntan con cargas con características semejantes. Esta compensación suele ser atractiva, toda vez que es económica. No obstante, los beneficios de esta compensación afectan a cada conductor aguas arriba del punto de conexión de un banco de capacitores [52].

3.5.1.4 Corrección mixta

El ajuste mixto reemplaza la compensación dividida y grupal. La compensación distribuida utiliza cargas de energía más altas; Sin embargo, el resto utiliza el grupo de carga para la

corrección. En este sentido, la corrección grupal se utiliza con más frecuencia para cargas con mayor demanda que para otras cargas que son esporádicas [52].

3.5.1.5 Corrección autónoma

Esta corrección se refiere a la conexión y desconexión, de manera automática, de cada capacitador, que pertenecen al banco. De esta manera, el banco proporciona diversos valores de potencia reactiva en un tiempo determinado. Así, si no funcionan de manera simultánea la totalidad de las cargas, así como tampoco existe una constante absorción de potencia reactiva debido al ciclo de trabajo es evidente que uno debe usar sólo el sistema de compensación situado en el punto de la instalación. Este es el caso que se da más a menudo en los sistemas industriales [45].

3.5.1.6 Corrección individual

El banco de condensadores está conectado, de manera directa, en los terminales de la carga inductiva. Esta configuración técnica es ideal, toda vez que la energía reactiva se produce exactamente donde se ajusta a la demanda. Esto aplica principalmente a motores de media tensión [53].

3.5.1.7 Corrección por motores sincrónicos

Para corregir el factor de potencia, numerosas compañías optan por implementar motores sincrónicos sobreexcitados que funcionan en vacío y vierten potencia reactiva en la red [54].

3.5.1.8 Corrección compensadores estáticos de VARS

Los cuales poseen almacenamiento de energía para la compensación de potencia activa y reactiva, la regulación de tensión y disminución de las afectaciones producto de las perturbaciones en el sistema eléctrico [55].

Dado que el primero es el método más barato se enfoca más en esta solución porque además se pueden producir al tamaño requerido por la instalación [56].

3.6 Mediciones de parámetros eléctricos

Si se pretende localizar fallas o detección de problemas, las mediciones se deben hacer con un equipo portátil. De la misma forma, si existen mediciones indicativas normales, los instrumentos de medición se encuentran en tableros. La toma de la lectura realizada durante una condición de operación normal, da origen a una indicación visual en el comportamiento del circuito, en cualquier momento, condice a una operación segura y productiva [57].

En el caso de que una medición o lectura se realice durante condiciones se falla, se realizará una clara visión sobre un problema en el circuito, la operación en un circuito, o algún futuro problema. Así, para la detección de fallas, siempre se realizarán mediciones, aun cuando estos errores sean obvios. Finalmente, se recalca que los términos básicos para realizar estas mediciones son los siguientes [58]:

- **Tensión de línea (V_L):** Esta diferencia de potencias se mide entre dos fases en un sistema trifásico. En redes industriales más comunes son de 220 V, 380 V y 440 V.
- **Corriente de línea (I_L):** intensidad de corriente que circula por cada fase del tablero de distribución.
- **Potencia activa (P):** potencia real que realiza trabajo útil.
- **Potencia aparente (S):** potencia total en que el motor demanda de la red.
- **Potencia reactiva (Q):** potencia cuyo trabajo no es útil, sino que almacena y libera en campos magnéticos.
- **Factor de potencia (FP):** la relación entre la potencia activa y aparente. Un fp mejor significa que el motor está consumiendo, más corriente de la necesaria para la misma potencia útil, generando pérdidas en la red [25].

La monitorización se lleva a cabo principalmente mediante el uso de tecnologías de ingeniería electrónica, comunicación y sensores [59]. Durante el proceso de monitorización, la selección cuidadosa de los parámetros a monitorización adecuados es crucial. Existen varios enfoques principales para monitorear el estado eléctrico. La primera categoría implica el monitoreo mediante métodos tradicionales [60]. La segunda categoría incluye métodos basados en IA, como técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo [61]. Las mediciones realizadas en un periodo largo evaluarán el factor de potencia medio en una instalación [62].

3.6.1 Analizadores de redes de panel

La instalación de analizadores de redes de panel tiene gran demanda. Estos analizadores se encuentran en celdas de media tensión, subestaciones, centros de transformación, cuadros generales de acometida y cuadros de distribución de baja tensión, entre otros [63].

Los analizadores permiten la medición de energía en sistemas trifásicos de cargas simétrica y realizar mediciones profesionales de energía, tanto en sistemas monofásicas como trifásicos [64]. Miden variables eléctricas (armónicos, corrientes de fuga, potencias.) en los ámbitos terciarios e industriales y obtienen la información necesaria para realizar estudios de consumo

de energía eléctrica, permiten realizar una gestión técnica y energética de la red, controlando los costes energéticos de explotación [65].

Con el fin de analizar los parámetros eléctricos y la demanda energética de la planta, se contempla el uso del analizador DUCATI DUCA-LCD96, ver **Anexo B**. Este dispositivo aporta al estudio la medición en tiempo real del flujo de potencia activa y reactiva, permitiendo evaluar la eficiencia energética del sistema, proporcionando el insumo de datos requerido para el dimensionamiento preciso del banco de capacitores de compensación. planteados

Los analizadores de redes de pared son equipos que se encargan de analizar y registrar parámetros en una red o instalación. Estos parámetros puede ser tensión, corriente, factor de potencia, energía reactiva, aparente y activa, entre otros. Además, tienen la posibilidad de ser instalados en cualquier instalación a instancia del usuario [66].

En algunas ocasiones, se podrá detectar y/o resolver problemas en las caídas de tensión, sobretensiones, desequilibrios, armónicos, novedades en la calidad de la energía eléctrica, entre otros. Estos analizadores de pared se emplearán como herramientas de evaluación y comparación que detectarán la tendencia en la calidad eléctrica en el tiempo, así como para solucionar problemas y hallar respuestas [67].

Los equipos mencionados permiten visualizar si los valores son instantáneos, mínimos o máximos respecto de cada parámetro, fase y valor promedio [68].

3.6.2 Analizador trifásico de calidad de energía

El analizador trifásico de calidad de energía permite evaluar los parámetros eléctricos de un sistema de distribución mediante la adquisición y registro de variables como tensión, corriente, potencia y factor de potencia, conforme se detalla en el **ANEXO C**. Para la adquisición confiable de los datos, se requiere efectuar la conexión de las sondas de tensión y pinzas de corriente, considerando la secuencia de fases, polaridad y sentido de medición, así como seleccionar en el equipo el esquema de conexión correspondiente a la configuración del sistema eléctrico evaluado [69] .

3.6.2.1 Esquema de configuración del equipo

Según la topología de la red eléctrica a registrar, el usuario debe seleccionar la configuración correspondiente en el menú interno del equipo:

Configuración Trifásica en Estrella (3F Estrella / 4 Hilos): Se utiliza en redes trifásicas con neutro accesible. Requiere la conexión de 4 sondas de tensión (L1, L2, L3, N) y 3 o 4 sondas de corriente. Permite medir voltajes de fase a fase (V_{LL}) y de fase a neutro (V_{LN}).

Configuración Trifásica en Delta (3F Delta / 3 Hilos): Se aplica en sistemas industriales sin conductor de neutro. Se conectan 3 puntas de tensión entre las fases tensión (L1, L2, L3) y 3 sondas de corriente en cada fase.

Configuración Monofásica (1F / 2 Hilos o 3 Hilos): Se emplea en instalaciones residenciales o cargas comerciales menores. Requiere la conexión de tensión entre fase y neutro (L1 - N), así como una sonda de corriente acoplada a la fase.

Configuración Bifásica / Monofásica de Fase Partida (2F): Diseñada para redes con punto medio a tierra tensión (L1, L2, L3, N), midiendo la tensión y corriente en ambas líneas vivas y el neutro [69] .

3.7 Fallas en bancos de corrección del fp

Los capacitores constituyen uno de los componentes principales de los sistemas de corrección del factor de potencia y se encuentran sometidos a diferentes condiciones eléctricas y térmicas durante su funcionamiento. Estas condiciones pueden provocar deterioro progresivo de sus características y afectar la capacidad de compensación del banco [70]. Por esta razón, la evaluación de sus componentes y condiciones de operación resulta necesaria para identificar posibles fallas que puedan afectar el desempeño del sistema.

Es fundamental verificar que cada componente sea capaz de soportar las solicitudes aplicadas:

3.7.1 Fallas eléctricas más comunes

Los bancos de capacitores pueden estar expuestos a diferentes condiciones que afectan el funcionamiento y vida útil de sus componentes. Entre las principales fallas asociadas a las unidades capacitivas se encuentran las siguientes:

- **Sobrecargas de tensión:** descargas atmosféricas o maniobras de conmutación en la red pueden generar sobretensiones que exceden la capacidad de los capacitores [71].
- **Temperatura excesiva:** la ventilación y temperatura interna del tablero influyen directamente en la vida útil del capacitor. Como se muestra en la Figura 3, si la

temperatura ambiental sobrepasa los 55 °C, el envejecimiento del dieléctrico se acelera si la temperatura de operación real es extremadamente alta.

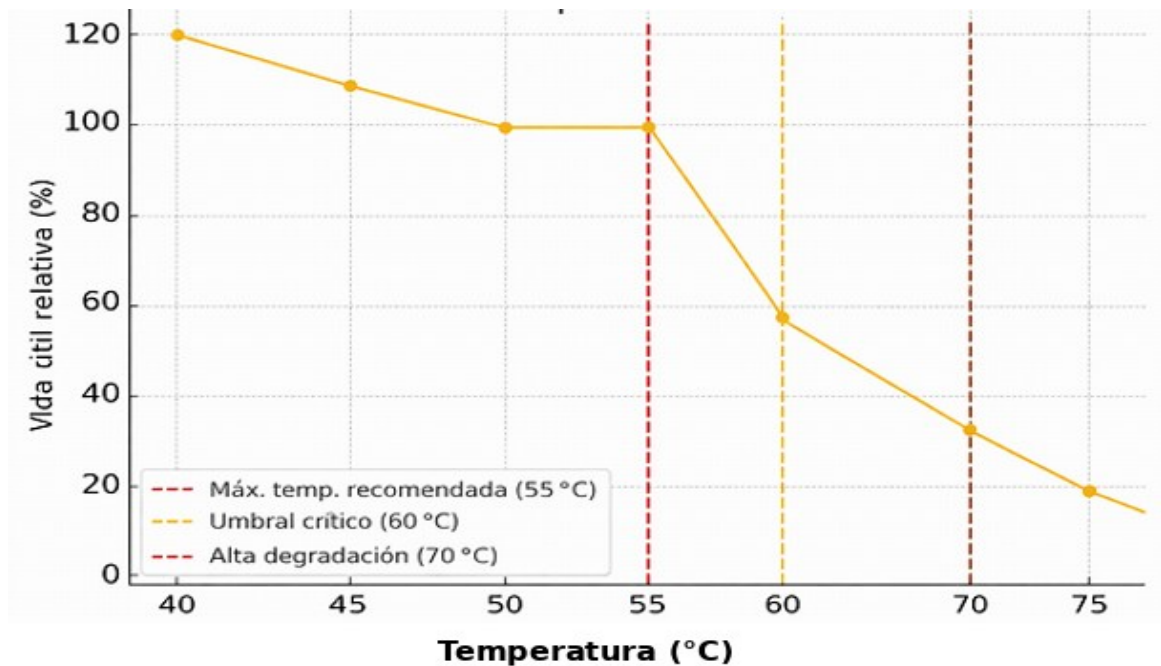


Figura 3. Relación entre temperatura ambiente y vida útil de capacitor.

- **Secado del electrolito:** El electrolito es susceptible de secarse, lo cual reduce su capacidad y aumenta la resistencia serie equivalente [72].
- **Ciclos de cargas/descargas excesivas:** La mayor parte de fallas en un elemento implica condiciones de carga que fluctúan con el tiempo, las cuales inducen esfuerzos de fluctuación (ciclos) que con frecuencia sus errores se deben a un daño acumulado [73].

3.7.2 Causas de las fallas

Las fallas en los bancos de capacitores pueden estar relacionadas tanto con el deterioro de sus componentes como con las condiciones de instalación, conexión y mantenimiento. La presencia de conexiones deficientes, unidades capacitivas deterioradas o dispositivos de protección afectados puede reducir la capacidad de corrección disponible e incluso ocasionar la indisponibilidad parcial o total del sistema [74]. Por ello, la revisión de las conexiones, capacitores, transformadores de corriente, contactores y elementos de control constituye un aspecto relevante para la identificación de las causas que afectan el funcionamiento del banco.

Las principales causas existentes:

- **Uso de cable muy rígido por diseño del tablero:** el calibre del conductor es adecuado pero muy rígido, esto ocasiona que no se pueda ajustar adecuadamente, y que se afloje fácilmente al tocarlo cuando se realiza mantenimiento.
- **Falla de conocimiento del personal:** sobre todo en aplicar el torque adecuado para el ajuste correcto, la comprobación del estado de los condensadores, conexiones de los TC, el funcionamiento de los contactores y resistencias de precarga, y configuración del módulo de control. Al trabajar en un circuito transformador de corriente (TC), existen peligros inherentes, como lo es el cableado y el bloqueo de cortocircuito. Si un circuito TC se encuentra abierto, al existir una carga pesada en el conmutador principal, el TC desarrollará una tensión legal en cada terminal [74].
- **Herramienta inadecuada para realizar el ajuste:** por el diseño y disposición de los componentes del tablero hay espacios estrechos que dificulta el ajuste usando las herramientas estándar.
- **Ventiladores pequeños en tableros que genera calentamiento del tablero:** se tiene temperatura elevada por una circulación de aire deficiente, por problemas de diseño del tablero [75].

4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

En este capítulo se presenta el procedimiento aplicado para diagnosticar las fallas en el banco de corrección del factor de potencia.

Se presenta la metodología aplicada para el diagnóstico del banco de corrección del factor de potencia y la formulación de la propuesta de mejora. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y de campo.

4.1 Procedimiento para el diagnóstico

El procedimiento se estructuró de forma secuencial, desde la caracterización del sistema hasta la evaluación económica de la propuesta, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento aplicado para el análisis del banco de corrección del factor de potencia.

4.2 Caracterización del sistema eléctrico

La caracterización se realizó mediante el diagrama unifilar, los datos de placa y la inspección del tablero principal. Se identificó un sistema trifásico de 380 V y 60 Hz, alimentado por un transformador de 300 kVA, y un banco automático de seis bloques con capacidad nominal total

de 105 kVAr, controlado mediante el DUCATI DUCA-LCD96. La capacidad de cada bloque se presenta en la Tabla 7.

El **ANEXO D** presenta la distribución de las cargas y la conexión del banco; el **ANEXO E** muestra el punto seleccionado para la medición.

4.3 Inspección técnica del banco de corrección del factor de potencia

Se inspeccionaron los seis bloques de compensación, los capacitores, contactores, dispositivos de protección, conductores y el controlador Siemens BR600 del banco de capacitores. Durante esta actividad se verificaron los datos de placa, la distribución de los escalones y el estado físico de los componentes. Las capacidades nominales y registradas de los bloques se presentan en la Tabla 7, mientras que el registro fotográfico de la inspección realizada se presenta en el **ANEXO F**.

4.4 Levantamiento de cargas eléctricas

Se identificó las cargas mediante inspección in situ y lectura de placas. Para cada equipo (carga) se registró la cantidad, tensión, corriente, potencia unitaria y potencia total, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3. El registro fotográfico de las placas de los motores identificados durante el levantamiento de cargas se presenta en el **ANEXO G**.

Tabla 3: Levantamiento de cargas de la planta de pintura

Carga	Cantidad	Voltaje/corriente	P. Uni kW	P. Total kW
Tecle de Valde	1	380V / 2.5 A	0.95	0.95
Blower (sopladora)	1	380V / 25.9 A	0.98	0.98
Casas de aires (M3-M5)	2	380V / 42.6 A	22	44
Extractores (M1 – M8)	2	380V / 7.9 A	3	6
Extractor 1	1	380V / 42.2 A	16	16
Extractor 2	1	380V / 57.2 A	22	22
Extractor 3	1	380V / 135.6 A	50.5	50.5
Extractor preparación	1	380V / 40 A	15	15
Extractor (implementado)	1	380V / 35 A	18.5	18.5
Cortinas de aires (M2 – M7)	2	132V / 44 A	7.5	15

Iluminación de Cabina		220V / 3 A	0.66	0.66
Iluminación de Cabina		220V / 2.5 A	0.55	0.55
Iluminación de Cabina		220V / 0.5 A	0.11	0.11
Iluminación y variador		220V / 0.5 A	0.19	0.19
Tomas torre de horno		220V / 14.5 A	3.19	3.19
Potencia Total Instalada			161.13	193.63

4.5 Plan de medición de parámetros eléctricos

La campaña se efectuó con el analizador Fluke 435-II en el tablero principal. La Tabla 4 reúne el punto de medición, las variables, la duración, el intervalo y el número de registros.

Tabla 4: parámetros establecidos para la campaña de medición

Parámetro	Condición establecida
Punto de medición	Tablero principal de distribución
Tensión nominal	380 V
Potencia nominal del sistema	300 kVA
Equipo de medición	Fluke 435-II
Periodo de medición	7 días continuos
Intervalo de registro	5 minutos
Número de registros	2002
Variables analizadas	Tensión, corriente, potencia activa y factor de potencia

4.5.1 Instalación y configuración del analizador de redes Fluke 435-II

Se instaló el analizador de redes Fluke 435-II mediante sondas de tensión y pinzas de corriente, respetando la correspondencia y el sentido de las fases, como se documenta en el **ANEXO H**.

La configuración aplicada correspondió a las condiciones definidas en la Tabla 4.

4.6 Verificación del sistema de medición

Se compararon simultáneamente las lecturas del analizador de panel DUCATI DUCA-LCD96, instalado en el tablero principal, y del analizador de redes Fluke 435-II. La comparación consideró los parámetros eléctricos registrados por ambos equipos, con el propósito de verificar la correspondencia de sus lecturas. La evidencia de esta comparación se presenta en la **Figura I.1 del ANEXO I**.

Al identificarse diferencias entre los valores registrados por ambos equipos, se revisaron los parámetros de configuración del analizador de panel DUCATI DUCA-LCD96, principalmente la relación de transformación de corriente y la correspondencia de fases. Posteriormente, se procedió a verificar el circuito de medición asociado a los transformadores de corriente (TC).

Los transformadores de corriente instalados en el tablero principal corresponden al modelo TCBA 105 AK5A, con relación de transformación de 1500/5 A, potencia nominal de 10 VA, clase de precisión 0.5 y frecuencia de 50–60 Hz. Los TC instalados se muestran en la **Figura I.2 del ANEXO I**.

La relación de transformación se determinó mediante la Ecuación (4.1):

$$K_{TC} = \frac{I_P}{I_S} \quad (4.1)$$

Donde:

K_{TC} : relación o factor de transformación del transformador de corriente.

I_P : corriente nominal del lado primario del TC, en A.

I_S : corriente nominal del lado secundario del TC, en A.

Considerando las características nominales de los transformadores instalados:

$$K_{TC} = \frac{1500}{5}$$

$$K_{TC} = 300$$

El resultado $K_{TC} = 300$ se utilizó para comprobar la configuración del controlador y la correspondencia entre las corrientes primaria y secundaria.

La corriente primaria se verificó mediante la Ecuación (4.2):

$$I_P = K_{TC} * I_S \quad (4.2)$$

Finalmente, se verificaron la continuidad del circuito secundario, la identificación de los terminales S1–S2 y la correspondencia de fases de los transformadores de corriente. El registro fotográfico de esta actividad se presenta en la **Figura I.3 del ANEXO I**, mientras que la conexión de referencia de los TC se muestra en la Figura 4.

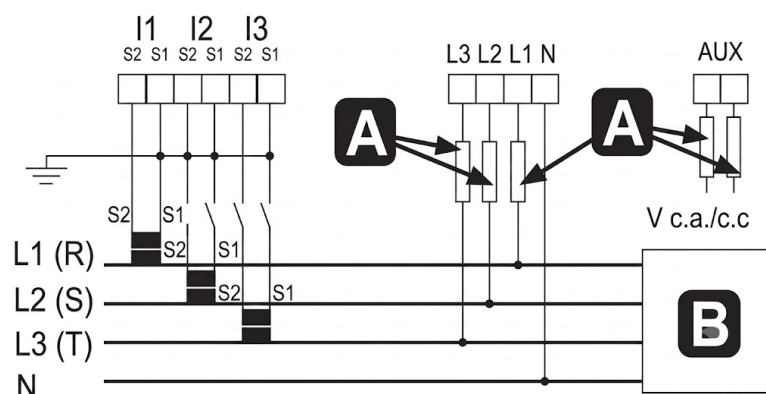


Figura 4. Conexión de los transformadores de corriente.

4.7 Procesamiento y evaluación de los registros

Los registros se transfirieron mediante Power Log, se ordenaron cronológicamente y se clasificaron en periodos de producción y baja demanda. Para evaluar los registros se adoptó 0.94 como límite de referencia; este valor se utilizó únicamente para clasificar el factor de potencia medido y no como objetivo del dimensionamiento.

4.7.1 Criterios derivados del diagnóstico para formular la propuesta

Mediante el diagnóstico se identificaron diferencias en la capacidad registrada de los bloques, anomalías en el circuito de medición y limitaciones en la respuesta del banco ante las variaciones de carga. Los hallazgos se sintetizaron en la Tabla 9.

Durante la baja demanda, las máquinas del proceso productivo permanecieron apagadas, mientras que la iluminación y las cargas auxiliares continuaron conectadas. En esta condición se registraron los valores más bajos del factor de potencia, como se evidenció en la Figura 8 y la Tabla 8. Paralelamente, el menor escalón disponible, de 10 kVAr, no permitió ajustar la compensación al requerimiento registrado.

Por esta razón, se estableció la incorporación de un escalón de menor capacidad, cuyo dimensionamiento se desarrolló en el apartado 4.8.

4.8 Cálculo de la compensación de potencia reactiva

En la Tabla 5 se reunieron los parámetros empleados para calcular la compensación durante la baja demanda, condición en la que las máquinas permanecieron apagadas y continuaron conectadas las cargas auxiliares.

La corriente de 17 A y el factor de potencia inicial de 0.80 (medido en baja demanda), procedieron de los registros; la tensión de 380 V y la frecuencia de 60 Hz correspondieron a los datos nominales. Para el cálculo se estableció 0.98 como factor de potencia objetivo.

Tabla 5: Parámetros considerados para el cálculo de compensación

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia nominal del transformador	S_n	300	kVA
Tensión secundaria	V_L	380	V
Frecuencia	f	60	Hz
Corriente medida (Planta fuera de producción)	I	17	A
Factor de potencia inicial	FP_1	0.80	
Factor de potencia deseado	FP_2	0.98	

A partir de los parámetros establecidos, inicialmente se determinó la potencia aparente correspondiente a la condición analizada:

$$S = \sqrt{3}V_L I \quad (4.3)$$

$$S = \sqrt{3}(380V)(17A)$$

$$S = 1.732 \times 380 \times 17$$

$$S = 11189VA$$

$$S = 11.19 \text{ kVA}$$

La potencia activa se calculó con el factor de potencia inicial:

$$P = S * FP \quad (4.4)$$

$$P = 11.19 \times 0.80$$

$$P = 8.95kW$$

La potencia reactiva correspondiente a la condición inicial se determinó mediante:

$$Q_1 = P \tan(\cos^{-1}(FP_1)) \quad (4.5)$$

$$\phi = \cos^{-1}(0.80) = 36.87^\circ$$

$$Q_1 = 8.95 \times \tan 36.87^\circ$$

$$Q_1 = 8.95 \times 0.75$$

$$Q_1 = 6.71 \text{ kVA}$$

Para el factor de potencia objetivo se calculó:

$$\phi_2 = \cos^{-1}(0.98) \quad (4.6)$$

$$\phi_2 = 11.48^\circ$$

$$Q_2 = P \tan 11.48^\circ$$

$$Q_2 = 8.95 \times 0.203$$

$$Q_2 = 1.82 \text{ kVAr}$$

La compensación requerida se determinó mediante:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (4.7)$$

$$Q_c = 6.71 - 1.82$$

$$Q_c = 4.89 \text{ kVAr}$$

Se calculó una compensación de 4.89 kVAr para elevar el factor de potencia de 0.80 a 0.98; por ello, se seleccionó el escalón comercial de 5 kVAr.

Validación analítica de la capacidad propuesta

El efecto del escalón de 5 kVAr se estimó con la potencia activa y la potencia reactiva de la condición de baja demanda.

Para estimar el efecto de esta capacidad, se calculó la potencia reactiva residual mediante la Ecuación (4.8):

$$Q_f = Q_1 - Q_c \quad (4.8)$$

Donde:

Q_1 : potencia reactiva inicial, en kVAr.

Q_c : capacidad del escalón seleccionado, en kVAr.

Q_f : potencia reactiva final después de la compensación, en kVAr.

Al sustituir los valores obtenidos:

$$Q_f = (6.71 - 5) \text{ kVAr}$$

$$Q_f = 1.71 \text{ kVAr}$$

Con la potencia activa de la condición evaluada y la potencia reactiva residual, se estimó el nuevo factor de potencia mediante la Ecuación (4.9):

$$FP_2 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_f^2}} \quad (4.9)$$

$$FP_2 = \frac{8.95 \text{ kW}}{\sqrt{8.95^2 + 1.71^2}}$$

$$FP_2 = 0.982$$

El cálculo determinó un factor de potencia estimado de 0.982, aproximadamente 0.98, después de incorporar el escalón de 5 kVAr. Este resultado corresponde a una validación analítica sustentada en los registros del Fluke 435-II.

Simulación de la capacidad de compensación propuesta en DIgSILENT PowerFactory

Se desarrolló un modelo en DIgSILENT PowerFactory para evaluar el comportamiento del sistema eléctrico con el escalón de 5 kVAr seleccionado mediante el cálculo analítico. La simulación reprodujo las condiciones de operación de la planta durante un día representativo, mediante características temporales de potencia activa y reactiva configuradas con intervalos de cinco minutos.

El modelo se estructuró a partir de los principales elementos del sistema eléctrico. La red de alimentación se representó mediante el External Grid, cuya configuración se presenta en la **Figura J.1 del ANEXO J**. El punto de conexión en media tensión se modeló mediante la BARRA MT - PCC 13.8 kV, como se muestra en la **Figura J.2 del ANEXO J**.

El transformador TR PLANTA DE PINTURA se configuró para representar la transformación del nivel de media tensión al sistema de 380 V, cuyos parámetros se presentan en la **Figura J.3 del ANEXO J**. En el lado de baja tensión se incorporó la BARRA PRINCIPAL 380 V, utilizada como punto de conexión de la carga y del capacitor, cuya configuración se muestra en la **Figura J.4 del ANEXO J**.

La demanda eléctrica se representó mediante la CARGA PLANTA PINTURA, a la cual se asignaron las características temporales de potencia activa y reactiva obtenidas de los registros eléctricos del día analizado. Su configuración se presenta en la **Figura J.5 del ANEXO J**. Finalmente, se incorporó el capacitor de 5 kVAr en la barra principal de 380 V para evaluar su

efecto sobre el factor de potencia durante los periodos de baja demanda; su configuración se muestra en la **Figura J.6 del ANEXO J**.

Una vez configurados los elementos, se ejecutó el flujo de carga para dos escenarios. En el primero se mantuvo desconectado el capacitor de 5 kVAr, estableciendo la condición inicial del sistema. En el segundo se conectó el escalón de compensación sin modificar los demás parámetros del modelo, de manera que la incorporación del capacitor constituyó la única diferencia entre las condiciones evaluadas.

La Figura 11 presenta la simulación sin compensación y la Figura 12 muestra la simulación con el capacitor de 5 kVAr conectado. La Tabla 14 compara el factor de potencia, la corriente y las potencias activa y reactiva obtenidas en ambos escenarios. El comportamiento diario del factor de potencia se presenta en el **ANEXO K**: la **Figura K.1 del ANEXO K** corresponde al escenario sin compensación y la **Figura K.2 del ANEXO K** al escenario con el capacitor de 5 kVAr conectado.

4.9 Dimensionamiento de los elementos

Los elementos de maniobra y protección se dimensionaron para verificar su compatibilidad con la reestructuración propuesta, conformada por seis escalones de 5, 10, 25, 25, 40 y 25 kVAr mediante la reutilización y la incorporación de capacitores de respaldo, como se presenta en las Tablas 10 y 11. Debido a la modificación de las capacidades y funciones de los bloques, se calcularon las corrientes de operación y se seleccionó los contactores e interruptores requeridos, cuyos valores se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Dimensionamiento de los elementos del banco de capacitores

Bloque	Potencia (kVAr)	Nº capacitores	Corriente c/u	Corriente nominal	Corriente de diseño (125%)	Interruptor 3 polos	Contactador (ac-6b)
1	5	5	7.6	7.6	9.5	16 A	10
2	10	10	15.2	15.2	19.0		
3	25	10	15.2	38.0	47.5	50 A	50
		15	22.8				
4	25	10	15.2	38.0	47.5	50 A	50
		15	22.8				
5	40	20	30.4	60.8	76.0	80 A	80
		20	30.4				
6	25	25	38.0	38.0	47.5		
		130					

4.10 Procedimiento para la evaluación económica de la propuesta

La evaluación económica se realizó para determinar la viabilidad de implementar la reestructuración del banco de capacitores. Para establecer la inversión requerida, se consideraron los elementos que deben adquirirse, cuyos precios referenciales se sustentan en la proforma presentada en el **ANEXO L**. Los costos de adquisición y el valor de los componentes que serán reutilizados se resumen en la Tabla 15. Como inversión inicial se consideró únicamente el desembolso correspondiente a la adquisición de los nuevos elementos, mientras que el valor de los componentes reutilizables se cuantificó como parte del aprovechamiento de los recursos existentes y no como una salida de efectivo.

Se utilizaron los siguientes parámetros:

- Inversión inicial: $I_0 = 1\,217.74\text{USD}$
- Flujo mensual estimado: $FC_m = 400 \frac{\text{USD}}{\text{mes}}$
- Horizonte: $n = 12 \text{ meses}$
- Tasa efectiva anual: $i_a = 12\%$
- Costos mensuales adicionales: 0 USD
- Valor residual: 0 USD

El flujo de 400 USD representa un escenario económico en el que se evita mensualmente una penalización de magnitud similar a la registrada por bajo factor de potencia. Por tanto, los resultados dependen de que este ahorro se mantenga durante los 12 meses evaluados.

Tasa mensual equivalente

$$i_m = (1 + i_a)^{\frac{1}{12}} - 1 \quad (4.10)$$

Al sustituir la tasa anual:

$$i_m = (1 + 0.12)^{\frac{1}{12}} - 1$$

$$i_m = 0.0094888$$

$$i_m = 0.9489 \% \text{ mensual}$$

Valor actual neto

Debido a que el flujo mensual es uniforme, el VAN se determinó mediante la expresión de valor presente de una serie uniforme:

$$VAN = -I_0 + FC_m \left[\frac{1 - (1 + i_m)^{-n}}{i_m} \right] \quad (4.11)$$

Como el valor residual fue igual a cero, se sustituyeron los valores restantes:

$$VAN = -1\,217.74 + 400 \left[\frac{1 - (1 + 0.0094888)^{-12}}{0.0094000} \right]$$

$$VAN = 3\,298.87 \text{ USD}$$

El VAN positivo indica que, bajo las condiciones consideradas, el valor actualizado de los ahorros supera la inversión inicial.

Tasa interna de retorno

La TIR corresponde a la tasa que hace que el VAN sea igual a cero:

$$0 = -I_0 + FC_m \left[\frac{1 - (1 + TIR)^{-n}}{TIR} \right] \quad (4.12)$$

Al sustituir la inversión, el flujo mensual y el horizonte:

$$0 = -1 + FC_m \left[\frac{1 - (1 + TIR)^{-12}}{TIR} \right]$$

Para resolver la ecuación se evaluaron dos tasas consecutivas. Con una tasa mensual de 31.60 % se obtuvo:

$$VAN_{31.60\%} = 1.17 \text{ USD}$$

Con una tasa mensual de 31.70 % se obtuvo:

$$VAN_{31.70\%} = -2.25 \text{ USD}$$

La TIR se determina mediante la interpolación:

$$TIR = i_1 + \frac{VAN_1}{VAN_1 - VAN_2} (i_2 - i_1) \quad (4.13)$$

$$TIR = 31.60 + \frac{1.17}{1.17 - (-2.25)} (31.70 - 31.60)$$

$$TIR = 31.63\%$$

La TIR obtenida supera la tasa de descuento mensual de 0.9489 %, por lo que la propuesta resulta económicamente viable dentro del escenario evaluado.

Periodo de recuperación

El periodo de recuperación se calculó mediante:

$$PR_e = \frac{I_0}{FC_m} \quad (4.14)$$

$$PR = \frac{1\,217.74}{400}$$

$$PR = 3.04 \text{ meses}$$

El resultado indica que la inversión equivale a aproximadamente 3.04 meses con ahorros de 400 USD. Este valor representa un periodo equivalente bajo el escenario proyectado y depende de la recurrencia de penalizaciones de magnitud similar. Los resultados del VAN, la TIR y el periodo de recuperación se resumen en la Tabla 16.

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del diagnóstico del banco de corrección del factor de potencia, el análisis de los parámetros eléctricos registrados y la evaluación técnica y económica de la propuesta de reestructuración.

5.1 Diagnóstico del banco de corrección del factor de potencia

En el diagnóstico se integraron la inspección del banco, la comparación de los equipos de medición y la revisión de los transformadores de corriente. Los hallazgos se sintetizaron en la Tabla 9.

5.1.1 Análisis del banco de capacitores

En la Tabla 7 se compararon la capacidad nominal y la capacidad registrada de los seis bloques del banco.

Tabla 7: Capacidad de los bloques del banco de capacitores

Bloques	Capacidad medida (kVAr)	Capacidad Nominal (kVAr)	Diferencia (kVAr)
Bloque 1	9.5	10	0.5
Bloque 2	13	15	2.0
Bloque 3	19.8	20	0.2
Bloque 4	23.7	25	1.3
Bloque 5	20	20	0.0
Bloque 6	13.4	15	1.6
	99.4	105	5.6

La capacidad nominal total del banco fue de 105 kVAr, mientras que la capacidad registrada alcanzó 99.4 kVAr, obteniéndose una diferencia total de 5.6 kVAr. Las mayores diferencias se presentaron en los bloques 2 y 6, con reducciones de 2.0 kVAr y 1.6 kVAr, respectivamente; el bloque 4 presentó una diferencia de 1.3 kVAr, mientras que en los bloques 1 y 3 las variaciones fueron menores. El bloque 5 mantuvo su capacidad nominal de 20 kVAr.

Estos resultados evidenciaron una reducción de la capacidad disponible respecto al valor nominal del banco, condición que fue considerada posteriormente en el diagnóstico y en la formulación de la propuesta de reestructuración.

5.2 Análisis del sistema de medición

La comparación de las lecturas obtenidas mediante el analizador de panel DUCATI DUCA-LCD96 y el analizador de redes Fluke 435-II, junto con la verificación de los transformadores de corriente, permitió evaluar el sistema de medición instalado en el tablero principal. El registro de las actividades realizadas se presenta en el ANEXO I.

5.2.1 Comparación de las lecturas del controlador DUCATI DUCA-LCD96 y el analizador Fluke 435-II

Las lecturas simultáneas registradas por el DUCATI DUCA-LCD96 y el Fluke 435-II presentaron diferencias en los valores de corriente, potencia reactiva y factor de potencia. La comparación realizada entre ambos equipos se presenta en la **Figura I.1 del ANEXO I**.

La revisión de los parámetros configurados en el DUCATI DUCA-LCD96 permitió comprobar la relación de transformación y la correspondencia de fases establecidas para el sistema de medición. Al no identificarse inconsistencias en estos parámetros, la evaluación se orientó posteriormente hacia el circuito secundario y las conexiones de los transformadores de corriente.

5.2.2 Análisis de los transformadores de corriente

Los transformadores de corriente instalados en el tablero principal presentaron una relación de 1500/5 A, equivalente a un factor de transformación de 300, una potencia nominal de 10 VA y una clase de precisión de 0.5. Los TC evaluados se presentan en la **Figura I.2 del ANEXO I**.

La verificación del circuito secundario permitió comprobar la continuidad, la identificación de los terminales S1–S2 y la correspondencia de fases, conforme al procedimiento documentado en la **Figura I.3 del ANEXO I** y al esquema de conexión presentado en la Figura 4.

Durante esta revisión se identificaron conexiones inadecuadas en el circuito de los TC, las cuales afectaban las señales recibidas por el analizador de panel DUCATI DUCA-LCD96. Una vez corregidas las conexiones, se obtuvo una mayor correspondencia entre las lecturas registradas por el DUCATI y las obtenidas mediante el Fluke 435-II.

5.3 Análisis de las cargas instaladas

A partir del levantamiento de cargas presentado en la Tabla 3, se determinó una potencia instalada total de 193.634 kW. Este valor corresponde a la suma de las potencias de las cargas identificadas y no representa una condición de funcionamiento simultáneo de todos los equipos. Las características nominales empleadas para el levantamiento se obtuvieron mediante la inspección y lectura de los datos de placa de los equipos, cuyo registro fotográfico se presenta en el **ANEXO G**.

5.4 Análisis de los parámetros eléctricos

Se analizaron los 2002 registros obtenidos mediante el analizador de redes Fluke 435-II, considerando la tensión, corriente, potencia activa y factor de potencia. Las Figuras 5 a 9 presentan el comportamiento de estas variables durante un día representativo, mientras que los registros correspondientes al periodo completo de siete días se presentan en las Figuras M.1 a M.5 del **ANEXO M**.

5.4.1 Análisis de la tensión

La Figura 5 presenta el comportamiento de las tensiones RMS línea-línea durante un día representativo de medición.

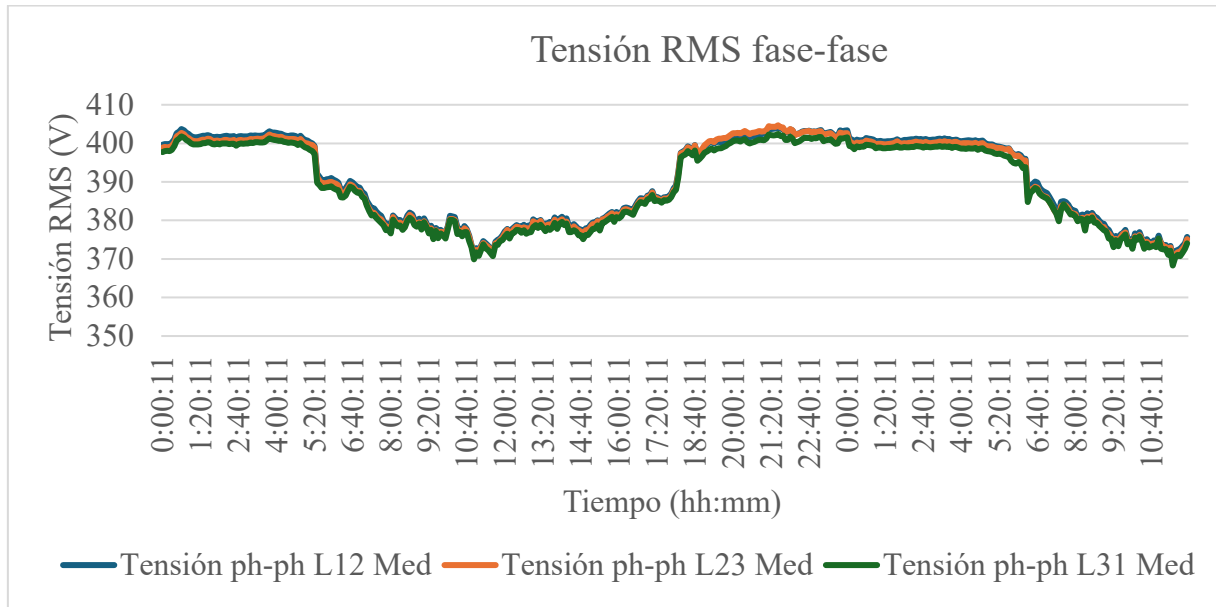


Figura 5. Comportamiento de la tensión RMS línea-línea durante un día representativo de medición.

En la Figura 5 se presentó el comportamiento de la tensión RMS fase-fase durante un día representativo. Las tensiones L1-L2, L2-L3 y L3-L1 mostraron tendencias similares, con valores promedio de 391.73 V, 391.32 V y 390.29 V, respectivamente. Durante la baja demanda se registraron valores cercanos a 400 V, mientras que en producción estable disminuyeron aproximadamente a 380 V, en correspondencia con el incremento de la corriente y la potencia activa demandada.

La proximidad entre las tres tensiones evidenció una alimentación relativamente equilibrada. Por consiguiente, las variaciones del factor de potencia se relacionaron principalmente con las condiciones de carga y la respuesta del sistema de compensación, y no con diferencias significativas de tensión entre fases. Los registros del periodo completo de medición se presentaron en la **Figura M.1 del ANEXO M**.

5.4.2 Análisis de la corriente

La Figura 6 presenta el comportamiento de las corrientes L1, L2 y L3 durante un día representativo de medición.

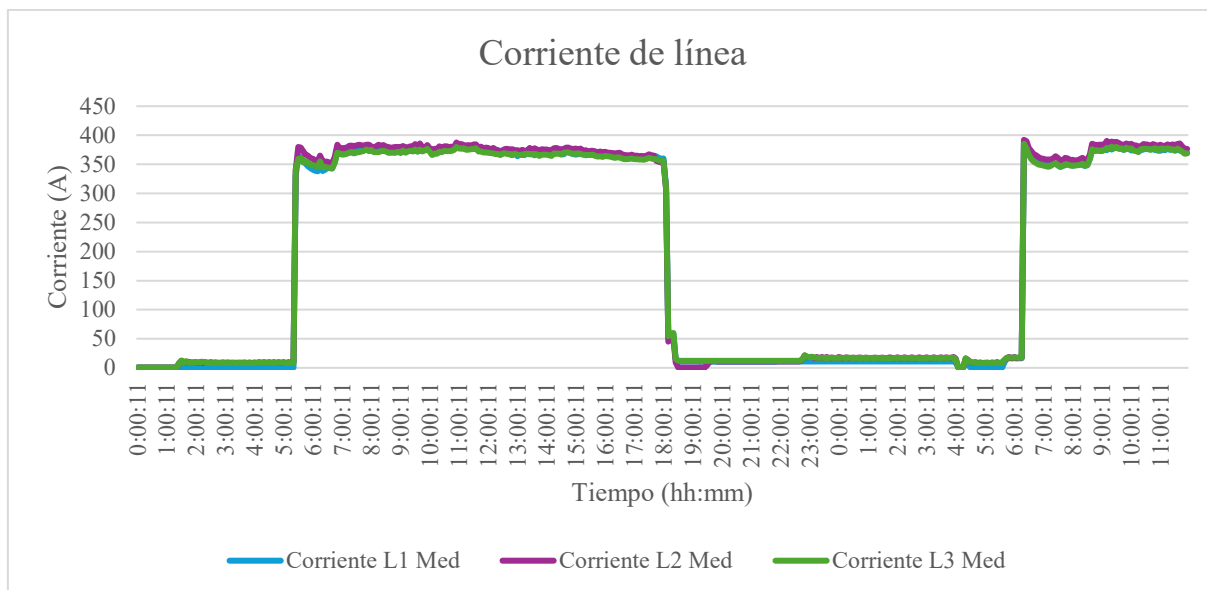


Figura 6. Comportamiento de la corriente eléctrica en las líneas de alimentación de la planta de pintura

Durante la condición de baja demanda se registraron niveles reducidos de corriente; posteriormente, con la incorporación de las cargas del proceso productivo, las corrientes aumentaron hasta alcanzar un régimen relativamente estable.

Durante el periodo completo de medición se obtuvieron valores promedio de 160.72 A en L1, 163.75 A en L2 y 161.09 A en L3. Al considerar únicamente la producción estable, los promedios aumentaron a 366.86 A, 373.08 A y 365.46 A, respectivamente, mientras que los valores máximos alcanzaron 392.20 A, 392.70 A y 391.70 A. La proximidad de los valores registrados en las tres fases evidenció una distribución relativamente uniforme de la carga durante la producción. El comportamiento de las corrientes durante el periodo completo de medición se presenta en la **Figura M.2 del ANEXO M**.

5.4.3 Análisis de la Potencia Activa

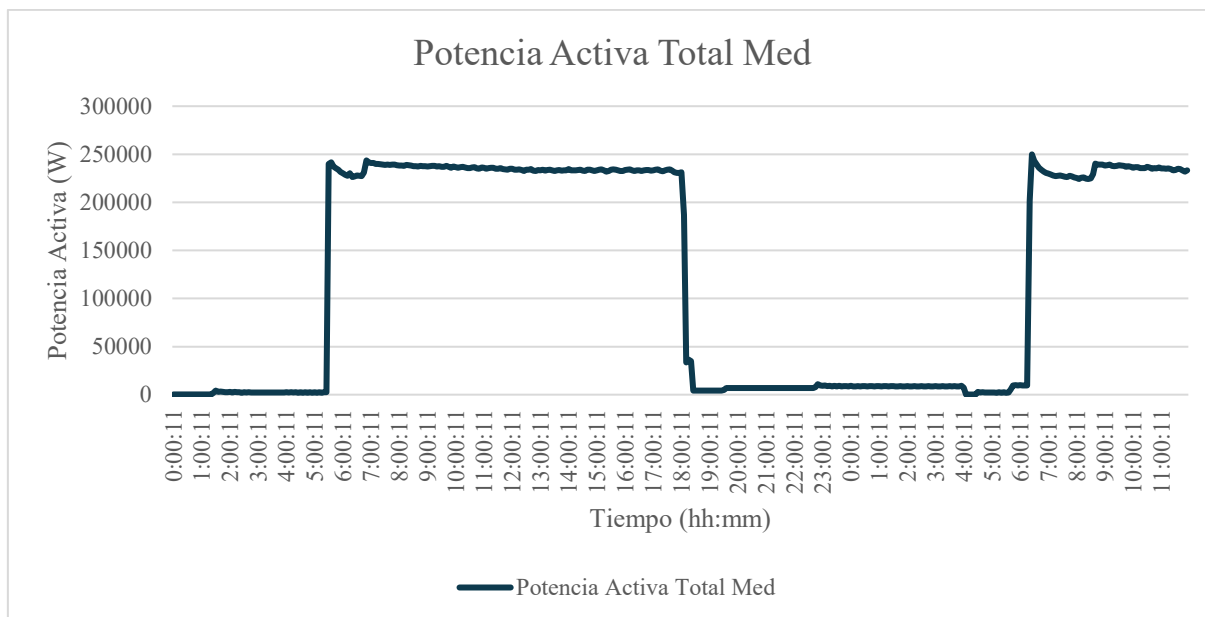


Figura 7. Variación de la potencia activa demandada por la planta de pintura durante la jornada de producción

En la Figura 7 se presentó el comportamiento de la potencia activa total durante un día representativo. En la condición de baja demanda se registraron valores reducidos; posteriormente, con la conexión de las cargas del proceso productivo, se observó un incremento hasta alcanzar un régimen de producción estable.

En los 2002 registros del periodo completo, la potencia activa varió entre 0.15 kW y 249.87 kW, con un promedio general de 101.58 kW. Debido a que este valor incluyó condiciones de producción y baja demanda, se analizaron por separado los registros de producción estable, en los cuales se obtuvo un promedio de 233.61 kW. Este resultado evidenció que la potencia instalada determinada en el levantamiento de cargas no operó simultáneamente. El comportamiento de la potencia activa durante el periodo completo de medición se presenta en la **Figura M.3 del ANEXO M**.

5.4.4 Análisis del factor de potencia

El factor de potencia se evaluó de forma total y por fase mediante los registros obtenidos con el Fluke 435-II. Las Figuras 8 y 9 presentan el comportamiento durante un día representativo, mientras que las Figuras M.4 y M.5 del ANEXO M muestran su comportamiento durante el periodo completo de medición.

5.4.4.1 Factor de potencia total

La Figura 8 presenta el comportamiento del factor de potencia total durante un día representativo de operación. Para facilitar su interpretación se incorpora como referencia el

valor de 0.94, permitiendo diferenciar visualmente los periodos en los que el factor de potencia se encuentra por debajo o por encima de este valor.

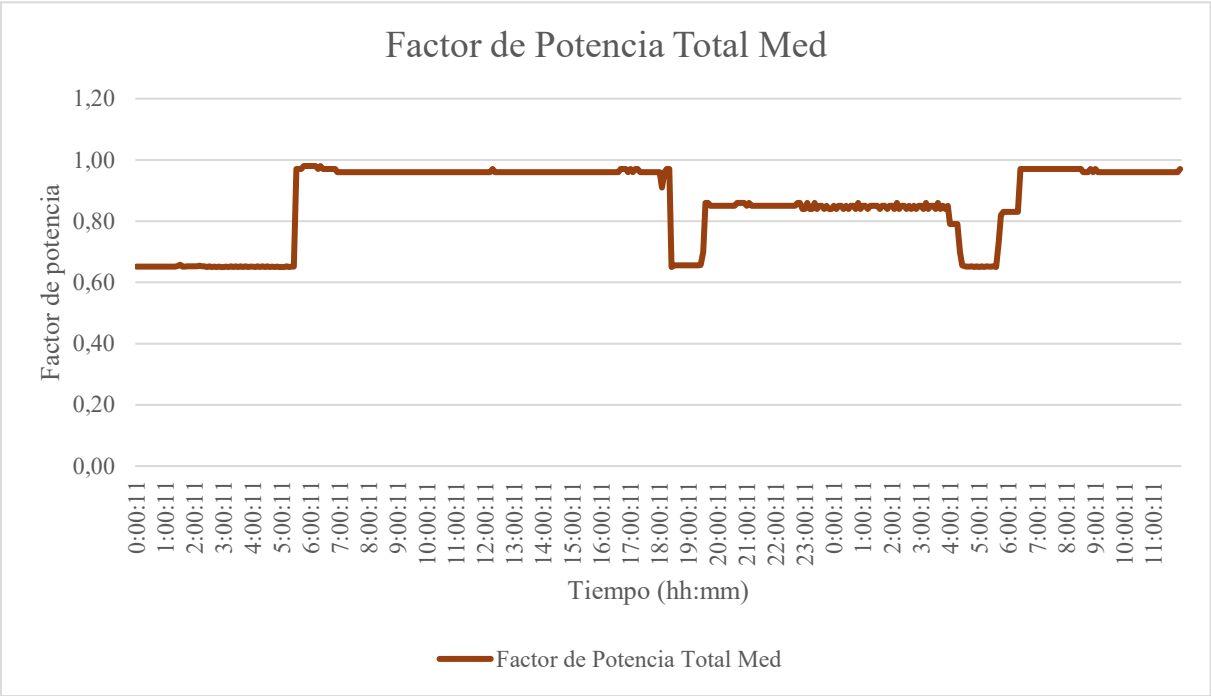


Figura 8. Comportamiento del factor de potencia total durante un día

En la gráfica se observó una diferencia entre los periodos de baja demanda y aquellos correspondientes al funcionamiento productivo de la planta. Durante las condiciones de menor carga se registraron los valores más bajos de factor de potencia; posteriormente, con el ingreso de las cargas asociadas al proceso productivo, el factor de potencia aumentó y presentó un comportamiento más estable.

Con el propósito de complementar el análisis del día representativo, se realizó una evaluación estadística de los 2002 registros correspondientes al periodo completo de medición. Los resultados se presentan en la Tabla 8, mientras que el comportamiento temporal del factor de potencia total durante los siete días se muestra en la Figura M.4 del ANEXO M.

Tabla 8: Análisis estadístico del factor de potencia total durante el periodo de medición

Indicador	Resultado
Número de registros analizados	2002
Factor de potencia promedio	0.864
Factor de potencia mínimo	0.65

Factor de potencia máximo	0.98
Registros con $FP < 0.94$	1147
Registros con $FP \geq 0.94$	854
Porcentaje de registros con $FP < 0.94$	57.32 %

El factor de potencia total varió entre 0.65 y 0.98, con un promedio de 0.864. De los 2001 registros válidos, 1 147 (57.32 %) se encontraron por debajo de 0.94 y 854 fueron iguales o superiores a dicho valor, como se indicó en la Tabla 8.

En baja demanda, cuando las máquinas permanecieron apagadas y continuaron conectadas cargas auxiliares como la iluminación, el promedio fue 0.79; durante la producción estable alcanzó 0.963. Esta diferencia sustentó el cálculo del escalón para la condición de menor carga. El comportamiento del factor de potencia total correspondiente al periodo completo de medición se presenta **en la Figura M.4 del ANEXO M.**

5.4.4.2 Factor de potencia por fase

La Figura 9 presenta el comportamiento del factor de potencia por fase durante un día representativo de medición.

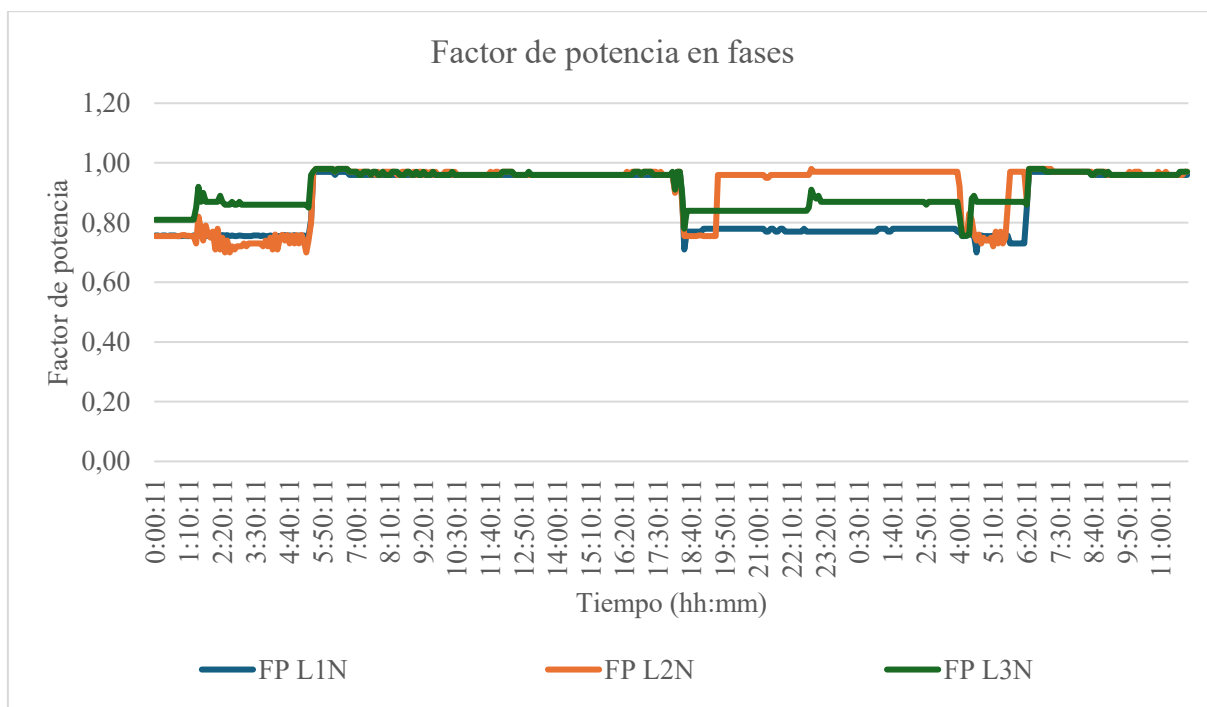


Figura 9. Comportamiento del factor de potencia por fase durante un día representativo de medición

Durante los periodos de baja demanda se registraron valores aproximados de 0.65 en L1, 0.72 en L2 y 0.85 en L3, evidenciándose diferencias entre las tres fases. En esta condición permanecieron conectadas principalmente la iluminación y las cargas auxiliares, mientras que las máquinas asociadas al proceso productivo se encontraban fuera de operación.

Con el inicio de la producción y la actuación del banco de capacitores, el factor de potencia aumentó hasta valores comprendidos entre 0.97 y 0.98 en las tres fases. Estos valores superaron el límite de referencia de 0.94 y presentaron una menor diferencia entre fases respecto a la condición de baja demanda.

Los resultados evidenciaron que el bajo factor de potencia no se presentó de manera permanente durante la operación de la planta, sino que se concentró principalmente en los periodos de menor carga. Por esta razón, el factor de potencia total permitió evaluar el comportamiento global del sistema, mientras que el análisis por fase permitió identificar las diferencias existentes entre L1, L2 y L3. El comportamiento del factor de potencia por fase durante el periodo completo de medición se presenta en la **Figura M.5 del ANEXO M**.

5.5 Fallas identificadas durante el diagnostico

Mediante la inspección técnica del banco de capacitores, la comparación de las lecturas del analizador de panel DUCATI DUCA-LCD96 con el analizador de redes Fluke 435-II, la verificación de los transformadores de corriente y el análisis de los registros eléctricos, se determinaron las condiciones que afectaban el funcionamiento del sistema de compensación. Los principales hallazgos y sus respectivas evidencias se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Fallas identificadas durante el diagnóstico del banco de capacitores

Elemento evaluado	Falla identificada	Evidencia	Incidencia sobre el sistema
Bloques de capacitores	Reducción de 5.6 kVAr respecto a la capacidad nominal total.	Tabla 7	Disminución de la capacidad disponible del banco
Sistema de medición	Diferencias entre las lecturas del DUCATI DUCA-LCD96 y el Fluke 435-II	Figura I.1 del ANEXO I	Lecturas que no correspondían con los valores registrados por el equipo de referencia
Transformadores de corriente	Conexiones inadecuadas en el	Figura 4 y Figuras I.2 e	Alteración de las señales recibidas por el analizador

	circuito secundario de los TC	I.3 del ANEXO I	de panel DUCATI DUCA-LCD96
Configuración de escalones	Ausencia de un escalón inferior a 10 kVAr	Tabla 7	Limitación de la regulación del banco ante condiciones de baja demanda
Respuesta del sistema de compensación	Factor de potencia inferior a 0.94 durante los periodos de baja demanda	Figura 8 y Tabla 8	Compensación insuficiente para las condiciones de menor carga

Los resultados evidenciaron que el desempeño del sistema de compensación estuvo condicionado por la reducción de la capacidad disponible de los capacitores, las conexiones del circuito secundario de los transformadores de corriente y la ausencia de un escalón de menor capacidad para responder a los periodos de baja demanda. Asimismo, las diferencias inicialmente registradas entre el DUCATI DUCA-LCD96 y el Fluke 435-II estuvieron relacionadas con las condiciones identificadas en el circuito de medición.

A partir de estos hallazgos se formuló la reestructuración del banco de capacitores, considerando la incorporación de un escalón de menor capacidad para atender las condiciones de baja demanda y la redistribución de los capacitores para disponer de unidades de respaldo. La configuración propuesta y los elementos requeridos se presentan en el apartado siguiente.

5.6 Propuesta de reestructuración del banco de capacitores

A partir de las fallas identificadas durante el diagnóstico y del comportamiento del factor de potencia registrado, se propuso la reestructuración del banco automático de capacitores. La propuesta consideró la incorporación de un escalón de menor capacidad para atender los periodos de baja demanda, la redistribución de los capacitores existentes y la disponibilidad de escalones de respaldo para mantener la capacidad de compensación ante la indisponibilidad de uno de los bloques principales.

5.6.1 Distribución funcional de los bloques

La reestructuración propuesta estableció una capacidad nominal total de 130 kVAr, distribuida en seis bloques. El primer bloque de 5 kVAr se destinó a la compensación durante condiciones de baja demanda; los bloques de mayor capacidad se asignaron a la compensación durante la

operación productiva y los bloques 2 y 6 se consideraron como respaldo operativo. La distribución y función de cada bloque se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Reestructuración propuesta del banco de capacitores

Bloque	Capacidad	Configuración	Función
Bloque 1	5 kVAr	1*5 kVAr	Compensación en baja carga
Bloque 2	10 kVAr	1*10 kVAr	Escalón de respaldo
Bloque 3	25 kVAr	10+15 kVAr	Escalón de compensación
Bloque 4	25 kVAr	10+15 kVAr	Escalón de compensación
Bloque 5	40 kVAr	20+20 kVAr	Escalón de compensación
Bloque 6	25 kVAr	1*25 kVAr	Escalón de respaldo
Total	130 kVAr		

La disposición de los bloques y su integración dentro del banco automático de capacitores se presenta en el diagrama unifilar del **ANEXO N**.

5.6.2 Distribución de componentes existentes y requeridos

Con base en la evaluación de los capacitores existentes presentada en la Tabla 7, se estableció su redistribución entre los bloques propuestos y se determinaron las unidades adicionales requeridas para completar la configuración. La conformación y procedencia de los capacitores de cada bloque se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11: Distribución de capacitores para la reestructuración del banco

Bloque	Capacidad propuesta	Conformación	Condición
Bloque 1	5 kVAr	5 kVAr	Adquirir
Bloque 2	10 kVAr	10 kVAr	Reutilizar
Bloque 3	25 kVAr	10 + 15 kVAr	Adquirir + reutilizar
Bloque 4	25 kVAr	10 + 15 kVAr	Adquirir + reutilizar
Bloque 5	40 kVAr	20 + 20 kVAr	Reutilizar
Bloque 6	25 kVAr	25 kVAr	Reutilizar
Total	130 kVAr		

Como se observa en la Tabla 11, la propuesta permite reutilizar los capacitores existentes de 10, 15, 15, 20, 20 y 25 kVAr, equivalentes a una capacidad nominal de 105 kVAr. Para completar la nueva distribución se requiere adquirir un capacitor de 5 kVAr y dos capacitores de 10 kVAr, correspondientes a 25 kVAr adicionales.

De esta manera, el banco queda conformado por seis bloques de 5, 10, 25, 25, 40 y 25 kVAr, alcanzando una capacidad nominal total de 130 kVAr y aprovechando los capacitores disponibles en la instalación.

5.7 Evaluación técnica de la propuesta

La evaluación técnica se sustentó en los resultados del diagnóstico y en los parámetros eléctricos registrados. Se identificó una menor capacidad respecto al valor nominal del banco y una reducción del factor de potencia durante la baja demanda, lo que evidenció la necesidad de adaptar el escalonamiento a las variaciones de carga.

La propuesta mantuvo el funcionamiento automático y los seis escalones existentes, pero modificó su distribución para incorporar una capacidad adecuada para la baja demanda y unidades de respaldo. En la Tabla 12 se compararon las características del banco actual y de la configuración propuesta.

Tabla 12: Comparación entre la configuración actual y propuesta del banco de capacitores

Característica	Banco actual	Banco propuesto
Número de escalones	6	6
Capacidad nominal total	105 kVAr	130 kVAr
Capacidad registrada	99.4 kVAr	No aplica
Distribución de escalones	10, 15, 20, 25, 20 y 15 kVAr	5, 10, 25, 25, 40 y 25 kVAr
Menor escalón disponible	10 kVAr	5 kVAr
Respuesta para baja demanda	Limitada por el escalonamiento existente	Escalón inicial de 5 kVAr
Escalones de respaldo	No establecidos específicamente	10 y 25 kVAr
Funcionamiento	Automático	Automático

Capacidad de respaldo	No establecida específicamente	Incorporada en la distribución propuesta
-----------------------	--------------------------------	--

La comparación evidenció que la propuesta conservó el principio de operación automática del banco y modificó la distribución de los escalones para responder a las condiciones de carga identificadas y disponer de capacidad de respaldo. La capacidad del escalón de 5 kVAr, destinado a la compensación durante los periodos de baja demanda, se evaluó mediante validación analítica y simulación en DlgSILENT PowerFactory.

5.7.1 Evaluación de la compensación requerida

La capacidad de compensación se evaluó considerando las condiciones de baja demanda y producción identificadas durante la campaña de medición.

Durante la baja demanda se registró un factor de potencia promedio de 0.79. Para el dimensionamiento se adoptó un valor de 0.80 como condición representativa, evitando utilizar valores mínimos asociados a intervalos puntuales. Mediante el cálculo se determinó un requerimiento de compensación de 4.89 kVAr para alcanzar un factor de potencia de 0.98, por lo que se seleccionó un escalón comercial de 5 kVAr.

Durante la producción se registró una potencia reactiva trifásica cercana a 70 kVAr y un factor de potencia comprendido entre 0.97 y 0.98. Debido a la variación de la demanda reactiva, la capacidad propuesta se distribuyó en escalones automáticos, permitiendo su incorporación progresiva de acuerdo con las condiciones de operación del sistema.

Tabla 13: Evaluación de la capacidad de compensación propuesta

Condición de operación	Requerimiento identificado	Escalones disponibles	Criterio de operación
Baja demanda	4.89 kVAr	5 kVAr	Compensación de la demanda reactiva durante los periodos de baja demanda
Producción	70 kVAr	25, 25 y 40 kVAr	Incorporación progresiva de los escalones de acuerdo con la demanda reactiva
Respaldo operativo	Según condición del banco	10 y 25 kVAr	Disponibilidad de capacidad ante la indisponibilidad de alguno de los escalones principales

Capacidad total propuesta	130 kVAr	Seis escalones	Capacidad instalada total, sin requerir la conexión simultánea de todos los escalones
---------------------------	----------	----------------	---

Como se observa en la Tabla 13, para la condición de baja demanda se determinó un requerimiento de 4.89 kVAr, cubierto mediante el escalón seleccionado de 5 kVAr. Los escalones de 25, 25 y 40 kVAr se destinaron a responder a las condiciones de producción, mientras que los escalones de 10 y 25 kVAr se establecieron como respaldo operativo.

5.7.2 Validación analítica del escalón 5kVAr

La validación analítica, desarrollada mediante las Ecuaciones (4.8) y (4.9), estimó el efecto del escalón de 5 kVAr sobre la condición representativa de baja demanda.

Con $P = 8.95$ kW, $Q = 6.71$ kVAr y $Q_c = 5$ kVAr, se estimó un factor de potencia de 0.982, equivalente a 0.98 al expresarlo con dos decimales. En la Figura 10 se compararon los valores iniciales y estimados.

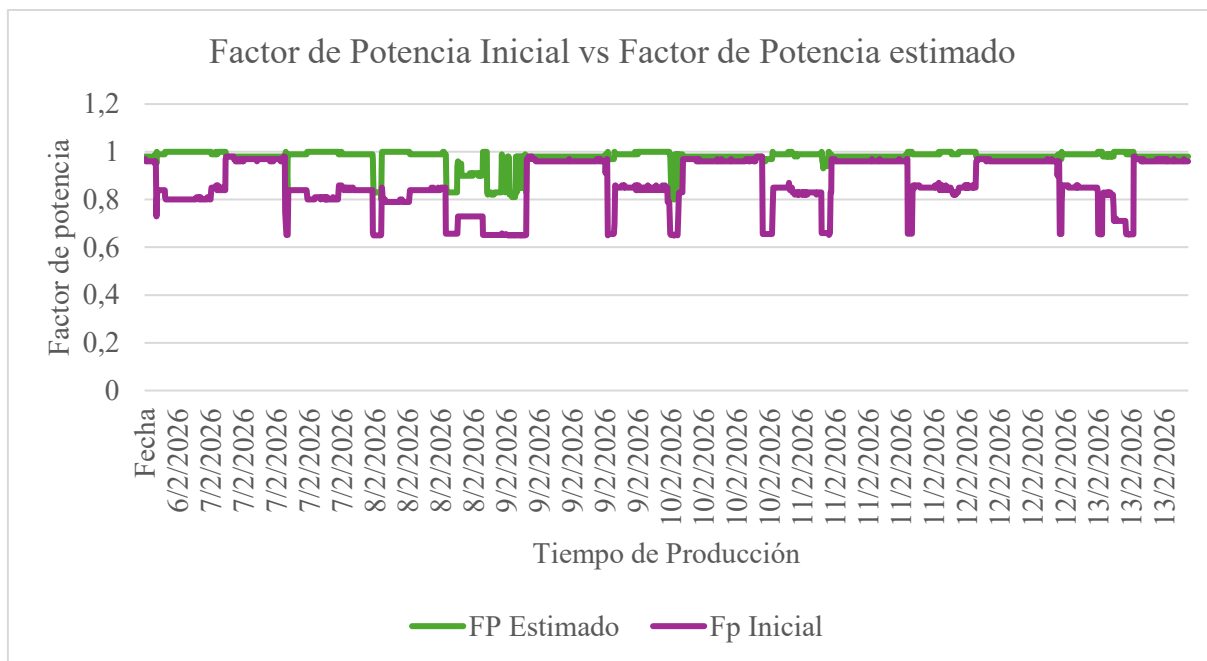


Figura 10. Comparación del factor de potencia inicial y estimado con la incorporación del escalón de 5 kVAr

Los resultados evidenciaron que el escalón de 5 kVAr respondió al requerimiento de compensación determinado para la condición de baja demanda. Su incorporación permitió elevar el factor de potencia estimado hasta 0.98, mientras que en los intervalos donde el factor de potencia inicial se aproximó a la unidad, el efecto de la compensación fue menor.

El comportamiento del factor de potencia inicial y estimado durante el periodo analizado se presenta en la **Figura M.6 del ANEXO M**, complementando la evaluación analítica del escalón seleccionado.

5.7.3 Validación de la propuesta mediante simulación en DigSILENT PowerFactory

La simulación se ejecutó para un día representativo, con intervalos de 5 minutos y condiciones de producción y baja demanda. Para comparar el efecto del escalón propuesto se seleccionó la condición de las 19:00 h, caracterizada por una potencia activa de 8.95 kW y una potencia reactiva de 6.71 kVAr. Se mantuvieron los parámetros de la carga y se modificó únicamente la conexión del capacitor de 5 kVAr.

En la Figura 11 se presentó el escenario sin compensación y en la Figura 12 el escenario con el capacitor conectado. Los resultados obtenidos se compararon en la Tabla 14.

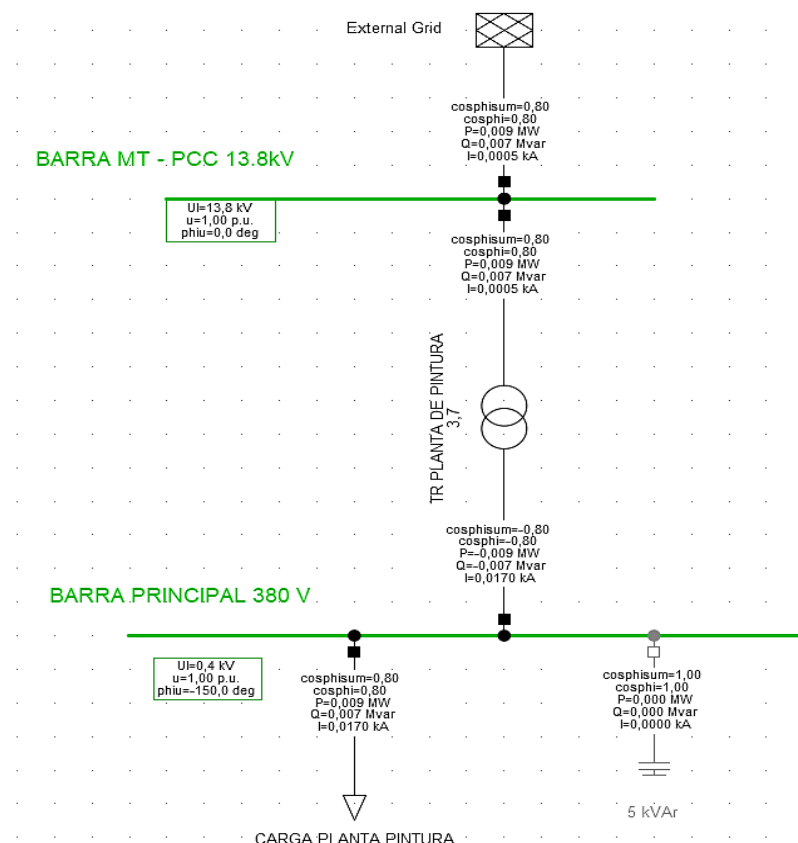


Figura 11. Simulación del sistema a las 19:00 h sin la incorporación del capacitor de 5 kVAr

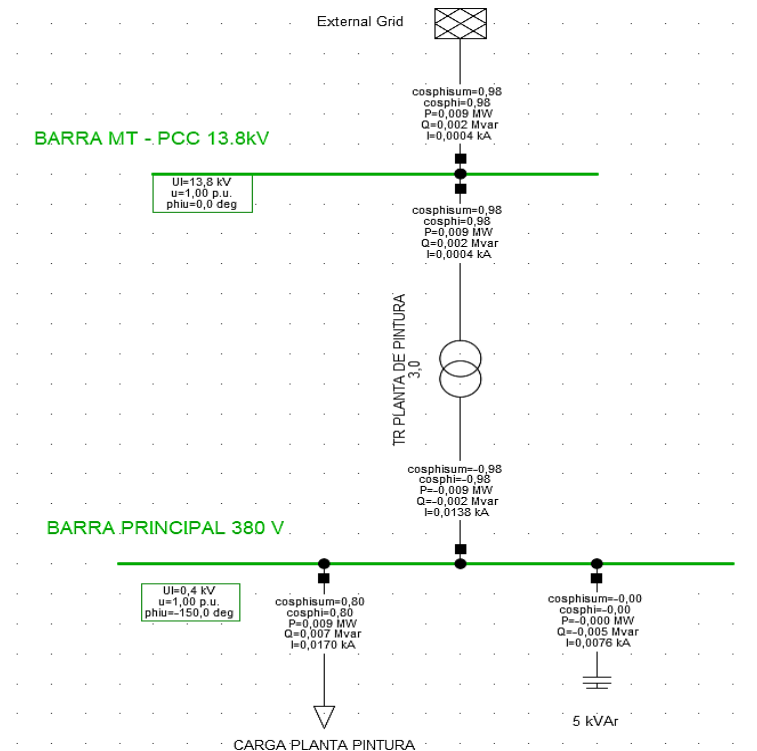


Figura 12. Simulación del sistema a las 19:00 h con la incorporación del capacitor de 5 kVAr

En el escenario sin compensación, la potencia reactiva solicitada a la red fue de 6.71 kVAr, con un factor de potencia de 0.80 y una corriente de 17.0 A. Al incorporar el capacitor de 5 kVAr, la potencia reactiva solicitada a la red disminuyó a 1.71 kVAr, el factor de potencia observado desde el punto de alimentación aumentó a 0.98 y la corriente se redujo a 13.8 A. Los resultados obtenidos para ambos escenarios se comparan en la Tabla 14.

Tabla 14. Comparación de los escenarios simulados con y sin el capacitor de 5 kVAr

Parámetro	Sin capacitor de 5 kVAr	Con capacitor de 5 kVAr
Condición simulada	Baja demanda	Baja demanda
Tensión en la barra principal	0.38 kV	0.38 kV
Potencia activa de la carga	8.95 kW	8.95 kW
Potencia reactiva de la carga	6.71 kVAr	6.71 kVAr
Factor de potencia de la carga	0.80	0.80
Potencia reactiva solicitada a la red	6.71 kVAr	1.71 kVAr
Factor de potencia observado desde la red	0.80	0.98
Corriente	17.0 A	13.8 A

Los resultados evidenciaron que el escalón de 5 kVAr redujo la potencia reactiva solicitada a la red de 6.71 kVAr a 1.71 kVAr, incrementó el factor de potencia de 0.80 a 0.98 y disminuyó la corriente de 17.0 A a 13.8 A, manteniendo constantes las condiciones de la carga. Estos resultados validaron mediante simulación la capacidad seleccionada para la condición de baja demanda. El comportamiento diario simulado sin y con compensación se presenta en las Figuras K.1 y K.2 del ANEXO K, respectivamente.

5.8 Evaluación económica de la propuesta

En la evaluación económica se consideraron los componentes reutilizables, la inversión requerida y un ahorro mensual estimado de 400 USD por penalización evitada. Los costos se presentaron en la Tabla 15 y los indicadores económicos en la Tabla 16.

5.8.1 Inversión requerida

Para determinar la inversión se diferenciaron los componentes disponibles para reutilización de aquellos que deben adquirirse. Los precios de los nuevos elementos se sustentaron en la proforma presentada en el **ANEXO L**, mientras que la distribución económica de los componentes se resume en la Tabla 15.

Tabla 15: Evaluación económica de los componentes considerados en la propuesta

Concepto	Valor (USD)	Participación
Elementos a adquirir	1 217.74	38.18 %
Elementos a reutilizar	1 971.96	61.82 %
Valor total de los componentes	3 189.70	100 %

De un valor referencial de 3 189.70 USD, se reutilizaron componentes valorados en 1 971.96 USD (61.82 %) y se determinó una inversión de 1 217.74 USD (38.18 %). La reutilización de los componentes existentes permitió reducir el desembolso requerido para la reestructuración propuesta.

5.8.2 Análisis de las penalizaciones y periodo de recuperación

Para la evaluación se consideró una inversión inicial de 1 217.74 USD, correspondiente únicamente a los elementos que deben adquirirse, y un ahorro mensual estimado de 400 USD, asociado a la penalización por bajo factor de potencia. Además, se estableció un horizonte de

análisis de 12 meses y una tasa efectiva anual de 12 %. Mediante las Ecuaciones (4.10) a (4.14) se obtuvo una tasa mensual equivalente de 0.9489 % y se determinaron los indicadores económicos presentados en la Tabla 16.

Los resultados del VAN, la TIR mensual y el periodo de recuperación se presentaron en la Tabla 16.

$$PR_e = \frac{1217.74\$}{400 \frac{\$}{mes}}$$

$$PR_e = 3.04 \text{ meses penalizados}$$

Se obtuvo un VAN de 3 298.87 USD, una TIR mensual de 31.63 % y un periodo de recuperación simple de 3.04 meses. Estos resultados indicaron viabilidad bajo el supuesto de mantener el ahorro mensual durante los 12 meses evaluados.

Tabla 16: Relación entre la inversión requerida y las penalizaciones

Indicador	Valor
Inversión inicial, I_0	1 217.74 USD
Flujo mensual estimado, FC_m	400.00 USD/mes
Horizonte, n	12 meses
Tasa efectiva anual, i_a	12.00 %
Tasa mensual equivalente, i_m	0.9489 %
Valor actual neto, VAN	3 298.87 USD
Tasa interna de retorno mensual, TIR	31.63 %
Periodo de recuperación simple, PR	3.04 meses

Los resultados mostraron un VAN de 3 298.87 USD, una TIR mensual de 31.63 % y un periodo de recuperación simple de 3.04 meses. Bajo las condiciones consideradas, estos indicadores evidenciaron la viabilidad económica de la propuesta y una recuperación de la inversión cercana a tres meses, considerando el ahorro mensual estimado por penalización evitada.

Los resultados económicos están asociados al ahorro mensual de 400 USD considerado en el análisis; por tanto, una variación de este valor modificaría los indicadores obtenidos.

5.9 Discusión de resultados

El diagnóstico evidenció que el desempeño del sistema estuvo relacionado con la reducción de 5.6 kVAr respecto a la capacidad nominal del banco, las conexiones inadecuadas de los transformadores de corriente y la limitada adaptación de los escalones ante las variaciones de carga. Estos hallazgos se sintetizaron en la Tabla 9, mientras que la comparación entre el DUCATI DUCA-LCD96 y el Fluke 435-II, junto con la verificación de los TC, se presenta en el **ANEXO I**.

El análisis de los parámetros eléctricos mostró que la condición crítica del factor de potencia se concentró durante la baja demanda, con un promedio de 0.79, mientras que durante la producción alcanzó valores entre 0.97 y 0.98. Este comportamiento indicó que la necesidad de compensación no fue constante, sino dependiente de las condiciones de carga de la planta. Los registros correspondientes al periodo completo se presentan en el **ANEXO M**.

Para la condición de baja demanda se determinó un requerimiento de compensación de 4.89 kVAr, lo que justificó la selección de un escalón comercial de 5 kVAr. La propuesta estableció una capacidad total de 130 kVAr, distribuida en seis escalones de 5, 10, 25, 25, 40 y 25 kVAr, incorporando escalones destinados a la compensación y al respaldo operativo.

La validación analítica determinó un factor de potencia de 0.982, mientras que la simulación en DigSILENT PowerFactory obtuvo 0.98 para la condición evaluada. Además, la potencia reactiva solicitada a la red disminuyó de 6.71 kVAr a 1.71 kVAr y la corriente de 17.0 A a 13.8 A, respaldando técnicamente la capacidad seleccionada. El comportamiento diario de los escenarios simulados se presenta en el **ANEXO K**.

La redistribución propuesta permitió aprovechar los capacitores existentes e incorporar capacidad de respaldo ante la indisponibilidad de alguno de los escalones principales. De esta manera, la propuesta no se fundamentó únicamente en incrementar la capacidad nominal del banco, sino en mejorar su adaptación a las diferentes condiciones de operación identificadas durante el diagnóstico.

Finalmente, la reutilización de componentes redujo la inversión requerida a 1 217.74 USD, equivalente al 38.18 % del valor referencial de los componentes considerados. Bajo un ahorro mensual estimado de 400 USD, se obtuvo un periodo de recuperación de 3.04 meses, lo que sustentó la viabilidad económica de la reestructuración propuesta

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La revisión de la normativa técnica aplicable, considerando los criterios establecidos en la Regulación Nro. ARCERNNR 002/20, permitió definir los parámetros para la evaluación del sistema eléctrico y del banco de corrección del factor de potencia. Se consideraron variables como factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva y corriente eléctrica, las cuales permitieron establecer los criterios técnicos utilizados durante el diagnóstico y análisis de las condiciones de operación de la planta de pintura.
- El diagnóstico evidenció que el factor de potencia presentó un comportamiento dependiente de las condiciones de carga. Durante la producción se registraron valores entre 0.97 y 0.98, mientras que en baja demanda se obtuvo un promedio de 0.79, inferior al valor de referencia de 0.94. Además, el banco presentó una capacidad nominal de 105 kVAr frente a una capacidad registrada de 99.4 kVAr, equivalente a una diferencia de 5.6 kVAr. La comparación entre el analizador de panel DUCATI DUCA-LCD96 y el analizador de redes Fluke 435-II permitió orientar la revisión hacia los transformadores de corriente, donde se identificaron conexiones inadecuadas. Después de su corrección se obtuvo una mayor correspondencia entre las lecturas y dejó de presentarse la vibración identificada en el tablero principal.
- Con base en los resultados obtenidos, se propuso la reestructuración del banco a una capacidad nominal de 130 kVAr, distribuida en seis escalones de 5, 10, 25, 25, 40 y 25 kVAr. Para la condición de baja demanda se determinó un requerimiento de 4.89 kVAr, justificando la selección de un escalón de 5 kVAr. La validación analítica estimó un factor de potencia de 0.982, mientras que la simulación en DIgSILENT PowerFactory obtuvo 0.98, reduciendo la potencia reactiva solicitada a la red de 6.71 a 1.71 kVAr y la corriente de 17.0 a 13.8 A. La propuesta incorporó escalones de respaldo de 10 y 25 kVAr y aprovechó componentes existentes, limitando la inversión requerida a 1 217.74 USD, con un periodo de recuperación estimado de 3.04 meses bajo las condiciones económicas consideradas.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda establecer un programa periódico de inspección y mantenimiento preventivo del banco de corrección del factor de potencia, considerando capacitores,

contactores, dispositivos de protección, conexiones eléctricas y el controlador Siemens BR600. Asimismo, se deberá verificar el circuito secundario de los transformadores de corriente y las lecturas del DUCATI DUCA-LCD96, con el propósito de identificar oportunamente pérdidas de capacidad, fallas de conmutación o anomalías en el sistema de medición.

- Se recomienda mantener un monitoreo periódico del factor de potencia y la demanda de potencia reactiva, principalmente durante los periodos de baja demanda. Ante la incorporación de nuevas cargas o modificaciones significativas en las condiciones de operación de la planta, se deberá evaluar nuevamente el requerimiento de compensación y la distribución de los escalones para verificar que la configuración del banco continúe respondiendo adecuadamente a las variaciones de carga.
- Se recomienda capacitar al personal técnico encargado del mantenimiento eléctrico en la operación, diagnóstico y mantenimiento del banco automático de capacitores, considerando la configuración del controlador Siemens BR600, la verificación de los transformadores de corriente y la actuación de los escalones de compensación. Además, se deberá comprobar periódicamente la conexión progresiva de los escalones y la disponibilidad de los bloques de 10 y 25 kVAr establecidos como respaldo operativo.

7 Referencias

- [1] J. J. S. Cruz, Fundamentos Sobre Ahorro de Energía, Uady, Ed., Mérida, 2000.
- [2] R. Saucedo Zaval, Introducción a las instalaciones electrónicas, L. E. Medina Gómez, Ed., Mexicali: Universidad Autónoma de Baja California, 2001, p. 149.
- [3] A. Leyva, «Guía Práctica para la Corrección del Factor de Potencia,» 2019. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/557393059/Bono-No-2-Guia-Practica-para-la-Correccion-del-Factor-de-Potencia>. [Último acceso: 25 Mayo 2026].
- [4] J. M. Molina Martínez, F. J. Cánivas Rodríguez y F. A. Ruz Vila, Corriente Alterna Monofásica y Trifásica: Fundamentos de electrotecnia para ingenieros, 1a edición ed., Barcelona: Marcombo S.A., 2012, p. 217.

- [5] M. J. García Trasancos, Instalaciones eléctricas en media y baja tensión, 7.^a edición ed., C. Lara Carmona, Ed., Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A., 2016, p. 236.
- [6] Á. L. Miranda y M. Á. Doménech, El ABC del aire acondicionado, Barcelona: Marcombo, 2012.
- [7] J. Pozzi, Manual de instrumentación para aire acondicionado, calefacción y refrigeración, A. LLC, Ed., Buenos Aires: Editorial Limusa, 2021, p. 181.
- [8] C. Garza, S. Ramón y R. Martínez, «Corrección de factor de potencia con bancos de capacitores distribuidos en la industria maquiladora,» de *Ciencias de la Ingeniería y Tecnología Handbook T-V*, Guanajuato, 2014.
- [9] P. C. Rodríguez, Introducción a las mediciones eléctricas, 1a edición ed., Buenos Aires: LIBERIA Y EDITORIAL ALSINA, 2018, p. 14.
- [10] P. Lenti Soria, M. Quiroz Damián y J. Samavides Vargas, «Scribd,» Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/396021667/Conexion-de-Condensadores-Para-Compensacion-de-Potencia-Reactiva>. [Último acceso: 27 Miercoles 2026].
- [11] R. Saucedo Zavala, Introducción a las instalaciones electrónicas, L. E. Medina Gómez, Ed., Mexicali: UABC, 2001, pp. 150 - 151.
- [12] O. D. Montoya, A. Garcés Ruiz, W. J. Gil González y A. Escobar Mejía, Compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos de potencia, Edicions UPC ed., U. T. d. Bolívar, Ed., Barcelona: UTB, 2021.
- [13] K. Bennie, «Fluke Corporation,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/calidad-electrica/solucion-de-problemas-para-los-capacitores-de-correccion-del-factor-de-potencia#>. [Último acceso: 27 junio 2026].
- [14] W. Yero Peña, J. Ramírez Bient, L. Rosa Rodrpiguez y P. García León, «Monitoreo, control y diagnóstico en bancos de capacitores automáticos en baja tensión,» *Ingeniare, Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, n° 1, pp. 28 - 39, 2018.

- [15] A. Moreno, F. Ruiz y J. Fernández, Calidad de la energía eléctrica y armónicos en instalaciones industriales, vol. 8, J. O. Valderrama, Ed., Madrid: Ediciones Paraninfo, 2005.
- [16] R. Campisi, Aprenda electricidad, EDICIONES DE LA CASA ed., Buenos Aires: Editorial Limusa , 2024, pp. 259-262.
- [17] «Electricidad Industrial Perú,» 01 02 2025. [En línea]. Available: <https://electricidadindustrial.pe/equipos-de-electricidad/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-electricidad-industrial-conceptos-basicos-funciones-y-aplicaciones/>. [Último acceso: 18 junio 2026].
- [18] Fluke Corporation, «¿Qué es la corriente?,» Fluke Corporation, [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/electrica/que-es-la-corriente>. [Último acceso: 31 mayo 2026].
- [19] Editorial Etecé, «Corriente eléctrica,» Concepto.de, 24 mayo 2025. [En línea]. Available: <https://concepto.de/corriente-electrica/>. [Último acceso: 02 junio 2026].
- [20] R. Pérez Huguet, Montaje de elementos y equipos de instalaciones eléctricas de baja tensión en edificios, 1a edición ed., Cueva de Viera, Ed., Málaga: Ediciones Paraninfo, 2021.
- [21] J. Hyde, «Potencia eléctrica,» de *Control electroneumático y electrónico*, Barcelona, Marcombo S.A., 1997, p. 13.
- [22] «Electro Genesis,» 22 junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.electro-genesis.com/WebGenesisBiblio/Literatura/Articulos/Teoria%20Fundamentos/Teoria/Web/Correcci%C3%B3n%20del%20factor%20de%20potencia.pdf>. [Último acceso: 18 junio 2026].
- [23] P. A. S. Miguel, Electrónica general, 2a edición ed., S. Ediciones Paraninfo, Ed., López Raso, María José,, 2010.
- [24] «Catarina.udlap.mx,» [En línea]. Available: https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/juarez_h_ii/capitulo2.pdf. [Último acceso: 18 junio 2026].

- [25] J.-R. Riba Ruiz, *Calidad del suministro eléctrico y analizadores de redes*, Barcelona: Edicions UPC, 2021.
- [26] J.-R. Riba Ruiz, *Auditor energético: Auditoría y certificación energética en edificaciones e industrias*, inmoley.com, Ed., Barcelona, 2021.
- [27] L. Cornalán, «Factor de potencia y coseno de fi: las tres dimensiones de la corriente eficaz,» *Ingeniería Eléctrica*, p. 2–6, Abril 2021.
- [28] A. d. R. y. C. d. E. (ARCONEL), «: Regulación Nro. ARCONEL 005/17: Prestación del servicio público de energía eléctrica (Resolución Nro. ARCONEL-074/17),» Quito, 2017.
- [29] A. d. R. y. C. d. E. (ARCONEL), «Resolución Nro. ARCONEL-029/2025,» CNEEL EP, Quito, Ecuador, 2025.
- [30] ScienceDirect, «ScienceDirect Topics (Engineering),» 2022. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/low-power-factor>. [Último acceso: 18 junio 2026].
- [31] A. d. R. y. C. d. E. y. R. N. N. R. (ARCERNNR), «Resolución Nro. ARCENNR 002/20,» ARCERNNR / Gobierno de la República del Ecuador, Quito, Ecuador, 2020.
- [32] A. Martinez Gracia, A. Valero Delgado, A. Aranda Usón, I. Zabalza Bribián y S. Scarpellini, *Disminución de costes energéticos en la industria*, Madrid: Marcombo, 2011.
- [33] A. Senner, *Principios de electrotecnia*, Reverte, Ed., Barcelona: Ediciones Paraninfo, 2021.
- [34] «Factor de potencia en motores: optimización y su importancia,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.preciocombustible.com/electricidad/factor-de-potencia-en-motores-optimizacion-y-su-importancia/>. [Último acceso: 22 junio 2026].
- [35] B. Quesada Solano, «Factor de potencia,» 15 agos 2019. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/421939518/Factor-de-potencia>. [Último acceso: 22 junio 2026].
- [36] J. Coto Alandro, *Análisis de sistemas de potencia*, McGraw-Hill, 1996.

- [37] P. Kundur, Power System Stability and Control, J. B. Neal y L. Marck G., Edits., California: McGraw-Hill, 1994.
- [38] H. Curiel, H. Armando y C. Ortega, «Análisi de las perturbaciones provocadas por el horno eléctrico y sus metodos para atenuarlas,» Ciudad de Guatemala, 2015.
- [39] L. M. Cassiani, R. Parejo, A. Cabrera, S. Miranda y L. M. Lopez, «importancia del factor de potencia,» 2024.
- [40] «StuDocu - Universidad de Ingeniería y Tecnología,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-de-ingenieria-y-tecnologia/fundamentos-de-electricidad-y-magnetismo/efectos-del-bajo-factor-de-potencia-en-los-sistemas-electricos/96078643>. [Último acceso: 22 junio 2026].
- [41] M. R. López Sandoval, «Análisis del factor de potencia y sus efectos en la red de distribución eléctrica,» Ciudad de Guatemala, 2012.
- [42] R. F. Silva, Comandos Eléctricos: Proyectos de Cuadro Control y Mando, R. F. Silva, Ed., Madrid: Ediciones Paraninfo, 2021.
- [43] «Nabalia Energía Blog,» 8 ene 2026. [En línea]. Available: <https://nabaliaenergia.com/blog/factor-potencia-bajo/>. [Último acceso: 22 junio 2026].
- [44] A. d. R. y. C. d. l. E. (ARCONEL), «Pliego Tarifario del Servicio Público de Energía Eléctrica para el año 2025,» Quito, Ecuador, 2024.
- [45] R. A. Pino León, «Corrección del factor de potencia en circuitos eléctricos,» 2014.
- [46] E. F. Fuchs y M. A. Masoun, «Optimal Placement and Sizing of Shunt Capacitor Banks in the Presence of Harmonics,» C. R. Bayliss, Ed., Elsevier, 2008.
- [47] A. Aranda Usón, F. Barrio Moreno, I. Zabalza Bribián y S. Díaz de Garaio, Técnicas para la elaboración de auditorías energéticas, J. A. A. Usón, Ed., Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010.
- [48] S. Electric, «Failure Analysis in the Power Factor Correction Bank,» Schneider Electric White Paper, Rueil-Malmaison, Francia, 2021.

- [49] A. V. Ayala Jardón, Á. G. Martínez Bravo, L. F. Ochoa Ferado y O. O. Sánchez Mendoza, «Triángulo de potencia, factor de potencia y corrección del factor de potencia,» Toluca, 19.
- [50] E. Harper, *El ABC de las Instalaciones Eléctricas Industriales*, LIMUSA, 2005.
- [51] E. A. Rosero Rosero, «Diseño e implementación de un sistema de corrección del factor de potencia automático para cargas industriales,» Cuenca, Ecuador, 2020.
- [52] A. Group, «Power Factor Correction and Harmonic Filtering in Electrical Plants,» Zurich, Suiza, 2011.
- [53] R. P. Blanc y C. Collombet, *Power Fctor Correction Solutions*, p. 5.
- [54] C. A. López Esquivel y A. Ramírez Luna, «Análisis y corrección del factor de potencia en sistemas eléctricos de distribución,» Santiago, Chile, 2021.
- [55] M. G. Onofre Amador, F. Ornelas Téllez, L. A. Zavaka Rubio y R. Ramírez Betancour, «Análisis del factor de potencia y armónicos en redes eléctricas industriales,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 22, pp. 1-12, 2021.
- [56] E. E. Pincololini, «Compensación de energía reactiva o factor de potencia,» 2015.
- [57] G. E. Harper, *Toma de mediciones estandarEl ABC de la reparación y mantenimiento de instalaciones eléctricas industriales*, G. NORIEGA, Ed., LIMUSA S.A., 2024.
- [58] P. C. Rodríguez, *Corriente eléctrica*, T. Ediciones, Ed., Buenos Aires: ALSINA, 2018, p. 7.
- [59] C. Dongwei, L. Zheng, L. Jinyue, C. Zhao, J. Dong,ing, H. Chen Yu y H. Xiaokun, «Analysis of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technology for Power Equipment,» *Electric Power Systems and Equipment*, vol. 11, 2024.
- [60] J. Ma y J. Jiang, «Power Quality in Power Systems and Electrical Machines,» *Progress in Nuclear Energy*, vol. 38, p. 120–135, 2011.
- [61] M. Ibrahim, A. Alsheikh, F. M. Awaysseh y M. Dahman Alshehri, «Machine Learning Schemes for Anomaly Detection in Solar Power Plants,» *Energies*, vol. 15, n° 3, 2022.

- [62] R. Capella, Medición práctica del factor de potencia., Octubre 2000 ed., Barcelona, 2000, p. 9.
- [63] G. Enríquez Harper, Eficiencia en el uso de la energía eléctrica, Editorial Limusa, 2011.
- [64] F. J. Rey Martínez, E. Velasco Gómez, J. M. Rey Hernández, J. F. San José Alonso, A. Tejero González y P. M. Esquivias Fernández, Sistemas BMS (Building Management System). Monitorización y control de edificios nZEB, P. Paz Otero y S. Durán Tamayo, Edits., Paraninfo, 2020.
- [65] L. Grijalbo Fernández, Estudios de ratio consumo: Eficiencia energética, Madrid: Ediciones Paraninfo, 2023, p. 148.
- [66] J. L. Sanza Serrano y J. C. Toledano Gasca, Técnicas y procesos en las instalaciones eléctricas, C. Lara Carmona, Ed., Madrid: Paraninfo.
- [67] F. Corporation, «Fluke,» [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-mx/productos/comprobacion-electrica/analizadores-de-calidad-electrica#>. [Último acceso: 24 junio 2026].
- [68] L. M. Cerdá Filiu, Electricidad y automatismos eléctricos, M. J. López Raso, Ed., Barcelona: Paraninfo S.A., 2025.
- [69] F. Corporation, «Fluke,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/434-435#>. [Último acceso: 05 julio 2026].
- [70] J. P. Escobar Patiño y D. Bonilla Vargas, «Linkein,» 2025. [En línea]. Available: https://es.linkedin.com/posts/juan-pablo-escobar-pati%C3%B1o-44a719237_las-fallas-m%C3%A1s-comunes-en-los-capacitores-activity-7288006291275292672-qr69. [Último acceso: 24 junio 2026].
- [71] A. Dominguez Celis, U. Silva Reyna y J. E. Garza García, «Sistemas de Protecciones Eléctricas P2: Banco de Capacitores,» 2025.
- [72] Mascotop, *Condensadores Electrolíticos*, 2023.
- [73] J. Castro, «Técnicas y procesos en las instalaciones eléctricas,» Técnicas y procesos en las instalaciones eléctricas., 2020.

- [74] K. Bennie, «Fluke Blog,» [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/calidad-electrica/solucion-de-problemas-para-los-capacitores-de-correccion-del-factor-de-potencia>. [Último acceso: 24 junio 2026].
- [75] C. Santiváñez, F. Córdova y A. Ríos , «ACR: Análisis Causa-Raíz - Falla de Banco de Condensadores,» 2013. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/650290827/ACR-Falla-de-Banco-de-Condensadores>. [Último acceso: 24 junio 2026].
- [76] A. V. Ayala Jardón, Á. G. Martínez Bravo, L. F. Ochoa Ferado y O. O. Sánchez Mendoza , «Triángulo de potencia, factor de potencia y corrección dell factor de potencia,» Toluca, 19.

8 Anexos

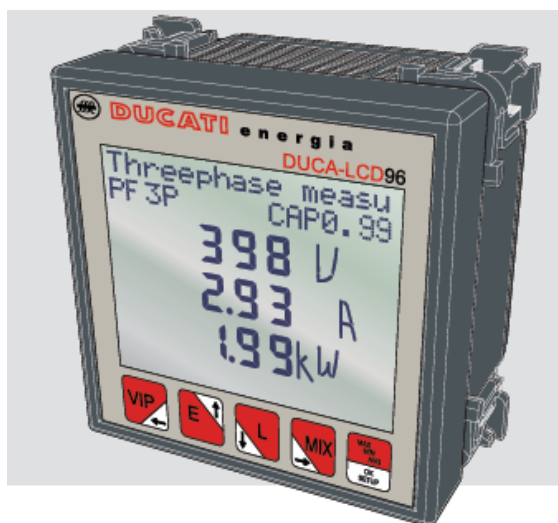
ANEXO A

LUGAR DE ESTUDIO: PLANTA DE PINTURA DE CIAUTO CIA. LTDA



ANEXO B

ANALIZADOR DE PANEL DE DUCATI ENERGÍA



ANEXO C

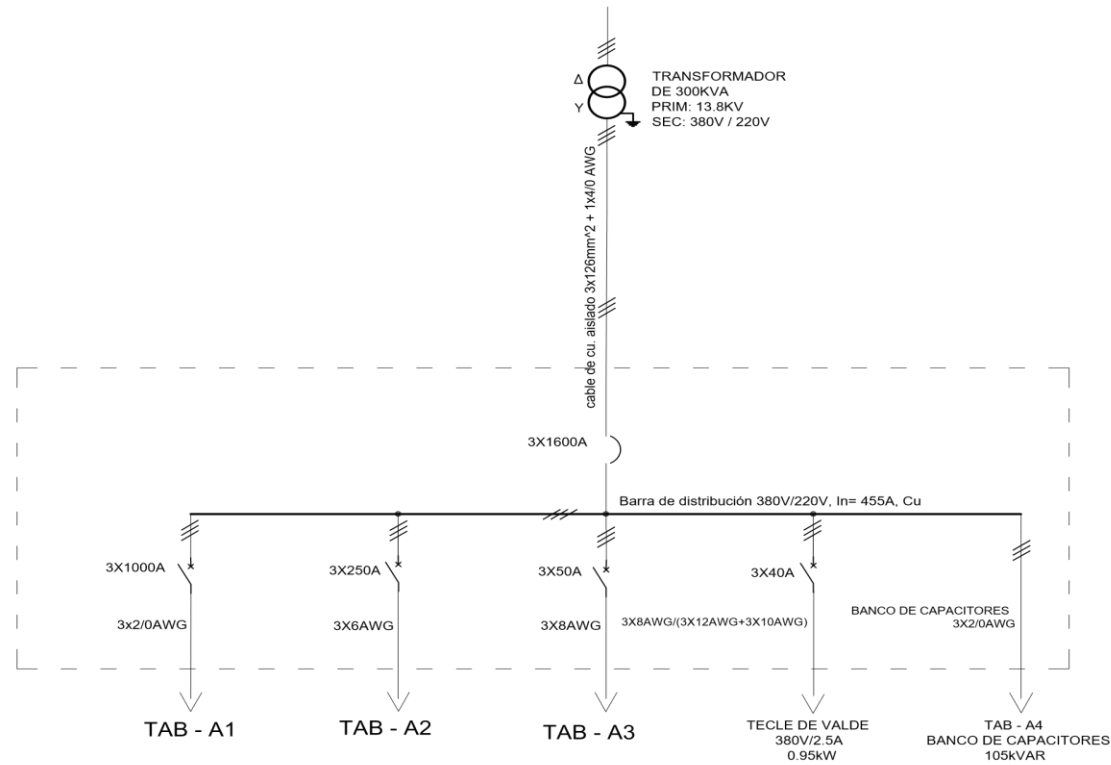
ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA FLUKE 435_II



ANEXO D

**DIAGRAMA UNIFILAR DEL TABLERO PRINCIPAL Y DEL BANCO DE
CAPACITORES**

DIAGRAMA UNIFILAR DEL TABLERO PRINCIPAL DE LA PLANTA DE PINTURA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICAELABORADO POR:
-Toapanta Andrango Stalin
-Telenchana Quilligana Margoth

..\..\Pictures\1.jpg

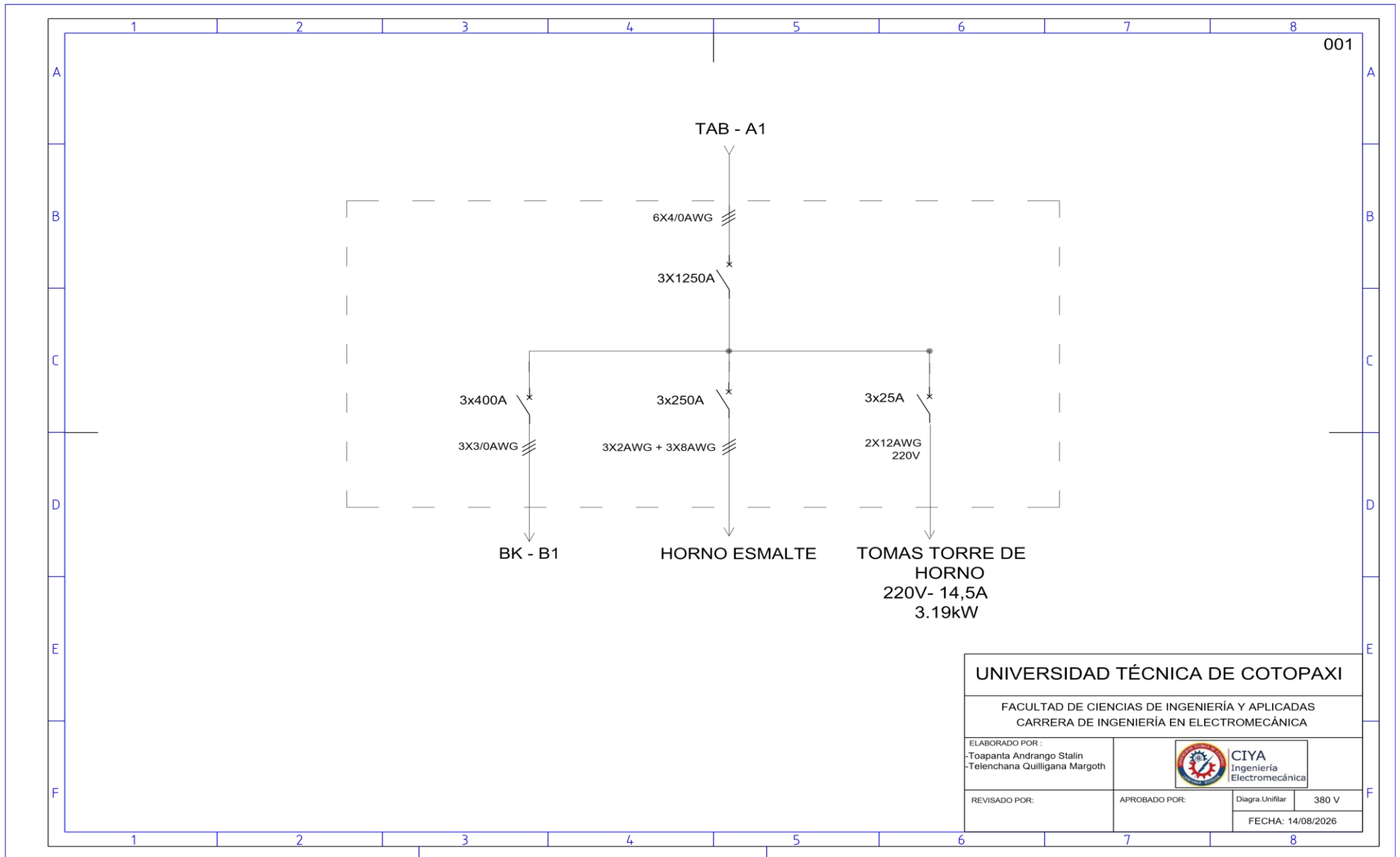
REVISADO POR:

APROBADO POR:

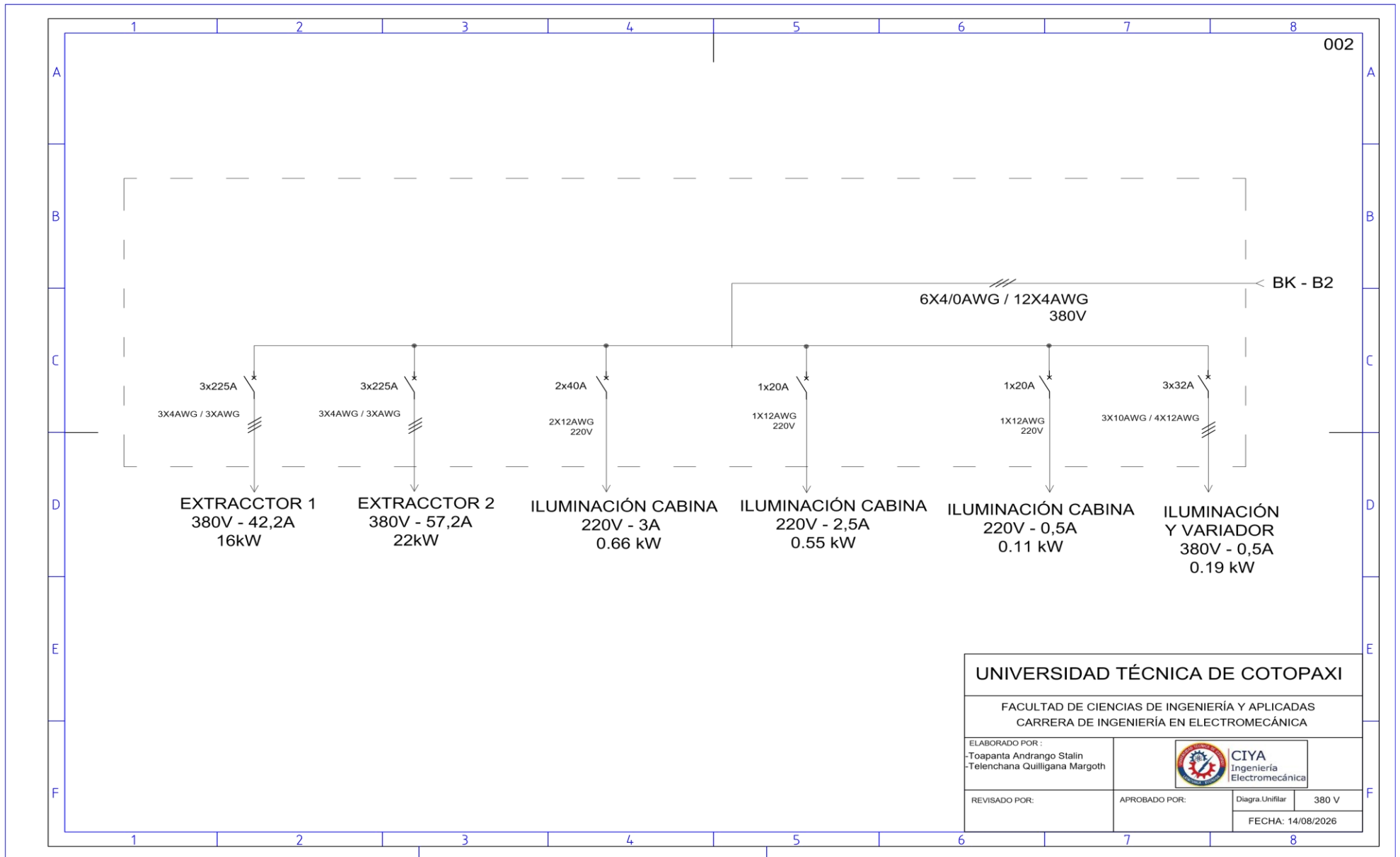
Diagra.Unifilar

380 V

FECHA: 14/08/2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI			
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA Y APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICA			
ELABORADO POR: -Toapanta Andrange Stalin -Telenchana Quilligana Margoth		 CIYA Ingeniería Electromecánica	
REVISADO POR:	APROBADO POR:	Diagra.Unifilar	380 V
		FECHA: 14/08/2026	





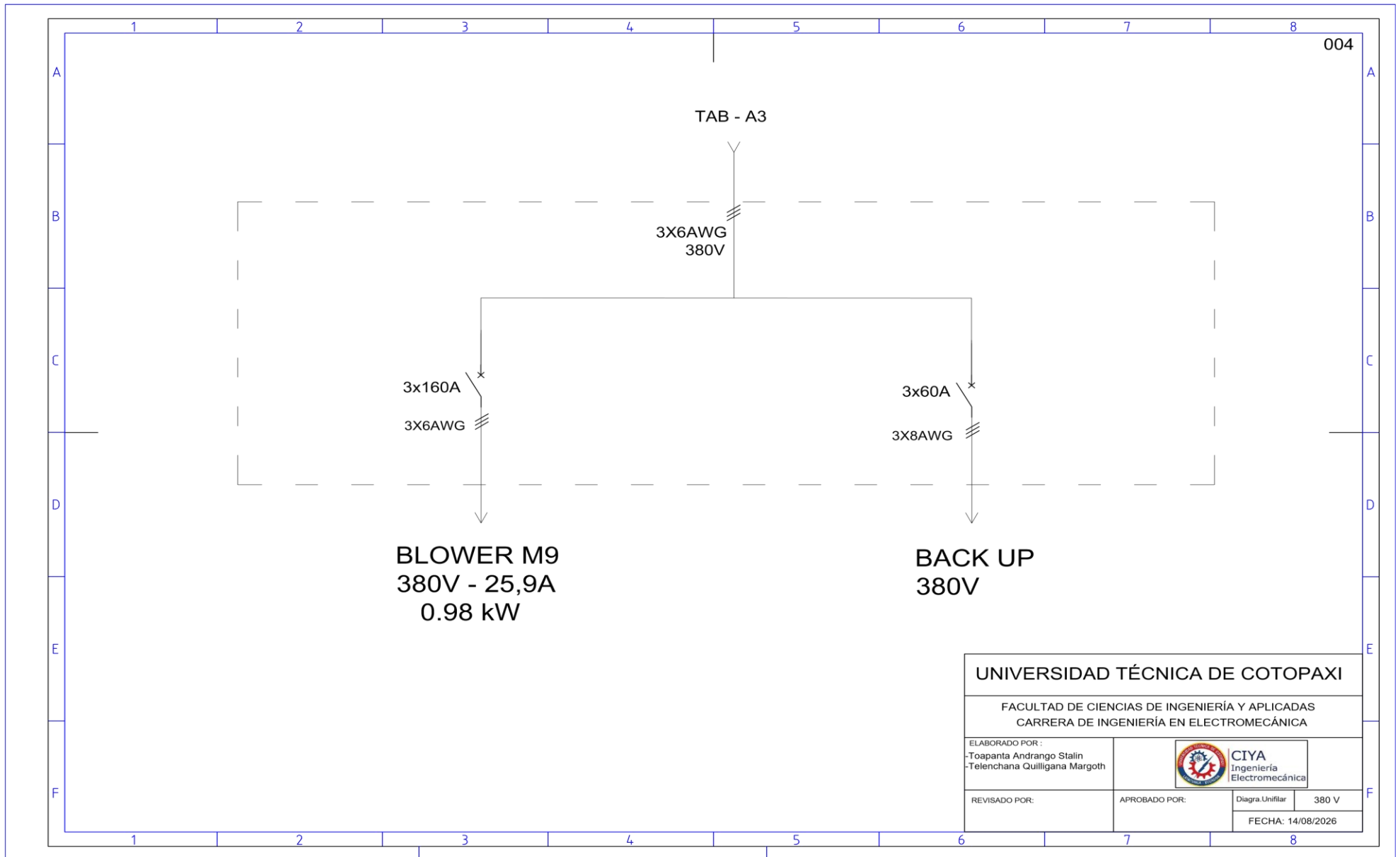
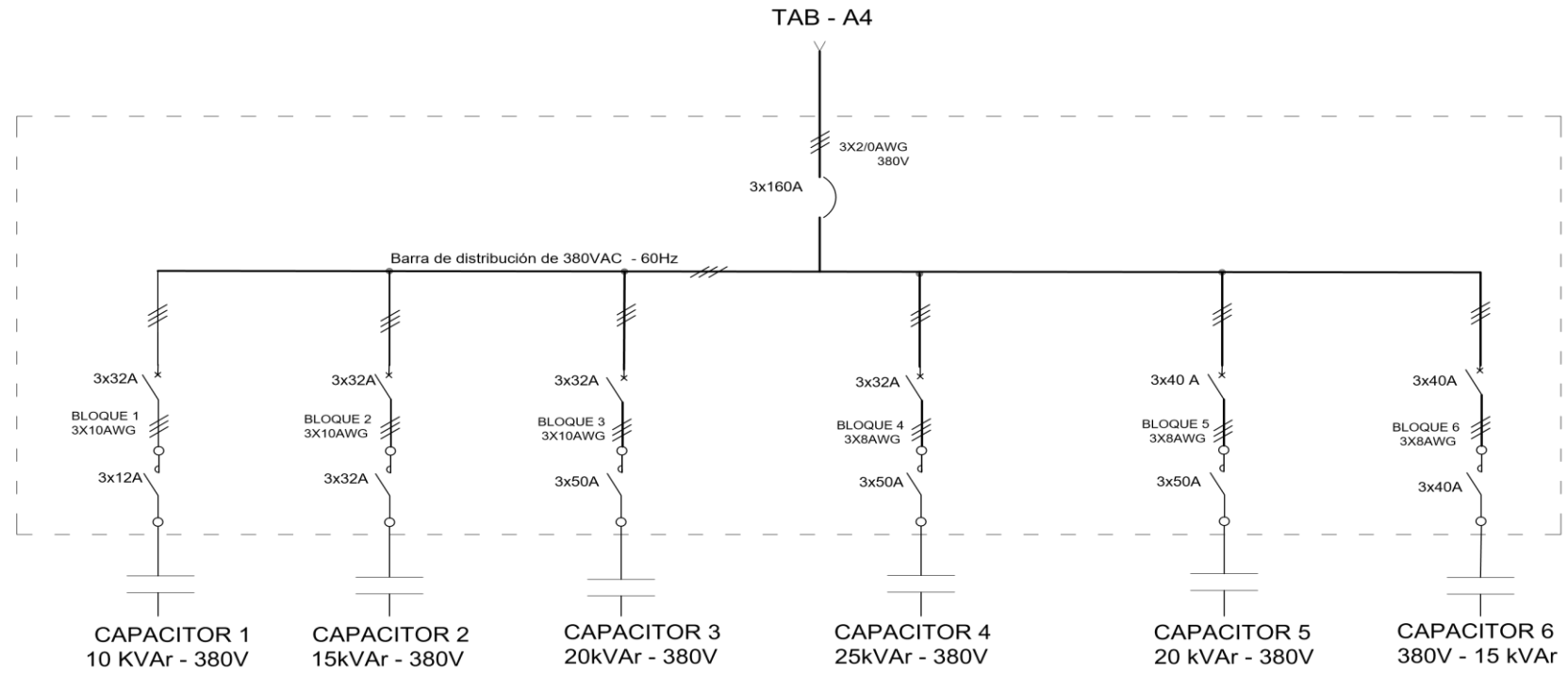


DIAGRAMA UNIFILAR DEL BANCO DE CAPACITORES



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

ELABORADO POR :
-Toapanta Andrango Stalin
-Telenchana Quilligana Margoth



REVISADO POR:

APROBADO POR:

Diagra.Unifilar 380 V

FECHA: 14/08/2026

ANEXO E

TABLERO PRINCIPAL DURANTE LA CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO



ANEXO F

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA INSPECCIÓN TÉCNICA DEL BANCO DE
CAPACITORES**



Figura F.1. Inspección técnica del banco automático de capacitores.



Figura F.2. Controlador de factor de potencia Siemens BR600 del banco automático de capacitores.



Figura F.3. Medición de los parámetros eléctricos de los capacitores instalados.

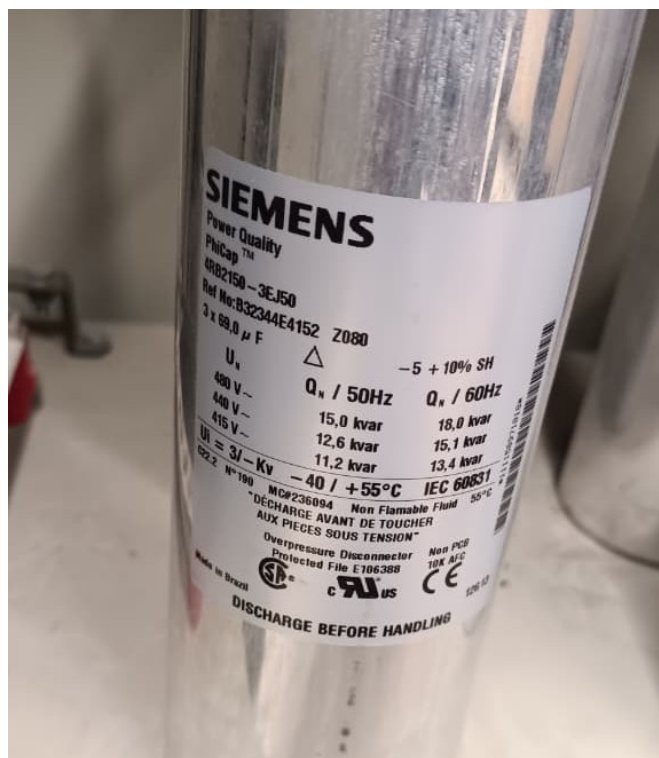


Figura F.4. Datos de placa de los capacitores instalados en el banco.

ANEXO G

PLACAS DE MOTORES CONECTADOS AL TABLERO PRINCIPAL



Figura F.1. Placa del transformador de la planta de pintura 300kVA



Figura F.2. Placa del motor de los extractores (M1- M8)



Figura F.3. Placa del motor del extractor de preparación

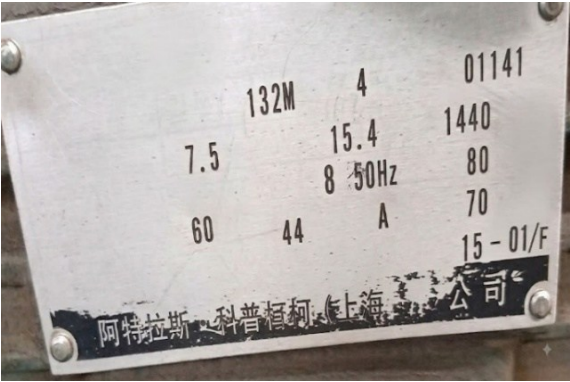


Figura F.4. Placa del motor de las cortinas de aire (M3-M5).



Figura F.5. Placa del motore de las casas de aire (M3-M5).



Figura F.6. Placa del motor del extractor (Implementado)



Figura F.7. Placa del motor del extractor 1

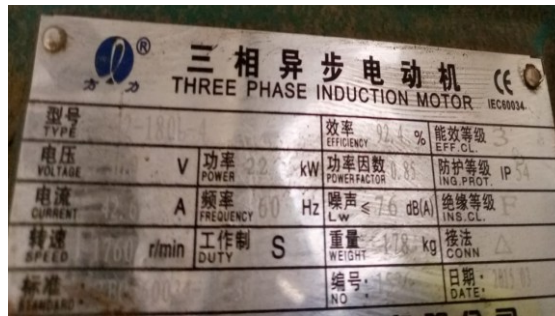


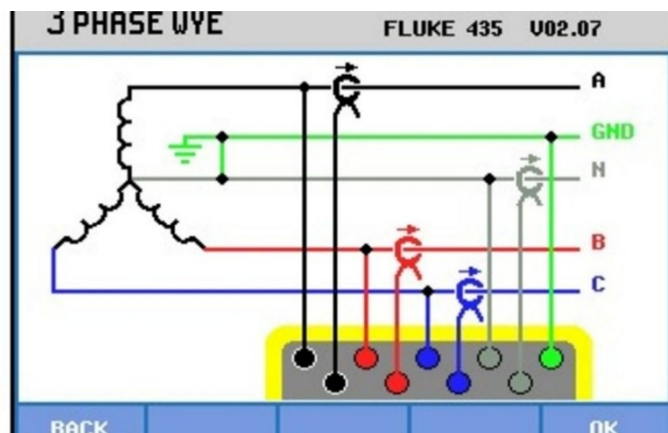
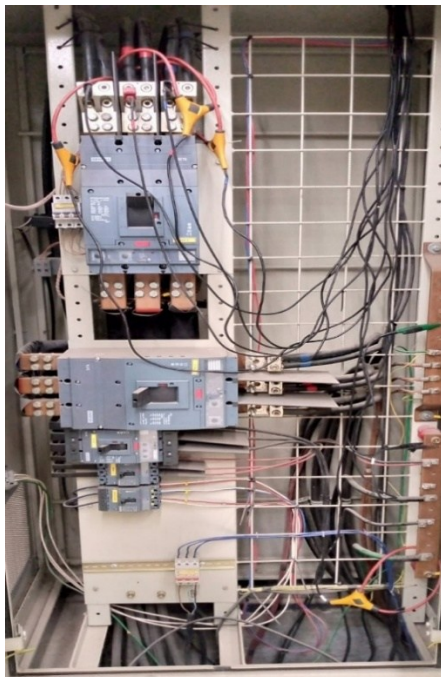
Figura F.8. Placa del motor del extractor 2



Figura F.9. Placa del motor del extractor

ANEXO H

INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN



ANEXO I

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE
MEDICIÓN**

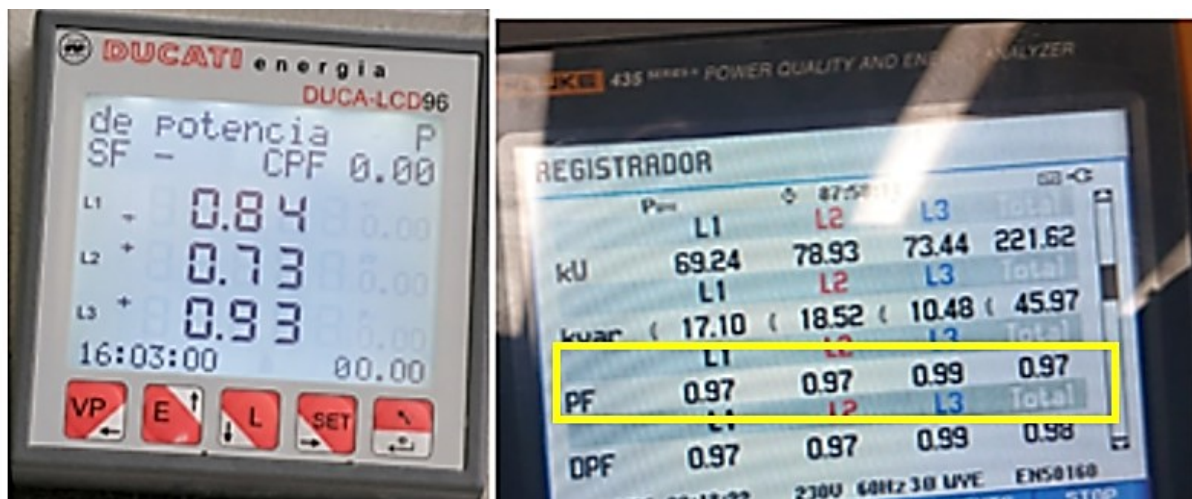


Figura I.1. Comparación de lecturas entre el analizador de panel DUCATI DUCA-LCD96 y el analizador de redes Fluke 435-II.



Figura I.2. Transformadores de corriente instalados en el tablero principal.



Figura I.3. Verificación del circuito secundario de los transformadores de corriente.

ANEXO J

Tabla J.1. Parámetros ingresados en el modelo de DIgSILENT PowerFactory

Elemento	Nombre asignado	Parámetros ingresados	Evidencia
Red externa	External Grid	Terminal: BARRA MT - PCC 13.8kV	Figura J.1
Barra de media tensión	BARRA MT - PCC 13.8kV	System Type: AC Usage: Busbar Phase Technology: ABC Line-Line: 13,8 kV	Figura J.2
Transformador	TR PLANTA DE PINTURA Tipo: TR 300 kVA	Technology: Three Phase Transformer Rated Power: 0,3 MVA Nominal Frequency: 60 Hz HV-Side: 13,8 kV LV-Side: 0,38 kV Vector Group: Dyn5 Phase Shift: 5 × 30 deg Short-Circuit Voltage uk: 2,8 % Copper Losses: 0 kW Short-Circuit Voltage uk0: 3 % SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r: 0 %	Figura J.3
Barra de baja tensión	BARRA PRINCIPAL 380 V	System Type: AC Usage: Busbar Phase Technology: ABC Line-Line: 0,38 kV	Figura J.4
Carga equivalente	CARGA PLANTA PINTURA	Input Mode: Default Balanced/Unbalanced: Balanced Active Power: 0,00895 MW Reactive Power: 0,00671 Mvar Voltage: 1 p.u. Scaling Factor: 1	Figura J.5
Capacitor	5 kVAr	System Type: AC Technology: 3PH-‘D’ Rated Voltage: 0,38 kV Shunt Type: C Input Mode: Default Max. No. of Steps: 1 Act. No. of Step: 1 Rated Reactive Power, C: 0,005 Mvar Loss Factor, tan(delta): 0	Figura J.6

External Grid - Grid\External Grid.ElmXnet

Basic Data

Description

Load Flow

Short-Circuit VDE/IEC

Short-Circuit Complete

Short-Circuit ANSI

Short-Circuit IEC 61363

Short-Circuit DC

Quasi-Dynamic Simulation

General **Grounding/Neutral Conductor**

Name: External Grid

Terminal: Grid\BARRA MT - PCC 13.8kV\Cub_2

Zone:

Area:

☐ Out of Service

OK

Cancel

Figure

Jump to ...

Figura J.1. Configuración de la red externa External Grid.

Terminal - Grid\BARRA MT - PCC 13.8kV.ElmTerm

Basic Data

Description

Load Flow

Short-Circuit VDE/IEC

Short-Circuit Complete

Short-Circuit ANSI

Short-Circuit IEC 61363

Short-Circuit DC

Simulation RMS

Simulation EMT

Arc-Flash Analysis

Power Quality/Harmonics

Tie Open Point Opt.

Name: BARRA MT - PCC 13.8kV

Type: Equipment Type Library\Busbar Type

Zone:

Area:

☐ Out of Service

System Type: AC

Usage: Busbar

Phase Technology: ABC

Nominal Voltage

Line-Line: 13,8 kV

Line-Ground: 7,967434 kV

OK

Cancel

Jump to ...

Cubicles

Busbar Type - Equipment Type Library\Busbar Type.TypBar

Basic Data

Description

Version

Name: Busbar Type

Rated Voltage: 13,8 kV

OK

Cancel

Figura J.2. Parámetros de la barra de media tensión BARRA MT - PCC 13.8kV.

2-Winding Transformer - Grid\TR PLANTA DE PINTURA.ElmTr2

Basic Data **General** **Grounding/Neutral Conductor**

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\TR 300 kVA.TypTr2

Basic Data

Description

Version

Load Flow

Short-Circuit VDE/IEC

Short-Circuit Complete

Short-Circuit ANSI

Short-Circuit IEC 61363

Short-Circuit DC

Simulation RMS

Simulation EMT

Protection

Power Quality/Harmonics

Reliability

Hosting Capacity Analysis

Optimal Power Flow

Name: TR 300 kVA

Technology: Three Phase Transformer

Rated Power: 0,3 MVA

Nominal Frequency: 60, Hz

Rated Voltage

HV-Side: 13,8 kV

LV-Side: 0,38 kV

Vector Group

HV-Side: D

LV-Side: YN

Phase Shift: 5, *30deg

Name: Dyn5

Positive Sequence Impedance

Short-Circuit Voltage uk: 2,8 %

Copper Losses: 0, kW

Zero Sequence Impedance

Short-Circuit Voltage uk0: 3, %

SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r: 0, %

Figura J.3. Parámetros del transformador TR PLANTA DE PINTURA.

UT TOOLS WINDOW HELP

Terminal - Grid\BARRA PRINCIPAL 380 V.ElmTerm

Basic Data	Name	BARRA PRINCIPAL 380 V	
Description	Type	▼ →	...pe Library\BARRA PRINCIPAL 380 V
Load Flow	Zone	▼ →	
Short-Circuit VDE/IEC	Area	▼ →	
Short-Circuit Complete	☐ Out of Service		
Short-Circuit ANSI	System Type	AC ▼	Usage Busbar
Short-Circuit IEC 61363	Phase Technology	ABC ▼	
Short-Circuit DC	Nominal Voltage		
Simulation RMS	Line-Line	0,38	kV
Simulation EMT	Line-Ground	0,2193931	kV
Arc-Flash Analysis			
Power Quality/Harmonics			
Tie Open Point Opt.			

Busbar Type - Equipment Type Library\BARRA PRINCIPAL 380 V.TypBar

Basic Data	Name	BARRA PRINCIPAL 380 V	
Description	Rated Voltage	0,38	kV
Version			
Load Flow			

Figura J.4. Parámetros de la barra de baja tensión BARRA PRINCIPAL 380 V.

General Load - Grid\CARGA PLANTA PINTURA.ElmLod

Basic Data Description Load Flow Short-Circuit VDE/IEC Short-Circuit Complete Short-Circuit ANSI Short-Circuit IEC 61363 Short-Circuit DC Simulation RMS Simulation EMT Power Quality/Harmonics Voltage Profile Optimisation Reliability Hosting Capacity Analysis Optimal Power Flow Unit Commitment State Estimation	General	Input Mode		Default ▼	...	
		Balanced/Unbalanced		Balanced ▼		
		Operating Point		Actual Values		
		Active Power	0,00895	MW	0,00895	MW
		Reactive Power	0,00671	Mvar	0,00671	Mvar
		Voltage	1,	p.u.		
		Scaling Factor	1,		1,	
		☐ Adjusted by Load Scaling	Zone Scaling Factor:		1,	
	OK Cancel Figure Jump to ...					

Figura J.5. Parámetros de la carga equivalente CARGA PLANTA PINTURA.

Shunt/Filter - Grid\5 kVar.ElmShnt

Basic Data

Description

Load Flow

Short-Circuit VDE/IEC

Short-Circuit Complete

Short-Circuit ANSI

Short-Circuit IEC 61363

Short-Circuit DC

Simulation RMS

Simulation EMT

Power Quality/Harmonics

Reliability

Hosting Capacity Analysis

Optimal Power Flow

Unit Commitment

General

Name: 5 kVar

Terminal: Grid\BARRA PRINCIPAL 380 V\Cub_3 - BARRA PRINCIPAL :

Zone: →

Area: →

☐ Out of Service

System Type: AC Technology: 3PH-'D'

Rated Voltage: 0,38 kV

Shunt Type: C

Input Mode: Default

Controller

Max. No. of Steps: 1 Max. Rated Reactive Power: 0,005 Mvar

Act.No. of Step: 1 Actual Reactive Power: 0,005 Mvar

☐ According to Measurement Report

Design Parameter (per Step)

Rated Reactive Power, C: 0,005 Mvar

Loss Factor, tan(delta): 0,

Layout Parameter (per Step)

Susceptance: 11542,01 uS

Parallel Conductance: 0, uS

OK

Cancel

Figure

Jump to ...

Figura J.6. Parámetros del capacitor de 5 kVar.

ANEXO K

COMPORTAMIENTO DIARIO DEL FACTOR DE POTENCIA SIMULADO

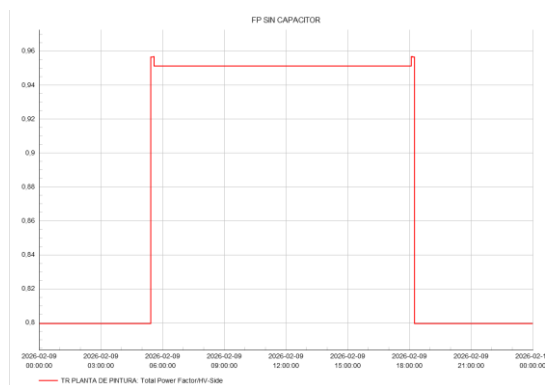


Figura K.1. Comportamiento diario del factor de potencia simulado sin compensación.

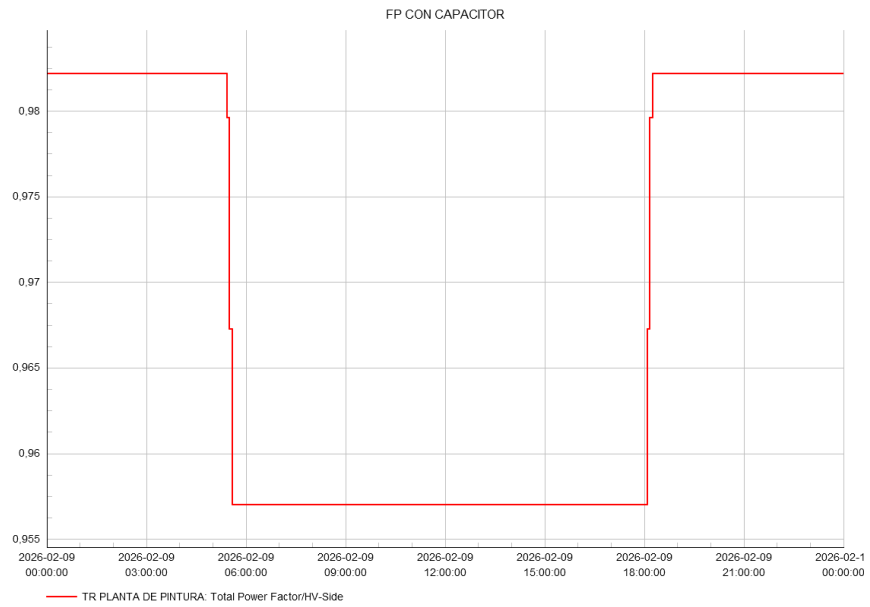


Figura K.2. Comportamiento diario del factor de potencia simulado con el capacitor de 5 kVar.

ANEXO L

PROFORMA COTIZACIÓN DE LOS COMPONENTES A ADQUIRIR.



R.U.C.: 0992124377001
Km. 6.5 Vía a Daule
04-3714900
Guayaquil - Ecuador

CONTRIBUYENTE ESPECIAL
Desde el 1 de marzo del 2018
Según resolución SRI. N°
NAC-DGERSGE18-00000228-E

C O T I Z A C I O N No. 241886

CODIGO	LM2830	FECHA	jueves-06-agosto-2026
CLIENTE	CIUDAD DEL AUTO CIAUTO CIA. LTDA.	TELEFONOS	0980570441
DIRECCION	CAMINO REAL S/N JUNTO A LA HACIENDA SAN PABLO	ATT.	LUIS TOAPAXI
E-MAIL	logistica@ciauto.ec	VENDEDOR	JORGE EDUARDO JIRON

DE ACUERDO A SU SOLICITUD NOS ES GRATO PRESENTAR LA COTIZACION DE

ITEM	COD	DESCRIPCION	CANTIDAD	UND.	PRECIO	DCTO.	TOTAL
1	9328	CONDENSADOR 3F 5 KVAR 480V 60HZ - FRAKO 2262	1	UNIDAD	92.000	28%	66.24
2	8495	CONDENSADOR 3F 10 KVAR 480V 60HZ - FRAKO 2268	1	PZA	108.800	28%	78.34
3	100395956	BREAKER 3 POLOS 16 AMP SSL4-7RC 440VAC-SIEMENS SSL4316-7RC	1	UNIDAD	31.530	42%	18.29
4	100395961	BREAKER 3 POLOS 50 AMP SSL4 440V-SIEMENS SSL4350-7RC	3	UNIDAD	44.080	42%	76.70
5	100363331	BREAKER 3 POLOS 80 AMP, 440VAC 3VM-SIEMENS 3VM1080-3ED32-0AA0	1	UNIDAD	110.070	42%	63.84
6	100208266	ZZCONTACTOR 17 AMP C/B 220VAC 1NA+1NC SIRIUS INN-SIEMENS 3RT2025-1AN20	1	UNIDAD	64.020	42%	37.13
7	100337215	ZZCONTACTOR 65 AMP C/BOB 220VAC 1NA+1NC SIRIUS INN-SIEMENS 3RT2037-1AN20	3	UNIDAD	267.110	42%	464.77
8	100337216	ZZCONTACTOR 80 AMP C/BOB 220VAC 1NA+1NC SIRIUS INN-SIEMENS 3RT2038-1AN20	1	UNIDAD	297.600	42%	172.61
9	3028	PLATINA DE COBRE DE 1/4X3/4"	3	MT	37.720	22%	88.27
10	0005	CABLE EXT. FLEX No 10 AWG NEGRO THHN	15	MT	1.500	28%	16.20
11	1756	CABLE CU. THHN No 6 AWG 7H	50	MT	3.760	28%	135.36

FORMA DE PAGO	CREDITO 30 DIAS	SUBTOTAL	USD \$	1,217.74
TIEMPO DE ENTREGA	24 HORAS	+ I.V.A:	15%	182.66
VALIDEZ	30 DIAS	TOTAL OFERTADO:	USD \$	1,400.40
OBSERVACION				

JNG del Ecuador
JORGE EDUARDO JIRON
0990954177
ventas.quito@jngdelecuador.com

ANEXO M

**REGISTROS DE COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE LOS SIETE DÍAS
CONTINUOS.**

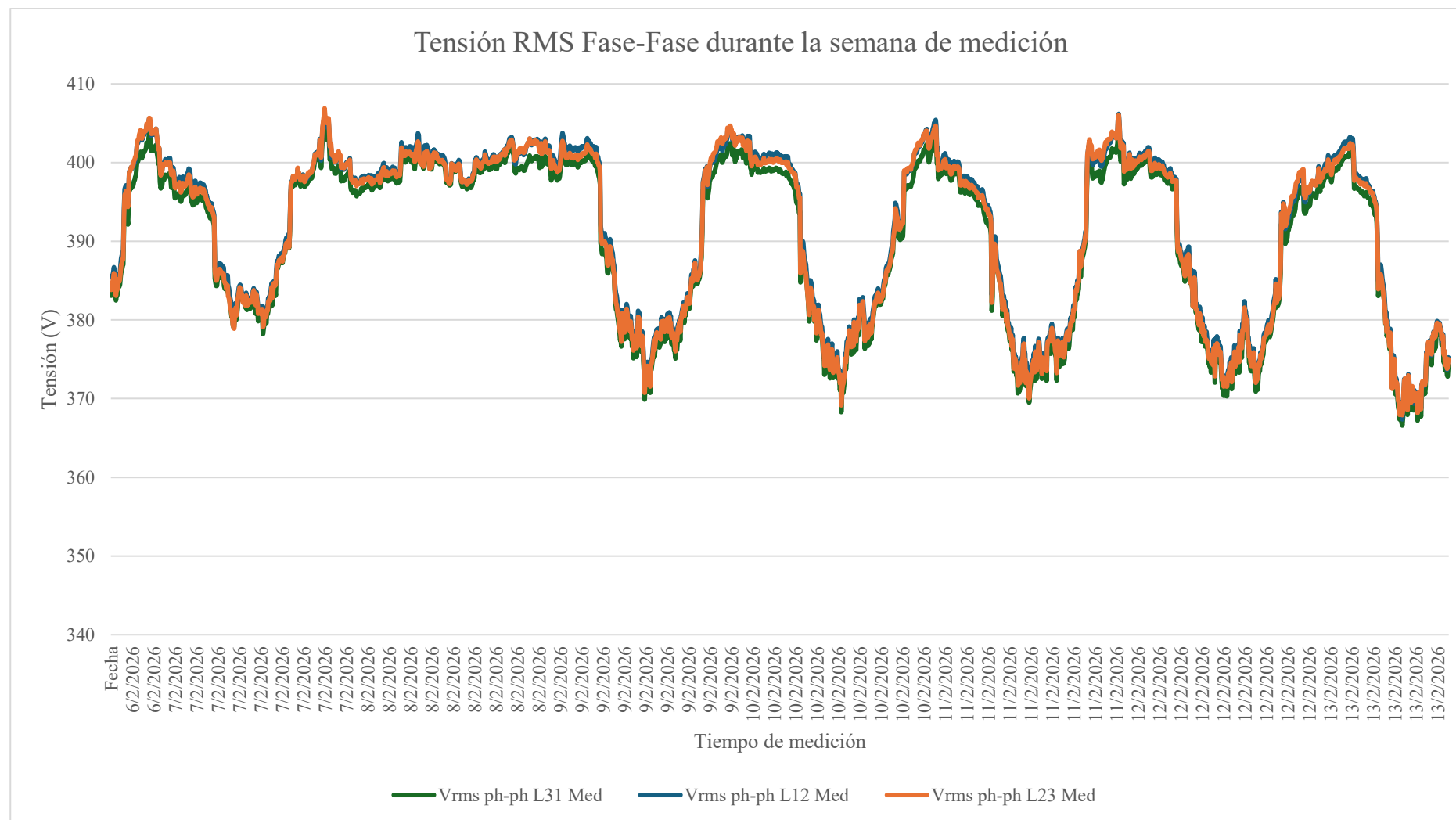


Figura M.1. Comportamiento de la tensión fase-fase durante el periodo de medición

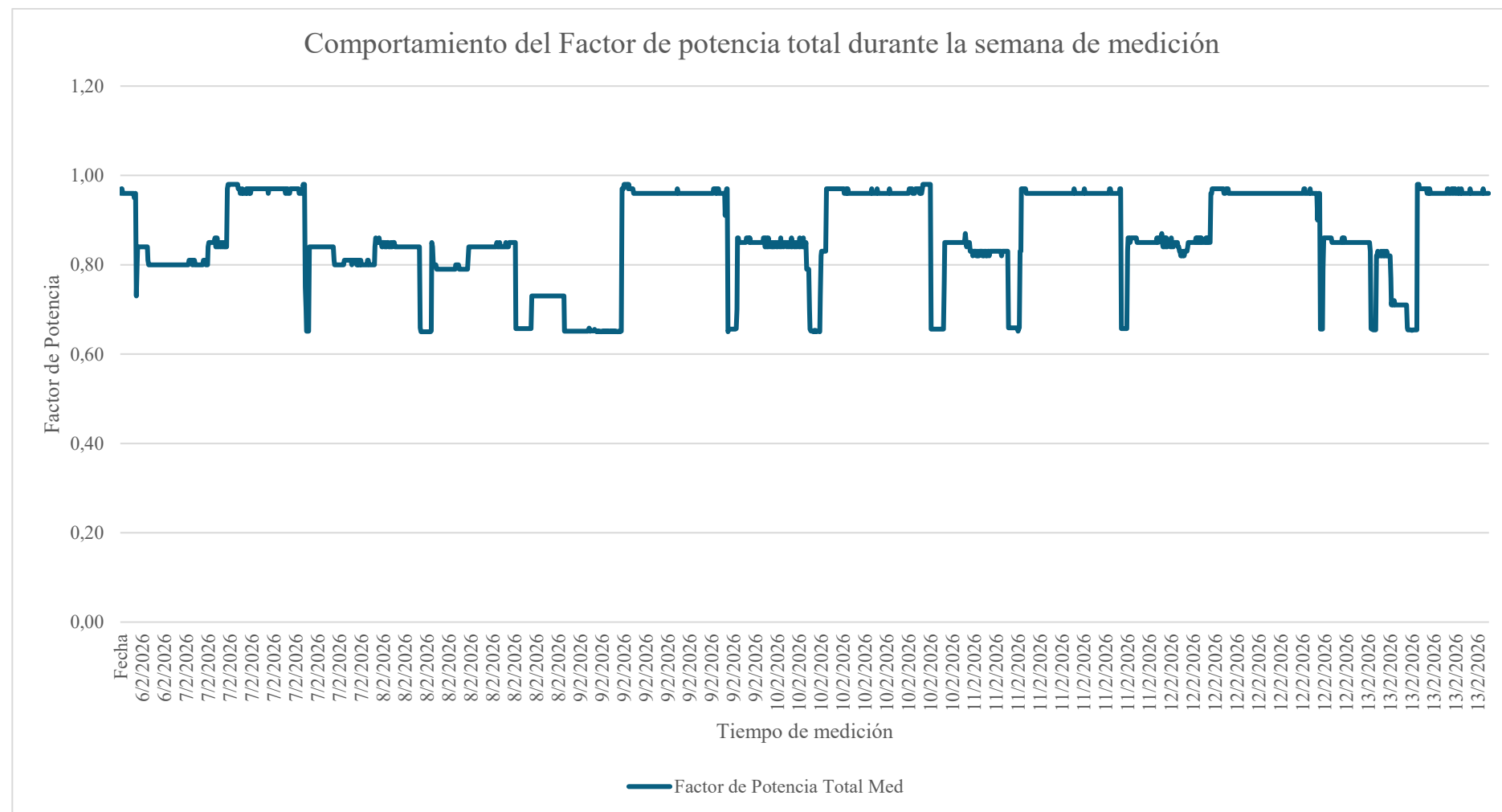


Figura M.4. Comportamiento del factor de potencia total durante el periodo de medición

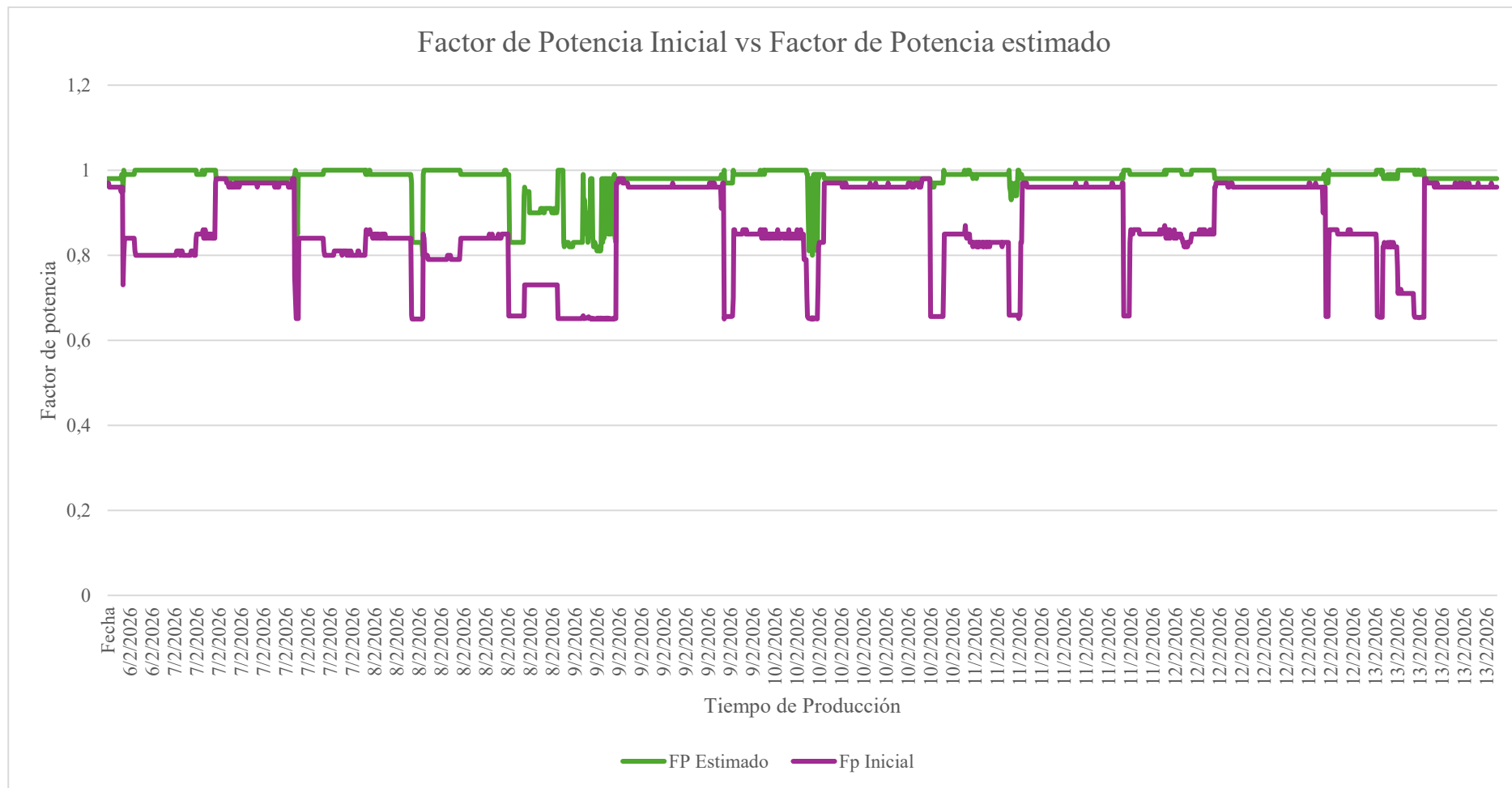
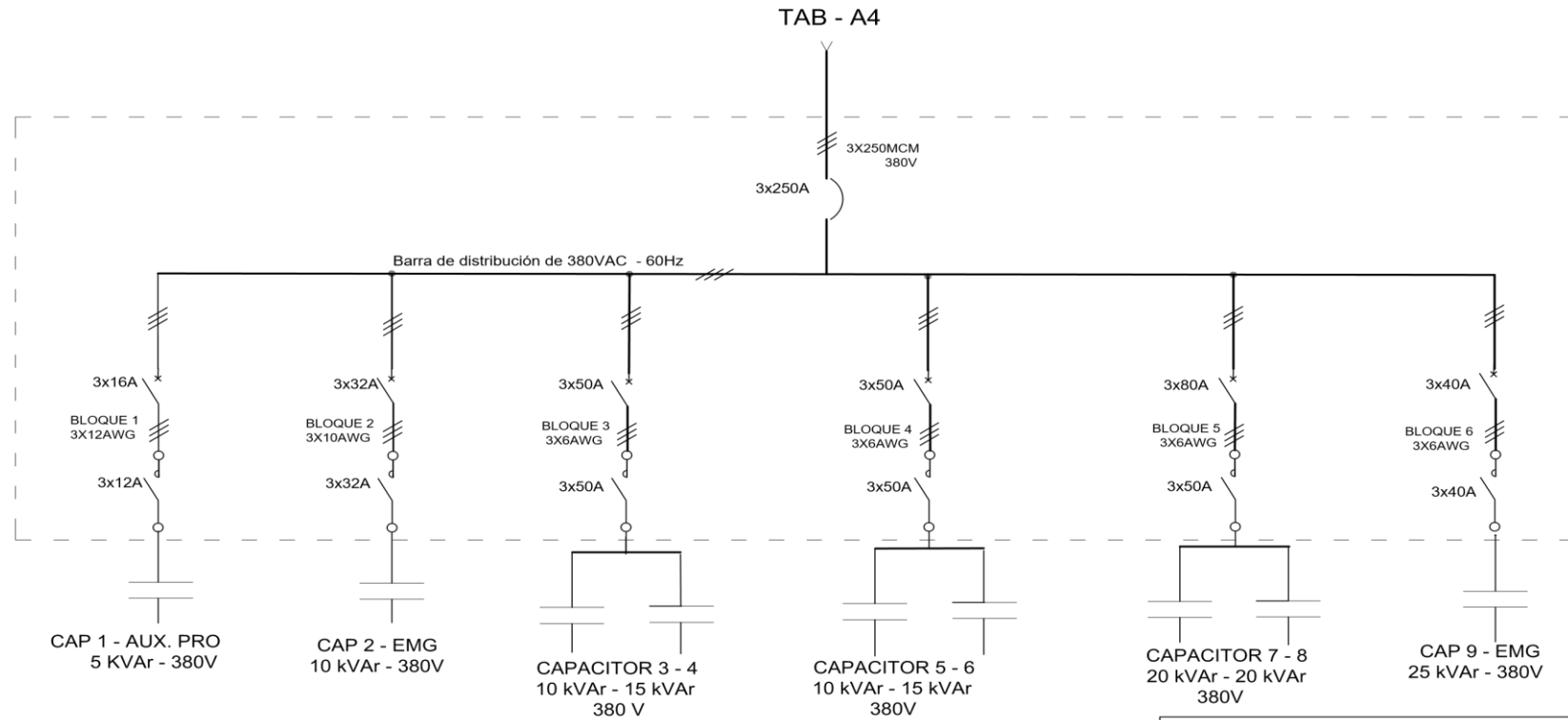


Figura M.6. Comportamiento del factor de potencia inicial y factor de potencia estimado.

ANEXO N

**DIAGRAMA UNIFILAR DE CONTROL Y FUERZA DE LA NUEVA DISTRIBUCIÓN
DEL BANCO DE CAPACITORES**

DIAGRAMA UNIFILAR REORGANIZACIDO DEL BANCO DE CAPACITORES



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICAELABORADO POR:
-Toapanta Andrango Stalin
-Telenchana Quilligana Margoth

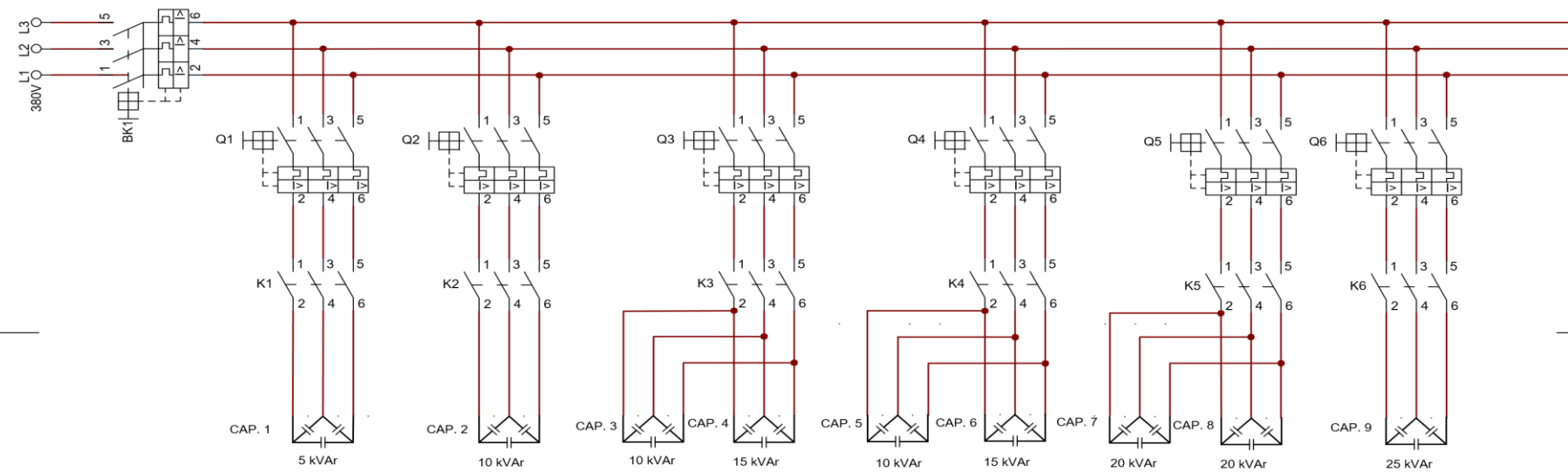
REVISADO POR:

APROBADO POR:

Diagra. Unifilar 380 V

FECHA: 14/08/2026

DIAGRAMA DE FUERZA DEL BANCO AUTOMÁTICO DE CAPACITORES



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICA

ELABORADO POR :
-Toapanta Andrango Stalin
-Telenchana Quilligana Margoth



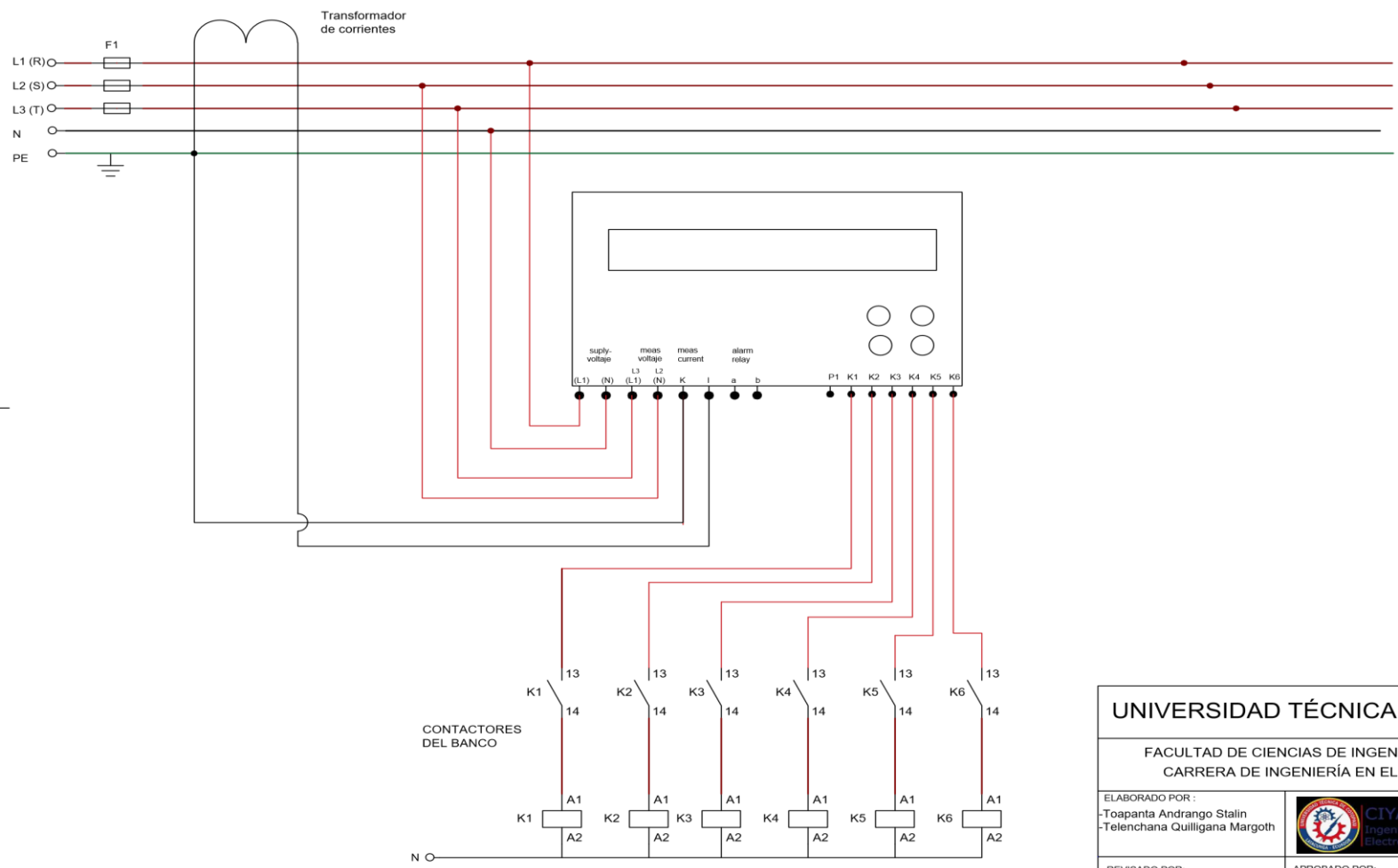
REVISADO POR:

APROBADO POR:

Diagra.Unifilar 380 V

FECHA: 14/08/2026

DIAGRAMA DE CONTROL DEL BANCO AUTOMÁTICO DE CAPACITORES



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICA

ELABORADO POR:
-Toapanta Andrango Stalin
-Telenchana Quilligana Margoth



REVISADO POR:

APROBADO POR:

Diagra.Unifilar 380 V

FECHA: 14/08/2026