

Propuesta de mejoramiento del sistema eléctrico de un taller industrial de la empresa  
PRAC incorporando soluciones para el uso eficiente de la energía.

Jesús Eduardo Parra Acevedo

Henry Leonardo Villamil Sánchez

Leidy Vanesa Ramírez Jaime

Trabajo De Grado Para Optar El Título De Ingenieros Electricistas

Rolando Andrés Rincón Saravia, MBA

Magíster en Dirección de Empresas

Codirector

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, PhD, MSc

Doctor en Tecnología Magíster en Informática Industrial y Automática .

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2026

### Agradecimientos

*Primero quiero agradecerle a Dios por haberme permitido llegar hasta este momento, por darme la fuerza para seguir adelante en los momentos difíciles y por acompañarme durante todo este proceso.*

*A mis papás, María y Eduardo, gracias por todo. Gracias por cada sacrificio que hicieron para que yo pudiera estudiar, por apoyarme incluso cuando las cosas no fueron fáciles y por confiar siempre en mí. Sé que detrás de este título también están muchos esfuerzos de ustedes, muchas preocupaciones y muchas veces en las que pusieron mis necesidades por encima de las suyas. Gracias por enseñarme a no rendirme y por estar ahí, tanto en los buenos momentos como en los no tan buenos. Este logro es mío, pero también es de ustedes, porque sin su apoyo no habría sido posible. Espero que este título sea una forma de demostrarles que todo lo que hicieron por mí valió la pena. Los quiero mucho y gracias por ayudarme a llegar hasta aquí.*

*A mi hermana menor, Julita, gracias por estar en mi vida, por tu cariño y por acompañarme a tu manera durante este camino. Espero que algún día pueda servirte de ejemplo para que luches por tus propios sueños.*

*A mis abuelos, tíos y primos, gracias por el cariño, el apoyo y por estar presentes durante estos años. Cada uno, desde su manera, ha aportado algo a la persona que soy hoy.*

*A mi segunda familia, Cárdenas Almeida, gracias por haber estado presentes durante tantos años de mi vida, por todo el cariño, los consejos y el apoyo que siempre me han brindado. Gracias por acompañarme en diferentes momentos, por alegrarse con mis logros y por estar también cuando las cosas no han sido tan fáciles. Más que una familia cercana, han sido una familia que la vida me permitió escoger, y por eso siempre voy a estar agradecido.*

*A mis amigos de la universidad, “Los Futbolistas”, gracias por todos los momentos que compartimos durante estos años. Entre trabajos, preocupaciones, risas y momentos difíciles, hicieron que este camino fuera mucho más llevadero. Me quedo con muchos recuerdos y, sobre todo, con la amistad que construimos.*

*Y finalmente, quiero agradecerme a mí mismo por no haberme rendido. Por seguir adelante cuando las cosas se pusieron difíciles, por superar cada obstáculo y por llegar hasta el final. Hoy puedo mirar atrás y sentir orgullo de todo lo que tuve que pasar para estar aquí.*

*A todos los que hicieron parte de este camino, gracias. Este título representa el cierre de una etapa muy importante de mi vida y el comienzo de todo lo que viene.*

*««El secreto de la existencia humana no está solamente en vivir, sino también en saber para qué se vive.»*

*— Fiódor Dostoievski»*

**Jesús Eduardo Parra Acevedo**

*En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida como profesional.*

*A mis padres Florentino Villamil y Maria Marlen Sánchez gracias por su apoyo y amor incondicional, por acompañarme durante este proceso y por ser un pilar fundamental en cada uno de los momentos de mi formación académica y personal, gracias por su confianza, sus consejos y por motivarme siempre a seguir adelante, incluso en los momentos de mayor dificultad. A mis hermanos Joaquín Ernesto y Laura Andrea, gracias por inspirarme a ser mejor cada día, por cada consejo, por darme un ejemplo de perseverancia y lucha en cada uno de mis propósitos.*

*A mis amigos, Sebastián G., Santiago J., Daniela V., Jesús P., Sergio C., Mafe B., Frank J. Laura G., Heidy S. y a las demás amistades que construí a lo largo de mi vida universitaria, gracias por su compañía durante estos años. Gracias por compartir conmigo tantos momentos, por las conversaciones, las risas y por aquellos espacios en los que, por un momento, pudimos dejar de lado la rigurosidad y las responsabilidades académicas. Su compañía hizo más llevadero este proceso y permitió que esta etapa estuviera acompañada de momentos agradables que siempre recordaré.*

*Agradezco a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) y a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por haber sido parte fundamental de mi formación académica, profesional y personal. Gracias a todo el personal docente por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, así como por la exigencia y dedicación que me permitieron fortalecer mis capacidades y prepararme para afrontar los retos de la vida profesional. Durante estos años, la UIS se convirtió en mi segundo hogar, un lugar donde no solo adquirí conocimientos, sino donde también crecí como persona, superé nuevos retos y viví experiencias que marcaron profundamente esta etapa de mi vida. Cada enseñanza, cada desafío y cada experiencia vivida deja una huella importante en mi formación y representa una parte fundamental del camino recorrido para alcanzar esta meta. Siento un profundo orgullo y gratitud por haber pertenecido a esta institución y por todo lo que significó para mí ser parte de la UIS.*

*Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este proceso. Cada consejo, palabra de ánimo, enseñanza y aporte contribuyó a que este trabajo pudiera culminarse satisfactoriamente. A todos ellos, mi más sincera gratitud por haber acompañado y contribuido, de alguna manera, a este importante capítulo de mi vida.*

**Henry Leonardo Villamil Sánchez**

*Primero quiero agradecerle a Dios por haberme permitido llegar hasta este momento, por darme la fuerza para seguir adelante en los momentos difíciles y por acompañarme durante todo este proceso.*

*A mis padres, Abelardo y Yolanda, por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y por acompañarme durante cada etapa de este camino. Gracias por todos los*

*esfuerzos, sacrificios y enseñanzas que hicieron para que yo pudiera llegar hasta aquí. Hoy, al alcanzar este logro, siento que también se refleja en mí una parte de todo aquello que ustedes soñaron, de las oportunidades que quizá no tuvieron y de todo lo que, con su trabajo y dedicación, hicieron posible para sus hijos. Este título es también una manera de honrar cada uno de sus esfuerzos y de demostrarles que todo aquello que hicieron por mí valió la pena. Este logro es mío, pero también es de ustedes.*

*A mi hermano menor, William, gracias por estar en mi vida, por tu cariño y por acompañarme, a tu manera, durante este camino. Espero que algún día pueda servirte de ejemplo para que luches por tus propios sueños, así como yo aprendí a luchar por los míos.*

*A mis amigos, a aquellos que estuvieron presentes en diferentes momentos de esta etapa y también a quienes, aunque hoy ya no estén tan cerca, dejaron una huella importante en mi vida. Gracias por las conversaciones, las risas, los momentos compartidos y, de una u otra manera, por ayudarme a seguir adelante cuando el camino se hizo difícil. Cada persona que pasó por esta etapa dejó algo en mí que también hace parte de este logro.*

*A mi novio, Edgar, por llegar y acompañarme durante la última etapa de mi carrera, que sin duda alguna fue una de las más fuertes y desafiantes. Gracias por estar, por escucharme, por apoyarme y por recordarme que podía seguir adelante incluso en los momentos en que yo misma dudaba. Esta etapa me hizo una mujer más valiente, y agradezco haber podido compartir parte de ella contigo.*

*A mi angelito, que sé que siempre está a mi lado, acompañándome y cuidándome. Aunque no pueda tenerte físicamente conmigo, siento tu presencia en cada paso que doy y quiero pensar que hoy estás aquí, orgulloso de todo lo que he logrado hasta este momento. Este logro también lleva un pedacito de ti.*

*A mi gato Coco, por acompañarme silenciosamente durante tantas horas de estudio, por estar a mi lado en los momentos de estrés y por hacer un poco más llevaderos aquellos días en los que sentía que no podía más. Gracias por tu compañía, por tus ocurrencias y por estar ahí, incluso sin saberlo, en tantos momentos importantes de este camino. Sin duda, fuiste una pequeña pero muy especial parte de esta etapa.*

*Y finalmente, a mí misma. Por no rendirme, por superar cada obstáculo y por encontrar la fuerza para llegar hasta el final. Esta carrera no fue fácil; hubo momentos de incertidumbre, dificultades y muchas piedras en el camino que hicieron que llegar hasta aquí fuera aún más*

*difícil. Sin embargo, seguí adelante. Hoy puedo mirar atrás y sentir orgullo de todo lo que tuve que superar para estar aquí. Me reconozco el esfuerzo, la valentía y la perseverancia que fueron necesarias para llevar a término una carrera tan compleja y, sobre todo, para no abandonar mis sueños.*

*A todos los que hicieron parte de este camino, gracias. Cada palabra, cada gesto, cada compañía y cada experiencia contribuyeron, de alguna manera, a que hoy pueda estar escribiendo estas palabras. Este título representa el cierre de una etapa muy importante de mi vida, pero también el comienzo de todo lo que está por venir.*

**Leidy Vanesa Ramírez Jaime**

## Tabla de Contenido

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                                                                    | 12 |
| 1. Objetivos .....                                                                                                    | 14 |
| 1.1 Objetivo General .....                                                                                            | 14 |
| 1.2 Objetivos Específicos.....                                                                                        | 14 |
| 2. Diagnóstico Técnico Del Taller Industrial.....                                                                     | 15 |
| 2.1 Cómo se hizo.....                                                                                                 | 15 |
| 2.2 Qué se encontró.....                                                                                              | 15 |
| 2.3 Tablero General de Baja Tensión 3 (TGBT3, área administrativa).....                                               | 16 |
| 3. Cálculos Eléctricos Y Dimensionamiento Del Sistema De Potencia .....                                               | 17 |
| 3.1 Revisión normativa y definición de criterios de diseño.....                                                       | 17 |
| 3.2 Diagnóstico técnico de campo del taller industrial .....                                                          | 18 |
| 3.3 Análisis de riesgos de origen eléctrico y medidas de mitigación .....                                             | 19 |
| 3.4 Análisis de riesgo por rayos y protección contra descargas atmosféricas (SIPRA) .....                             | 19 |
| 3.5 Determinación de cuadros de carga y sectorización del sistema .....                                               | 20 |
| 3.6 Medidas de eficiencia energética: corrección del factor de potencia y evaluación del variador de frecuencia ..... | 20 |
| 3.7 Análisis de coordinación de aislamiento eléctrico.....                                                            | 21 |
| 3.8 Análisis de cortocircuito y falla a tierra.....                                                                   | 22 |
| 3.9 Análisis del nivel de tensión requerido y del sistema de medición .....                                           | 22 |
| 3.10 Cálculo de campos electromagnéticos .....                                                                        | 23 |
| 3.11 Cálculo y selección del transformador.....                                                                       | 23 |
| 3.12 Diseño del sistema de puesta a tierra .....                                                                      | 23 |
| 3.13 Cálculo de corrientes de diseño y calibre de conductores .....                                                   | 24 |
| 3.14 Verificación de conductores por circuito.....                                                                    | 24 |
| 3.15 Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos .....                                         | 25 |
| 3.16 Cálculo y coordinación de protecciones .....                                                                     | 26 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.17 Selección de canalizaciones .....                                                    | 26 |
| 3.18 Cálculo de pérdidas de energía .....                                                 | 27 |
| 3.19 Cálculo de regulación de tensión .....                                               | 27 |
| 3.20 Clasificación de áreas .....                                                         | 27 |
| 3.21 Elaboración de diagramas unifilares, planos y especificaciones de construcción ..... | 28 |
| 3.22 Verificación de distancias de seguridad.....                                         | 28 |
| 3.23 Diseño de iluminación .....                                                          | 29 |
| 3.24 Elaboración del presupuesto del proyecto .....                                       | 29 |
| <br>                                                                                      |    |
| 4. Desempeño Energético Y Medidas De Eficiencia.....                                      | 30 |
| 4.1 Diseño de iluminación .....                                                           | 30 |
| 4.2 Corrección del factor de potencia .....                                               | 31 |
| 4.2.1 Identificación de las cargas de la instalación .....                                | 31 |
| 4.2.2 Determinación de la potencia activa .....                                           | 31 |
| 4.2.3 Determinación de la potencia reactiva existente.....                                | 32 |
| 4.2.4 Establecimiento del factor de potencia objetivo .....                               | 32 |
| 4.2.5 Cálculo de la potencia reactiva deseada.....                                        | 33 |
| 4.2.6 Determinación de la potencia reactiva a compensar .....                             | 33 |
| 4.2.7 Selección del banco de capacitores.....                                             | 34 |
| 4.2.8 Selección de la ubicación.....                                                      | 34 |
| <br>                                                                                      |    |
| 5. Presupuesto Del Proyecto .....                                                         | 35 |
| 5.1 Cómo se construyó.....                                                                | 35 |
| 5.2 Resultado.....                                                                        | 35 |
| <br>                                                                                      |    |
| 6. Documentación Técnica Del Proyecto.....                                                | 36 |
| <br>                                                                                      |    |
| 7. Conclusiones .....                                                                     | 38 |
| <br>                                                                                      |    |
| Referencias Bibliográficas .....                                                          | 41 |

**Lista de Tablas**

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| Tabla 1 Resultados Dialux ..... | 30 |
| Tabla 2 Presupuesto .....       | 35 |

### **Lista de Apéndices**

**Apéndice A.** Registro Fotográfico.

**Apéndice B.** Planos y esquemas.

**Apéndice C.** Diagramas Unifilares.

**Apéndice D.** Levantamiento Eléctrico.

**Apéndice E.** Matrices Riesgo Eléctrico.

**Apéndice F.** Cuadro de cargas.

**Apéndice G.** Dimensionamiento del Transformador.

**Apéndice H.** Perdidas y Regulación.

**Apéndice I.** Sistema puesta tierra.

**Apéndice J.** Análisis y cálculos de cortocircuito, arco eléctrico y falla a tierra.

**Apéndice K.** Memoria de Cálculo DiaLux.

**Apéndice L.** Memoria de Cálculo Eficiencia Energética.

**Apéndice M.** Fichas Técnicas.

**Apéndice N.** Presupuesto.

**Apéndice O.** Evaluación de Riesgo Contra Rayos (SIPRA).

**Apéndice P.** Canalizaciones.

**Apéndice Q.** Canalizaciones.

### Resumen

**Título:** Propuesta de mejoramiento del sistema eléctrico de un taller industrial de la empresa PRAC incorporando soluciones para el uso eficiente de la energía. \*

**Autor:** Jesús Eduardo Parra Acevedo, Henry leonardo Villamil Sánchez, Leidy Vanesa Ramírez Jaime \*\*

**Palabras Clave:** Diseño eléctrico, eficiencia energética, factor de potencia, RETIE, NTC 2050, taller industrial, sostenibilidad.

### Descripción:

El presente trabajo de grado desarrolla el diseño de una solución integral para la modernización de la infraestructura eléctrica del taller industrial de la empresa PRAC, ubicado en Paipa, Boyacá. El proyecto surge de la necesidad de reestructurar un sistema que operaba bajo condiciones limitadas de seguridad y sin medición independiente, lo que dificultaba la adecuada gestión energética de las áreas operativas. En este contexto, el objetivo central fue formular una propuesta técnica robusta que garantice la confiabilidad del suministro, la protección del personal y la optimización del consumo de energía, en estricto cumplimiento de los reglamentos RETIE, NTC 2050 y RETILAP.

La metodología se desarrolló de manera secuencial, iniciando con un diagnóstico técnico detallado que permitió identificar deficiencias en el sistema de protecciones y oportunidades de mejora en el desempeño energético. Con base en este análisis, se llevó a cabo el dimensionamiento de una nueva infraestructura donde se sectorizan las cargas por áreas funcionales y se hace la instalación de un sistema de transformación independiente, capaz de soportar la operación de equipos industriales de alta demanda, y de esa manera se pudo realizar la incorporación de estrategias de eficiencia energética orientadas a la corrección del factor de potencia.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia, MBA Magíster en Dirección de Empresas.

### Abstract

**Title:** Proposal for the improvement of the electrical system of an industrial workshop of the PRAC company incorporating solutions for the efficient use of energy.\*

**Author:** Jesús Eduardo Parra Acevedo, Henry Leonardo Villamil Sánchez, Leidy Vanesa Ramírez Jaime\*\*

**Key Words:** Electrical design, energy efficiency, power factor, electrical regulations, industrial workshop, sustainability.

### Description:

This undergraduate thesis presents the design of a comprehensive solution for modernizing the electrical infrastructure of PRAC's industrial workshop, located in Paipa, Boyacá. The project stems from the need to restructure a system that had been operating under limited safety conditions and without independent metering, which hindered proper energy management across operational areas. In this context, the main objective was to develop a robust technical proposal that ensures supply reliability, personnel safety, and optimized energy consumption, in full compliance with RETIE, NTC 2050, and RETILAP regulations.

The methodology was carried out in a sequential manner, beginning with a detailed technical assessment that identified deficiencies in the protection system and opportunities to improve energy performance. Based on this analysis, a new infrastructure was designed, where loads are segmented by functional areas and an independent transformation system is installed to support high-demand industrial equipment. This approach also enabled the integration of energy efficiency strategies focused on power factor correction.

---

\* Thesis

\*\*Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia, MBA – Master of Business Administration.

## **Introducción**

En Colombia, el sector industrial representa aproximadamente el 25% del consumo de energía eléctrica nacional y enfrenta el desafío permanente de optimizar sus procesos para mantener la competitividad en un contexto de costos energéticos crecientes. En este escenario, la empresa PRAC Obras de Ingeniería S.A.S., ubicada en Paipa, Boyacá, requiere modernizar su taller industrial para respaldar su expansión operativa. Actualmente, sus instalaciones presentan limitaciones críticas, entre ellas la ausencia de medición independiente por área funcional y el uso de componentes de tipo residencial para atender cargas industriales de alta demanda, lo cual contraviene los estándares de seguridad y eficiencia energética.

El problema central de esta investigación radica en la falta de una infraestructura eléctrica moderna y adecuadamente dimensionada que garantice la continuidad del servicio ante la operación simultánea de equipos como soldadoras y compresores, en estricto cumplimiento de los reglamentos RETIE, NTC 2050 y RETILAP. En consecuencia, el propósito de este trabajo es diseñar una solución integral basada en una capacidad instalada de 75 kVA, orientada a eliminar riesgos de sobrecarga y fallas en el suministro. Esta propuesta se fundamenta en antecedentes técnicos que evidencian que la incorporación de tecnologías eficientes puede reducir de manera significativa los costos operativos y el impacto ambiental.

La iniciativa se justifica en la necesidad de transformar el modelo operativo de PRAC hacia un esquema de mayor sostenibilidad y confiabilidad técnica, con beneficios directos en la seguridad de los trabajadores y en la eficiencia financiera, al eliminar penalizaciones por energía reactiva. Para abordar la problemática identificada, se adoptó un enfoque metodológico de ingeniería estructurado en seis fases: diagnóstico técnico, dimensionamiento de potencia, diseño

de iluminación, análisis de eficiencia mediante la corrección del factor de potencia, elaboración de presupuestos y consolidación de la documentación técnica final.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Diseñar una solución para el mejoramiento del sistema eléctrico de un taller industrial de la empresa PRAC, incorporando estrategias de eficiencia energética, automatización y seguridad que garanticen un suministro confiable y sostenible.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Realizar el diagnóstico técnico del taller industrial de la empresa PRAC y recopilar la información necesaria sobre equipos, acometida y normatividad vigente (RETIE 2024 y NTC 2050), para establecer las condiciones de diseño del nuevo sistema eléctrico conforme a las restricciones técnicas, espaciales y presupuestales.

Efectuar los cálculos eléctricos y el dimensionamiento del sistema de potencia, incluyendo el transformador, tableros, protecciones, conductores y sistema de puesta a tierra, garantizando la seguridad, confiabilidad y cumplimiento de las normas técnicas dentro de los límites presupuestarios establecidos por PRAC.

Analizar el desempeño energético del sistema y proponer medidas de eficiencia como la corrección del factor de potencia y la incorporación de variadores de frecuencia, asegurando el ajuste del consumo eléctrico y la reducción de pérdidas dentro de los límites económicos del proyecto.

Desarrollar el presupuesto detallado del proyecto mediante la metodología de Análisis de Precios Unitarios (APU) y la evaluación económica tipo CAPEX, con el fin de determinar la viabilidad financiera del diseño propuesto y adecuar la utilización de los recursos disponibles de PRAC.

Elaborar la documentación técnica completa del diseño, que incluya planos, memorias de cálculo y cumplimiento normativo, garantizando la coherencia entre los documentos y la viabilidad técnica de la solución propuesta.

## **2. Diagnóstico técnico del taller industrial**

### **2.1 Cómo se hizo**

El diagnóstico se desarrolló en dos etapas. Primero se revisó la normativa aplicable (RETIE 2024, NTC 2050) para fijar los criterios técnicos con los que se evaluaría la instalación. Después se realizaron visitas técnicas al taller de PRAC en Paipa, Boyacá, donde se inspeccionó equipo por equipo y se entrevistó al personal operativo y administrativo para entender cómo se usa realmente la instalación, no solo cómo está construida en el papel.

Se evaluaron ocho componentes de la instalación: el predio, la acometida eléctrica, el sistema de medición, el tablero general, el tablero del taller, los tomacorrientes, la iluminación y la maquinaria. Los planos eléctricos y el diagrama unifilar no estaban actualizados —la empresa no pudo suministrarlos—, así que ambos se reconstruyeron desde cero en AutoCAD a partir de lo levantado en campo.

### **2.2 Qué se encontró**

El taller, la bodega, las oficinas y el parqueadero comparten un mismo suministro sin medición independiente por área. Además:

- La acometida es subterránea trifásica en media tensión (13.2 kV) tomada directamente de la red pública, sin transformador propio.
- No hay confirmación de la sección nominal de los conductores frente a la corriente de diseño, por lo que no se puede validar el dimensionamiento ni la caída de tensión.

- El tablero del taller no tiene interruptores diferenciales (RCD) ni DPS, y sus canalizaciones no tienen sellos herméticos frente al polvo metálico del mecanizado.
- Los tomacorrientes del taller son de tipo residencial (no industrial) y están ubicados a baja altura, expuestos a golpes, humedad y daño mecánico.
- Varias máquinas (tronzadora pequeña Milwaukee, tronzadora industrial Jaguar, pulidora Total) no cuentan con punto de conexión específico ni breaker dedicado conforme a norma.

La conclusión del levantamiento (Apéndice D) es que la instalación es funcional en su base sin fallas estructurales críticas, pero no cumple con la normativa vigente en varios puntos concretos y necesita una reestructuración integral. Ese diagnóstico es el que definió qué había que diseñar en los objetivos 2 y 3.

*Evidencia y detalle completo: Apéndice A (registro fotográfico), Apéndice D (levantamiento y diagnóstico).*

### **2.3 Tablero General de Baja Tensión 3 (TGBT3, área administrativa)**

A diferencia de los tableros del Taller (TGBT1) y del Lote (TGBT2), diseñados y dimensionados en su totalidad por el equipo de trabajo a partir del levantamiento de cargas en campo, el TGBT3 del área administrativa fue suministrado directamente por PRAC, como una instalación preexistente y en operación, con sus circuitos ya definidos por la empresa.

Esto quedó documentado en el levantamiento eléctrico (Apéndice D / registro fotográfico, Apéndice A): el directorio de circuitos al interior del tablero muestra más de 20 circuitos ya identificados por la empresa, entre ellos alumbrado de archivo, baños, hall, escaleras y oficinas de primer y segundo piso, tomas eléctricas por piso y área, y un circuito de citófono.

Ese directorio —fotografiado tal como está rotulado en el tablero— es la fuente primaria a partir de la cual el equipo tomó la configuración de cargas del área administrativa.

Por lo tanto, los cálculos eléctricos asociados a TGBT3 —demanda máxima, calibre del alimentador y regulación de tensión— no partieron de un diseño propio, sino de las cargas y circuitos ya existentes, verificados en campo y reportados por PRAC. La responsabilidad de diseño del equipo se limita, en este caso, a verificar que la carga reportada sea compatible con el sistema de potencia y con la normativa vigente (RETIE 2024, NTC 2050), no a definir la configuración interna del tablero.

### **3. Cálculos eléctricos y dimensionamiento del sistema de potencia**

Para el desarrollo de este capítulo se tomaron como referencia los lineamientos establecidos en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), adoptado mediante la Resolución 40117 de 2024 (energía, 2024). En este sentido, se consideraron los requisitos y disposiciones aplicables establecidos en los diferentes libros y anexos que conforman el reglamento, comprendidos desde el Libro A hasta el Libro X, con el propósito de garantizar que los criterios técnicos y de seguridad contemplados en el diseño cumplan con la normativa eléctrica vigente.

#### **3.1 Revisión normativa y definición de criterios de diseño**

Antes de iniciar cualquier cálculo se identificaron las normas y reglamentos aplicables al proyecto: la Norma Técnica Colombiana NTC 2050, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE (Resolución 40117 de 2024), el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP (Resolución 40150 de 2024), las normas del operador de red EBSA y la base de datos LIKINORMAS de CODENSA como referencia técnica,

complementadas con normas internacionales reconocidas (IEEE, IEC, ANSI, NFPA 70, NEC). Este marco normativo fijó los límites técnicos con los que se validó cada cálculo posterior: caída de tensión, factor de potencia, iluminancia, resistencia de puesta a tierra, capacidad de interrupción de protecciones, entre otros. A lo largo del desarrollo del proyecto no se identificó la necesidad de ninguna desviación técnica frente a la NTC 2050. Con este marco definido se procedió al diagnóstico técnico de la instalación existente.

### **3.2 Diagnóstico técnico de campo del taller industrial**

El diagnóstico se desarrolló en dos etapas. Primero se revisó la normativa aplicable para fijar los criterios de evaluación; después se realizaron visitas técnicas al taller de PRAC en Paipa, Boyacá, donde se inspeccionó equipo por equipo y se entrevistó al personal operativo y administrativo para entender el uso real de la instalación. Se evaluaron ocho componentes: el predio, la acometida eléctrica, el sistema de medición, el tablero general, el tablero del taller, los tomacorrientes, la iluminación y la maquinaria. Como los planos eléctricos y el diagrama unifilar no estaban actualizados, ambos se reconstruyeron desde cero en AutoCAD a partir del levantamiento en campo.

Del diagnóstico se obtuvo que la acometida es subterránea trifásica en media tensión (13.2 kV) sin transformador propio, que no había confirmación de la sección nominal de los conductores frente a la corriente de diseño, que el tablero del taller carecía de interruptores diferenciales (RCD) y DPS y de sellos herméticos frente al polvo metálico, que los tomacorrientes eran de tipo residencial y estaban mal ubicados, y que varias máquinas no contaban con punto de conexión ni breaker dedicado. Este diagnóstico (Apéndice A y Apéndice D) definió qué había que diseñar en los literales siguientes.

### **3.3 Análisis de riesgos de origen eléctrico y medidas de mitigación**

Para evaluar el nivel de riesgo eléctrico se aplicó una matriz de valoración siguiendo estos pasos: definir el factor de riesgo, identificar si es potencial o real, determinar las consecuencias sobre personas, aspectos económicos, medio ambiente e imagen institucional, ubicar el punto de cruce en la matriz según el nivel de consecuencia (1 a 5) y la frecuencia (A a E), repetir el proceso para cada clase de riesgo y seleccionar el caso más crítico como categoría final. Las decisiones se adoptaron conforme a la Tabla 9.4 del RETIE. Con este procedimiento se identificaron como riesgos principales el arco eléctrico y el contacto directo e indirecto. A partir de esos resultados se definieron las medidas preventivas incorporadas al diseño: tableros con cierre permanente, señalización del tipo de riesgo, aislamiento y protección de líneas, empalmes y conexiones, prohibición de cables o clavijas defectuosos, y la incorporación de interruptores diferenciales (RCD) y DPS en los tableros. El detalle se encuentra en el Apéndice E.

### **3.4 Análisis de riesgo por rayos y protección contra descargas atmosféricas (SIPRA)**

Conforme al artículo 16 del RETIE, la protección contra rayos debe basarse en la evaluación del nivel de riesgo mediante la metodología de la NTC 4552. Se evaluaron los cuatro componentes de riesgo que establece la norma: pérdida de vidas humanas (R1), pérdida de servicio público (R2), pérdida de patrimonio cultural (R3) y pérdida de valores económicos (R4), a partir de la ubicación del taller, las edificaciones colindantes y la presencia de un edificio administrativo de mayor altura que ya cuenta con sistema de protección contra rayos. En los cuatro componentes el riesgo calculado resultó inferior al riesgo tolerable ( $R < R_T$ ), principalmente porque las edificaciones vecinas actúan como blindaje natural. Con ese resultado se determinó que no es necesario implementar un sistema de protección externa contra rayos

(SIPRA), y el diseño se concentró en la equipotencialidad interna del sistema. El detalle se encuentra en el Apéndice O.

### **3.5 Determinación de cuadros de carga y sectorización del sistema**

A partir del levantamiento de cargas en campo (Apéndice D y Apéndice F), la instalación se dividió en tres sistemas independientes, Taller, Lote (bodegas y parqueadero) y Administrativo, cada uno con su propia demanda máxima calculada según los factores de demanda y simultaneidad de la NTC 2050, aplicando el 125 % a la carga de mayor peso y el 100 % al resto, más un factor de simultaneidad de 0.8. El tablero del área administrativa (TGBT3), a diferencia de los otros dos, es una instalación preexistente suministrada por PRAC, con más de 20 circuitos ya identificados por la empresa; en este caso el equipo no definió la configuración interna del tablero, sino que verificó que la carga reportada fuera compatible con el sistema de potencia y con la normativa vigente. Los resultados obtenidos fueron: Taller, 37 884.0 VA de carga instalada y 32 816.8 VA de demanda máxima; Lote, 29 274.13 VA y 26 637.06 VA; Administrativa, 20 895.0 VA de demanda máxima. Estos valores alimentaron el dimensionamiento del transformador y de los alimentadores en los literales siguientes (AENOR, 2002).

### **3.6 Medidas de eficiencia energética: corrección del factor de potencia y evaluación del variador de frecuencia**

Se estimó inicialmente un factor de potencia de 0.95, considerando que buena parte de la carga corresponde a iluminación LED y equipos de cómputo con fuentes conmutadas. Sin embargo, el estudio de eficiencia energética realizado en el taller determinó un factor de potencia real de 0.85, por debajo del 0.90 exigido por EBSA (GAS, s.f.), debido al peso de las cargas inductivas (motores, compresor, equipo de soldadura). Se fijó una meta de 0.95 y el cálculo

arrojó una necesidad de compensación de 9.27 kVAr, cubierta con un banco automático de 10 kVAr en 4 pasos de 2.5 kVAr, ubicado de forma centralizada en el TGBT. El ahorro estimado es de \$228 192 COP al año; con una inversión de \$1 956 000 COP el periodo de recuperación calculado es de 103 meses, cerca de 8.5 años, justificado además por la reducción de pérdidas por corriente reactiva y la capacidad liberada en conductores y transformador. Para mitigar armónicos, se optó por reforzar el conductor neutro, salvo en las cargas con motores trifásicos por su redundancia.

Respecto al variador de frecuencia (VFD), se evaluó el compresor como candidato natural por su carga variable, pero al consultar con el personal del taller se encontró que su uso es de apenas dos veces al año, un nivel demasiado bajo para justificar la inversión: el ahorro sería mínimo y el periodo de recuperación indefinido. Por esa razón el diseño final no incluye variador de frecuencia, decisión que quedó documentada como parte del análisis técnico-económico y no como un objetivo incumplido. El desarrollo completo de este análisis —cálculo de potencia aparente y activa, factor de potencia actual, dimensionamiento del banco de compensación y evaluación técnico-económica— se encuentra en el Apéndice L.

### **3.7 Análisis de coordinación de aislamiento eléctrico**

Se verificó si correspondía desarrollar un análisis de coordinación de aislamiento eléctrico conforme a las Normas de Diseño de Redes de Distribución de Energía Eléctrica del operador de red (versión 03). Dado que el proyecto se conecta a una red de media tensión ya diseñada y construida por EBSA, se determinó que este análisis no aplica para el presente proyecto.

### **3.8 Análisis de cortocircuito y falla a tierra**

El análisis se realizó con la metodología establecida en la norma IEC 60909, considerando la falla trifásica como la condición más crítica, y se validó con el software LSPS en los nodos principales del sistema definidos en los diagramas unifilares. A partir de este análisis se determinaron los niveles de corriente de falla en los distintos puntos del sistema, incluyendo el punto de conexión del transformador nuevo, lo que permitió verificar la capacidad de interrupción de los breakers del TGBT y confirmar las curvas de coordinación tiempo-corriente. El resultado confirma que, ante una falla, solo opera la protección más cercana al punto afectado, sin dejar sin servicio al resto de la planta. También se consideraron las fallas a tierra, para asegurar la correcta actuación de las protecciones asociadas. Estos resultados se usaron para dimensionar la coordinación de protecciones desarrollada en el literal p. El detalle se encuentra en el Apéndice J.

### **3.9 Análisis del nivel de tensión requerido y del sistema de medición**

El operador de red EBSA suministra en el municipio de Paipa un voltaje en media tensión de 13 200 V, con una relación de transformación de 13 200/220 V en el punto de conexión. A partir de esta información se definió que el sistema de baja tensión requerido es de 208/120 V, compatible con los equipos instalados. Como la conexión es en media tensión y la corriente resultante en baja tensión (208.2 A) supera lo que admite un medidor de conexión directa, el único sistema válido es la medición semidirecta, con transformadores de corriente 300:5 A clase 0.5S. Esta decisión respondió a una obligación técnica y no a una preferencia de diseño.

### **3.10 Cálculo de campos electromagnéticos**

Se verificó la aplicabilidad del análisis de campos electromagnéticos que exige la Tabla 14.1 del RETIE. Dado que no existen redes o subestaciones de alta tensión ni fuentes de campos electromagnéticos de alta frecuencia en las cercanías del proyecto, se determinó que este análisis no era requerido para la instalación de PRAC.

### **3.11 Cálculo y selección del transformador**

Con la demanda máxima de las tres áreas obtenida en el literal e y la aplicación de los factores de diversidad de carga establecidos en las tablas 430.148 y 430.150 de la NTC 2050 para los motores, y en las tablas 220.11 y 220.13 para iluminación y demás cargas, se sumaron las demandas de las tres áreas aplicando de nuevo la regla de demanda decreciente, obteniendo una demanda consolidada de 52 174 VA. A ese valor se le sumó un 25 % de crecimiento, criterio estándar para dejar margen ante ampliaciones futuras, con lo que el resultado, 65 218 VA, se redondeó a la capacidad comercial siguiente. El transformador seleccionado es trifásico, de 75 kVA, tipo convencional en aceite, con conexión DY, tensión primaria de 13 200 V y tensión secundaria de 220/127 V. Esta capacidad deja un margen de reserva cercano al 15 % sobre la demanda actual, adecuado para la expansión que PRAC tiene planeada. Los cálculos se encuentran en el Apéndice G y la ficha técnica del equipo en el Apéndice M.

### **3.12 Diseño del sistema de puesta a tierra**

Al no contar con telurómetro para medir la resistividad real del suelo, se usó el valor de referencia de la IEEE Std 80 para suelo húmedo ( $100 \Omega \cdot m$ ), condición observada en el sitio. Con esa base se diseñó una malla de 5×5 m con dos varillas de acero recubiertas en cobre de 5/8 pulgadas por 2.4 m, conductor de cobre desnudo calibre 2/0 AWG y caja de inspección de 30×30 cm, para una corriente de falla de 10 kA. El cálculo, desarrollado bajo el estándar IEEE Std 80,

arrojó una resistencia de puesta a tierra de  $8.35 \Omega$ , por debajo del límite de  $10 \Omega$  que exige el RETIE. Este resultado es válido para el diseño, pero queda condicionado a medir la resistividad real del suelo con el método de Wenner (IEEE Std 81) y a confirmar el nivel de cortocircuito con el operador de red antes de construir, en lugar de asumir los 10 kA usados en el cálculo. El detalle se encuentra en el Apéndice I.

### 3.13 Cálculo de corrientes de diseño y calibre de conductores

Para el cálculo de conductores se determinó la corriente de circuitos ramales, alimentadores y acometidas según el tipo de sistema: en circuito monofásico  $I_0 = P / (V_L \times FP)$ , y en circuito trifásico  $I_0 = P / (\sqrt{3} \times V_L \times FP)$ , donde  $I_0$  es la corriente del circuito,  $V_L$  la tensión de línea,  $P$  la potencia activa y  $FP$  el factor de potencia. Conforme a la NTC 2050, la capacidad nominal de los circuitos debe cubrir el 100 % de la carga no continua más el 125 % de la carga continua, por lo que la corriente nominal se calculó como  $I_n = I_0 \times 1.25$ . Sobre esa corriente nominal se aplicaron los factores de corrección de la sección 310-15 de la NTC 2050, tanto por temperatura ambiente como por el número de conductores activos por canalización, ya que la capacidad de corriente del conductor disminuye cuando la temperatura aumenta o cuando hay más de tres conductores en un mismo ducto. Con estos factores se estableció el calibre mínimo de cada conductor, verificado por circuito en el literal siguiente. Los resultados se encuentran en el Apéndice C y sus costos en el Apéndice N.

### 3.14 Verificación de conductores por circuito

Cada alimentador se verificó calculando su corriente de demanda máxima, corrigiéndola por temperatura y agrupamiento, y comprobando que la caída de tensión resultante quedara dentro de los límites normativos, con criterios de ampacidad, regulación de tensión y resistencia mecánica conforme a la NTC 2050 y las especificaciones de EBSA. El resultado por tramo fue:

alimentador de TGBT a TGBT1 (Taller), calibre 1/0 AWG, regulación de 2.51 %, protección de 3×150 A; de TGBT a TGBT2 (Lote), calibre 2 AWG, regulación de 2.09 %, protección de 3×80 A; de TGBT a TGBT3 (Administrativo), calibre 2 AWG, regulación de 1.97 %, protección de 3×60 A; y de la subestación al TGBT, calibre 4/0 AWG, regulación de 2.51 %, protección de 3×250 A, este último en cable antifraude tipo trébol con aislamiento THHN/THWN y chaqueta resistente a la intemperie. Todos los valores de regulación quedaron por debajo del 3 % y las pérdidas por debajo del 0.01 % en cada tramo, dentro de los márgenes que exige la NTC 2050 (Apéndice H).

### **3.15 Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos**

Para el diseño mecánico de las estructuras y elementos de sujeción se adoptaron los lineamientos de la guía técnica del operador de red para el cálculo mecánico de estructuras de distribución, evaluando dos condiciones de carga: normales, que incluyen cargas verticales por peso propio, transversales por acción del viento y longitudinales por desbalance de tensiones entre vanos, y anormales, asociadas a rotura de conductores o desequilibrios de carga.

Se seleccionaron postes de concreto por su resistencia mecánica y durabilidad, con cargas de rotura normalizadas (510, 750, 1050 y 1350 kg) y un factor de seguridad estructural típico de 2.5. El procedimiento de verificación incluyó el cálculo de la profundidad de cimentación ( $t = 0.1 \times H_p + 0.6$ ), el área aproximada del poste, la presión y la carga del viento sobre el poste y los conductores, la fuerza por cambio de dirección, las alturas de amarre y libre del poste, y los momentos actuantes por viento sobre el apoyo, sobre los conductores y por tensión en los conductores, frente al momento resistente del poste. La condición de verificación exige que el momento resistente sea mayor o igual a la suma de los momentos actuantes; con ella se confirmó

que los postes seleccionados son estructuralmente adecuados para las condiciones de carga evaluadas.

### **3.16 Cálculo y coordinación de protecciones**

La coordinación de protecciones se diseñó bajo criterios de selectividad, con base en los resultados del análisis de cortocircuito del literal h, definiendo tres niveles. El nivel 1, protección de cabecera en el tablero de medida externa, corresponde a un interruptor automático trifásico de 3×250 A para proteger la acometida contra sobrecargas y cortocircuitos. El nivel 2, distribución del taller, se ubica en un tablero de 24 circuitos con un interruptor de 3×150 A, incluyendo protección de sobrecarga para los motores conforme a la sección 430-32(a)(1) de la NTC 2050. El nivel 3, distribución de bodegas, se ubica en un tablero de 12 circuitos con un interruptor de 3×80 A. Con estos tres niveles se garantiza que, ante una falla, solo opera la protección más cercana al punto afectado. El detalle se encuentra en el Apéndice J.

### **3.17 Selección de canalizaciones**

En el taller se especificó tubería metálica EMT por el riesgo de impacto mecánico de la maquinaria pesada, con tramos flexibles en las conexiones a motores para absorber vibración; en las bodegas se empleó igualmente tubería EMT, y en zonas exteriores y acometidas subterráneas se usó PVC SCH 80. Conforme a la tabla 1 del capítulo 9 de la NTC 2050, el porcentaje de ocupación de un ducto se calcula como la relación entre el área del conductor y el área del ducto ( $\% \text{ Ocupación} = A_{\text{conductor}} / A_{\text{ducto}} \times 100$ ); dado que se tienen más de dos conductores por ducto, el límite de llenado aplicado fue del 40 %. Con ese criterio se proyectaron las canalizaciones en baja tensión, verificando que la ocupación de cada ducto se mantuviera dentro del límite normativo. El resultado se encuentra en el Apéndice P.

### 3.18 Cálculo de pérdidas de energía

Conforme a los parámetros que exige el RETIE, se aplicó la fórmula  $\%P_p = (I_{125\%}^2 \times R_{cond} \times L) / (D_{max} \times F_p)$ , donde  $I_{125\%}$  es la corriente de línea al 125 %,  $R_{cond}$  la resistencia del conductor,  $L$  la distancia del tramo,  $D_{max}$  la potencia aparente y  $F_p$  el factor de potencia. Con esta metodología se calcularon las pérdidas de potencia en cada tramo de la instalación, obteniendo valores inferiores al 0.01 %, dentro de los márgenes normativos. El detalle se encuentra en el Apéndice H.

### 3.19 Cálculo de regulación de tensión

El cálculo de regulación se realizó con las fórmulas para sistemas monofásicos y trifásicos tomadas de catálogos de fabricantes de cables como CENTELSA y PROCABLES, a partir del momento eléctrico, calculado con la potencia aparente, la tensión de línea, la impedancia efectiva del conductor, la longitud del tramo y el número de conductores por fase. Las secciones 210-19(a) nota 4 y 215-2(b) nota 2 de la NTC 2050 establecen que la caída de tensión desde la salida más alejada de un circuito ramal no debe superar el 3 %, y que la caída combinada de los circuitos alimentador y ramal no debe exceder el 5 %; cuando un conductor supera estos valores, se incrementa su calibre hasta cumplir el criterio. Con este procedimiento se obtuvieron regulaciones entre 1.97 % y 2.51 % en los tramos evaluados en el literal n, por debajo de los límites normativos. El detalle se encuentra en el Apéndice H.

### 3.20 Clasificación de áreas

Se evaluaron las instalaciones del taller, incluyendo bodegas, parqueaderos y área de almacenamiento de residuos. En el taller y las bodegas, el almacenamiento y mantenimiento se limita a elementos pasivos de media y alta tensión que no desprenden sustancias inflamables; los parqueaderos cuentan con ventilación adecuada y no tienen fosas de servicio técnico; y el área de

residuos se destina exclusivamente a residuos sólidos no peligrosos e inertes, sin combustibles, pinturas ni solventes. Bajo los lineamientos del capítulo 5 de la NTC 2050 y el RETIE, se concluyó que el 100 % de las instalaciones se clasifica como área ordinaria, no clasificada, sin requerimientos adicionales de diseño antiexplosivo.

### **3.21 Elaboración de diagramas unifilares, planos y especificaciones de construcción**

Con los resultados de los literales anteriores se elaboraron los diagramas unifilares (Apéndice C) y los planos y esquemas eléctricos de construcción (Apéndice B y Apéndice D), bajo los lineamientos del RETIE y las especificaciones de la NTC 2050, incluyendo los cuadros de carga y la distribución en planta. A partir de estos documentos se definieron las especificaciones de construcción, exigiendo que la ejecución de la obra siga los detalles constructivos y las notas de ingeniería consignados en los planos, para garantizar el correcto dimensionamiento de canalizaciones, cajas y soportes y prevenir arcos eléctricos durante el montaje. Con esta documentación técnica se cuenta con la trazabilidad normativa necesaria para el proceso de inspección y el dictamen de conformidad requerido para la legalización del proyecto.

### **3.22 Verificación de distancias de seguridad**

Se verificaron dos tipos de distancias de seguridad: las distancias mínimas en zonas con construcciones, entre la línea de media tensión a 13 200 V y la edificación proyectada, conforme al artículo 13 del RETIE; y las distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas. Con este análisis se estableció que los tableros eléctricos deben contar con puerta y llave para restringir el acceso al personal autorizado, y que quienes intervengan partes energizadas deben utilizar equipo de protección personal adecuado al nivel de tensión y a la energía incidente, conforme a la categoría y el nivel mínimo de protección que establece la Tabla 13.6 del RETIE.

### **3.23 Diseño de iluminación**

El diseño lumínico se simuló completamente en DIALux evo para las zonas críticas del predio: taller, bodegas, área administrativa y exteriores. Se optó por un único modelo de luminaria, LED Sylvania Jeta de 40 W (referencia P27916), para todo el predio, decisión pensada en el mantenimiento futuro, de manera que PRAC no necesite mantener inventario de varios tipos de luminaria. Verificado frente al RETILAP (Resolución 40150 de 2024), el resultado obtenido fue de 395 lux en el taller industrial, con uniformidad de 0.69, frente a un requisito de 300 a 500 lux; entre 244 y 283 lux en la bodega de herramientas, con uniformidad de 0.48, frente a un requisito de 200 lux; 298 lux en la bodega vehicular, con uniformidad de 0.40, frente al mismo requisito de 200 lux; y 162 lux en pasillos y circulación, frente a un requisito de 100 lux. Todas las zonas superaron el mínimo normativo, y se incorporó iluminación de emergencia con 90 minutos de autonomía en las rutas de evacuación, un elemento que el diagnóstico inicial había señalado como ausente. El detalle se encuentra en el Apéndice K.

### **3.24 Elaboración del presupuesto del proyecto**

El presupuesto se elaboró a partir del diseño eléctrico desarrollado en los literales anteriores, cuantificando los materiales, equipos y actividades requeridas para la implementación de la propuesta de mejoramiento del sistema eléctrico. Se incluyeron las cantidades de obra y los precios unitarios de mercado, agrupados en seis capítulos: preliminares, mampostería y remates, instalaciones eléctricas, iluminación, subestación y equipos especiales. El costo directo obtenido fue de \$182 181 170.16 COP, mientras que el costo total de la obra, incluyendo un 3 % de imprevistos, un 19.74 % de administración, un 5 % de utilidad y el IVA, ascendió a \$234 448 947.88 COP. El capítulo de mayor participación económica fue el de instalaciones eléctricas, con \$128 857 473.70, seguido de la subestación eléctrica, con \$18.42 millones, que dota a la empresa

del transformador propio y de la infraestructura necesaria para atender la demanda identificada en el diagnóstico. El detalle se encuentra en el Apéndice N.

4. Desempeño energético y medidas de eficiencia

4.1 Diseño de iluminación

El diseño lumínico se simuló completamente en DIALux evo para las zonas críticas: taller, bodegas, área administrativa y exteriores. Se optó por un único modelo de luminaria (LED SYLVANIA JETA 40W, referencia P27916) para todo el predio, decisión pensada en el mantenimiento futuro más que en el diseño en sí: con una sola referencia, PRAC no necesita mantener inventario de varios tipos de luminaria ni arriesgarse a instalar la incorrecta al reponer una dañada.

Tabla 1

Resultados Dialux

| Área                   | Iluminancia obtenida | Uniformidad | Requisito RETILAP |
|------------------------|----------------------|-------------|-------------------|
| Taller industrial      | 395 lux              | 0.69        | 300–500 lux       |
| Bodega de herramientas | 244–283 lux          | 0.48        | 200 lux           |
| Bodega vehicular       | 298 lux              | 0.40        | 200 lux           |
| Pasillos / circulación | 162 lux              | —           | 100 lux           |

Todas las zonas superan el mínimo normativo del RETILAP (RETILAP, 2024), y se incorporó iluminación de emergencia con 90 minutos de autonomía en las rutas de evacuación algo que el diagnóstico inicial había señalado como ausente por completo.

## **4.2 Corrección del factor de potencia**

Como parte de las estrategias de eficiencia energética propuestas para el taller industrial de PRAC, se realizó un análisis del factor de potencia de la instalación, con el propósito de identificar la necesidad de compensar la potencia reactiva y establecer una alternativa técnicamente adecuada para mejorar el comportamiento energético del sistema.

### **4.2.1 Identificación de las cargas de la instalación**

Inicialmente, se realizó el levantamiento de las cargas eléctricas existentes en el taller, identificando los equipos que intervienen en el consumo de energía. Entre las principales cargas se encontraron motores eléctricos, compresores, equipos de soldadura y herramientas electromecánicas, las cuales presentan un comportamiento predominantemente inductivo y, por tanto, demandan potencia reactiva.

A partir de la información obtenida durante el levantamiento, se determinó la potencia aparente asociada a cada uno de los equipos. La suma de estas cargas permitió establecer una potencia aparente total instalada de 37,9 kVA, considerando las condiciones nominales de operación de los equipos.

### **4.2.2 Determinación de la potencia activa**

Una vez obtenida la potencia aparente total, se procedió a estimar la potencia activa de la instalación. Para efectos del análisis se adoptó un factor de potencia inicial de 0,85, correspondiente al comportamiento esperado de una instalación industrial con presencia de cargas inductivas.

La potencia activa se calculó mediante la expresión:

$$P = S \times F_p \quad (1)$$

Donde:

- **P:** potencia activa, en kW.
- **S:** potencia aparente, en kVA.
- **Fp:** factor de potencia.

Al sustituir los valores obtenidos se obtuvo una potencia activa de aproximadamente **32,215 kW**. Posteriormente, mediante la relación entre la potencia activa y la potencia aparente, se verificó el factor de potencia inicial:

$$Fp = P/S = 32,215/37,9 = 0,85 \quad (2)$$

De esta manera, se estableció que la instalación presenta un factor de potencia aproximado de **0,85**, evidenciando la presencia de una componente reactiva significativa.

#### ***4.2.3 Determinación de la potencia reactiva existente***

Con el factor de potencia inicial establecido, se determinó la potencia reactiva (EBSA, 2024) presente en la instalación mediante la relación entre las potencias aparente y activa:

$$Q = \sqrt{(S^2 - P^2)} \quad (3)$$

Al sustituir los valores calculados se obtuvo una potencia reactiva aproximada de **19,97 kVAr**.

Este resultado permitió cuantificar la potencia reactiva asociada principalmente a las cargas inductivas del taller. La circulación de esta componente de potencia representa una demanda adicional para la instalación eléctrica y puede incrementar las pérdidas en conductores y equipos.

#### ***4.2.4 Establecimiento del factor de potencia objetivo***

Una vez determinado el estado actual de la instalación, se estableció el factor de potencia que se pretendía alcanzar mediante la estrategia de compensación.

Para el proyecto se seleccionó un factor de potencia objetivo de **0,95**, buscando mejorar el desempeño energético de la instalación y mantener un margen adecuado respecto al límite establecido para evitar penalizaciones asociadas al consumo de energía reactiva.

El valor objetivo de 0,95 se utilizó posteriormente como parámetro para determinar la cantidad de potencia reactiva que debía permanecer en el sistema después de realizar la compensación.

#### ***4.2.5 Cálculo de la potencia reactiva deseada***

Con la potencia activa previamente determinada y el factor de potencia objetivo de 0,95, se calculó la potencia reactiva que debería permanecer en la instalación después de realizar la compensación.

Para ello se empleó la expresión:

$$Q_2 = P \times \tan(\cos^{-1}(Fp \text{ objetivo})) \quad (4)$$

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$Q_2 = 32,215 \times \tan(\cos^{-1}(0,95)) = 10,6 \text{ kVAr} \quad (5)$$

Por lo tanto, para operar con un factor de potencia de 0,95, la instalación debería presentar aproximadamente **10,6 kVAr de potencia reactiva**.

#### ***4.2.6 Determinación de la potencia reactiva a compensar***

Posteriormente, se determinó la diferencia entre la potencia reactiva existente y la potencia reactiva deseada (EBSA, 2024). Esta diferencia corresponde a la cantidad de potencia reactiva que debe ser compensada mediante un sistema de capacitores.

La potencia reactiva a compensar se calculó mediante:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (6)$$

Donde:

- **Q<sub>c</sub>**: potencia reactiva que debe compensarse.
- **Q<sub>1</sub>**: potencia reactiva actual.
- **Q<sub>2</sub>**: potencia reactiva deseada.

Por lo tanto:

$$Q_c = 19,97 - 10,6 = 9,37 \text{ kVAr} \quad (7)$$

El resultado indicó que la instalación requiere una compensación aproximada de **9,37 kVAr** para alcanzar el factor de potencia objetivo de 0,95.

#### ***4.2.7 Selección del banco de capacitores***

Conociendo el valor de potencia reactiva requerido, se procedió a seleccionar la capacidad del banco de compensación. Debido a que los bancos de capacitores comerciales se encuentran disponibles en capacidades normalizadas, se seleccionó el valor comercial inmediatamente superior al calculado.

Por esta razón, para una necesidad de compensación de **9,37 kVAr**, se seleccionó un banco automático de **10 kVAr**.

El banco seleccionado corresponde a un sistema trifásico con control automático del factor de potencia y configuración de cuatro pasos de 2,5 kVAr cada uno. Esta configuración permite que la compensación se adapte a las variaciones de carga de la instalación, conectando o desconectando etapas de acuerdo con la demanda de potencia reactiva.

#### ***4.2.8 Selección de la ubicación***

Finalmente, se definió una compensación de tipo centralizada, mediante la instalación del banco de capacitores en el **Tablero General de Baja Tensión (TGBT)**.

La selección de esta ubicación permite realizar la compensación de manera global sobre las cargas inductivas conectadas a la instalación. Además, facilita las actividades de supervisión y mantenimiento y reduce la circulación de potencia reactiva desde el punto de suministro hacia los diferentes circuitos de la instalación.

Por lo tanto, la solución propuesta consiste en la implementación de un **banco automático de capacitores de 10 kVAr**, instalado en el TGBT, con el objetivo de elevar el factor de potencia de aproximadamente 0,85 hasta un valor cercano a 0,95 y mejorar el desempeño energético de la instalación.

## 5. Presupuesto del proyecto

### 5.1 Cómo se construyó

El presupuesto del proyecto se elaboró a partir del diseño eléctrico desarrollado en el objetivo específico 2, cuantificando cada uno de los materiales, equipos y actividades requeridas para la implementación de la propuesta de mejoramiento del sistema eléctrico. Se incluyeron las cantidades de obra y los precios unitarios de mercado para los diferentes componentes del proyecto, agrupados en seis capítulos: preliminares, mampostería y remates, instalaciones eléctricas, iluminación, subestación y equipos especiales. El costo directo obtenido fue de \$182.181.170,16, mientras que el costo total de la obra, incluyendo administración, imprevistos, utilidad e IVA, asciende a \$234.448.947,88.

### 5.2 Resultado

**Tabla 2**

Presupuesto

| Concepto | Valor (COP) |
|----------|-------------|
|----------|-------------|

|                                           |                   |
|-------------------------------------------|-------------------|
| Costo directo (materiales y mano de obra) | \$ 182 181 170,16 |
| Imprevistos (3%)                          | \$ 5 465 435,10   |
| Administración (19.74%)                   | \$ 35 962 562,99  |
| Utilidad (5%)                             | \$ 9 109 058,51   |
| IVA (19%)                                 | \$ 1 730 721,12   |
| Total del proyecto                        | \$ 234 448 947,88 |

El capítulo con mayor participación económica corresponde a las instalaciones eléctricas, con un valor de \$128.857.473,70, debido a que concentra la mayor parte de las canalizaciones, bandejas portacables, cableado, tableros eléctricos, protecciones, tomacorrientes, salidas de iluminación y certificaciones requeridas para garantizar el correcto funcionamiento de la instalación. Dentro de este capítulo destacan la bandeja portacable tipo ducto cerrado 300 × 100 mm, con un costo aproximado de \$21,03 millones, y la tubería EMT de ¾", con un valor cercano a \$17,24 millones, elementos indispensables para proporcionar una canalización segura y adecuada en el taller. Asimismo, la subestación eléctrica, con un costo de \$18,42 millones, representa una de las inversiones más importantes del proyecto, ya que permite dotar a la empresa de un transformador propio y de la infraestructura necesaria para atender la demanda eléctrica identificada durante el diagnóstico realizado en el objetivo específico 1.

*Evidencia y desglose completo por ítem: Apéndice N (presupuesto de obra eléctrica).*

## **6. Documentación técnica del proyecto**

Este objetivo no es un capítulo aparte sino el resultado acumulado de los cuatro anteriores: cada cálculo, cada decisión de diseño y cada justificación normativa mencionada en

las secciones 1 a 4 quedó documentada en un apéndice independiente, trazable y verificable. En conjunto, la documentación producida es:

Apéndice A — Registro fotográfico del levantamiento.

Apéndice B — Planos eléctricos actualizados (iluminación y tomacorrientes).

Apéndice C — Diagrama unifilar proyectado y justificación del sistema de medición.

Apéndice D — Levantamiento y diagnóstico completo de la infraestructura existente.

Apéndice E — Matriz de riesgo eléctrico.

Apéndice F — Cuadro de cargas (TGBT 1 (Taller), TGBT 2 (Lote) y TGBT).

Apéndice G — Memoria de dimensionamiento del transformador.

Apéndice H — Memoria de regulación de tensión y pérdidas.

Apéndice I — Diseño y cálculos del sistema de puesta a tierra.

Apéndice J — Informes de cortocircuito y coordinación de protecciones (LSPS).

Apéndice K — Memoria de cálculo lumínico (DIALux evo).

Apéndice L — Memoria de cálculo de factor de potencia y eficiencia energética.

Apéndice M — Fichas técnicas de equipos (transformador, banco de capacitores, cables).

Apéndice N — Presupuesto de obra eléctrica.

Apéndice O — Evaluación de riesgo contra rayos (SIPRA).

Apéndice P — Memoria de cálculo de canalizaciones.

Apéndice Q — Memoria general de cálculos eléctricos.

Esta trazabilidad es lo que le permite a PRAC llevar el proyecto a ejecución sin tener que reconstruir ningún cálculo: cada número que aparece en el cuerpo del documento tiene detrás una memoria de cálculo verificable en su apéndice correspondiente.

## 7. Conclusiones

El levantamiento en campo permitió constatar que el taller de PRAC operaba sin sistemas de medición independiente por área, sin un esquema de puesta a tierra verificable mediante mediciones de resistencia, y con tableros de distribución que carecían de protecciones diferenciales y de dispositivos de protección contra sobretensiones, en incumplimiento de los requisitos establecidos por el RETIE. Este diagnóstico no correspondió a una etapa administrativa preliminar, sino que constituyó el insumo técnico determinante para definir el alcance del rediseño y su justificación normativa. De no haberse realizado las visitas técnicas y las entrevistas con el personal operativo, decisiones de diseño posteriores —como la segregación en tres sistemas independientes de medición o la implementación de corrección del factor de potencia— se habrían fundamentado en supuestos, en lugar de sustentarse en el estado real y verificado de la instalación eléctrica.

A partir de una demanda consolidada de 52.17 kVA y un margen de crecimiento del 25%, se definió un transformador de 75 kVA a 13.2 kV/220 V, con tres alimentadores independientes cuya regulación de tensión se mantuvo en todos los casos por debajo del 3% exigido por la NTC 2050. El sistema de puesta a tierra diseñado —malla de 5×5 m con dos varillas de cobre— arrojó una resistencia calculada de 8.35  $\Omega$ , dentro del límite de 10  $\Omega$  del RETIE, aunque ese resultado sigue condicionado a una medición real de resistividad en campo, algo que el propio estudio recomienda hacer antes de construir. El estudio de cortocircuito con LSPS confirmó que las protecciones seleccionadas actúan de forma selectiva pues ante una falla, solo se desconecta el tramo afectado, sin comprometer el resto de la planta.

El diseño lumínico en DIALux superó los mínimos del RETILAP en todas las zonas evaluadas —395 lux en el taller frente a los 300 exigidos, por ejemplo— usando un único

modelo de luminaria para simplificar el mantenimiento futuro. En cuanto al factor de potencia, el banco de capacitores de 10 kVAr lleva el sistema de 0.85 a 0.95, con un retorno de inversión de 78.9 meses. No es rápido, y conviene decirlo así de directo, el ahorro en la factura no es lo que justifica la inversión, sino la reducción de pérdidas y la capacidad que libera en conductores y transformador. Sobre el variador de frecuencia, el análisis fue igual de honesto en la dirección contraria: el compresor se usa apenas dos veces al año, así que se determinó que no era una inversión viable y se dejó fuera del diseño final, con esa decisión debidamente sustentada y no simplemente omitida.

El presupuesto, elaborado mediante el análisis de precios unitarios de cada actividad y material requerido para la implementación del diseño, arrojó un costo directo de \$182.181.170,16 COP y un costo total de obra de \$234.448.947,88 COP, incluyendo administración, imprevistos, utilidad e IVA. El capítulo de instalaciones eléctricas, con un valor de \$128.857.473,70 COP, concentra la mayor parte de la inversión debido a la cantidad de canalizaciones, cableado, tableros, protecciones y certificaciones necesarias para la modernización del sistema. Entre los rubros de mayor impacto económico se encuentran la bandeja portacable tipo ducto cerrado (\$21.025.300 COP), la subestación eléctrica (\$18.418.650 COP) y la tubería EMT de ¾" (\$17.238.750 COP), inversiones que responden directamente a las necesidades identificadas durante el diagnóstico inicial, especialmente la incorporación de un sistema de transformación propio y la implementación de canalizaciones con protección mecánica adecuada. Estos resultados evidencian que la mayor parte de los recursos se orienta a solucionar las deficiencias técnicas detectadas, garantizando una intervención enfocada en mejorar la seguridad, confiabilidad y capacidad del sistema eléctrico.

El resultado acumulado de los cuatro objetivos anteriores es un conjunto de diecisiete apéndices —planos, diagramas unifilares, memorias de cálculo y fichas técnicas— que dejan a PRAC con algo que no tenía al inicio del proyecto, la trazabilidad completa de su propia infraestructura eléctrica, con cada cifra del diseño respaldada por su memoria de cálculo correspondiente.

### Referencias Bibliográficas

AENOR. (2002). *Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna*. Madrid:

IEC.

EBSA. (2024). *CONOCE TODO SOBRE LA ENERGIA REACTIVA*. TUNJA.

GAS, C. D. (s.f.). *Gestor Normativo*. Obtenido de

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0016\\_2018.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0016_2018.htm)

RETIE. (2024). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE*. Bogotá.

RETILAP. (2024). *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado*. Bogotá.