**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**
**Universidad del Perú. Decana de América**
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Física

# Evaluación de la calidad de energía eléctrica en una planta industrial mediante analizadores de redes: impacto técnico y tarifario

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**
Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

**AUTOR**
Vladimir MANCHA DE LA CRUZ

**ASESOR(A)**
Mg. María Luisa CERÓN LOAYZA
Mg. Abel Edwin CCOYCCOSI CHURA(Coasesor)

Lima, Perú
2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

**Referencia bibliográfica**

Mancha, V. (2026). *Evaluación de la calidad de energía eléctrica en una planta industrial mediante analizadores de redes: impacto técnico y tarifario*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

## Metadatos complementarios

| | |
|---|---|
| **Datos de autor** | |
| Nombres y apellidos | Vladimir Mancha de la Cruz |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 41522622 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0009-0009-4505-484X |
| **Datos de asesor** | |
| Nombres y apellidos | María Luisa Cerón Loayza |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 10013268 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0000-0002-9655-2883 |
| **Datos de coasesor** | |
| Nombres y apellidos | Abel Edwin Ccoyccosi Chura |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 48496457 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0009-0008-4476-1027 |
| **Datos del jurado** | |
| **Presidente del jurado** | |
| Nombres y apellidos | Jesús Félix Sánchez Ortiz |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 06532590 |
| **Miembro del jurado 1** | |
| Nombres y apellidos | Jose Hermenegildo Galarreta Diaz |

| | |
|---|---|
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 25583872 |
| **Miembro del jurado 2** | |
| Nombres y apellidos | Percy Arturo Paz Retuerto |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 07175524 |
| **Datos de investigación** | |
| Línea de investigación | No Aplica |
| Grupo de investigación | No Aplica |
| Agencia de financiamiento | Sin Financiamiento |
| Ubicación geográfica de la investigación | Edificio: Corporación Roca S.A.C. (planta industrial)<br>País: Perú<br>Departamento: Lima<br>Provincia: Lima<br>Distrito: Puente Piedra<br>Centro poblado: No aplica<br>Urbanización: Asociación El Dorado<br>Manzana y lote: Mz. I, Lt. 08<br>Calle: Av. Contumaza<br>Latitud: -11.830067<br>Longitud: -77.099366 |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | Mayo 2024 |
| URL de disciplinas OCDE | Ingeniería eléctrica y electrónica, https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01<br><br>Ciencias físicas. https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.03.00) |

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

# ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 09:00 horas del sábado 15 de agosto de 2026, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz (Presidente), Mg. Jose Hermenegildo Galarreta Diaz (Miembro Titular), Mg. María Luisa Cerón Loayza (Asesora) y el Lic. Percy Arturo Paz Retuerto (Miembro Suplente), se dió inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Trabajo de Suficiencia Profesional para optar el Título Profesional de Licenciado en Física (según Art. 45.2 de la Ley N° 30220), del bachiller:

**MANCHA DE LA CRUZ, VLADIMIR**

Dando lectura al Resumen del Expediente, el presidente del Jurado, invitó al bachiller Vladimir, Mancha de la Cruz a realizar su exposición del Trabajo de Suficiencia Profesional titulado *"Evaluación de la calidad de energía eléctrica en una planta industrial mediante analizadores de redes: impacto técnico y tarifario"*

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el presidente, invitó al bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, el Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al resultado de la deliberación. Ha obtenido la calificación de:

| 19 | Diecinueve | Aprobado con máximos honores |
|---|---|---|
| (NÚMERO) | (LETRAS) | (MENCIÓN) |

Finalmente, el Presidente del Jurado, propone al consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al bachiller Vladimir, Mancha de la Cruz. Siendo las 09:35..... horas, se levanta la sesión.

**Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz**
Presidente

**Mg. Jose Hermenegildo Galarreta Diaz**
Miembro Titular

**Mg. Maria Luisa Cerón Loayza**
Asesor

**Lic. Percy Arturo Paz Retuerto**
Miembro Suplente



Scanned with CamScanner

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

## Anexo 1

# CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo MARÍA LUISA CERÓN LOAYZA en mi condición de profesora acreditada con el ACUERDO COMITÉ DE GESTIÓN N° 081-EPF-FCF-26 sobre el Trabajo de Suficiencia Profesional, cuyo título es **"EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL MEDIANTE ANALIZADORES DE REDES: IMPACTO TÉCNICO Y TARIFARIO"** presentado por el Bachiller Vladimir Mancha de la Cruz, para optar el Título Profesional de Licenciado en Física, bajo la modalidad de Trabajo de Suficiencia Profesional (TSP).

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con **el 10% de similitud**, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional**.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del Título Profesional de Licenciado en Física

Lima, 29 de setiembre de 2026

Firma del docente ----------

Nombres y Apellidos del docente: María Luisa Cerón L

DNI: 10013268

*La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.*

# Dedicatoria

A mis padres, Marina y Germán, por su esfuerzo y constancia. Su apoyo y esperanza me acompañaron en cada etapa de mi formación. Este logro refleja el fruto de su dedicación.

# Agradecimientos

A la empresa Roca, por brindar el entorno y las condiciones que hicieron posible el desarrollo del presente trabajo.

A Greener S.A.C., por brindarme el apoyo técnico y el acceso a los equipos de medición utilizados en el estudio de calidad de energía eléctrica. La experiencia desarrollada durante este trabajo fortaleció significativamente mi formación profesional y técnica.

Al Ing. Abel Ccoyccosi, por su apoyo constante y disposición a lo largo del proceso, así como por su valiosa contribución en el ámbito del análisis y la comprensión del estudio realizado.

A la Mg. María Luisa Cerón Loayza, asesora del presente trabajo, por su valioso acompañamiento en la redacción, estructuración y desarrollo metodológico de esta investigación. Sus orientaciones y observaciones fueron fundamentales para fortalecer la calidad y organización del trabajo.

Al Bach. Christian Guillmar Huanca Osco, Bachiller en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), por su disposición para resolver las consultas técnicas planteadas durante el desarrollo del estudio, así como por su apoyo en la verificación de los cálculos realizados, contribuyendo a la solidez técnica de este trabajo.

Al Dr. David Pareja Quispe, por sus orientaciones y aportes, que permitieron elaborar de manera idónea este trabajo.

A todos ellos, mi sincero agradecimiento.

# RESUMEN

Se evaluó la calidad de energía eléctrica en la planta industrial Corporación Roca S.A.C. mediante un analizador de redes trifásico Metrel MI2892, con registro continuo de siete días en el punto de acoplamiento común (220 V, 60 Hz). Se midieron tensión eléctrica, corriente eléctrica, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, distorsión armónica total de tensión ($THD_v$) y distorsión de demanda total de corriente (TDD), además de flicker y desbalance de tensión eléctrica. La máxima demanda registrada fue de 134.03 kW, con la máquina peletizadora como carga dominante (88.01 kW). Los resultados mostraron que el índice $THD_v$ promedio (3.82 %) y el TDD de corriente (7.65 %) cumplen con la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) y el estándar del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 519-2014, respectivamente; sin embargo, la tensión de suministro supera el rango admisible de $\pm 5$ % en el 38 % del tiempo y los armónicos de corriente de orden 5 y 11 presentan transgresiones individuales. El factor de potencia promedio fue de 0.95 inductivo. El análisis tarifario determinó que el cambio de la tarifa BT3 (baja tensión) a la tarifa MT3 (media tensión), con consumo en horas fuera de punta genera un ahorro mensual de S/. 21 356.66 (46.8 %), con retorno de inversión de 7 meses.

***Palabras clave:*** calidad de energía eléctrica, distorsión armónica, factor de potencia, demanda industrial, análisis tarifario, IEEE 519, NTCSE.

# ABSTRACT

The electric power quality at the Corporación Roca S.A.C. industrial plant was evaluated using a Metrel MI2892 three-phase power quality analyzer, with continuous seven-day monitoring at the point of common coupling (220 V, 60 Hz). Voltage, current, active and reactive power, power factor, total harmonic distortion in voltage ($THD_v$), total demand distortion in current (TDD), flicker, and voltage unbalance were recorded. The maximum demand reached 134.03 kW, with the pelletizing machine as the dominant load (88.01 kW). Results showed that the average $THD_v$ (3.82 %) and current TDD (7.65 %) comply with the Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) and the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 519-2014 limits, respectively; however, the supply voltage exceeds the admissible $\pm 5$ % range in 38 % of intervals, and 5th and 11th order current harmonics present individual violations. The average power factor was 0.95 inductive. The tariff analysis showed that switching from the low-voltage BT3 tariff to the medium-voltage MT3 tariff with off-peak consumption generates a monthly saving of S/. 21 356.66 (46.8 %), with a 7-month payback period.

***Keywords:*** power quality, harmonic distortion, power factor, industrial demand, tariff analysis, IEEE 519, NTCSE.

# ÍNDICE

**Pag.**

**Dedicatoria** . . . . . I

**Agradecimientos** . . . . . II

**RESUMEN** . . . . . III

**ABSTRACT** . . . . . IV

**LISTA DE TABLAS** . . . . . IX

**LISTA DE FIGURAS** . . . . . X

**CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN** . . . . . 1

1.1 Situación problemática . . . . . 2

1.1.1 Problema general . . . . . 2

1.1.2 Problemas específicos . . . . . 3

1.2 Motivación . . . . . 3

1.3 Justificación . . . . . 3

1.4 Objetivos . . . . . 4

1.4.1 Objetivo general . . . . . 4

1.4.2 Objetivos específicos . . . . . 4

**CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO** . . . . . 5

2.1 Antecedentes . . . . . 5

2.2 Base teórica . . . . . 6

2.2.1 Energía y potencia en sistemas eléctricos . . . . . 6

2.2.2 Potencia en régimen sinusoidal . . . . . 7

2.2.3 Potencia en señales no sinusoidales . . . . . 9
2.2.4 Representación espectral mediante series de Fourier . . . . . 11
2.2.5 Distorsión armónica . . . . . 12
2.2.6 Factor de potencia en condiciones reales . . . . . 14
2.2.7 Desbalance en sistemas trifásicos . . . . . 15
2.2.8 Calidad de energía eléctrica . . . . . 16
2.2.9 Normativa técnica . . . . . 17
2.2.10 Origen físico de los armónicos en cargas no lineales . . . . . 19
2.2.11 Factor de potencia en sistemas no sinusoidales . . . . . 20

**CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y ÁREA DE ESTUDIO** . . . . . 22
3.1 Metodología . . . . . 22
3.1.1 Enfoque metodológico . . . . . 22
3.1.2 Diseño experimental . . . . . 22
3.1.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos . . . . . 23
3.1.4 Procedimiento experimental . . . . . 24
3.1.5 Procesamiento y análisis de datos . . . . . 25
3.1.6 Validación de resultados . . . . . 26
3.2 Área de estudio . . . . . 27
3.2.1 Caracterización de la planta industrial . . . . . 28
3.2.2 Diagrama unifilar de la instalación . . . . . 28

**CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN** . . . . . 30
4.1 Presentación del análisis, interpretación y discusión de resultados . . . . . 30
4.1.1 Análisis de la potencia eléctrica . . . . . 30
4.1.2 Análisis del consumo por equipos . . . . . 32
4.1.3 Análisis del factor de potencia y la potencia reactiva . . . . . 34
4.1.4 Análisis de la tensión y desbalance . . . . . 37
4.1.5 Análisis del flicker . . . . . 39
4.1.6 Análisis de la distorsión armónica . . . . . 40

4.1.6.1 Distorsión armónica en tensión ($THD_v$) . . . . . 40
4.1.6.2 Distorsión de demanda total en corriente (TDD) . . . . . 42
4.1.7 Síntesis del cumplimiento normativo . . . . . 44
4.2 Verificación de conformidad normativa . . . . . 46

**CAPÍTULO 5. IMPACTOS** . . . . . 47
5.1 Propuesta para la solución del problema . . . . . 47
5.1.1 Propuesta técnica: mitigación de armónicos de corriente . . . . . 47
5.1.2 Propuesta técnica: regularización de la tensión de suministro . . . . 48
5.1.3 Propuesta tarifaria: análisis y cambio de opción tarifaria . . . . . 49
5.1.3.1 Propuesta óptima: MT3 con consumo solo en horas fuera de punta . . . . . 51
5.2 Beneficios que aporta la propuesta . . . . . 52
5.2.1 Beneficios técnicos . . . . . 52
5.2.2 Beneficios económicos . . . . . 53
5.2.3 Beneficios para la gestión energética . . . . . 54

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** . . . . . 55

**Referencias** . . . . . 60

**Anexos** . . . . . 61
Marco Conceptual o Glosario . . . . . 61

# LISTA DE TABLAS

**Pag.**


2.1 Límites normativos NTCSE para parámetros de calidad de energía eléctrica 18

2.2 Límites de TDD e individuales de corriente según IEEE 519-2014 (voltajes 120 V – 69 kV) . . . . . 19

3.1 Parámetros de medición del estudio de calidad de energía eléctrica . . . . . 24

3.2 Organización de variables y gráficos generados . . . . . 26

3.3 Descripción de los puntos de medición . . . . . 29

4.1 Resumen diario de mediciones — Tablero General C-2 (mayo 2024) . . . . 31

4.2 Resumen de máxima demanda por equipo eléctrico. . . . . 32

4.3 Nivel de potencia activa, reactiva y factor de potencia en el Tablero General (C-2). . . . . 35

4.4 Resumen diario de energía reactiva inductiva — Tablero General C-2 (mayo 2024) . . . . . 36

4.5 Tensión RMS registrada en el Tablero General. . . . . 37

4.6 Desbalance de tensión en el Tablero General. . . . . 38

4.7 Índice de severidad de flicker ($P_{st}$) en el Tablero General. . . . . 39

4.8 Tasa de distorsión total de armónicos en tensión ($THD_v$) en el Tablero General. 41

4.9 Armónicos individuales de tensión — Tablero General (NTCSE) . . . . . 42

4.10 Distorsión de demanda total en corriente (TDD) en el Tablero General. . . . 43

4.11 Armónicos individuales de corriente más representativos, según IEEE 519-2014. . . . . 45

4.12 Resumen del cumplimiento normativo de los parámetros de calidad de energía eléctrica evaluados en el Tablero General. . . . . 45

5.1 Comparativo de precios unitarios de los pliegos tarifarios BT3 y MT3 vigentes. 50

5.2 Comparativo de facturación mensual según escenario tarifario evaluado (proyección propia a partir del perfil de carga medido, mayo 2024). . . . . 51

5.3 Facturación proyectada — Propuesta óptima: MT3 con consumo solo en HFP. 52

5.4 Evaluación económica de los escenarios tarifarios propuestos. . . . . 53

5 Resumen de parámetros de calidad de energía eléctrica y cumplimiento normativo. . . . . 63

# LISTA DE FIGURAS

**Pag.**

3.1 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de la planta y ubicación de los puntos de medición PM1 y PM2. . . . . 29

4.1 Perfil de Potencia Activa en Tablero General. . . . . 30
4.2 Registro de potencia activa — Máquina peletizadora. . . . . 32
4.3 Registro de potencia activa — Máquina de lavado. . . . . 33
4.4 Registro de potencia activa — Edificios (oficinas). . . . . 34
4.5 Perfil de potencia reactiva inductiva en el circuito C-2. . . . . 35
4.6 Perfil de variación de tensión en el Tablero General. . . . . 38
4.7 Perfil de variación del flicker en el Tablero General. . . . . 40
4.8 Perfil de variación del $THD_v$ en el Tablero General. . . . . 41
4.9 Perfil de variación del TDD en el Tablero General. . . . . 44

1 Diagrama conceptual de parámetros de calidad de energía y normativa aplicable. . . . . 63
2 Recibo de facturación eléctrica — ciclo junio de 2024, correspondiente al consumo del periodo 03/05/2024 al 04/06/2024, Corporación Roca S.A.C., emitido por Enel Distribución. . . . . 64

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía eléctrica constituye un factor determinante en el desempeño de las instalaciones industriales, debido a su influencia directa sobre la eficiencia operativa, la confiabilidad de los equipos y los costos asociados al consumo de energía eléctrica (Ugwuagbo *et al.*, 2026). En este contexto, la presencia de perturbaciones eléctricas, tales como distorsión armónica, bajo factor de potencia y variaciones de tensión, puede generar pérdidas adicionales, sobrecalentamiento en los equipos y penalizaciones económicas en la facturación eléctrica.

En un escenario de creciente demanda de energía eléctrica y mayor exigencia en la competitividad industrial, resulta fundamental evaluar de manera rigurosa los parámetros eléctricos que caracterizan el comportamiento de las instalaciones, así como analizar las condiciones tarifarias que influyen en la gestión económica de la energía.

En el caso de la empresa Corporación Roca S.A.C., ubicada en el distrito de Puente Piedra, se identificó la necesidad de analizar la calidad de energía eléctrica en su planta industrial, debido a la operación de cargas de alta demanda y características no lineales, como una peletizadora y una lavadora industrial. Estas condiciones pueden afectar el perfil de consumo eléctrico, generando desviaciones en los parámetros de calidad de energía eléctrica y posibles impactos en la facturación.

El presente estudio se enmarca en normas técnicas nacionales e internacionales, tales como la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE, 1997), el estándar del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE, 2014) 519 y la norma de la International Electrotechnical Commission (IEC, 2015) 61000-4-30, las cuales establecen criterios para la medición, evaluación y control de parámetros eléctricos como tensión eléctrica, potencia eléctrica, factor de potencia y distorsión armónica.

La investigación tiene como objetivo caracterizar el comportamiento eléctrico de la planta mediante mediciones realizadas en el punto de acoplamiento común y en los principales equipos de producción, así como evaluar la adecuación de la tarifa eléctrica contratada. A partir de ello, se busca proponer alternativas que optimicen la relación costo-beneficio en el consumo de energía eléctrica.

Desde el punto de vista académico, este trabajo se enmarca en la aplicación de los principios de los sistemas eléctricos de potencia y la calidad de energía eléctrica, integrando el análisis técnico de variables eléctricas con criterios de gestión energética, con el fin de plantear soluciones orientadas a mejorar la eficiencia operativa y económica en el ámbito industrial (Arrillaga y Watson, 2003; Dugan *et al.*, 2012).

## 1.1. Situación problemática

En la planta industrial Corporación Roca S.A.C., ubicada en Puente Piedra, Lima, la operación de cargas de alta demanda y comportamiento no lineal —como la máquina peletizadora y la lavadora industrial— constituye una fuente potencial de perturbaciones eléctricas, particularmente distorsión armónica y bajo factor de potencia, asociadas a la naturaleza de estas cargas. Asimismo, resulta necesario evaluar otros parámetros de calidad de energía eléctrica registrados en el punto de suministro, como el nivel de tensión y el desbalance entre fases, cuyo origen —interno o externo a la instalación— solo puede determinarse mediante un análisis técnico basado en mediciones reales. La ausencia de dicho análisis impide identificar las causas de ineficiencia energética, tomar decisiones de mejora operativa y optimizar los costos asociados al suministro eléctrico.

### 1.1.1. Problema general

¿Cuál es el estado de la calidad de energía eléctrica de la planta industrial Corporación Roca S.A.C. y qué mejoras técnicas y tarifarias permitirían optimizar su

consumo de energía eléctrica?

### 1.1.2. Problemas específicos

1) ¿Cuál es el comportamiento de los principales parámetros de calidad de energía eléctrica y cuáles son los equipos de mayor consumo en la planta industrial Corporación Roca S.A.C.?

2) ¿En qué medida los parámetros de calidad de energía eléctrica registrados en la planta industrial cumplen los límites establecidos por las normas nacionales e internacionales aplicables?

3) ¿Qué mejoras técnicas y tarifarias pueden proponerse para reducir los costos de energía eléctrica de la planta y cuál sería su impacto económico?

## 1.2. Motivación

La motivación del presente trabajo surge de la oportunidad de aplicar herramientas de medición especializadas en una instalación industrial real, con acceso directo a los datos de campo. Esto permitió caracterizar el comportamiento eléctrico del sistema, evaluar el cumplimiento normativo y proponer mejoras concretas con sustento técnico y económico.

## 1.3. Justificación

La calidad de energía eléctrica es un aspecto fundamental en el funcionamiento adecuado de los sistemas eléctricos, porque las desviaciones en parámetros como tensión, factor de potencia o contenido armónico pueden afectar el desempeño de los equipos conectados a la red eléctrica. Desde la perspectiva de la física aplicada, el análisis de estos fenómenos permite comprender cómo las características de las cargas influyen en la distribución de la energía y en la aparición de perturbaciones eléctricas asociadas a los procesos de consumo y conversión energética.

El trabajo se justifica además por la necesidad de evaluar la adecuación de la opción tarifaria contratada, considerando el perfil de carga real de la instalación y los pliegos tarifarios vigentes del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). La integración del análisis técnico de calidad de energía eléctrica con la evaluación económica tarifaria constituye el aporte diferenciador del presente estudio.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Analizar la calidad de energía eléctrica en una planta industrial mediante mediciones con analizadores de redes, identificando parámetros críticos y proponiendo mejoras técnicas y tarifarias que optimicen el consumo de energía eléctrica.

### 1.4.2. Objetivos específicos

1. Registrar y evaluar los parámetros de calidad de energía eléctrica (tensión eléctrica, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, distorsión armónica, flicker y desbalance de tensión) en el tablero general de la planta, identificando los equipos de mayor consumo y su impacto en el sistema.

2. Comparar los resultados obtenidos con los límites establecidos en normas internacionales (IEEE 519, IEC 61000-2-2) y nacionales (NTCSE), determinando el grado de cumplimiento normativo del sistema eléctrico.

3. Diseñar y proponer mejoras técnicas y tarifarias que reduzcan los costos de energía eléctrica de la planta, evaluando su impacto económico.

# CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

## 2.1. Antecedentes

El estudio de la calidad de energía eléctrica en sistemas industriales ha adquirido creciente relevancia debido a la incorporación de cargas no lineales y equipos basados en electrónica de potencia, los cuales modifican el comportamiento convencional de las señales eléctricas.

A nivel internacional, diversos trabajos han analizado el impacto de estas cargas en la operación de los sistemas eléctricos. Se ha identificado que la presencia de armónicos incrementa las pérdidas eléctricas, genera sobrecalentamiento en equipos y reduce la eficiencia energética del sistema (Dugan *et al.*, 2012). Asimismo, estudios especializados han abordado la propagación de armónicos en redes eléctricas, destacando su influencia en la calidad de energía eléctrica y en la confiabilidad del suministro (Arrillaga y Watson, 2003).

En el contexto actual, la proliferación de dispositivos basados en electrónica de potencia ha incrementado los niveles de distorsión armónica en sistemas industriales, generando desviaciones respecto a las condiciones sinusoidales ideales y afectando parámetros como el factor de potencia y la estabilidad del sistema eléctrico (Zobaa y Aleem, 2018). En el contexto latinoamericano, estudios aplicados en sistemas industriales han evidenciado metodologías similares de evaluación en el punto de acoplamiento común (Angarita y Zapata, 2016). En el ámbito nacional, trabajos desarrollados en instalaciones industriales peruanas han aplicado enfoques equivalentes para caracterizar el comportamiento eléctrico de sistemas con cargas no lineales y evaluar su adecuación a la normativa vigente (Condori Quispe, 2019).

Adicionalmente, estudios aplicados han demostrado que la evaluación de la calidad de energía eléctrica en el punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés, Point of Common Coupling) constituye un enfoque fundamental para analizar la interacción entre las cargas industriales y la red eléctrica. En este sentido, Ugwuagbo *et al.* (2026) evidencian

que la distorsión armónica está directamente asociada al tipo de carga y a sus condiciones de operación.

Desde el punto de vista normativo, estándares internacionales establecen límites para la distorsión armónica con el fin de garantizar condiciones adecuadas de operación. El estándar IEEE 519 (IEEE, 2014) define valores máximos permisibles en tensión y corriente evaluados en el PCC, mientras que la norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2015) establece procedimientos para la medición de parámetros de calidad de energía eléctrica. A nivel nacional, la NTCSE (OSINERGMIN, 1997) regula los niveles de calidad del suministro eléctrico en el Perú.

No obstante, a pesar del desarrollo de estos estudios y marcos normativos, se observa una limitada aplicación de análisis de calidad de energía eléctrica bajo condiciones reales de operación en plantas industriales específicas en el contexto local. Esta situación evidencia la necesidad de realizar evaluaciones que permitan caracterizar el comportamiento eléctrico de instalaciones reales y su impacto técnico y económico.

En este contexto, el presente trabajo se orienta a evaluar la calidad de energía eléctrica en una planta industrial, mediante mediciones directas en el punto de acoplamiento común y en circuitos representativos de carga, con el propósito de identificar perturbaciones eléctricas y su influencia en el desempeño del sistema.

## 2.2. Base teórica

### 2.2.1. Energía y potencia en sistemas eléctricos

En los sistemas eléctricos, la energía se manifiesta como la capacidad de realizar trabajo mediante la transferencia de energía eléctrica a través de un circuito. Esta transferencia ocurre cuando una diferencia de potencial impulsa el flujo de corriente hacia las cargas conectadas (Alexander y Sadiku, 2017; Hayt *et al.*, 2019).

La potencia eléctrica representa la tasa de transferencia de energía en el tiempo, constituyendo una magnitud fundamental para el análisis del comportamiento energético de los sistemas eléctricos (Dugan *et al.*, 2012).

Desde un enfoque general, la potencia instantánea en un circuito eléctrico se define como:

$$p(t) = v(t)\, i(t) \tag{2.1}$$

Donde $p(t)$ es la potencia eléctrica instantánea, $v(t)$ es la tensión eléctrica instantánea e $i(t)$ es la corriente eléctrica instantánea.

Esta expresión describe el flujo de energía en cada instante y es válida independientemente de la forma de onda de la tensión y la corriente, permitiendo analizar tanto condiciones ideales como reales de operación.

Desde una perspectiva física, la potencia instantánea puede tomar valores positivos o negativos. Un valor positivo indica transferencia de energía desde la fuente hacia la carga, mientras que un valor negativo representa un retorno de energía hacia el sistema, asociado al almacenamiento temporal en elementos reactivos como inductancias y capacitancias (Arrillaga y Watson, 2003).

En sistemas reales, la presencia de desfases entre tensión y corriente, así como la distorsión de las formas de onda, da lugar a componentes de potencia que no contribuyen al trabajo útil, afectando la eficiencia del sistema eléctrico.

En consecuencia, el análisis de la energía y la potencia constituye la base para el estudio de fenómenos en corriente alterna, incluyendo el comportamiento en régimen sinusoidal y no sinusoidal, los cuales serán desarrollados en las siguientes secciones.

### 2.2.2. Potencia en régimen sinusoidal

En sistemas de corriente alterna bajo condiciones sinusoidales, las tensiones y corrientes pueden representarse mediante funciones periódicas de tipo senoidal. Esta condición permite simplificar el análisis utilizando valores eficaces y representaciones fasoriales (Dugan *et al.*, 2012; Grainger y Stevenson, 1994).

Cuando la tensión y la corriente presentan un desfase angular $\phi$, la potencia instantánea varía en el tiempo y puede descomponerse en componentes con distinto significado físico. A partir de este comportamiento, se definen tres magnitudes

fundamentales: potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente.

La potencia activa $P$ corresponde a la energía efectivamente convertida en trabajo útil o disipada en la carga, y se expresa como:

$$P = VI\cos\phi \tag{2.2}$$

donde $P$ es la potencia activa, $V$ es el valor eficaz de la tensión eléctrica, $I$ es el valor eficaz de la corriente eléctrica y $\phi$ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente eléctricas.

La potencia reactiva $Q$ está asociada al intercambio periódico de energía entre la fuente y los elementos reactivos del sistema, tales como inductancias y capacitancias, y se define como:

$$Q = VI\sin\phi \tag{2.3}$$

donde $Q$ es la potencia reactiva, $V$ es el valor eficaz de la tensión eléctrica, $I$ es el valor eficaz de la corriente eléctrica y $\phi$ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente eléctricas.

Por su parte, la potencia aparente $S$ representa la capacidad total del sistema para suministrar energía y se define como:

$$S = VI \tag{2.4}$$

donde $S$ es la potencia aparente, $V$ es el valor eficaz de la tensión eléctrica e $I$ es el valor eficaz de la corriente eléctrica.

Estas magnitudes se relacionan mediante el triángulo de potencias:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{2.5}$$

donde $S$ es la potencia aparente, $P$ es la potencia activa y $Q$ es la potencia reactiva.

Desde una perspectiva física, la potencia activa representa la transferencia neta de

energía hacia la carga, mientras que la potencia reactiva implica un intercambio oscilatorio de energía que, aunque no produce trabajo útil, incrementa la circulación de corriente en el sistema (Arrillaga y Watson, 2003).

El factor de potencia (FP), definido como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente, se expresa como:

$$\text{FP} = \cos\phi \tag{2.6}$$

donde $FP$ es el factor de potencia y $\phi$ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente eléctricas fundamentales.

Un factor de potencia bajo implica que una mayor corriente debe circular para suministrar la misma potencia útil, lo que incrementa las pérdidas en conductores y equipos eléctricos.

Este modelo es válido únicamente bajo condiciones sinusoidales ideales. En sistemas reales, la presencia de distorsión armónica altera la relación entre estas magnitudes, por lo que se requiere un análisis más general basado en componentes espectrales, el cual será desarrollado en las siguientes secciones.

### 2.2.3. Potencia en señales no sinusoidales

En sistemas eléctricos reales, las formas de onda de tensión y corriente pueden desviarse de la condición sinusoidal ideal debido a la presencia de cargas no lineales. Estas cargas modifican la relación entre tensión y corriente, generando señales distorsionadas que contienen múltiples componentes de frecuencia (Arrillaga y Watson, 2003; Zobaa y Aleem, 2018).

Bajo estas condiciones, la expresión de la potencia instantánea definida en la Ec. (2.1) permanece válida; sin embargo, la interpretación de las magnitudes de potencia requiere un enfoque más general. En particular, el modelo basado únicamente en el desfase angular entre tensión y corriente deja de ser suficiente para describir el comportamiento energético del sistema.

En presencia de distorsión armónica, la potencia activa continúa representando la

energía promedio transferida hacia la carga, mientras que la corriente eficaz total incluye tanto la componente fundamental como las componentes armónicas, incrementando el valor de $I_{\text{rms}}$ sin aportar directamente al trabajo útil. El subíndice rms corresponde al valor eficaz de la magnitud eléctrica (RMS, por sus siglas en inglés, root mean square) (Dugan *et al.*, 2012).

En este contexto, la potencia aparente se define como:

$$S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \tag{2.7}$$

donde $S$ es la potencia aparente, $V_{\text{rms}}$ es el valor eficaz de la tensión eléctrica e $I_{\text{rms}}$ es el valor eficaz de la corriente eléctrica.

mientras que la potencia activa se obtiene como el valor promedio de la potencia instantánea. En esta expresión, $T$ representa el período de la señal eléctrica, $v(t)$ la tensión eléctrica instantánea e $i(t)$ la corriente eléctrica instantánea:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)\, i(t)\, dt \tag{2.8}$$

La diferencia entre estas magnitudes evidencia la presencia de una componente adicional de potencia asociada a la distorsión armónica, conocida como potencia de distorsión, la cual no puede ser explicada únicamente mediante el desfase entre tensión y corriente:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \tag{2.9}$$

donde $S$ es la potencia aparente, $P$ es la potencia activa, $Q$ es la potencia reactiva y $D$ es la potencia de distorsión.

Como consecuencia, el factor de potencia en sistemas no sinusoidales no depende exclusivamente del ángulo de desfase, sino también del contenido armónico de la señal, por lo que su valor puede reducirse incluso en ausencia de desfase significativo.

Desde una perspectiva física, la distorsión implica que la energía eléctrica se distribuye en múltiples frecuencias, lo que incrementa la circulación de corriente en el

sistema, generando mayores pérdidas, sobrecarga en conductores y una reducción en la eficiencia global (Arrillaga y Watson, 2003).

En consecuencia, el análisis de la potencia en señales no sinusoidales requiere herramientas adicionales, como la descomposición espectral de las señales y la evaluación de la distorsión armónica, las cuales serán desarrolladas en las siguientes secciones.

### 2.2.4. Representación espectral mediante series de Fourier

En sistemas eléctricos reales, las formas de onda de tensión y corriente pueden presentar distorsión debido a la presencia de cargas no lineales. A pesar de esta complejidad, cualquier señal periódica puede descomponerse en una suma de componentes sinusoidales de distintas frecuencias mediante la serie de Fourier (Oppenheim *et al.*, 1997).

De forma general, una señal periódica puede expresarse como la suma de una componente fundamental y un conjunto de componentes armónicas, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema. Esta descomposición puede representarse de manera simplificada mediante:

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin(n\omega t + \phi_n) \tag{2.10}$$

donde $x(t)$ es la señal eléctrica periódica, $X_0$ es su componente continua, $X_n$ representa la amplitud de la componente armónica de orden $n$, $\omega$ es la frecuencia angular fundamental y $\phi_n$ es el ángulo de fase correspondiente (Arrillaga y Watson, 2003; Oppenheim *et al.*, 1997). Esta expresión permite describir cómo una señal no sinusoidal se construye a partir de múltiples componentes de frecuencia (Oppenheim *et al.*, 1997; Proakis y Manolakis, 2007).

En el contexto de los sistemas eléctricos de potencia, esta representación resulta fundamental, ya que permite identificar la presencia de armónicos en las formas de onda de tensión y corriente, facilitando su cuantificación y análisis en mediciones reales. Cada componente armónica contribuye de manera distinta al comportamiento del sistema, afectando parámetros como la potencia, las pérdidas y la eficiencia (Arrillaga y Watson, 2003).

Desde una perspectiva física, la descomposición espectral implica que la energía transportada por una señal no sinusoidal se distribuye en diferentes frecuencias. Esto significa que el sistema no opera únicamente a la frecuencia fundamental, sino que existen componentes adicionales que interactúan con los elementos eléctricos, generando efectos no deseados como sobrecorrientes y calentamiento.

Cabe señalar que, para fines de análisis en sistemas eléctricos, no es necesario desarrollar la formulación completa de los coeficientes de Fourier, sino comprender que esta herramienta permite cuantificar el contenido armónico de las señales y evaluar su impacto en el sistema eléctrico.

En consecuencia, la representación espectral mediante series de Fourier constituye la base teórica para la definición de parámetros como la distorsión armónica total (THD), los cuales serán desarrollados en la siguiente sección.

### 2.2.5. Distorsión armónica

La distorsión armónica es una de las principales manifestaciones de la degradación de la calidad de energía eléctrica en sistemas eléctricos modernos. Se produce cuando las formas de onda de tensión o corriente se desvían de su forma sinusoidal ideal debido a la presencia de cargas no lineales (Arrillaga y Watson, 2003; Zobaa y Aleem, 2018).

Estas cargas generan corrientes con componentes de frecuencia múltiple de la fundamental, conocidas como armónicos. Como consecuencia, las señales eléctricas pueden expresarse como la superposición de una componente fundamental y varias componentes armónicas, lo que altera su forma de onda original.

Para cuantificar el nivel de distorsión presente en una señal, se emplea el índice de distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés, Total Harmonic Distortion), definido como:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \tag{2.11}$$

donde $I_1$ es la componente fundamental de la corriente eléctrica, $I_n$ representa la componente armónica de corriente eléctrica de orden $n$, y $n$ es el orden del armónico. De

manera análoga, puede definirse el THD para la tensión eléctrica.

Este índice expresa la relación entre el contenido armónico total y la componente fundamental, proporcionando una medida del grado de distorsión de la señal.

Desde una perspectiva física, la presencia de armónicos implica que parte de la corriente que circula en el sistema no contribuye a la transferencia útil de energía, pero sí incrementa las pérdidas en conductores y equipos eléctricos. Esto se traduce en efectos como sobrecalentamiento, reducción de la eficiencia y posibles fallas en los equipos (Dugan *et al.*, 2012).

Además, los armónicos pueden interactuar con las impedancias del sistema, generando distorsión en la tensión de suministro, lo que afecta no solo a las cargas que los producen, sino también a otros equipos conectados a la misma red (Arrillaga y Watson, 2003).

En sistemas industriales, donde predominan equipos electrónicos de potencia como variadores de velocidad y rectificadores, la distorsión armónica puede alcanzar niveles significativos, convirtiéndose en un factor crítico en la evaluación de la calidad de energía eléctrica (Singh *et al.*, 1999).

En el contexto de sistemas industriales con cargas variables, el estándar IEEE 519-2014 introduce el índice de distorsión de demanda total (TDD, por sus siglas en inglés, Total Demand Distortion), definido como:

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{L,\max}} \times 100\,\% \tag{2.12}$$

donde $I_{L,\max}$ es la demanda máxima de corriente de carga en el punto de acoplamiento común, establecida sobre un período de medición donde $I_h$ es la componente armónica de corriente eléctrica de orden $h$, $h$ es el orden del armónico e $I_{L,\max}$ es la corriente eléctrica máxima de carga utilizada como demanda de referencia.

representativo. A diferencia del THD, que referencia el contenido armónico respecto a la componente fundamental, el TDD lo referencia respecto a la demanda máxima, constituyendo un indicador más apropiado para evaluar el impacto real de los armónicos de corriente en sistemas industriales con demanda variable (IEEE, 2014).

En consecuencia, el análisis de la distorsión armónica resulta fundamental para diagnosticar el comportamiento del sistema eléctrico, evaluar su impacto en la operación y establecer medidas correctivas orientadas a mejorar la eficiencia y confiabilidad del suministro.

### 2.2.6. Factor de potencia en condiciones reales

En sistemas eléctricos reales, el factor de potencia no puede interpretarse únicamente como el coseno del ángulo de desfase entre la tensión y la corriente. Esta definición es válida solo bajo condiciones sinusoidales ideales, las cuales rara vez se presentan en instalaciones industriales (Dugan *et al.*, 2012).

En presencia de cargas no lineales, las formas de onda de corriente contienen componentes armónicas que incrementan el valor eficaz total sin contribuir directamente a la potencia útil. Como consecuencia, el factor de potencia se ve afectado no solo por el desfase entre las componentes fundamentales, sino también por el contenido armónico de la señal (Zobaa y Aleem, 2018).

En este contexto, el factor de potencia se define de manera general como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente:

$$\text{FP} = \frac{P}{S} \tag{2.13}$$

donde $FP$ es el factor de potencia, $P$ es la potencia activa y $S$ es la potencia aparente.

Esta expresión permite evaluar el aprovechamiento real de la energía eléctrica en el sistema, considerando tanto el efecto del desfase como el de la distorsión.

Desde un enfoque práctico, el factor de potencia puede entenderse como el producto de dos componentes: el factor de desplazamiento, asociado al desfase entre tensión y corriente en la frecuencia fundamental, y el factor de distorsión, relacionado con la presencia de armónicos en la corriente (Arrillaga y Watson, 2003). De manera conceptual, esta relación puede expresarse como:

$$\text{FP} = \text{FD} \cdot \cos\phi \tag{2.14}$$

donde $FD = I_1/I_{\text{rms}}$ representa el factor de distorsión, $I_1$ es la componente fundamental de la corriente eléctrica, $I_{\text{rms}}$ es su valor eficaz total y $\phi$ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente eléctricas fundamentales.

Un factor de potencia bajo implica que una mayor corriente debe circular para suministrar la misma potencia activa, lo que incrementa las pérdidas en conductores, transformadores y otros equipos eléctricos, además de reducir la capacidad efectiva del sistema.

En entornos industriales, donde predominan cargas como variadores de velocidad y equipos electrónicos de potencia, es común encontrar factores de potencia reducidos debido a la combinación de desfase y distorsión armónica.

En consecuencia, la mejora del factor de potencia en condiciones reales requiere estrategias que aborden tanto la compensación reactiva como la mitigación de armónicos, con el fin de optimizar el desempeño energético del sistema eléctrico.

### 2.2.7. Desbalance en sistemas trifásicos

En un sistema trifásico ideal, las tensiones y corrientes de las tres fases presentan igual magnitud y están desfasadas entre sí en 120° eléctricos. Bajo estas condiciones, el sistema opera de manera equilibrada, permitiendo una distribución uniforme de la energía (Dugan *et al.*, 2012; Grainger y Stevenson, 1994).

En sistemas reales, es frecuente la presencia de desbalance, el cual ocurre cuando existen diferencias en la magnitud o en el ángulo de las tensiones o corrientes de fase. Este fenómeno puede originarse por una distribución desigual de cargas monofásicas, conexiones defectuosas o variaciones en las impedancias del sistema (Arrillaga y Watson, 2003). Para efectos del presente estudio, el desbalance se evaluó conforme al criterio de la norma IEC 61000-2-2, tomando como referencia la máxima desviación de tensión de fase respecto al valor promedio entre fases (IEC, 2002).

Desde una perspectiva física, el desbalance provoca una distribución no uniforme de corrientes en las fases, lo que puede generar sobrecargas localizadas, incremento de pérdidas y sobrecalentamiento en equipos eléctricos. En particular, los motores trifásicos son

altamente sensibles a este fenómeno, pudiendo presentar reducción de eficiencia, vibraciones y disminución de su vida útil.

Para cuantificar el nivel de desbalance, se emplea el factor de desbalance de tensión, definido como la relación entre la máxima desviación respecto al valor promedio y dicho valor medio, expresado en porcentaje:

$$\%\text{Desbalance} = \frac{V_{\text{max_desv}}}{V_{\text{prom}}} \times 100 \tag{2.15}$$

donde $V_{\text{max_desv}}$ es la máxima desviación de tensión eléctrica de fase respecto al valor promedio, y $V_{\text{prom}}$ es el valor promedio de la tensión eléctrica entre las fases.

Este indicador permite evaluar la severidad del desbalance y su impacto en la operación del sistema.

En el contexto de la calidad de energía eléctrica, el desbalance constituye un fenómeno que puede interactuar con otros efectos, como la distorsión armónica, incrementando las pérdidas y afectando la confiabilidad de los equipos.

Si bien el presente trabajo se centra en el análisis de la distorsión armónica y el factor de potencia, el desbalance de tensión y corriente se considera un parámetro complementario para la caracterización integral del sistema eléctrico.

### 2.2.8. Calidad de energía eléctrica

La calidad de energía eléctrica se refiere al grado en que las características del suministro, tales como la tensión, la frecuencia y la forma de onda, se mantienen dentro de límites aceptables para el correcto funcionamiento de los equipos conectados (IEEE, 2019; Bollen, 2000).

Desde una perspectiva física, un sistema eléctrico presenta adecuada calidad de energía eléctrica cuando la transferencia de energía se realiza de manera estable y eficiente, sin perturbaciones que alteren el comportamiento esperado de las cargas. En condiciones ideales, esto implica tensiones sinusoidales, equilibrio entre fases y un adecuado aprovechamiento de la energía suministrada.

En sistemas reales, la calidad de energía eléctrica puede verse afectada por diversos

fenómenos eléctricos. Entre los más relevantes se encuentran la distorsión armónica, el bajo factor de potencia y el desbalance en sistemas trifásicos, los cuales generan desviaciones respecto a las condiciones ideales de operación (Dugan *et al.*, 2012; Zobaa y Aleem, 2018).

Los fenómenos que afectan la calidad de energía eléctrica —distorsión armónica, bajo factor de potencia y desbalance trifásico— han sido desarrollados en las secciones precedentes. Su evaluación conjunta en el punto de acoplamiento común (PCC) permite caracterizar el desempeño integral del sistema eléctrico bajo condiciones reales de operación.

En el ámbito industrial, la calidad de energía eléctrica adquiere especial relevancia debido a la presencia de cargas no lineales y sistemas automatizados, los cuales pueden generar perturbaciones significativas en la red eléctrica, afectando tanto el desempeño operativo de los equipos como los costos asociados al consumo de energía eléctrica (Ugwuagbo *et al.*, 2026).

La evaluación de la calidad de energía eléctrica se realiza mediante la medición y análisis de parámetros eléctricos en puntos representativos del sistema, como el punto de acoplamiento común (PCC), permitiendo comparar los resultados obtenidos con los límites establecidos en normas técnicas (IEEE, 2014; IEC, 2015).

En consecuencia, el análisis de la calidad de energía eléctrica constituye una herramienta fundamental para el diagnóstico de sistemas eléctricos industriales, ya que permite identificar desviaciones, evaluar su impacto y establecer medidas orientadas a mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema.

### 2.2.9. Normativa técnica

La evaluación de la calidad de energía eléctrica en sistemas industriales se sustenta en normas técnicas que establecen criterios para la medición, análisis y límites aceptables de los parámetros eléctricos, permitiendo interpretar los resultados obtenidos en campo y determinar si las condiciones de operación del sistema son adecuadas.

A nivel internacional, el estándar IEEE 519 proporciona lineamientos para el control de la distorsión armónica en sistemas eléctricos de potencia, estableciendo límites permisibles para la distorsión armónica en tensión y corriente evaluados en el punto de

acoplamiento común (PCC), en función del nivel de tensión del sistema y de la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de carga máxima ($I_{SC}/I_L$), donde $I_{SC}$ es la corriente eléctrica de cortocircuito en el punto de acoplamiento común e $I_L$ es la corriente eléctrica de carga máxima (IEEE, 2014).

Por otro lado, la norma IEC 61000-4-30 define los métodos de medición de parámetros de calidad de energía eléctrica, tales como tensión, frecuencia y armónicos, clasificándolos en diferentes clases de precisión que garantizan la confiabilidad y comparabilidad de los datos obtenidos en estudios de campo (IEC, 2015).

En el ámbito nacional, la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) establece los niveles de calidad del suministro eléctrico en el Perú, incluyendo límites para variaciones de tensión, frecuencia y otras perturbaciones que puedan afectar la continuidad y calidad del servicio. Asimismo, el Código Nacional de Electricidad – Utilización proporciona criterios complementarios para el diseño y operación segura de las instalaciones eléctricas (OSINERGMIN, 1997; Ministerio de Energía y Minas, 2011).

Los límites normativos principales considerados en el presente estudio se resumen en las siguientes tablas. La Tabla 2.1 presenta los rangos admisibles establecidos por la NTCSE para los parámetros de calidad evaluados, mientras que la Tabla 2.2 indica los límites de distorsión armónica de corriente según IEEE 519-2014 en función de la relación $I_{SC}/I_L$.

**Tabla 2.1**

*Límites normativos NTCSE para parámetros de calidad de energía eléctrica*

| **Parámetro** | **Límite** | **Norma** |
|---|---|---|
| Tensión (baja tensión) | $\pm 5{,}0$ % del valor nominal | NTCSE |
| THDv | $\leq 8{,}0$ % | NTCSE |
| Flicker ($P_{st}$) | $\leq 1{,}0$ | NTCSE |
| Desbalance de tensión | $\leq 2{,}0$ % | IEC 61000-2-2 |

*Nota*. Elaboración propia, basado en NTCSE (OSINERGMIN, 1997) e IEC 61000-2-2 (IEC, 2002).

Cabe precisar que la determinación exacta de la corriente de cortocircuito ($I_{SC}$) en el punto de acoplamiento común requiere datos de la impedancia de la red aguas arriba, información que es de exclusiva disponibilidad de la empresa concesionaria Enel Distribución y que **no fue proporcionada** en el marco del presente estudio, pese a haber

**Tabla 2.2**

*Límites de TDD e individuales de corriente según IEEE 519-2014 (voltajes 120 V – 69 kV)*

| $I_{SC}/I_L$ | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h$ | **TDD** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $< 20$ | 4,0 | 2,0 | 1,5 | 0,6 | 0,3 | 5,0 |
| $20 - 50$ | 7,0 | 3,5 | 2,5 | 1,0 | 0,5 | 8,0 |
| $50 - 100$ | 10,0 | 4,5 | 4,0 | 1,5 | 0,7 | 12,0 |
| $100 - 1000$ | 12,0 | 5,5 | 5,0 | 2,0 | 1,0 | 15,0 |
| $> 1000$ | 15,0 | 7,0 | 6,0 | 2,5 | 1,4 | 20,0 |

*Nota*. Elaboración propia, basado en IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014).

sido solicitada. Ante esta limitación, y siguiendo un criterio técnico conservador, en el presente estudio se adoptó el rango $50 < I_{SC}/I_L < 100$ de la norma IEEE 519-2014, el cual resulta consistente con las características de la acometida en media tensión de la planta industrial y con los valores de tolerancia empleados en estudios de campo similares (IEEE, 2014). Se recomienda que estudios posteriores gestionen ante la concesionaria el dato exacto de $I_{SC}$, con el fin de precisar los límites individuales aplicables.

En el contexto del presente estudio, estas normas constituyen el marco de referencia para la evaluación de los parámetros medidos en la planta industrial. En particular, los niveles de distorsión armónica serán comparados con los límites establecidos por el estándar IEEE 519, mientras que la metodología de medición se fundamenta en los lineamientos de la IEC 61000-4-30.

De esta manera, la aplicación de la normativa técnica permite no solo validar los resultados obtenidos, sino también identificar desviaciones respecto a condiciones aceptables de operación, facilitando el diagnóstico del sistema eléctrico y la formulación de propuestas de mejora.

### 2.2.10. Origen físico de los armónicos en cargas no lineales

En los sistemas eléctricos, los armónicos se originan principalmente debido al comportamiento no lineal de ciertas cargas, en las cuales la corriente no es proporcional a la tensión aplicada. A diferencia de las cargas lineales, donde la relación tensión-corriente mantiene la forma sinusoidal, las cargas no lineales introducen deformaciones en la señal de corriente (Arrillaga y Watson, 2003; Zobaa y Aleem, 2018).

Desde una perspectiva física, este fenómeno se produce porque los dispositivos no lineales no consumen energía de manera continua a lo largo del ciclo de la tensión, sino en intervalos específicos. Como resultado, la corriente presenta formas de onda distorsionadas, caracterizadas por picos o discontinuidades, en lugar de seguir una variación sinusoidal suave.

Este comportamiento es característico de equipos que incorporan procesos de conmutación electrónica, tales como rectificadores, variadores de velocidad y fuentes de alimentación conmutadas. En estos dispositivos, la corriente es absorbida únicamente cuando la tensión supera ciertos umbrales, generando una forma de onda no sinusoidal (Dugan *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 1999).

Mediante la descomposición en series de Fourier, estas formas de onda pueden representarse como la suma de una componente fundamental y múltiples componentes armónicas. Esto implica que la corriente inyectada en el sistema contiene frecuencias adicionales que no forman parte de la señal original de la red.

Desde el punto de vista del sistema eléctrico, la presencia de estas corrientes armónicas genera caídas de tensión adicionales en las impedancias de la red, lo que puede provocar también distorsión en la tensión de suministro. De esta manera, el fenómeno no se limita a la corriente, sino que puede propagarse y afectar la calidad de la tensión en el sistema (Arrillaga y Watson, 2003).

En consecuencia, el origen físico de los armónicos está directamente relacionado con la interacción entre el comportamiento no lineal de las cargas y la respuesta del sistema eléctrico, dando lugar a la propagación de componentes de frecuencia múltiple y a la distorsión de las formas de onda.

### 2.2.11. Factor de potencia en sistemas no sinusoidales

En presencia de distorsión armónica, el factor de potencia no puede expresarse únicamente como el coseno del ángulo de desfase entre la tensión y la corriente, tal como se desarrolló en la Sección 2.2.6. En estas condiciones, las componentes armónicas de la corriente incrementan su valor eficaz total sin contribuir proporcionalmente a la

transferencia de potencia activa, lo que afecta el desempeño energético del sistema incluso cuando el desfase entre las componentes fundamentales es reducido (Arrillaga y Watson, 2003; Zobaa y Aleem, 2018).

En sistemas industriales, la presencia de equipos electrónicos de potencia como variadores de velocidad y rectificadores favorece la aparición de estas corrientes no sinusoidales, dando lugar a factores de potencia reducidos incluso cuando se ha corregido el desfase mediante compensación reactiva (Dugan *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 1999).

La relación cuantitativa entre el contenido armónico y el factor de potencia puede expresarse como:

$$\mathrm{FP} = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + \mathrm{THD}_I^2}} \tag{2.16}$$

donde $\phi_1$ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente eléctricas fundamentales, y $THD_I$ es la distorsión armónica total de la corriente eléctrica expresada en valor por unidad. Esta expresión evidencia que, aun con desfase nulo ($\phi_1 = 0$), la presencia de armónicos reduce el factor de potencia por debajo de la unidad, lo que justifica la necesidad de mitigación armónica como complemento a la compensación reactiva (Arrillaga y Watson, 2003; Dugan *et al.*, 2012).

En consecuencia, el análisis del factor de potencia en sistemas no sinusoidales requiere considerar simultáneamente los efectos de la distorsión armónica y del desfase, con el fin de evaluar adecuadamente el desempeño energético del sistema eléctrico y definir estrategias de mejora.

# CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y ÁREA DE ESTUDIO

El presente capítulo describe la metodología aplicada para la evaluación de la calidad de energía eléctrica en una planta industrial dedicada al procesamiento de materiales plásticos. Se detallan el enfoque metodológico, el diseño experimental, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, el procedimiento seguido, así como el procesamiento y validación de los resultados. Finalmente, se caracteriza el área de estudio y se presenta el diagrama unifilar de la instalación.

## 3.1. Metodología

### 3.1.1. Enfoque metodológico

El presente estudio corresponde a una investigación de tipo aplicada y descriptiva, orientada al análisis del comportamiento de parámetros eléctricos en una instalación industrial. De acuerdo con Hernández Sampieri *et al.* (2014), la investigación aplicada busca resolver problemas prácticos mediante la generación de conocimiento útil, mientras que la investigación descriptiva se centra en caracterizar fenómenos sin manipular variables.

En este caso, se adoptó un enfoque observacional, basado en mediciones directas y procesamiento de datos experimentales, lo cual permite evaluar la calidad de energía eléctrica en condiciones reales de operación. Este enfoque garantiza la validez y representatividad de los resultados obtenidos, al reflejar el desempeño del sistema eléctrico bajo condiciones normales de funcionamiento de la planta.

### 3.1.2. Diseño experimental

El presente estudio se enmarca dentro de un diseño no experimental, dado que no se manipulan las variables del sistema eléctrico, sino que se registran tal como se presentan en condiciones reales de operación. En este sentido, corresponde a un estudio de tipo observacional, en el cual se mide el comportamiento de los parámetros eléctricos durante

el funcionamiento normal de la planta, sin intervenir en el proceso productivo ni en la configuración del sistema.

Asimismo, el diseño es de carácter longitudinal, ya que las mediciones se realizaron de manera continua durante un periodo de siete días. Este enfoque permitió analizar la variación temporal de las variables eléctricas y caracterizar el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

La elección de un periodo de una semana responde a la necesidad de capturar ciclos completos de operación industrial, incluyendo variaciones en la demanda de energía eléctrica entre días laborables y fines de semana. De esta manera, se asegura que los resultados obtenidos sean representativos del régimen de operación real de la instalación, lo cual resulta fundamental para el análisis de la calidad de energía eléctrica y la identificación de posibles problemas asociados al sistema.

### 3.1.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la adquisición de información se empleó la técnica de medición directa, mediante la instalación de un analizador de redes en el tablero general de la planta. Esta técnica permitió registrar en tiempo real variables fundamentales del sistema eléctrico, tales como tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, distorsión armónica en tensión (THDv), distorsión de demanda total en corriente (TDD), flicker ($P_{st}$) y desbalance de tensión.

Asimismo, se aplicó la técnica de monitoreo continuo, configurando el equipo para realizar registros automáticos durante un periodo de siete días con un intervalo de muestreo de un minuto.

El instrumento utilizado fue un analizador de redes Metrel MI2892, diseñado para aplicaciones de diagnóstico en calidad de energía eléctrica, conforme a la norma IEC 61000-4-30 Clase A, y con homologación de Osinergmin para mediciones de calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico peruano, lo que garantiza la validez oficial de los registros obtenidos (1997). Dicho equipo permite la medición simultánea de múltiples parámetros eléctricos en sistemas trifásicos de tres hilos.

Los parámetros de medición considerados en el estudio se resumen en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1**
*Parámetros de medición del estudio de calidad de energía eléctrica*

| **Parámetro** | **Descripción** |
|---|---|
| Equipo de medición | Analizador de redes Metrel MI2892 |
| Tipo de sistema | Trifásico, 3 hilos |
| Nivel de tensión | 220 V |
| Frecuencia | 60 Hz |
| Punto de medición principal | PM1 (circuito de máquinas — C-2) |
| Punto secundario | PM2 (oficinas — C-1) |
| Intervalo de registro | 1 minuto |
| Duración del monitoreo | 7 días |
| Variables medidas | V, I, P, Q, FP, THDv, TDD, $P_{st}$, desbalance |
| Norma de medición | IEC 61000-4-30 Clase A |

*Nota*. Elaboración propia.

La combinación de medición directa y monitoreo continuo, junto con el uso de un equipo especializado y homologado, asegura la validez y representatividad de los datos registrados, constituyendo la base para el análisis posterior de la calidad de energía eléctrica en la planta industrial.

### 3.1.4. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se desarrolló en etapas sucesivas, orientadas a garantizar la confiabilidad de las mediciones y la representatividad de los datos obtenidos:

1) Instalación del analizador de redes Metrel MI2892 en el tablero general de la planta, específicamente en el punto de medición PM1, correspondiente al circuito de máquinas (C-2).

2) Configuración del equipo para el registro de variables eléctricas en un sistema trifásico de tres hilos, incluyendo tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, distorsión armónica en tensión (THDv), distorsión de demanda total en corriente (TDD), flicker ($P_{st}$) y desbalance de tensión.

3) Programación del equipo para el registro automático de datos con un intervalo de muestreo de un minuto durante un periodo continuo de siete días.

4) Monitoreo del sistema eléctrico bajo condiciones normales de operación de la planta, asegurando que las mediciones reflejen el comportamiento real de las cargas críticas.

5) Exportación y almacenamiento digital de los datos mediante el software PowerView v3.0, herramienta propietaria del fabricante Metrel que permite la descarga, visualización y organización de los registros almacenados en el analizador de redes. Su empleo permitió estructurar la información en un formato digital ordenado, constituyendo la base para el posterior procesamiento y análisis de los datos.

6) Retiro del equipo una vez finalizado el periodo de medición.

Las mediciones se realizaron entre el 22 de mayo de 2024 a las 15:06 h y el 30 de mayo de 2024 a las 11:35 h, en el circuito de máquinas (PM1), donde se concentran las cargas más representativas de la planta.

La elección de PM1 como punto principal responde a que concentra la mayor demanda de potencia de la instalación, alimentando equipos críticos del proceso productivo como la peletizadora y la lavadora industrial. El punto secundario PM2, ubicado en el circuito de edificios (C-1), se utilizó como referencia para contrastar con las cargas auxiliares.

### 3.1.5. Procesamiento y análisis de datos

Los datos registrados por el analizador de redes fueron exportados mediante el software PowerView v3.0 y organizados en formato digital para su posterior análisis. Este proceso incluyó la clasificación de las variables medidas — tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, THDv, TDD, flicker ($P_{st}$) y desbalance de tensión — así como la verificación de consistencia de los registros, con el fin de identificar posibles valores atípicos o errores de medición.

Dado que el analizador generó un registro por minuto durante siete días continuos, resultando en aproximadamente 11 310 registros por variable, se seleccionó un valor cada 15 minutos para la construcción de los perfiles gráficos. Cada punto representado en los gráficos corresponde al valor medido en ese instante específico, lo que preserva la fidelidad

de los datos originales y permite una visualización clara de la evolución temporal de cada parámetro.

Posteriormente, los datos fueron ordenados cronológicamente, lo que permitió analizar el comportamiento del sistema eléctrico a lo largo del periodo de monitoreo. A partir de esta organización se elaboraron gráficos representativos — perfiles de carga de potencia activa, variaciones del factor de potencia y niveles de distorsión armónica — facilitando la interpretación de tendencias y patrones de operación.

La relación entre las variables medidas y los gráficos generados se resume en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2**

*Organización de variables y gráficos generados*

| **Variable** | **Gráfico generado** |
|---|---|
| Tensión (V) | Perfil de tensión por fase |
| Corriente (I) | Perfil de corriente por fase |
| Potencia activa (P) | Curva de carga de potencia activa |
| Potencia reactiva (Q) | Variación de potencia reactiva |
| Factor de potencia (FP) | Evolución temporal del FP |
| THDv | Perfil de distorsión armónica en tensión |
| TDD | Perfil de distorsión de demanda en corriente |
| Flicker ($P_{st}$) | Perfil de variación del flicker |
| Desbalance de tensión | Registro de desbalance por fase |

*Nota*. Elaboración propia.

Desde una perspectiva analítica, el procesamiento de los datos consideró la descomposición de las señales eléctricas en sus componentes fundamentales y armónicas, en concordancia con el análisis espectral basado en series de Fourier desarrollado en la sección 2.2.4. Este enfoque permitió interpretar la presencia de distorsión en las señales y su impacto en la calidad de energía eléctrica del sistema.

### 3.1.6. Validación de resultados

La validación de los resultados obtenidos se realizó mediante la verificación de la consistencia interna de los datos registrados y su contraste con valores esperados en sistemas eléctricos industriales similares. En primer lugar, se evaluó la continuidad de los registros

y la ausencia de valores atípicos que pudieran indicar errores de medición o fallas en el equipo. Asimismo, se comprobó la correspondencia entre las variables medidas, verificando la coherencia entre potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia.

Adicionalmente, los resultados fueron comparados con los rangos establecidos en normas técnicas de calidad de energía eléctrica, tanto nacionales como internacionales, lo que permitió determinar el grado de cumplimiento del sistema eléctrico analizado.

Los registros de demanda y consumo obtenidos por el analizador de redes fueron contrastados con la facturación eléctrica del ciclo junio de 2024 emitida por Enel Distribución (Figura 2, en Anexos), la cual corresponde al periodo de consumo comprendido entre el 03 de mayo y el 04 de junio de 2024, con el fin de verificar la coherencia entre las mediciones de campo y los valores registrados en la facturación al cliente.

La confiabilidad instrumental se sustenta en el uso del analizador de redes Metrel MI2892, homologado por Osinergmin y conforme a la norma IEC 61000-4-30 Clase A. La representatividad de los resultados se garantiza mediante el monitoreo continuo durante siete días bajo condiciones normales de operación, lo que permite considerar que los datos reflejan adecuadamente el comportamiento real del sistema eléctrico.

## 3.2. Área de estudio

El estudio de calidad de energía eléctrica se desarrolló en la planta industrial Corporación Roca S.A.C., dedicada al procesamiento de materiales plásticos, cuya operación se caracteriza por el uso intensivo de maquinaria electromecánica de alta potencia.

El sistema eléctrico de la planta opera en baja tensión, con una configuración trifásica de tres hilos, a un nivel de 220 V y frecuencia de 60 Hz. La distribución de energía se realiza a partir de un tablero general, desde el cual se derivan los circuitos principales que alimentan las distintas áreas de la instalación. La potencia contratada con la empresa concesionaria Enel Distribución es de 225 kW, siendo la demanda máxima registrada durante el periodo de medición de 134.03 kW, equivalente al 59.6 % de la capacidad contratada.

La distribución eléctrica de la planta se describe mediante el diagrama unifilar

presentado en la Figura 3.1, el cual identifica los circuitos principales y los puntos de medición seleccionados para el estudio.

### 3.2.1. Caracterización de la planta industrial

La planta cuenta con dos áreas principales de consumo eléctrico:

- **Área de oficinas:** equipada con cargas auxiliares como iluminación, equipos de cómputo y sistemas de climatización. Este sector presenta una demanda de energía eléctrica moderada y estable, con una potencia máxima registrada de 7.81 kW.
- **Área de máquinas:** concentra la mayor demanda de potencia, alimentando los equipos críticos del proceso productivo — la peletizadora y la lavadora industrial —. Estas cargas son representativas del comportamiento eléctrico de la planta bajo condiciones de operación intensiva, con potencias máximas registradas de 88.01 kW y 39.78 kW respectivamente.

El tablero general de distribución constituye el punto central de suministro, desde el cual se derivan los circuitos principales hacia las áreas mencionadas. La caracterización de estas zonas permite contextualizar adecuadamente los resultados del estudio de calidad de energía.

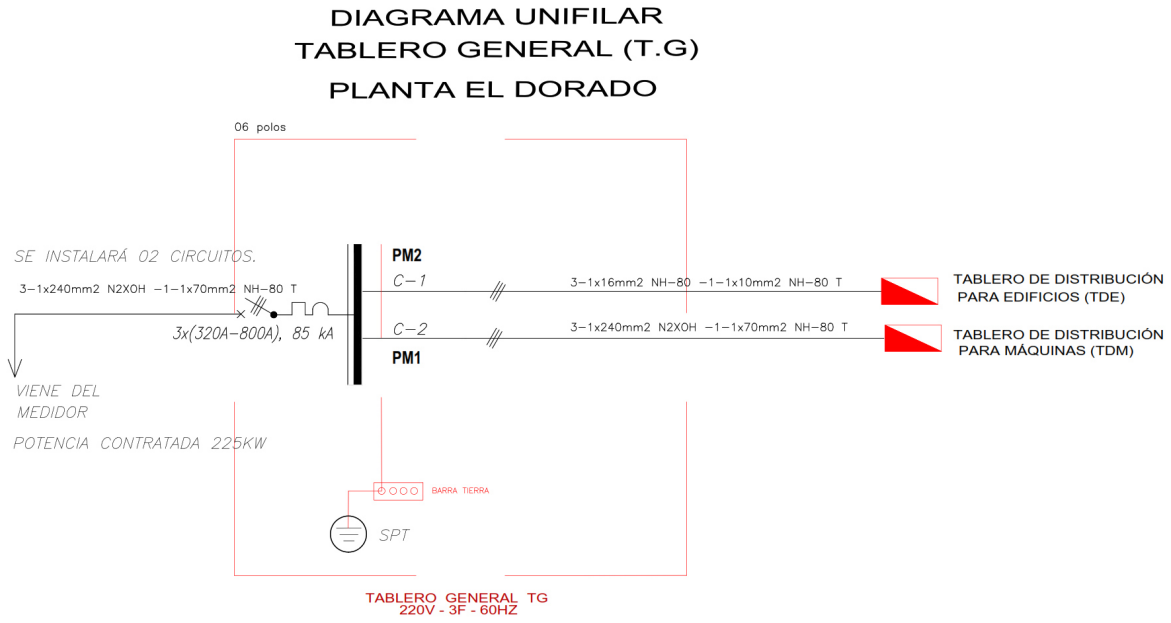
### 3.2.2. Diagrama unifilar de la instalación

La Figura 3.1 presenta el diagrama unifilar del sistema eléctrico de la planta, en el cual se identifican los puntos de medición seleccionados para el estudio. El sistema se organiza a partir de un tablero general de distribución, del cual derivan dos circuitos principales:

- **Circuito C-1:** destinado al suministro de energía hacia los edificios de oficinas, donde se ubica el punto de medición PM2, representativo de las cargas auxiliares.
- **Circuito C-2:** correspondiente al suministro de energía hacia el área de máquinas, donde se ubica el punto de medición PM1, el cual alimenta principalmente la peletizadora y la lavadora industrial.

**Figura 3.1**

*Diagrama unifilar del sistema eléctrico de la planta y ubicación de los puntos de medición PM1 y PM2.*




*Nota*. Elaboración propia.

La descripción detallada de cada punto de medición se presenta en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3**

*Descripción de los puntos de medición*

| Ítem | Punto de medición | Circuito | Nivel de tensión (V) | Equipo |
|---|---|---|---|---|
| 1 | PM1 | Tablero General (C-2) | 220 | Metrel MI2892 |
| 2 | PM2 | Tablero General (C-1) | 220 | Metrel MI2892 |

*Nota*. Elaboración propia.

La selección de PM1 como punto principal responde a que concentra la mayor demanda de potencia de la instalación, permitiendo evaluar el comportamiento eléctrico bajo condiciones de carga crítica. El punto PM2 proporciona una referencia del comportamiento de cargas auxiliares, facilitando la diferenciación entre consumos productivos y administrativos.

# CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4.1. Presentación del análisis, interpretación y discusión de resultados

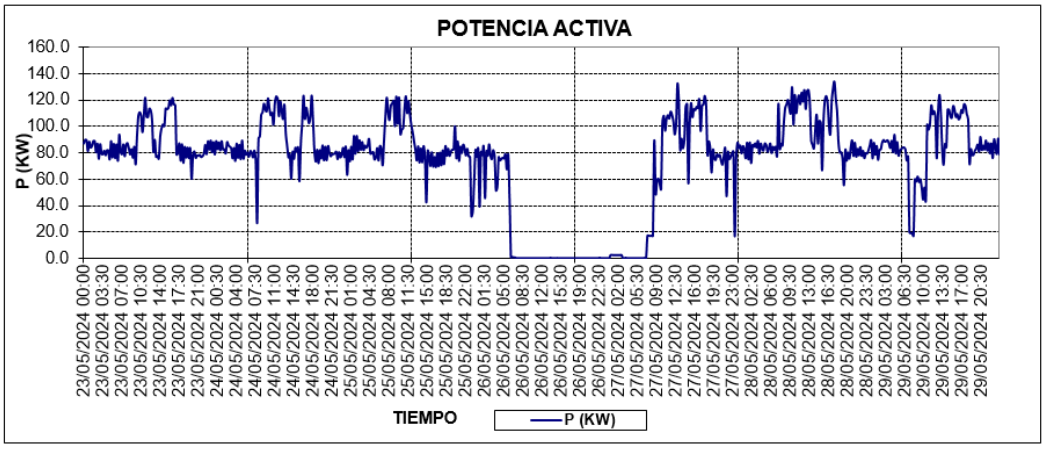
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del estudio de calidad de energía eléctrica realizado en la planta industrial Corporación Roca S.A.C., así como su análisis e interpretación desde una perspectiva de la física aplicada a los sistemas eléctricos. El análisis se estructura en función de las principales variables evaluadas — potencia eléctrica, factor de potencia, tensión, flicker, desbalance y distorsión armónica — con el objetivo de caracterizar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación y determinar su grado de cumplimiento respecto a la normativa nacional e internacional vigente.

### 4.1.1. Análisis de la potencia eléctrica

El análisis de la potencia eléctrica se realizó a partir de los registros obtenidos en el punto de medición PM1, correspondiente al circuito de máquinas (C-2) del tablero general.

**Figura 4.1**

*Perfil de Potencia Activa en Tablero General.*




*Nota*. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 4.1, el comportamiento de la potencia activa presenta variaciones a lo largo del tiempo, asociadas al régimen operativo de la planta. El perfil

registrado durante siete días continuos revela una demanda máxima de **134.03 kW** en hora valle y de **100.2 kW** en hora punta, lo que pone de manifiesto que la mayor carga se concentra fuera del horario de punta definido por la tarifa eléctrica vigente.

Asimismo, se observa la existencia de periodos sin consumo de energía, asociados a la detención de actividades en planta, evidenciando un comportamiento discontinuo en la operación. En particular, se registró inactividad completa durante el lapso comprendido entre el domingo 26 de mayo a las 6:00 h y el lunes 27 de mayo a las 7:00 h, lo que corresponde al descanso semanal de la instalación.

La proyección del consumo mensual típico del circuito C-2 asciende a **46 600.3 kWh**, valor que constituye la base para el posterior análisis tarifario.

El detalle diario de la máxima demanda y el consumo de energía activa durante el periodo de medición se presenta en la Tabla 4.1, la cual incluye la calificación tarifaria diaria y el factor de potencia (FP) registrados en el circuito C-2. En las tablas de este capítulo, las siglas HP y HFP corresponden, respectivamente, a horas punta y horas fuera de punta.

**Tabla 4.1**

*Resumen diario de mediciones — Tablero General C-2 (mayo 2024)*

| **Fecha** | **Día** | **Máx. Demanda (kW)** | | | **Energía Activa (kWh)** | | | **fp** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **HP** | **HFP** | **DÍA** | **HP** | **HFP** | **DÍA** | |
| 23/05/2024 | Jueves | 88.9 | 121.9 | 121.9 | 394.3 | 1733.1 | 2127.4 | 0.96 |
| 24/05/2024 | Viernes | 85.7 | 123.5 | 123.5 | 394.9 | 1741.0 | 2135.9 | 0.95 |
| 25/05/2024 | Sábado | 100.2 | 123.0 | 123.0 | 397.6 | 1647.9 | 2045.5 | 0.96 |
| 26/05/2024 | Domingo | 0.4 | 86.5 | 86.5 | 0.2 | 431.6 | 431.8 | 0.96 |
| 27/05/2024 | Lunes | 88.7 | 132.4 | 132.4 | 382.6 | 1061.2 | 1443.8 | 0.94 |
| 28/05/2024 | Martes | 89.4 | 134.0 | 134.0 | 396.9 | 1885.0 | 2281.9 | 0.95 |
| 29/05/2024 | Miércoles | 92.1 | 124.0 | 124.0 | 415.7 | 1636.2 | 2051.9 | 0.95 |
| | **Máximo** | 100.2 | 134.0 | 134.0 | 415.7 | 1885.0 | 2281.9 | 0.96 |
| | **Mínimo** | 0.4 | 86.5 | 86.5 | 0.2 | 431.6 | 431.8 | 0.94 |
| | **Promedio** | 77.9 | 120.8 | 120.8 | 340.3 | 1448.0 | 1788.3 | 0.95 |
| **Promedio días útiles** | | | | | 314.4 | 1353.3 | 1667.8 | |
| **Sábado** | | | | | 397.6 | 1647.9 | 2045.5 | |
| **Domingo** | | | | | 0.2 | 431.6 | 431.8 | |
| **Proyección al mes** | | | | | 8508.6 | 38091.6 | 46600.3 | |

*Nota*. Elaboración propia.

La proyección del consumo mensual típico del circuito C-2 asciende a 46 600.3 kWh, valor que constituye la base para el posterior análisis tarifario desarrollado en el Capítulo 5.

### 4.1.2. Análisis del consumo por equipos

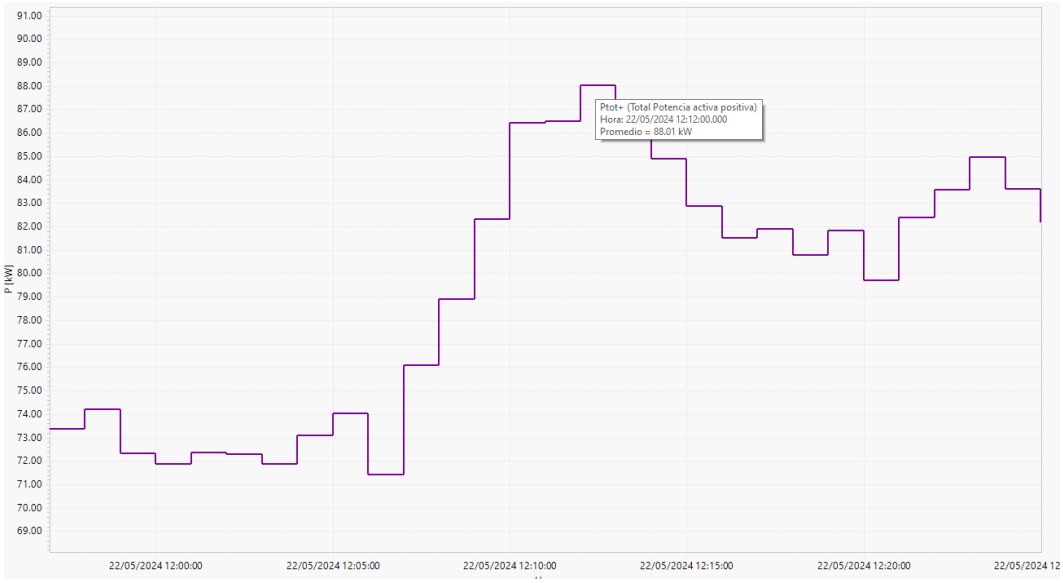
Con el objetivo de identificar la contribución individual de las principales cargas al consumo total de energía, se realizó un análisis específico de los equipos más representativos de la planta. Los resultados se resumen en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2**
*Resumen de máxima demanda por equipo eléctrico.*

| Carga | Potencia máxima (kW) |
|---|---|
| Máquina peletizadora | 88.01 |
| Máquina de lavado | 39.78 |
| Edificios (oficinas) | 7.81 |
| **Total** | **135.60** |

*Nota*. Elaboración propia.

**Figura 4.2**
*Registro de potencia activa — Máquina peletizadora.*



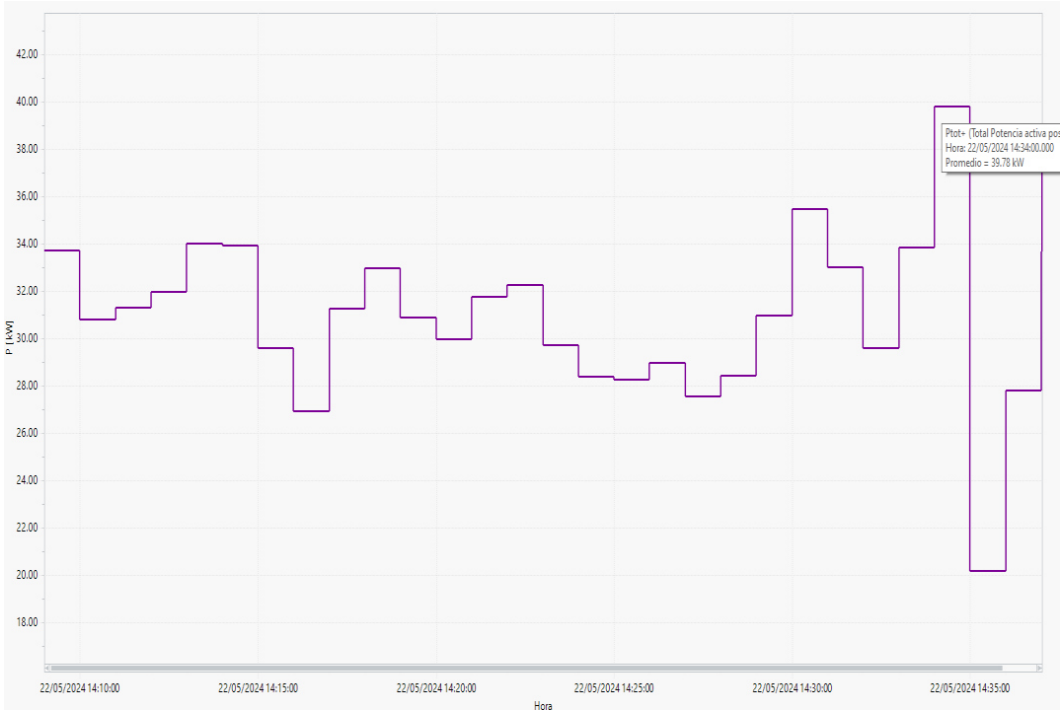

*Nota*. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 4.2, la máquina peletizadora presenta un comportamiento de carga variable, alcanzando una potencia máxima de aproximadamente **88.01 kW**, lo que la posiciona como la carga dominante de la instalación, representando más del 62 % de la demanda total medida.

La máquina de lavado, cuyo perfil se muestra en la Figura 4.3, presenta una potencia

**Figura 4.3**

*Registro de potencia activa — Máquina de lavado.*




*Nota*. Elaboración propia.

máxima de **39.78 kW**, con un régimen de operación predominantemente diurno. Su perfil escalonado refleja ciclos de carga y descarga asociados al proceso de lavado industrial de plásticos.

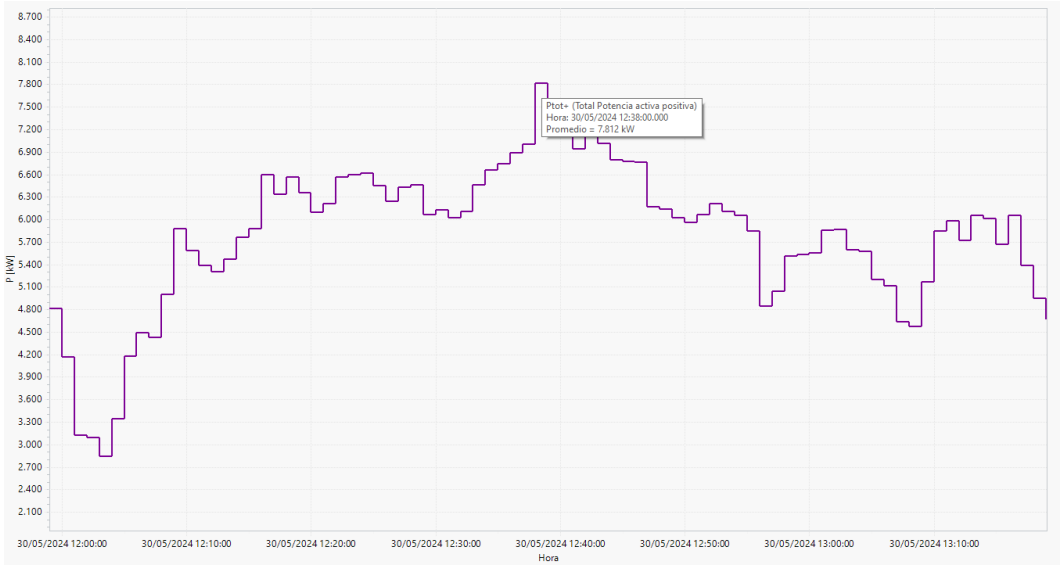
En el caso de los edificios de oficinas (Figura 4.4), se registra una potencia máxima de **7.81 kW**, representando una fracción menor del consumo total, correspondiente a cargas auxiliares como iluminación y equipos administrativos.

Precisamos que la suma de las potencias máximas individuales de los equipos 135,60 kW no coincide con la demanda máxima registrada en el tablero general (134.03 kW). Esta diferencia se explica porque cada equipo alcanza su potencia máxima en un instante distinto de su ciclo operativo; es decir, los picos individuales de la peletizadora, la máquina de lavado y los edificios de oficinas no ocurren de manera simultánea a lo largo del periodo de medición. Por ello, la suma aritmética de los máximos individuales sobreestima la demanda real del sistema, mientras que la demanda máxima registrada en el tablero general refleja el valor efectivamente coincidente de todas las cargas operando en conjunto.

Adicionalmente, la potencia total simultánea registrada por el analizador en el punto

**Figura 4.4**

*Registro de potencia activa — Edificios (oficinas).*




*Nota*. Elaboración propia.

de acoplamiento común alcanzó 141.81 kW, valor superior a la demanda máxima del tablero general, que incluye las pérdidas en conductores y cargas auxiliares no contabilizadas individualmente en el levantamiento por equipo. Esta distinción entre demanda por equipo, demanda del tablero general y demanda en el punto de acoplamiento común es relevante para el análisis tarifario desarrollado en el Capítulo 5, donde se emplea la demanda registrada en el punto de suministro como referencia de facturación.

La concentración de la demanda en la peletizadora implica que cualquier estrategia de mejora energética debe priorizar este equipo, cuya naturaleza no lineal incide directamente sobre el factor de potencia y la distorsión armónica del sistema, parámetros que se analizan en las secciones siguientes.

### 4.1.3. Análisis del factor de potencia y la potencia reactiva

El análisis del factor de potencia y la potencia reactiva se realizó a partir de los datos registrados en el punto de medición principal (PM1), considerando la relación entre la potencia activa, la potencia reactiva y la potencia aparente del sistema eléctrico. Los resultados se presentan en la Tabla 4.3.

Como se muestra en la Tabla 4.3, el factor de potencia promedio registrado en el

**Tabla 4.3**

*Nivel de potencia activa, reactiva y factor de potencia en el Tablero General (C-2).*

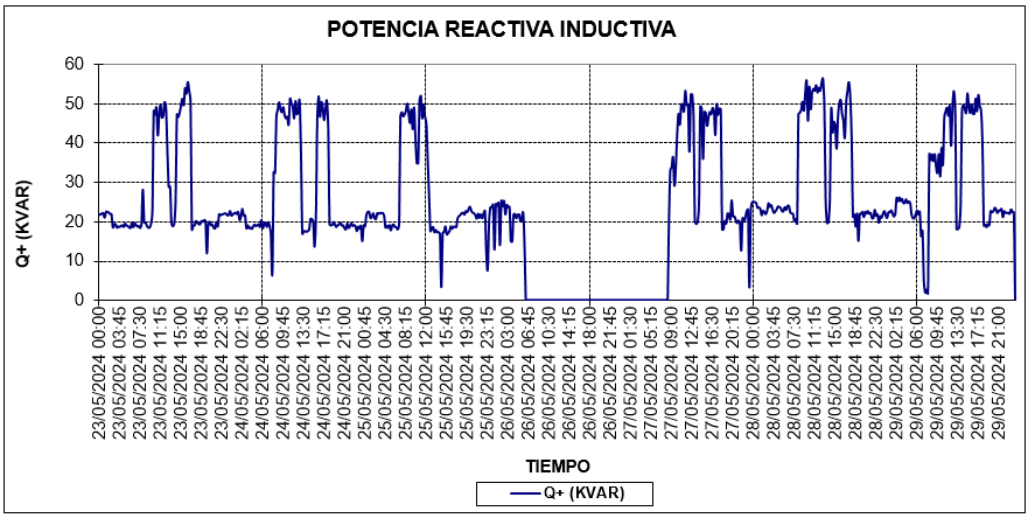
| Parámetro | Valor mínimo | Valor máximo | Promedio |
|---|---|---|---|
| Potencia activa (kW) | 86.5 | 134.03 | 120.8 |
| Potencia reactiva (kVAr) | 25.2 | 56.3 | 49.6 |
| Factor de potencia | 0.94 | 0.96 | 0.95 |

*Nota*. Elaboración propia.

circuito de máquinas es de **0.95**, con carácter inductivo, coherente con la operación de motores eléctricos de la peletizadora y la lavadora industrial, que demandan potencia reactiva para su funcionamiento.

**Figura 4.5**

*Perfil de potencia reactiva inductiva en el circuito C-2.*




*Nota*. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 4.5, la potencia reactiva presenta un comportamiento variable a lo largo del periodo de medición, en concordancia con el régimen de operación de los equipos industriales. La potencia reactiva máxima registrada alcanzó **56.3 kVAr**, con un promedio de **49.6 kVAr**.

El detalle diario del consumo de energía reactiva inductiva durante el periodo de medición se presenta en la Tabla 4.4.

La proyección mensual de consumo de energía reactiva inductiva asciende a **14 885.2 kVArh**. La presencia de potencia reactiva incrementa la corriente total del sistema,

**Tabla 4.4**

*Resumen diario de energía reactiva inductiva — Tablero General C-2 (mayo 2024)*

| Fecha | Día | Pot. Reactiva Q (kVAr) | | | Energía Reactiva (kVArh) | | | fp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | HP | HFP | DÍA | HP | HFP | DÍA | |
| 23/05/2024 | Jueves | 22.1 | 55.5 | 55.5 | 98.0 | 544.0 | 642.0 | 0.96 |
| 24/05/2024 | Viernes | 19.9 | 51.8 | 51.8 | 95.1 | 570.9 | 666.0 | 0.95 |
| 25/05/2024 | Sábado | 23.8 | 52.0 | 52.0 | 107.9 | 501.1 | 609.0 | 0.96 |
| 26/05/2024 | Domingo | 0.0 | 25.2 | 25.2 | 0.0 | 126.8 | 126.8 | 0.96 |
| 27/05/2024 | Lunes | 25.4 | 53.3 | 53.3 | 102.1 | 429.8 | 531.9 | 0.94 |
| 28/05/2024 | Martes | 22.9 | 56.3 | 56.3 | 106.3 | 674.1 | 780.4 | 0.95 |
| 29/05/2024 | Miércoles | 39.7 | 53.2 | 53.2 | 108.0 | 602.0 | 710.0 | 0.95 |
| | **Máximo** | 39.7 | 56.3 | 56.3 | 108.0 | 674.1 | 780.4 | 0.96 |
| | **Mínimo** | 0.0 | 25.2 | 25.2 | 0.0 | 126.8 | 126.8 | 0.94 |
| | **Promedio** | 22.0 | 49.6 | 49.6 | 88.2 | 492.7 | 580.9 | 0.95 |
| **Promedio días útiles** | | | | | 82.3 | 460.5 | 542.8 | |
| **Sábado** | | | | | 107.9 | 501.1 | 609.0 | |
| **Domingo** | | | | | 0.0 | 126.8 | 126.8 | |
| **Proyección al mes** | | | | | 2241.8 | 12643.5 | 14885.2 | |

*Nota*. Elaboración propia.

generando pérdidas adicionales por efecto Joule en conductores y equipos sin contribuir a la transferencia de potencia útil. Aplicando la expresión general del factor de potencia (Dugan *et al.*, 2012):

$$\text{FP} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \tag{4.1}$$

El valor promedio de FP $= 0{,}95$ obtenido indica que, si bien el sistema opera dentro de rangos aceptables, no alcanza el valor referencial de **0.98** recomendado para instalaciones industriales (Dugan *et al.*, 2012), lo que implica la necesidad de implementar compensación reactiva mediante bancos de capacitores, con el fin de reducir la demanda de potencia reactiva y mejorar el desempeño energético del sistema.

En términos normativos, un factor de potencia reducido puede derivar en penalizaciones económicas por parte de la empresa concesionaria. En el caso de Corporación Roca S.A.C., la facturación del ciclo junio de 2024 (correspondiente al consumo de mayo, Figura 2 en Anexos) no registró cargos por energía reactiva, dado que el consumo reactivo se mantuvo dentro del límite del 30 % de la energía activa total establecido por OSINERGMIN (1997). No obstante, la corrección del factor de potencia reduce las pérdidas en la instalación

y mejora la eficiencia global del sistema, conforme se desarrolla en el Capítulo 5.

### 4.1.4. Análisis de la tensión y desbalance

Los niveles de tensión registrados en el tablero general se presentan en la Tabla 4.5, expresados tanto en valores eficaces (RMS, por sus siglas en inglés, root mean square) como en valores por unidad (p.u.) respecto a la tensión nominal de 220 V.

**Tabla 4.5**
*Tensión RMS registrada en el Tablero General.*

| **Parámetro** | **Máximo** | **Promedio** | **Mínimo** |
|---|---|---|---|
| Tensión RMS (V) | 238.00 | 230.27 | 223.92 |
| Tensión (p.u.) | 1.08 | 1.05 | 1.02 |

*Nota*. Elaboración propia.

Del análisis de los valores registrados se deduce que el perfil de tensión en el Tablero General, considerando la tensión nominal de 220 V y la tolerancia admisible de $\pm 5$ % establecida por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE), **no cumple** con dicha tolerancia. En efecto, la tensión máxima registrada de 238 V representa una desviación del $+8.2$ % respecto al valor nominal, superando el límite admisible de 231 V ($220\ \text{V} \times 1{,}05 = 231\ \text{V}$). El número de intervalos en transgresión fue de 4253 sobre 11 310 evaluados, correspondiendo al **38 %** del periodo de medición.

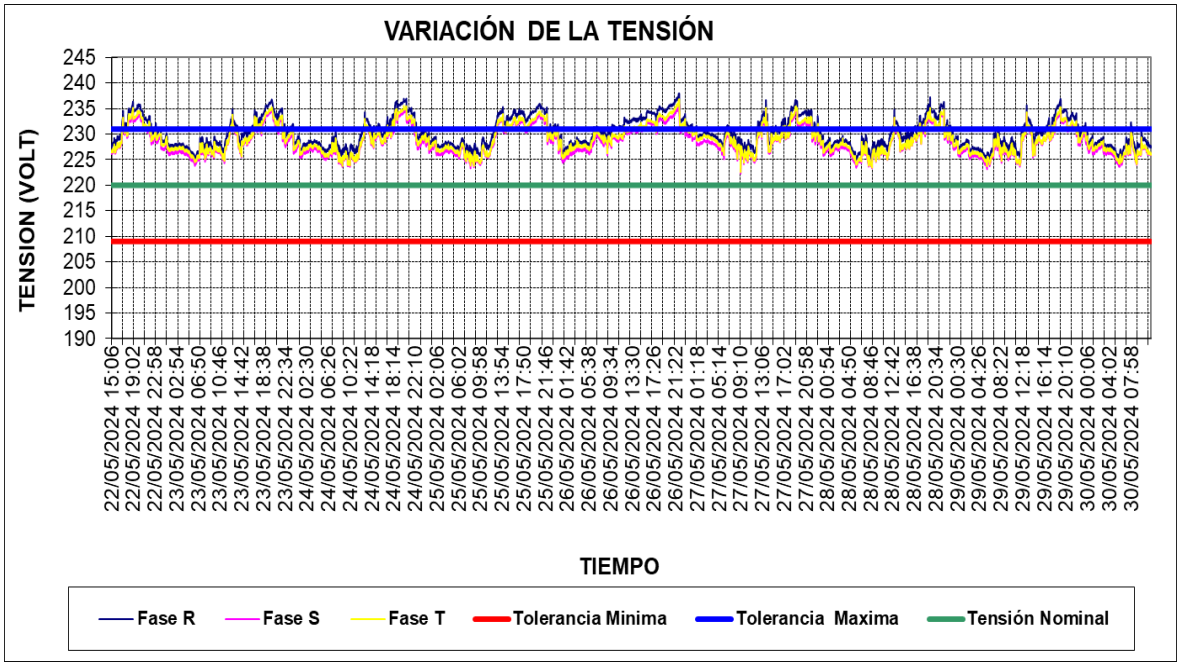
A continuación se detalla el perfil de tensión registrado durante el periodo de monitoreo, donde se aprecia la variación temporal de las tres fases respecto a los límites de tolerancia establecidos por la NTCSE.

Del gráfico anterior se confirma que la tensión de suministro supera sistemáticamente el límite superior de 231 V durante una fracción significativa del periodo evaluado, constituyendo la principal no conformidad identificada respecto a la NTCSE.

Esta condición implica que el sistema eléctrico de la planta recibe una tensión de suministro elevada de manera sistemática, lo que puede generar sobrecalentamiento en equipos, reducción de su vida útil y mayor consumo de potencia reactiva (Arrillaga y Watson, 2003). Estudios en redes industriales confirman que tensiones fuera del rango nominal aceleran el deterioro de equipos eléctricos (Melo *et al.*, 2017).

**Figura 4.6**

*Perfil de variación de tensión en el Tablero General.*




*Nota*. Elaboración propia.

Respecto al desbalance de tensión, los resultados se presentan en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6**

*Desbalance de tensión en el Tablero General.*

| Fase R (V) | Fase S (V) | Fase T (V) | Desbalance ( %) | Tolerancia |
|---|---|---|---|---|
| Máx. 238.00 | 235.95 | 236.86 | 0.65 | |
| Prom. 230.27 | 228.55 | 229.05 | 0.43 | $\leq 2$ % |
| Mín. 223.92 | 222.28 | 222.59 | 0.28 | |

*Nota*. Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 4.6, el desbalance de tensión promedio registrado es de **0.43 %**, valor que se encuentra dentro de la tolerancia establecida por la Norma IEC 61000-2-2 ($\leq 2$ %) (IEC, 2002). Este resultado indica que el sistema opera con un nivel de equilibrio adecuado entre fases, lo que minimiza el riesgo de sobrecorrientes en el neutro y deterioro en equipos trifásicos sensibles al desbalance (Dugan *et al.*, 2012).

### 4.1.5. Análisis del flicker

El flicker, definido como la variación perceptible de la luminosidad debida a fluctuaciones de tensión en la red eléctrica, fue evaluado mediante el índice de severidad de corta duración $P_{st}$, conforme a los criterios establecidos en la NTCSE (OSINERGMIN, 1997). Los resultados se presentan en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7**
*Índice de severidad de flicker ($P_{st}$) en el Tablero General.*

| **Fase** | $P_{st}$ **máx.** | $P_{st}$ **prom.** | $P_{st}$ **mín.** | **Tolerancia NTCSE** |
|---|---|---|---|---|
| Fase R | 5.19 | 0.22 | 0.00 | $\leq 1.00$ |
| Fase S | 4.34 | 0.21 | 0.00 | |
| Fase T | 4.32 | 0.22 | 0.09 | |
| Global | 5.19 | 0.22 | 0.09 | |

*Nota*. Elaboración propia.

Del análisis de la Tabla 4.7 se desprende que el valor promedio del índice $P_{st}$ es de **0.22**, muy por debajo del límite establecido por la NTCSE ($P_{st} \leq 1{,}00$). No obstante, se registraron valores máximos puntuales de hasta 5.19 en la Fase R, asociados a eventos transitorios de conmutación de las cargas industriales. Dado que la NTCSE evalúa el cumplimiento sobre la base del valor promedio, el sistema **cumple** con los límites de flicker establecidos.

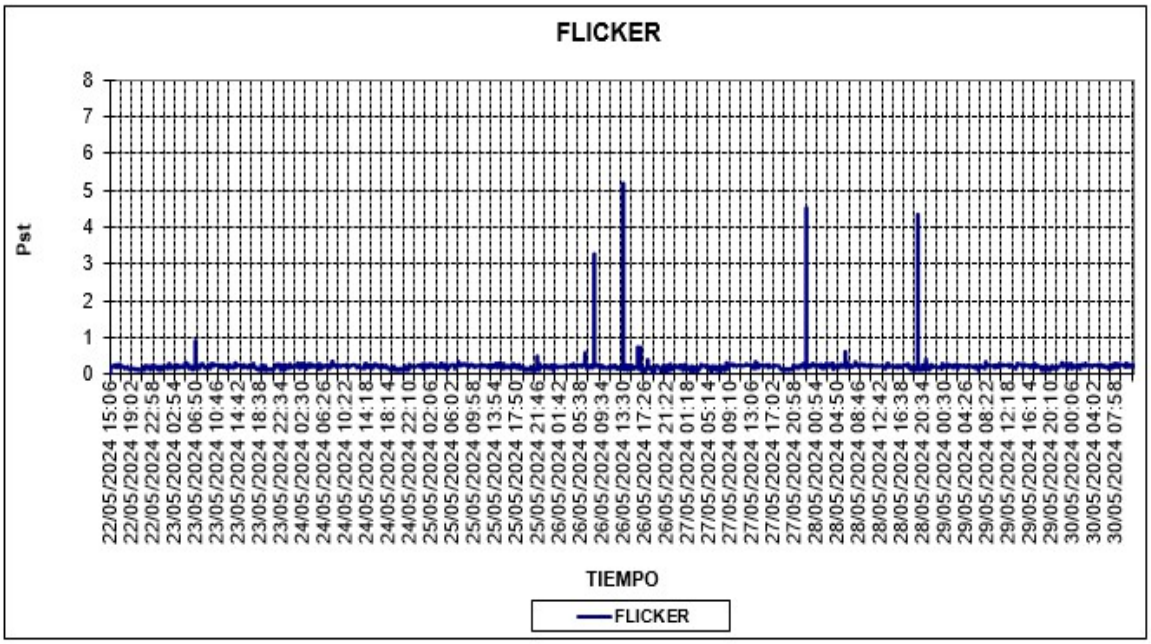
Los valores reportados corresponden al análisis detallado por fase. El promedio global de $P_{st} = 0{,}22$ constituye el indicador determinante para la evaluación normativa, conforme al criterio establecido en la NTCSE (OSINERGMIN, 1997).

A continuación se presenta el perfil temporal del índice de flicker registrado durante el periodo de monitoreo.

Del gráfico anterior se confirma que, si bien se presentan picos puntuales por encima del límite de $P_{st} = 1{,}00$ asociados a eventos de conmutación, el comportamiento promedio se mantiene consistentemente por debajo del límite normativo durante todo el periodo evaluado.

El número de transgresiones sobre el total de intervalos evaluados fue de 40 sobre 11 310, representando el **0 %** de transgresiones, lo que confirma el cumplimiento normativo del parámetro de flicker en el Tablero General.

**Figura 4.7**
*Perfil de variación del flicker en el Tablero General.*




*Nota*. Elaboración propia.

## 4.1.6. Análisis de la distorsión armónica

El análisis de la distorsión armónica constituye uno de los aspectos más relevantes del presente estudio, dado que la planta opera con cargas no lineales que introducen componentes espectrales adicionales en las señales de tensión y corriente. La evaluación se realizó considerando tanto la distorsión en tensión ($THD_v$) como la distorsión de demanda total en corriente (TDD), conforme a los límites establecidos en la NTCSE y el estándar IEEE 519-2014, respectivamente (OSINERGMIN, 1997; IEEE, 2014).

### *4.1.6.1. Distorsión armónica en tensión ($THD_v$)*

Los valores del índice de distorsión total en tensión ($THD_v$) registrados en el Tablero General se presentan en la Tabla 4.8.

Como se observa en la Tabla 4.8, los niveles de $THD_v$ se mantienen por debajo del límite establecido por la NTCSE (8 %) en la totalidad de los intervalos evaluados. El valor promedio global de **3.82 %** y el máximo de **5.36 %** indican la presencia de distorsión

**Tabla 4.8**

*Tasa de distorsión total de armónicos en tensión ($THD_v$) en el Tablero General.*

| **Parámetro** | **$THD_v$ R ( %)** | **$THD_v$ S ( %)** | **$THD_v$ T ( %)** | **$THD_v$ global ( %)** |
|---|---|---|---|---|
| Máximo | 4.97 | 5.36 | 5.10 | 5.36 |
| Promedio | 3.63 | 4.02 | 3.80 | 3.82 |
| Mínimo | 1.51 | 1.90 | 1.65 | 1.69 |
| *Límite NTCSE* | | | | **8.0 %** |
| *Transgresiones* | | | | 0 / 11 310 (0 %) |
| *Cumplimiento* | | | | **SÍ CUMPLE** |

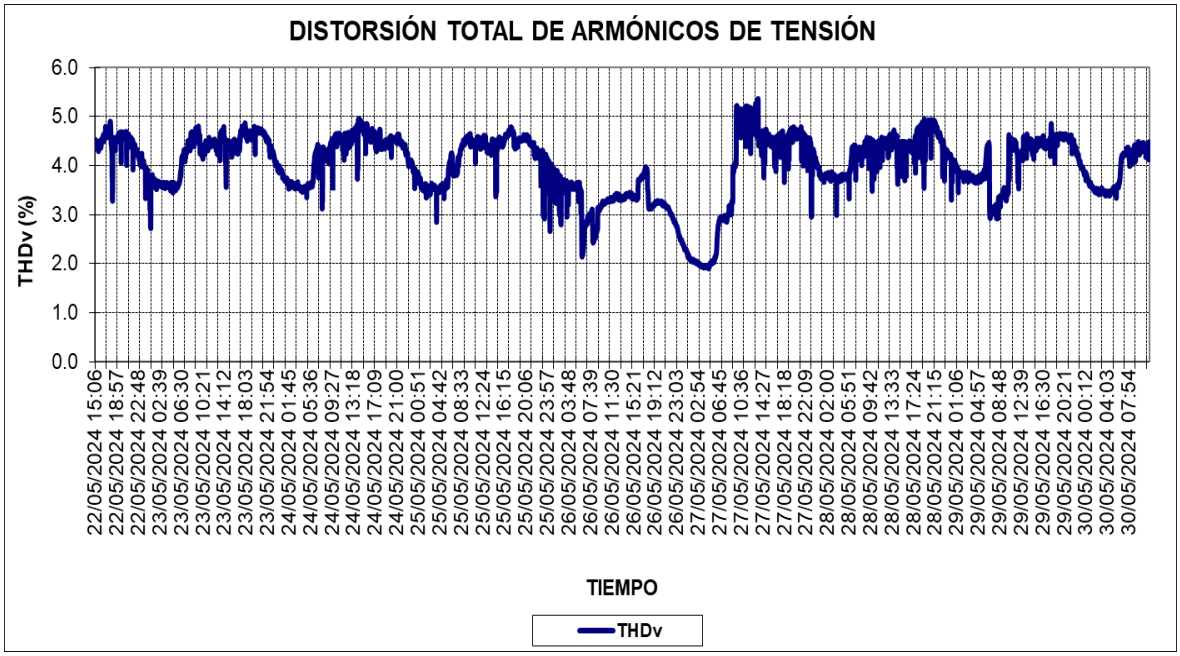
*Nota*. Elaboración propia.

armónica en tensión, aunque dentro de rangos admisibles.

A continuación se presenta el perfil temporal del $THD_v$ registrado durante el periodo de monitoreo.

**Figura 4.8**

*Perfil de variación del $THD_v$ en el Tablero General.*




*Nota*. Elaboración propia.

Del gráfico anterior se confirma que el $THD_v$ se mantiene dentro del límite normativo durante todo el periodo evaluado, con una tendencia estable en las tres fases.

Desde el punto de vista espectral, el armónico de quinto orden (h = 5) es el de mayor contribución, alcanzando un valor máximo de 5.16 % frente a un límite NTCSE de 6 %. Le

siguen en importancia los armónicos de orden 7 (máx. 1.09 %) y 11 (máx. 0.79 %), todos dentro de los límites permitidos. Esta distribución espectral es coherente con el origen físico de los armónicos en cargas que incorporan convertidores electrónicos de potencia de seis pulsos, los cuales generan preferentemente armónicos de orden $6k \pm 1$ (h = 5, 7, 11, 13, . . . ) (Zobaa y Aleem, 2018).

El análisis individual de cada armónico de tensión, evaluado del orden 2 al 40 conforme a los límites establecidos en la NTCSE, se presenta en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9**

*Armónicos individuales de tensión — Tablero General (NTCSE)*

| Orden | Máx. ( %) | Prom. ( %) | Mín. ( %) | Tol. ( %) | Orden | Máx. ( %) | Prom. ( %) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.0 | 22 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 0.52 | 0.17 | 0.02 | 5.0 | 23 | 0.37 | 0.20 |
| 4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.0 | 24 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 5.16 | 3.68 | 1.44 | 6.0 | 25 | 0.33 | 0.16 |
| 6 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.5 | 26 | 0.00 | 0.00 |
| 7 | 1.09 | 0.53 | 0.02 | 5.0 | 27 | 0.12 | 0.04 |
| 8 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.5 | 28 | 0.00 | 0.00 |
| 9 | 0.20 | 0.08 | 0.01 | 1.5 | 29 | 0.24 | 0.11 |
| 10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.5 | 30 | 0.00 | 0.00 |
| 11 | 0.79 | 0.43 | 0.05 | 3.5 | 31 | 0.26 | 0.12 |
| 12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.5 | 32 | 0.00 | 0.00 |
| 13 | 0.57 | 0.30 | 0.02 | 3.0 | 33 | 0.13 | 0.04 |
| 14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.2 | 34 | 0.00 | 0.00 |
| 15 | 0.14 | 0.05 | 0.02 | 0.3 | 35 | 0.22 | 0.09 |
| 16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.2 | 36 | 0.00 | 0.00 |
| 17 | 0.52 | 0.28 | 0.04 | 2.0 | 37 | 0.25 | 0.08 |
| 18 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.2 | 38 | 0.00 | 0.00 |
| 19 | 0.43 | 0.20 | 0.02 | 1.5 | 39 | 0.14 | 0.04 |
| 20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.2 | 40 | 0.07 | 0.02 |
| 21 | 0.12 | 0.05 | 0.02 | 0.2 | | | |

*Transgresiones: 0 / 11 310 (0 %) — Cumplimiento:* ***SÍ CUMPLE*** *(todos los órdenes dentro de límites NTCSE)*

*Nota*. Elaboración propia.

Del análisis de la Tabla 4.9 se observa que ningún armónico de tensión supera las tolerancias establecidas en la NTCSE para el rango evaluado (h = 2 al h = 40), confirmando el cumplimiento normativo integral de la distorsión armónica en tensión.

#### *4.1.6.2. Distorsión de demanda total en corriente (TDD)*

La evaluación de la distorsión armónica en corriente se realizó mediante el índice de distorsión de demanda total (TDD, por sus siglas en inglés, Total Demand Distortion),

definido en el estándar IEEE 519-2014 (IEEE, 2014) como la relación entre el contenido armónico total de la corriente y la demanda de corriente de carga máxima. Los resultados se presentan en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10**

*Distorsión de demanda total en corriente (TDD) en el Tablero General.*

| **Parámetro** | **TDD R ( %)** | **TDD S ( %)** | **TDD T ( %)** | **TDD global ( %)** |
|---|---|---|---|---|
| Máximo | 12.02 | 12.57 | 11.38 | 12.57 |
| Promedio | 7.47 | 7.83 | 7.46 | 7.65 |
| Mínimo | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |
| *Límite IEEE 519-2014* ($50 < I_{SC}/I_L < 100$) | | | | **12.0 %** |
| *Transgresiones* | | | | 135 / 11 310 (1 %) |
| *Cumplimiento* | | | | **SÍ CUMPLE** |

[a] El TDD global de 7.65 % corresponde al valor reportado directamente por el analizador de redes Metrel MI2892 mediante el software PowerView v3.0, calculado de forma vectorial sobre las tres fases simultáneamente. Por esta razón no coincide con el promedio aritmético de los valores por fase (7.59 %).

*Nota*. Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 4.10 indican que el TDD promedio global es de **7.65 %**, con un valor máximo de **12.57 %**, ambos evaluados frente al límite de 12 % establecido por la IEEE 519-2014 para el rango $50 < I_{SC}/I_L < 100$. El porcentaje de transgresiones es del **1 %** del total de intervalos evaluados, por lo que el sistema **cumple** con la norma en términos estadísticos.

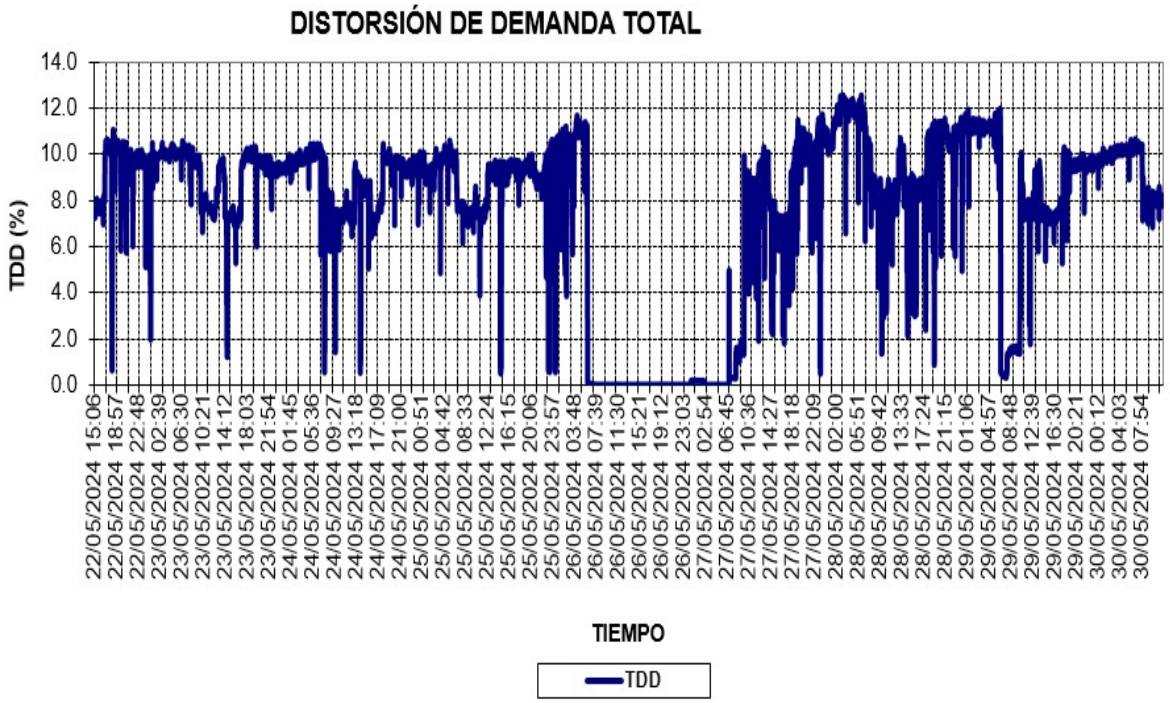
A continuación se presenta el perfil temporal del TDD registrado durante el periodo de monitoreo.

No obstante, el análisis de armónicos individuales de corriente revela que los armónicos de quinto orden (h = 5) y undécimo orden (h = 11) presentan transgresiones significativas, con porcentajes de intervalos en falta del **52 %** y **29 %**, respectivamente, conforme se detalla en la Tabla 4.11.

Desde una perspectiva física, la predominancia de los armónicos de orden 5 y 11 es característica del espectro generado por convertidores de frecuencia de seis pulsos (rectificadores trifásicos no controlados), que producen corrientes armónicas de orden $h = 6k \pm 1$ para $k = 1, 2, 3, \ldots$ (Arrillaga y Watson, 2003). En la planta analizada, la

**Figura 4.9**

*Perfil de variación del TDD en el Tablero General.*




*Nota*. Elaboración propia.

peletizadora y la máquina de lavado emplean motores con variadores de velocidad, los cuales constituyen la principal fuente generadora de estas componentes espectrales.

La presencia de estos armónicos de corriente, aunque dentro del límite global de TDD, genera efectos adversos en el sistema eléctrico, entre los que se incluyen el incremento de pérdidas por efecto Joule en conductores y transformadores, el sobrecalentamiento de equipos y la posible interferencia con dispositivos de protección y medición (Fuchs y Masoum, 2011; Singh *et al.*, 1999).

En consecuencia, se recomienda la implementación de filtros pasivos de orden 5° y 11°, conforme se detalla en el Capítulo 5 del presente trabajo.

### 4.1.7. Síntesis del cumplimiento normativo

A manera de resumen, la Tabla 4.12 presenta el estado de cumplimiento de cada parámetro evaluado respecto a la normativa aplicable.

Del análisis integral presentado en la Tabla 4.12 se desprende que el sistema eléctrico

**Tabla 4.11**

*Armónicos individuales de corriente más representativos, según IEEE 519-2014.*

| Orden | Máx. ( %) | Prom. ( %) | Intervalos en falta | En falta ( %) | Tolerancia ( %) |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 28.72 | 12.00 | 5871 | 52 % | 10.0 |
| 7 | 24.09 | 4.20 | 20 | 0 % | 10.0 |
| 11 | 13.24 | 3.08 | 3280 | 29 % | 4.5 |
| 13 | 11.23 | 1.40 | 3 | 0 % | 4.5 |
| 17 | 8.47 | 1.17 | 1 | 0 % | 4.0 |
| 19 | 6.70 | 0.79 | 1 | 0 % | 4.0 |

*Nota*. Elaboración propia.

**Tabla 4.12**

*Resumen del cumplimiento normativo de los parámetros de calidad de energía eléctrica evaluados en el Tablero General.*

| Parámetro | Valor obtenido | Límite | Norma | Cumple |
|---|---|---|---|---|
| Tensión (p.u.) prom. | 1.05 p.u. | $\pm 5$ % | NTCSE | **NO** |
| Desbalance tensión | 0.43 % | $\leq 2$ % | IEC 61000-2-2 | **SÍ** |
| Flicker ($P_{st}$) prom. | 0.22 | $\leq 1.0$ | NTCSE | **SÍ** |
| $\text{THD}_v$ prom. | 3.82 % | $\leq 8$ % | NTCSE | **SÍ** |
| TDD (corriente) prom. | 7.65 % | $\leq 12$ % | IEEE 519 | **SÍ** |
| Armónico h = 5 (corr.) | Máx. 28.72 % | $\leq 10$ % | IEEE 519 | **NO** |
| Armónico h = 11 (corr.) | Máx. 13.24 % | $\leq 4.5$ % | IEEE 519 | **NO** |
| Factor de potencia | 0.95 (ind.) | $\geq 0.98$ | Referencial | **MEJORABLE** |

*Nota*. Elaboración propia.

de la planta industrial presenta tres condiciones que requieren atención prioritaria: la tensión de suministro elevada, que supera el rango admisible de la NTCSE en el 38 % del tiempo; los armónicos individuales de corriente de quinto orden (h = 5) y undécimo orden (h = 11), que superan sus límites individuales según IEEE 519-2014 en el 52 % y 29 % de los intervalos evaluados respectivamente; y el factor de potencia, que con un valor promedio de 0.95 no alcanza el valor referencial de 0.98 recomendado para instalaciones industriales. Los demás parámetros evaluados — desbalance de tensión, flicker, $\text{THD}_v$ y TDD global de corriente — se encuentran dentro de los límites normativos establecidos. Las propuestas de mejora para cada una de estas condiciones se desarrollan en el Capítulo 5.

## 4.2. Verificación de conformidad normativa

El presente trabajo adopta un enfoque descriptivo y aplicado, por lo que no se plantean hipótesis estadísticas formales en el sentido inferencial clásico. No obstante, los resultados obtenidos permiten evaluar de manera sistemática el comportamiento del sistema eléctrico en relación con los estándares establecidos en la normativa vigente.

A partir de los datos registrados durante el periodo de medición, se establecen las siguientes verificaciones de conformidad normativa:

1) Los parámetros de distorsión armónica en tensión ($THD_v$ prom. = 3.82 %) y la distorsión de demanda total en corriente (TDD prom. = 7.65 %) se encuentran dentro de los límites establecidos por la NTCSE y la IEEE 519-2014, respectivamente. Sin embargo, los armónicos individuales de corriente de quinto orden ($h = 5$) y undécimo orden ($h = 11$) superan sus límites individuales en el 52 % y 29 % de los intervalos evaluados, constituyendo una no conformidad técnica que requiere atención mediante la instalación de filtros pasivos sintonizados.

2) El nivel de tensión de suministro supera el rango admisible de $\pm 5$ % establecido por la NTCSE en el 38 % de los intervalos evaluados, constituyendo la principal no conformidad identificada en el sistema. Esta condición es atribuible al suministro de la empresa concesionaria y no a la instalación interna de la planta.

3) El factor de potencia promedio de 0.95 inductivo se encuentra dentro de rangos operativos aceptables; sin embargo, no alcanza el valor referencial de 0.98 recomendado para instalaciones industriales (Dugan *et al.*, 2012). La presencia de potencia reactiva inductiva incrementa la corriente circulante y las pérdidas en la instalación, justificando la implementación de compensación reactiva mediante bancos de capacitores.

4) La estructura de consumo de la planta, caracterizada por la operación de cargas de alta demanda durante el horario fuera de punta (134.03 kW en hora valle vs. 100.2 kW en hora punta), genera oportunidades de optimización tarifaria que se desarrollan en el Capítulo 5.

# CAPÍTULO 5. IMPACTOS

A partir de los resultados obtenidos en el Capítulo 4, el presente capítulo desarrolla las propuestas de solución estructuradas en dos ejes: las mejoras técnicas, dirigidas a corregir las no conformidades identificadas en los parámetros de calidad de energía eléctrica, y las mejoras tarifarias, orientadas a reducir los costos asociados al consumo eléctrico mediante la selección de la opción tarifaria más adecuada al perfil de carga de la instalación.

## 5.1. Propuesta para la solución del problema

### 5.1.1. Propuesta técnica: mitigación de armónicos de corriente

El análisis de armónicos individuales de corriente presentado en el Capítulo 4 evidenció que los armónicos de quinto orden (h = 5) y undécimo orden (h = 11) superan los límites individuales establecidos por la norma IEEE 519-2014 en el 52 % y 29 % de los intervalos evaluados, respectivamente. Estos armónicos son generados principalmente por los variadores de velocidad instalados en la máquina peletizadora y la máquina de lavado industrial, los cuales incorporan rectificadores trifásicos de seis pulsos en su etapa de conversión de potencia (Dugan *et al.*, 2012).

Con el fin de mitigar estos efectos, se propone la implementación de **filtros pasivos sintonizados** de orden 5° y 11°. Los filtros pasivos constituyen una solución técnicamente probada y económicamente viable para entornos industriales con cargas no lineales de potencia media, ya que presentan baja impedancia a la frecuencia de sintonía, desviando las corrientes armónicas correspondientes antes de que circulen por la red (Singh *et al.*, 1999).

Desde el punto de vista físico, un filtro pasivo sintonizado al armónico de orden $h$ se diseña como un circuito LC en serie, cuya frecuencia de resonancia $f_h$ se establece como:

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = h \cdot f_1 \tag{5.1}$$

donde $f_h$ es la frecuencia de resonancia correspondiente al armónico de orden $h$,

$f_1 = 60$ Hz es la frecuencia fundamental del sistema, $h$ es el orden del armónico, $L$ es la inductancia del filtro y $C$ es la capacitancia del filtro. Para los armónicos de interés, las frecuencias de sintonía correspondientes son:

- Filtro de orden 5: $f_5 = 5 \times 60 = 300$ Hz
- Filtro de orden 11: $f_{11} = 11 \times 60 = 660$ Hz

A la frecuencia de resonancia, la impedancia del filtro es mínima, lo que permite derivar a tierra la corriente armónica correspondiente con mínima caída de tensión (Arrillaga y Watson, 2003).

Los beneficios esperados de la implementación de estos filtros incluyen la reducción de los armónicos individuales de corriente h = 5 y h = 11 por debajo de los límites establecidos por la IEEE 519-2014 (10 % y 4.5 % respectivamente), la disminución de las pérdidas por efecto Joule en conductores y transformadores, la reducción del sobrecalentamiento en equipos eléctricos y la mejora del factor de potencia del sistema al eliminar la potencia de distorsión asociada a los armónicos.

### 5.1.2. Propuesta técnica: regularización de la tensión de suministro

El análisis de tensión presentado en el Capítulo 4 evidenció que la tensión de suministro supera el rango admisible de ±5 % establecido por la NTCSE en el 38 % de los intervalos evaluados, con valores que alcanzan hasta 238 V sobre una tensión nominal de 220 V. Esta situación no es atribuible directamente a la instalación de la planta, sino a las condiciones del suministro proporcionado por la empresa concesionaria.

En consecuencia, se recomienda **notificar formalmente a la empresa concesionaria Enel Distribución** la condición de transgresión de tensión identificada, adjuntando el informe de mediciones como sustento técnico, conforme al procedimiento establecido en la NTCSE (OSINERGMIN, 1997). Asimismo, se recomienda la instalación de un **regulador de tensión** en el tablero general como medida de protección inmediata para los equipos de la planta.

Adicionalmente, se recomienda verificar con Enel Distribución la discrepancia identificada entre la potencia registrada por el analizador de redes (141.81 kW) y la potencia facturada por la concesionaria (193.35 kW), dado que esta diferencia podría representar un cargo indebido en la facturación eléctrica (OSINERGMIN, 1997).

### 5.1.3. Propuesta tarifaria: análisis y cambio de opción tarifaria

El análisis tarifario se realizó tomando como línea base el perfil de carga registrado por el analizador de redes durante el periodo de medición (22 al 30 de mayo de 2024), al cual se aplicaron los pliegos tarifarios vigentes de la tarifa **BT3** con calificación en horas punta, opción tarifaria vigente de la planta. Esta línea base proyectada (S/. 45 603.29 mensuales) constituye una **estimación propia** elaborada a partir de los datos de campo, y no una transcripción literal del recibo de facturación, dado que el recibo real del ciclo junio de 2024 (Figura 2, en Anexos) incluye conceptos ajenos al consumo del periodo evaluado — tales como deuda anterior, recargos por mora y redondeos de meses previos — que no corresponden a la proyección tarifaria aquí desarrollada. No obstante, la línea base estimada es consistente en orden de magnitud con el subtotal del mes facturado en dicho recibo (S/. 46 523.85, sin IGV), lo que valida la coherencia entre el perfil de carga medido y la facturación real de la planta. A partir de esta línea base, se evaluaron seis escenarios tarifarios — el actual y cinco alternativos — cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.2.

Para comprender el origen de la diferencia de costos entre ambas opciones tarifarias, es necesario comparar los pliegos tarifarios vigentes de OSINERGMIN para BT3 y MT3 (Anexos). La Tabla 5.1 presenta dicha comparación.

Como se observa en la Tabla 5.1, el ahorro no proviene principalmente de la energía consumida, cuyo precio unitario es apenas 8 % menor en MT3, sino casi exclusivamente del cargo de potencia de redes de distribución, que se reduce en alrededor del 74 %. Esto se debe a que, en media tensión, el usuario asume la propiedad y el mantenimiento de su propio transformador de distribución, liberando a la concesionaria de esa infraestructura y del costo asociado que traslada al cliente en baja tensión.

A partir de esta comparación tarifaria, se evaluaron de forma progresiva seis

**Tabla 5.1**

*Comparativo de precios unitarios de los pliegos tarifarios BT3 y MT3 vigentes.*

| Concepto | Unidad | BT3 | MT3 | Reducción |
|---|---|---|---|---|
| Cargo fijo mensual | S/./mes | 4.40 | 4.40 | 0.0 % |
| Energía activa en punta | ctm. S/./kWh | 35.57 | 32.74 | 8.0 % |
| Energía activa fuera de punta | ctm. S/./kWh | 30.18 | 27.77 | 8.0 % |
| Potencia generación — presente en punta | S/./kW-mes | 63.22 | 57.99 | 8.3 % |
| Potencia generación — fuera de punta | S/./kW-mes | 37.65 | 30.79 | 18.2 % |
| **Potencia distribución — presente en punta** | S/./kW-mes | **67.86** | **17.50** | **74.2 %** |
| **Potencia distribución — fuera de punta** | S/./kW-mes | **59.12** | **17.07** | **71.1 %** |
| Energía reactiva (exceso 30 %) | ctm. S/./kVarh | 5.42 | 5.42 | 0.0 % |

*Nota*. Elaboración propia, basado en los pliegos tarifarios BT3 y MT3 de OSINERGMIN vigentes a la fecha de facturación evaluada.

escenarios que aíslan el efecto de cada variable de decisión: primero el cambio de opción tarifaria por sí solo (BT3 $\rightarrow$ MT3, manteniendo la calificación en horas punta), luego el cambio de calificación tarifaria por sí solo (de HP a HFP, manteniendo BT3), y finalmente la combinación de ambos cambios, evaluada tanto con la calificación tarifaria reducida como con la eliminación total del consumo en horas punta. Esta evaluación escalonada permite atribuir el ahorro obtenido a cada decisión operativa de forma independiente, en lugar de presentar únicamente el resultado del escenario óptimo.

La tarifa BT3 corresponde a una tarifa de baja tensión con doble medición de energía activa y contratación o medición de una potencia, aplicable a usuarios cuya máxima demanda mensual se encuentra entre 20 kW y 200 kW (OSINERGMIN, 1997). La tarifa MT3, por su parte, es su equivalente en media tensión, aplicable cuando el usuario instala un transformador de distribución propio, lo que permite acceder a tarifas de energía y potencia significativamente menores.

La **calificación tarifaria** determina si un usuario es facturado como cliente presente en punta (HP) o fuera de punta (HFP), en función del cociente entre su demanda en horas punta y su demanda total. Un usuario con calificación en horas fuera de punta (HFP) accede a cargos de potencia sustancialmente menores, dado que no utiliza la red eléctrica en el horario de mayor demanda del sistema (18:00 h – 23:00 h). En el caso de Corporación Roca S.A.C., la calificación tarifaria actual (CT = 0.51) corresponde a un cliente presente en punta, condición que se modifica al reprogramar el consumo fuera de dicho horario, permitiendo

acceder a los cargos de potencia reducidos que caracterizan la calificación HFP.

**Tabla 5.2**
*Comparativo de facturación mensual según escenario tarifario evaluado (proyección propia a partir del perfil de carga medido, mayo 2024).*

| N° | Escenario tarifario | Costo mensual (S/.) | Ahorro mensual (S/.) |
|---|---|---|---|
| 1 | BT3 — Tarifa actual (HP) | 45 603.29 | — |
| 2 | MT3 — Cambio de tarifa (HP) | 33 926.16 | 11 677.13 |
| 3 | BT3 — Calificación HFP | 38 646.50 | 6 956.79 |
| 4 | MT3 — Calificación HFP | 28 170.63 | 17 432.66 |
| 5 | BT3 — Consumo solo en HFP | 34 374.50 | 11 228.79 |
| 6 | MT3 — Consumo solo en HFP | 24 246.63 | 21 356.66 |

*Nota*. Elaboración propia.

A continuación se detalla la facturación de la tarifa actual y de la propuesta óptima, con el fin de ilustrar los componentes de costo sobre los que actúa cada escenario.

#### *5.1.3.1. Propuesta óptima: MT3 con consumo solo en horas fuera de punta*

De los seis escenarios evaluados en la Tabla 5.2, el escenario de mayor ahorro corresponde al cambio simultáneo de opción tarifaria a MT3 y de calificación tarifaria a horas fuera de punta (HFP), mediante la eliminación del consumo de energía en el horario de punta (6:00 pm – 11:00 pm). Este escenario reduce la facturación mensual de **S/. 45 603.29** (tarifa actual BT3 en horas punta) a **S/. 24 246.63**, lo que representa un **ahorro mensual de S/. 21 356.66** (equivalente al 46.8 % de la facturación actual) respecto a la condición tarifaria vigente de la planta. La Tabla 5.3 presenta el detalle de la facturación proyectada bajo este escenario.

La implementación de este escenario requiere la instalación de un **transformador de potencia de 500 kVA** (22.9/0.23 kV, conexión Dyn5, frecuencia 60 Hz), cuyo costo estimado asciende a S/. 47 000, así como la adecuación del horario operativo de la planta para evitar el consumo de energía en horas punta. El procedimiento para solicitar el cambio de opción tarifaria consiste en presentar una solicitud formal a la empresa concesionaria Enel Distribución con un mínimo de 30 días de anticipación.

**Tabla 5.3**
*Facturación proyectada — Propuesta óptima: MT3 con consumo solo en HFP.*

| Descripción del cargo | Consumo | Unidad | Precio unit. | Importe (S/.) |
|---|---|---|---|---|
| Cargo fijo mensual | — | S/. | 4.400 | 4.40 |
| Energía activa HP | 0 | kWh | 0.327 | 0.00 |
| Energía activa HFP | 54 858 | kWh | 0.278 | 15 250.52 |
| Potencia generación (HFP) | 193 | kW-mes | 30.790 | 5 953.25 |
| Potencia distrib. (HFP) | 178 | kW-mes | 17.070 | 3 038.46 |
| Energía reactiva | 0.00 | kVARh | 0.036 | 0.00 |
| **Total** | | | | **24 246.63** |

*Nota*. Elaboración propia.

## 5.2. Beneficios que aporta la propuesta

### 5.2.1. Beneficios técnicos

La implementación de las propuestas técnicas descritas en la sección anterior genera los siguientes beneficios sobre el sistema eléctrico de la planta:

- **Reducción de la distorsión armónica:** la instalación de filtros pasivos de orden 5° y 11° permite reducir los niveles de TDD de corriente por debajo de los límites individuales establecidos por la IEEE 519-2014, eliminando las transgresiones actualmente observadas en el 52 % y 29 % de los intervalos para dichos órdenes armónicos, respectivamente.

- **Mejora del factor de potencia:** la instalación del banco de capacitores de 15 kVAr eleva el factor de potencia de 0.95 a 0.98, reduciendo la corriente reactiva circulante en los conductores y disminuyendo las pérdidas por efecto Joule en la instalación.

- **Reducción de pérdidas en conductores:** la corrección del factor de potencia y la mitigación de armónicos reducen el valor eficaz total de la corriente circulante, lo que se traduce directamente en una disminución de las pérdidas óhmicas en los conductores del sistema, proporcionales al cuadrado de la corriente (Dugan *et al.*, 2012).

- **Incremento de la vida útil de los equipos:** la reducción de la distorsión armónica y del sobrecalentamiento asociado contribuye a preservar el aislamiento de los

devanados de los motores eléctricos y del transformador, extendiendo su vida útil operativa.

- **Mayor confiabilidad del sistema:** la corrección de los parámetros de calidad de energía eléctrica reduce la probabilidad de disparos intempestivos de protecciones y fallas prematuras en equipos electrónicos sensibles conectados a la red de la planta.

### 5.2.2. Beneficios económicos

La Tabla 5.4 presenta el resumen de los beneficios económicos proyectados para cada escenario tarifario evaluado, expresados en términos de ahorro mensual, ahorro anual, porcentaje de ahorro respecto a la tarifa actual y retorno de inversión cuando aplique.

**Tabla 5.4**
*Evaluación económica de los escenarios tarifarios propuestos.*

| Escenario | Ahorro mensual (S/.) | Ahorro anual (S/.) | % ahorro | Retorno inversión |
|---|---|---|---|---|
| MT3 — HP | 11 677.13 | 140 125.6 | 25.6 % | — |
| BT3 — HFP | 6 956.79 | 83 481.5 | 15.3 % | — |
| MT3 — HFP | 17 432.66 | 209 191.9 | 38.2 % | — |
| BT3 — solo HFP | 11 228.79 | 134 745.5 | 24.6 % | — |
| **MT3 — solo HFP** | **21 356.66** | **256 279.9** | **46.8 %** | **7 meses** |

*Nota*. Elaboración propia.

El escenario óptimo corresponde al cambio de tarifa a **MT3 con consumo exclusivo en horas fuera de punta**, el cual genera un ahorro mensual de **S/. 21 356.66** y un ahorro anual de **S/. 256 279.9**, representando una reducción del **46.8 %** respecto a la facturación actual. Considerando una inversión estimada de S/. 150 000 para la instalación del transformador de 500 kVA y las adecuaciones necesarias, el retorno de inversión se estima en **7 meses**, lo que constituye un indicador financiero altamente favorable para la toma de decisiones.

Adicionalmente, se recomienda verificar con la empresa concesionaria Enel Distribución la discrepancia identificada entre la potencia medida por el analizador de redes (141.81 kW) y la potencia facturada de 193.35 kW, dado que esta diferencia podría representar un cargo indebido en la facturación que, de confirmarse, implicaría un beneficio

económico adicional para la planta (OSINERGMIN, 1997).

### 5.2.3. Beneficios para la gestión energética

Más allá de los beneficios técnicos y económicos inmediatos, el presente estudio aporta a la planta industrial una **línea base documentada** de sus parámetros de calidad de energía eléctrica, obtenida mediante mediciones directas con equipos calibrados y bajo condiciones reales de operación. Esta información constituye un insumo fundamental para la implementación de un **sistema de gestión energética continua**, entendido como un proceso sistemático de monitoreo periódico de los parámetros eléctricos, registro histórico de su evolución en el tiempo, y revisión recurrente de indicadores de desempeño (demanda, factor de potencia, distorsión armónica, entre otros), que permita a la planta identificar oportunidades de mejora adicionales y sostener en el tiempo los beneficios obtenidos mediante las medidas correctivas propuestas.

Asimismo, el conocimiento del perfil de carga real de la planta —en particular, la identificación de la máquina peletizadora como la carga dominante con más del 62 % de la demanda total— permite orientar futuras inversiones en eficiencia energética hacia los equipos de mayor impacto, maximizando el retorno de cada intervención.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Conclusiones

1) La evaluación de la calidad de energía eléctrica en la planta industrial Corporación Roca S.A.C., realizada mediante mediciones continuas durante siete días con un analizador de redes Metrel MI2892 en el punto de acoplamiento común, permitió caracterizar de manera integral el comportamiento eléctrico del sistema bajo condiciones reales de operación. La máxima demanda registrada fue de **134.03 kW**, con una proyección de consumo mensual de **46 600.3 kWh**, siendo la máquina peletizadora la carga dominante con el 62.1 % de la demanda total del circuito de máquinas.

2) El análisis del factor de potencia y de la distorsión armónica evidenció no conformidades técnicas atribuibles a la naturaleza no lineal de las cargas principales. El factor de potencia promedio de **0.95 inductivo** en el circuito de máquinas (C-2), asociado a la operación de motores eléctricos de la peletizadora y la máquina de lavado, si bien se encuentra dentro de rangos operativos aceptables, no alcanza el valor recomendado de 0.98, implicando una circulación de corriente reactiva de hasta **56.3 kVAr** que incrementa las pérdidas en la instalación. Asimismo, aunque el $\mathrm{THD}_v$ promedio de **3.82 %** y el TDD de corriente promedio de **7.65 %** cumplen los límites globales de la NTCSE (8 %) y la IEEE 519-2014 (12 %) respectivamente, los armónicos individuales de corriente de quinto orden ($h = 5$) y undécimo orden ($h = 11$) superan sus límites individuales en el 52 % y 29 % de los intervalos evaluados. En conjunto, estos hallazgos justifican la implementación de compensación reactiva mediante un banco de capacitores y de filtros pasivos sintonizados para corregir ambas no conformidades.

3) El perfil de tensión de suministro registrado en el Tablero General **no cumple** con la

tolerancia de $\pm 5$ % establecida por la NTCSE, al registrarse una tensión máxima de **238 V** sobre una tensión nominal de 220 V, con el 38 % de intervalos en transgresión. Por el contrario, el desbalance de tensión promedio de **0.43 %** y el índice de flicker promedio de $P_{st}$ **= 0.22** se encuentran dentro de los límites establecidos por la IEC 61000-2-2 y la NTCSE, respectivamente, lo que indica que el sistema opera con adecuado equilibrio entre fases y sin fluctuaciones de tensión perceptibles.

4) El análisis tarifario demostró que la planta opera bajo una opción tarifaria **BT3 con calificación en horas punta**, generando una facturación mensual de S/. 45 603.29. El cambio a la tarifa **MT3 con consumo exclusivo en horas fuera de punta** constituye la propuesta de mayor impacto económico, con un ahorro mensual de **S/. 21 356.66**, un ahorro anual proyectado de **S/. 256 279.90** y un retorno de inversión estimado de **7 meses**, representando una reducción del 46.8 % en la facturación eléctrica actual.

## Recomendaciones

1) Se recomienda gestionar el **cambio de opción tarifaria de BT3 a MT3** ante la empresa concesionaria Enel Distribución, con una anticipación mínima de 30 días, acompañado de la adecuación del horario laboral de la planta para evitar el consumo de energía en el horario de punta (18:00 h – 23:00 h). Para ello, se requiere la instalación de un transformador de potencia de 500 kVA (22.9/0.23 kV, conexión Dyn5, 60 Hz), cuya inversión estimada de S/. 150 000 — que comprende el costo del equipo, instalación y adecuaciones de infraestructura — se recupera en 7 meses gracias al ahorro tarifario generado.

2) Se recomienda la **instalación conjunta de filtros pasivos sintonizados y de un banco de capacitores** en el tablero de máquinas y el tablero general, respectivamente. Los filtros pasivos sintonizados de quinto y undécimo orden deben dimensionarse considerando la potencia reactiva de los armónicos predominantes y la impedancia de la red en el punto de acoplamiento común, con el fin de reducir los armónicos individuales de corriente $h = 5$ y $h = 11$ por debajo de los límites establecidos por

la IEEE 519-2014 (10 % y 4.5 % respectivamente). De forma complementaria, el banco de capacitores de 15 kVAr, con control automático por etapas, permitirá elevar el factor de potencia de 0.95 a 0.98, reduciendo la corriente reactiva circulante y mejorando la eficiencia energética global de la instalación.

3) Se recomienda **notificar formalmente a la empresa concesionaria Enel Distribución** la condición de tensión elevada identificada, que supera el rango admisible de la NTCSE en el 38 % del tiempo, adjuntando el informe de mediciones como sustento técnico. Asimismo, se recomienda verificar la discrepancia entre la potencia medida por el analizador de redes (141.81 kW) y la potencia facturada (193.35 kW), dado que esta diferencia podría representar un cargo indebido en la facturación eléctrica.

4) Se recomienda **implementar un sistema de monitoreo energético continuo** mediante la instalación de un medidor multifunción trifásico permanente — modelo referencial: RISH LM 1360, costo estimado S/. 618.90 — en el tablero general, que permita registrar en tiempo real los parámetros de calidad de energía eléctrica y verificar la efectividad de las medidas correctivas implementadas. Este sistema constituye la base para el desarrollo de una gestión energética sistemática orientada a la mejora continua del desempeño eléctrico y económico de la planta.

# Referencias


Alexander, C. K. y Sadiku, M. N. O. (2017). *Fundamentals of Electric Circuits*. McGraw-Hill, 6 edición.

Angarita, M. L. y Zapata, C. J. (2016). Análisis de calidad de energía eléctrica en sistemas industriales: metodología y casos de estudio. *Ingeniería y Ciencia*, *12*(23), 151–175. https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.23.7.

Arrillaga, J. y Watson, N. R. (2003). *Power System Harmonics*. Wiley, 2 edición.

Bollen, M. H. J. (2000). *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. Wiley-IEEE Press. https://doi.org/10.1109/9780470546840.

Condori Quispe, R. A. (2019). Análisis de la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico de la Universidad Nacional del Altiplano Puno [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/11345.

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., y Beaty, H. W. (2012). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, 3 edición.

Fuchs, E. F. y Masoum, M. A. S. (2011). *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369536-9.X0001-6.

Grainger, J. J. y Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.

Hayt, W. H., Kemmerly, J. E., y Durbin, S. M. (2019). *Engineering Circuit Analysis*. McGraw-Hill, 9 edición.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, M. d. P. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill, 6 edición.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (2014). IEEE Std 519-2014: Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (2019). IEEE Std 1159-2019: Recommended practice for monitoring electric power quality. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486.

International Electrotechnical Commission (2002). IEC 61000-2-2: Electromagnetic compatibility (EMC) — part 2-2: Environment — compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.

International Electrotechnical Commission (2015). IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) — part 4-30: Testing and measurement techniques — power quality measurement methods.

Melo, N. A., Bollen, M. H. J., y Ribeiro, P. F. (2017). Voltage disturbances and power quality in industrial networks: Measurements and analysis. *Electric Power Systems Research*, *145*, 171–180. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.007.

Ministerio de Energía y Minas (2011). Código nacional de electricidad — utilización. Resolución Ministerial N° 037-2006-MEM/DM y modificatorias.

Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., y Nawab, S. H. (1997). *Signals and Systems*. Prentice Hall, 2 edición.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (1997). Norma técnica de calidad de los servicios eléctricos. Decreto Supremo N° 020-97-EM. Modificada por Resolución N° 243-2010-OS/CD.

Proakis, J. G. y Manolakis, D. G. (2007). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. Pearson Prentice Hall, 4 edición.

Singh, B., Al-Haddad, K., y Chandra, A. (1999). A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *46*(5), 960–971. https://doi.org/10.1109/TIE.1999.793349.

Ugwuagbo, E., Ray, B., Balogun, A., Okafor, F., Sul, J., Nabi, N., y Datta, U. (2026). Power quality assessment and harmonic mitigation at the point of common coupling of industrial load. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, *37*, 397–410. https://doi.org/10.1007/s40313-025-01245-7.

Zobaa, A. F. y Aleem, S. H. E. A. (2018). Power quality in modern power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 109–121. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.054.

# Anexos

## Marco Conceptual o Glosario

- **Calidad de energía eléctrica.** Grado en que las características del suministro eléctrico (tensión, frecuencia y forma de onda) se mantienen dentro de límites aceptables para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos conectados. Incluye parámetros como distorsión armónica, factor de potencia, flicker y desbalance de tensión (IEEE, 2019; Bollen, 2000).

- **Distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés, Total Harmonic Distortion).** Indicador que cuantifica el contenido armónico de una señal respecto a su componente fundamental. En tensión, la NTCSE establece un límite de 8 % en el punto de acoplamiento común (OSINERGMIN, 1997).

- **Distorsión de demanda total (TDD, por sus siglas en inglés, Total Demand Distortion).** Relación entre el contenido armónico de la corriente y la demanda máxima de carga. La norma IEEE 519-2014 fija un límite de 12 % para sistemas con relación $50 < I_{SC}/I_L < 100$ (IEEE, 2014).

- **Factor de potencia (FP).** Relación entre la potencia activa y la potencia aparente de un sistema eléctrico. En condiciones no sinusoidales se expresa como el producto de un factor de desplazamiento y un factor de distorsión (Arrillaga y Watson, 2003):

$$\text{FP} = \text{FD} \cdot \cos\varphi$$

  donde $FP$ es el factor de potencia, $FD$ es el factor de distorsión y $\varphi$ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente eléctricas fundamentales.

  Un valor bajo implica mayor circulación de corriente y pérdidas adicionales en la instalación.

- **Potencia activa (P).** Magnitud que representa la energía efectivamente convertida en trabajo útil o disipada en la carga. Se expresa como $P = VI\cos\varphi$, donde $P$ es la potencia activa, $V$ es el valor eficaz de la tensión eléctrica, $I$ es el valor eficaz de la corriente eléctrica y $\varphi$ es el ángulo de desfase entre ambas magnitudes.

- **Potencia reactiva (Q).** Magnitud asociada al intercambio de energía entre la fuente y los elementos reactivos del sistema (inductancias y capacitancias). Se expresa como $Q = VI\sin\varphi$, donde $Q$ es la potencia reactiva, $V$ es el valor eficaz de la tensión eléctrica, $I$ es el valor eficaz de la corriente eléctrica y $\varphi$ es el ángulo de desfase entre ambas magnitudes.

- **Potencia aparente (S).** Capacidad total del sistema para suministrar energía, definida como $S = VI$, donde $S$ es la potencia aparente, $V$ es el valor eficaz de la tensión eléctrica e $I$ es el valor eficaz de la corriente eléctrica.

- **Desbalance de tensión.** Diferencia porcentual entre la máxima desviación de tensión de fase respecto al valor promedio. La norma IEC 61000-2-2 establece un límite de 2 % (IEC, 2002).

- **Flicker.** Fluctuación rápida de la tensión que genera variaciones perceptibles en la iluminación. El índice de severidad a corto plazo ($P_{st}$) debe ser $\leq 1{,}0$ según la NTCSE (OSINERGMIN, 1997).

- **Armónicos.** Componentes de frecuencia múltiple de la fundamental presentes en las señales eléctricas debido a cargas no lineales (rectificadores, variadores de velocidad). Los más representativos en sistemas trifásicos de seis pulsos son los de orden 5, 7, 11 y 13 (Arrillaga y Watson, 2003).

- **Banco de capacitores.** Dispositivo utilizado para compensar la potencia reactiva inductiva y elevar el factor de potencia de un sistema eléctrico.

- **Filtros pasivos sintonizados.** Circuitos formados por inductancias y capacitancias (LC) diseñados para atenuar armónicos específicos (5° y 11°), desviando las corrientes armónicas hacia tierra y reduciendo la distorsión en el sistema (Singh *et al.*, 1999).

- **Tarifa BT3.** Opción tarifaria en baja tensión para usuarios con demanda máxima mensual entre 20 kW y 200 kW. Incluye cargos diferenciados en horas punta (HP) y fuera de punta (HFP) (OSINERGMIN, 1997).

- **Tarifa MT3.** Opción tarifaria en media tensión, aplicable a usuarios con transformador propio. Permite acceder a menores costos de energía y potencia, especialmente en calificación HFP (OSINERGMIN, 1997).

- **Punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés, Point of Common Coupling).** Lugar de la instalación donde se conectan las cargas de la planta con la red de distribución. Es el punto de referencia para la evaluación de la calidad de energía eléctrica según IEEE 519 (IEEE, 2014).

**Tabla 5**

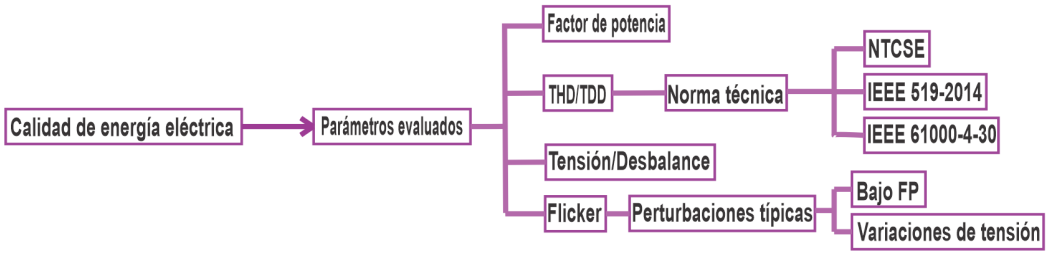
*Resumen de parámetros de calidad de energía eléctrica y cumplimiento normativo.*

| Parámetro | Valor obtenido | Límite normativo | Norma | Cumple |
|---|---|---|---|---|
| Tensión (p.u.) promedio | 1.05 p.u. | $\pm 5$ % | NTCSE | **NO** |
| Desbalance de tensión | 0.43 % | $\leq 2$ % | IEC 61000-2-2 | **SÍ** |
| Flicker ($P_{st}$) prom. | 0.22 | $\leq 1.0$ | NTCSE | **SÍ** |
| THDv (promedio) | 3.82 % | $\leq 8$ % | NTCSE | **SÍ** |
| TDD corriente (promedio) | 7.65 % | $\leq 12$ % | IEEE 519 | **SÍ** |
| Armónico h = 5 (corr.) | Máx. 28.72 % | $\leq 10$ % | IEEE 519 | **NO** |
| Armónico h = 11 (corr.) | Máx. 13.24 % | $\leq 4.5$ % | IEEE 519 | **NO** |
| Factor de potencia | 0.95 (ind.) | $\geq 0.98$ | Referencial | **MEJORABLE** |

*Nota*. Elaboración propia.

**Figura 1**

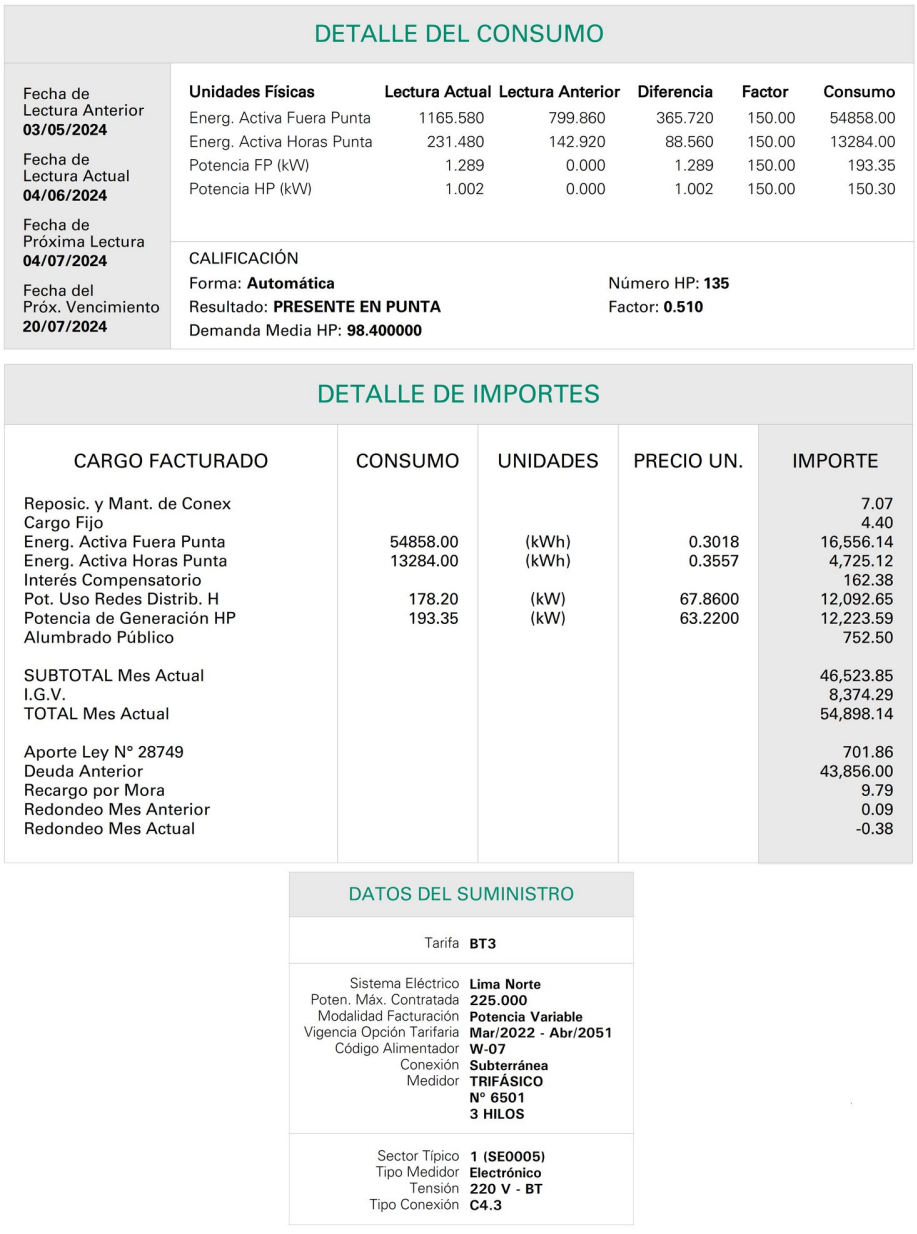
*Diagrama conceptual de parámetros de calidad de energía y normativa aplicable.*




*Nota*. Elaboración propia.

**Figura 2**

*Recibo de facturación eléctrica — ciclo junio de 2024, correspondiente al consumo del periodo 03/05/2024 al 04/06/2024, Corporación Roca S.A.C., emitido por Enel Distribución.*



DETALLE DEL CONSUMO

Fecha de Lectura Anterior **03/05/2024**
Fecha de Lectura Actual **04/06/2024**
Fecha de Próxima Lectura **04/07/2024**
Fecha del Próx. Vencimiento **20/07/2024**

| Unidades Físicas | Lectura Actual | Lectura Anterior | Diferencia | Factor | Consumo |
|---|---|---|---|---|---|
| Energ. Activa Fuera Punta | 1165.580 | 799.860 | 365.720 | 150.00 | 54858.00 |
| Energ. Activa Horas Punta | 231.480 | 142.920 | 88.560 | 150.00 | 13284.00 |
| Potencia FP (kW) | 1.289 | 0.000 | 1.289 | 150.00 | 193.35 |
| Potencia HP (kW) | 1.002 | 0.000 | 1.002 | 150.00 | 150.30 |

CALIFICACIÓN
Forma: **Automática**
Resultado: **PRESENTE EN PUNTA**
Demanda Media HP: **98.400000**
Número HP: **135**
Factor: **0.510**

DETALLE DE IMPORTES

| CARGO FACTURADO | CONSUMO | UNIDADES | PRECIO UN. | IMPORTE |
|---|---|---|---|---|
| Reposic. y Mant. de Conex | | | | 7.07 |
| Cargo Fijo | | | | 4.40 |
| Energ. Activa Fuera Punta | 54858.00 | (kWh) | 0.3018 | 16,556.14 |
| Energ. Activa Horas Punta | 13284.00 | (kWh) | 0.3557 | 4,725.12 |
| Interés Compensatorio | | | | 162.38 |
| Pot. Uso Redes Distrib. H | 178.20 | (kW) | 67.8600 | 12,092.65 |
| Potencia de Generación HP | 193.35 | (kW) | 63.2200 | 12,223.59 |
| Alumbrado Público | | | | 752.50 |
| SUBTOTAL Mes Actual | | | | 46,523.85 |
| I.G.V. | | | | 8,374.29 |
| TOTAL Mes Actual | | | | 54,898.14 |
| Aporte Ley N° 28749 | | | | 701.86 |
| Deuda Anterior | | | | 43,856.00 |
| Recargo por Mora | | | | 9.79 |
| Redondeo Mes Anterior | | | | 0.09 |
| Redondeo Mes Actual | | | | -0.38 |

DATOS DEL SUMINISTRO

Tarifa **BT3**

Sistema Eléctrico **Lima Norte**
Poten. Máx. Contratada **225.000**
Modalidad Facturación **Potencia Variable**
Vigencia Opción Tarifaria **Mar/2022 - Abr/2051**
Código Alimentador **W-07**
Conexión **Subterránea**
Medidor **TRIFÁSICO**
**N° 6501**
**3 HILOS**

Sector Típico **1 (SE0005)**
Tipo Medidor **Electrónico**
Tensión **220 V - BT**
Tipo Conexión **C4.3**

*Nota*. Documento proporcionado por la empresa Corporación Roca S.A.C. Datos de identificación del titular omitidos por confidencialidad.