



**ESTUDIO DE CALIDAD DE LA ENERGÍA PARA LA COMPENSACIÓN Y
CORRECCIÓN DE ENERGÍA REACTIVA EN ESTACIONES DE SERVICIO DE GAS
NATURAL VEHICULAR (GNV) DE ACUERDO CON LA RESOLUCIÓN CREG 015
2018**

Práctica empresarial en la modalidad de semestre de Industria

Jorge Luis González Morelo

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesores

Nelson de Jesús Londoño Ospina, Doctor (PhD) en Ingeniería Electrónica
Universidad de Antioquia

Diana Patricia Valencia Aguirre, Especialista en Gerencia de Mantenimiento
ILUX INGENIERÍA S.A.S

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	González Morelo [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] J. González Morelo, “Estudio de calidad de la energía para la compensación y corrección de energía reactiva en estaciones de servicio de gas natural vehicular (GNV) de acuerdo con la resolución CREG 015 2018”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Noé Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

El resultado de este proyecto que me permite culminar mi pregrado académico se lo dedico a mi amada familia, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido los pilares que sostuvieron cada paso en este camino académica y a todas las personas que de alguna u otra manera contribuyeron a este proyecto con su tiempo, consejos y palabras alentadoras.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a la Universidad de Antioquia por proporcionar un entorno maravilloso para el aprendizaje adquirido durante mi formación académica. A cada uno de los profesores que, sin duda, me compartieron sus conocimientos de la mejor manera durante esta etapa. También, agradezco a la empresa ILUX INGENIERÍA S.A.S por haberme permitido ser parte de lo que yo considero una familia, y por darme la oportunidad de hacerme partícipe de este maravilloso proyecto. Finalmente, me queda agradecerle a mi familia por ser el motor que impulsó cada paso de esta travesía académica.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. OBJETIVOS	12
A. Objetivo general	12
B. Objetivos específicos	12
II. MARCO TEÓRICO	13
a. Energía Activa.....	13
b. Energía Reactiva:	13
c. Cobro de penalización de Energía Reactiva Capacitiva.....	14
d. Comportamiento de la variable M.....	14
e. Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).....	15
f. Calidad de la Energía:	15
g. Fórmula de cobro de penalización Energía Reactiva	15
h. Variable de incremento	16
i. Algunas desventajas de los bancos de capacitores:.....	16
j. Algunas ventajas del filtro activo:.....	16
k. Armónicos	16
IV. METODOLOGÍA	17
V. RESULTADOS	18
Celda de medida:	20
Transformadores de instrumentación y medidor electrónico:.....	21
Celda del seccionador:	22
Estudio de Calidad de La Energía SE EDS Tasajera 1	24

frecuencia [Hz]:.....	28
Tensiones Fase – Neutro (V rms), Tensión Fase – Fase (U RMS) [V]:	29
Corrientes [A] – Desbalance de corrientes:.....	30
Factor de potencia:	31
Potencia y Energía:.....	33
Distorsión Armónica Total de Tensión THD – V [%]:.....	36
Análisis de carga:	37
Carga por fase:	37
Estudio de calidad de la energía en EDS BELÉN.....	38
frecuencia [Hz]:.....	40
Tensiones Fase – Neutro (V rms), Tensión Fase – Fase (U RMS) [V]:	41
Corrientes [A] – Desbalance de corrientes:.....	41
Desbalance de tensión (%):.....	42
Factor de Potencia	42
Potencia y Energía:.....	43
Montaje de filtro activo en EDS Belén:	44
VII. CONCLUSIONES	47
III. REFERENCIAS	48

LISTA DE TABLAS

TABLA I GARGABILIDAD ELÉCTRICA DE LA EDS	26
TABLA II POTENCIA DISPONIBLE EN KVA.....	26
TABLA III FRECUENCIA DEL SISTEMA.....	28
TABLA IV TENSIONES DE FASE	29
TABLA V TENSIONES DE LÍNEA.....	29
TABLA VI CORRIENTES.....	30
TABLA VII FACTOR DE POTENCIA SIN B.C	32
TABLA VIII FACTOR DE POTENCIA CON B.C.....	33
TABLA IX	34
TABLA X.....	36
TABLA XI	36
TABLA XII.....	38
TABLA XIII FRECUENCIA DEL SISTEMA.....	40
TABLA XIV TENSIONES DE FASE.....	41
TABLA XV TENSIONES DE FASE.....	41
TABLA XVI	41
TABLA XVII DESBALANCE DE TENSIÓN.	42
TABLA XVIII.....	42
TABLA XIX POTENCIA Y ENERGÍA DEL SISTEMA	43
TABLA XX POTENCIA Y ENERGÍA DEL SISTEMA.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. EDS Tasajera.	19
Figura 2. Subestación eléctrica Tasajera 1.	20
Figura 3. Celda de medida en media tensión.	21
Figura 4. Celda del seccionador.	22
Figura 5. Seccionador SOCOL.....	23
Figura 6. Referencia del fusible por fase.....	24
Figura 7. Protección general de la subestación 3x400A.	25
Figura 8. Montaje en sitio del analizador de redes.....	27
Figura 9. Frecuencia del sistema.	28
Figura 10. Tensión de fase.	29
Figura 11. Tensiones línea – línea.....	30
Figura 12. Corriente por fase del sistema.....	31
Figura 13. Factor de potencia sin B.C.....	32
Figura 14. Factor de potencia con B.C.....	33
Figura 15. Potencia activa del sistema.	34
Figura 16. Potencia reactiva del sistema	35
Figura 17. Potencia aparente del sistema	35
Figura 18. Curva de carga del Transformador 300kVA.....	37
Figura 19. Montaje en sitio del analizador de redes.....	39
Figura 20. Protección general trifásica de 3x600A.	40
Figura 21. Instalación exitosa de filtro activo en EDS Belén.	44
Figura 22. Consumo de energía mes de octubre.	45
Figura 23. Consumo de energía mes de noviembre.	45

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Cms.	Centímetros
Esp.	Especialista
Párr.	Párrafo
PhD	Philosophiae Doctor
UdeA	Universidad de Antioquia
RETIE	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas
kVA	Kilo voltamperios
F. P	Factor de Potencia
ML	Main Load
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
EDS	Estación de Servicio
GNV	Gas Natural Vehicular
EPM	Empresas Públicas de Medellín
NTC	Norma Técnica Colombiana
kVAr	Kilo voltamperios reactivos
B.C	Banco de capacitores
SE	Subestación Eléctrica
OR	Operador de Red

RESUMEN

En este informe se expone la experiencia del periodo de prácticas realizadas en la empresa ILUX Ingeniería S.A.S. Se participó en diversas actividades relacionadas con el mantenimiento eléctrico de subestaciones eléctricas de media y baja tensión, así como en proyectos de ingeniería eléctrica. La empresa también ofrece servicios especializados, incluyendo intervenciones de emergencia.

En el desarrollo de las prácticas se abarcó diferentes fases de servicios y proyectos, desde la inspección inicial hasta el análisis detallado y la implementación de soluciones. Uno de los proyectos en los que más importantes fue la ejecución de estudios de calidad de la energía en subestaciones de estaciones de servicio de la empresa EPM.

Es imperativo destacar la importancia de los estudios de calidad de la energía en el contexto de subestaciones eléctricas, especialmente en entornos críticos como las estaciones de servicio.

Durante el desarrollo del proyecto, se siguieron las pautas establecidas por normativas específicas, asegurándose de cumplir con las resoluciones pertinentes y códigos eléctricos aplicables. La atención se centró en aspectos como la continuidad de la onda de tensión, Factor de Potencia, consumo de energía reactiva y la inyección de armónicos a la red eléctrica, entre otros parámetros relevantes para garantizar la calidad del servicio eléctrico en subestaciones.

En ese sentido, se establecen soluciones tales como la instalación de filtros activos para dar soluciones como por ejemplo la compensación de energía reactiva, desbalances en la carga, filtración de contenido de armónicos, entre otras. Lo que se traduce en no penalización por consumo excesivo de energía reactiva, así como también el garantizar la vida útil de los activos de la instalación eléctrica, entre otras razones no menos importantes. Este enfoque no solo asegura el cumplimiento normativo y económico, sino que también contribuye a la sostenibilidad y eficiencia energética, aspectos cruciales en el panorama actual de transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

***Palabras clave* — Calidad de la energía, Energía Reactiva, Factor de Potencia, Filtro Activo, Eficiencia Energética.**

ABSTRACT

This report presents the experience gained during the internship period at ILUX Ingeniería S.A.S. I was involved in various activities related to the electrical maintenance of medium and low voltage substations, as well as in electrical engineering projects. The company also provides specialized services, including emergency interventions.

My participation covered different phases of services and projects, from the initial inspection to the detailed analysis and implementation of solutions. One of the projects I focused on involved conducting a power quality study in the substations of service stations for the company EPM.

It is crucial to highlight the importance of power quality studies in the context of electrical substations, especially in critical environments such as service stations. Throughout the project development, guidelines established by specific regulations were followed, ensuring compliance with relevant resolutions and applicable electrical codes. The focus was on aspects such as voltage waveform continuity, power factor, reactive power consumption, and injection of harmonics into the electrical grid, among other relevant parameters to ensure the quality of electrical service in substations.

In this regard, solutions were proposed, including the installation of active filters to address issues such as reactive power compensation, load imbalances, harmonic content filtration, among others. This translates into no penalty for excessive reactive power consumption and ensures the lifespan of assets in the electrical installation, among other equally important reasons. This approach not only ensures regulatory and economic compliance but also contributes to sustainability and energy efficiency, crucial aspects in the current transition towards cleaner and more sustainable energy sources.

Keywords — **Power Quality, Reactive Power, Power Factor, Active Filter, Energy Efficiency.**

I. INTRODUCCIÓN

La penalización por consumo excesivo de energía reactiva es un desafío significativo en el sector energético de Colombia, con un impacto tanto en los costos de energía para las empresas como en la eficiencia del sistema eléctrico nacional. La energía reactiva es un componente de la electricidad que no realiza trabajo útil, pero que requiere inversión en equipos y generación de energía. Cuando en el sistema eléctrico de las empresas se presenta un bajo factor de potencia, es decir, cuando se consume más energía reactiva de la necesaria en relación con la energía activa (que realiza trabajo real), se enfrentan a penalizaciones que aumentan sus costos en el consumo de energía eléctrica, baja eficiencia de los equipos, además de otros factores negativos. En este contexto, es fundamental comprender los antecedentes de este problema que permitieron el desarrollo de este proyecto y por ende explorar posibles soluciones para mitigarlo.

Actualmente en la ciudad de Medellín y el Valle de Aburrá se viene implementado lo que sería el uso de transporte ya sea público o particular a partir de gas natural vehicular. Empresas Públicas de Medellín (EPM) ha sido pionera en esto y por lo tanto hoy en día cuenta con diferentes ‘Eco Estaciones de Servicio EPM’ donde se recargan vehículos que trabajen con gas natural. En ese sentido, dichas estaciones de servicio (EDS) requieren de una subestación tipo interior donde se encuentran diferentes equipos eléctricos que conforman a la subestación y que finalmente alimentan eléctricamente a la EDS.

Dicho lo anterior, se ha observado que después de varios meses de servicio el consumo de energía en estas estaciones viene siendo un problema en términos económicos puesto que se ha visto reflejado en excesos de consumo de energía reactiva, superando el 50% del consumo de potencia activa. Por lo cual, EPM se ha visto en la necesidad de hacer un estudio de calidad de la energía para determinar posibles causas de bajos factores de potencia y exceso en consumo de reactiva. Por lo cual, se ha contratado a la empresa ILUX INGENIERIA S.A.S para que evalúe y dé soluciones técnicas que permitan mejorar la calidad de la energía en estas estaciones de GNV que presentan problemas, además de disminuir los costos de la factura de energía eléctrica viéndose reflejada en los KVAR/Hora de exceso.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Realizar estudios de calidad de la energía en subestaciones eléctricas de estaciones de servicio de GNV en el Valle de Aburrá, en cumplimiento con la resolución CREG 015 de 2018.

B. Objetivos específicos

Analizar la normativa establecida en la resolución CREG 015 de 2018 Cap. 12 como base fundamental para comprender la metodología del costo de transporte excesivo de energía reactiva.

Realizar mediciones para el análisis de variables y de la calidad de la energía en las diferentes estaciones de servicio de GNV para identificar problemas relacionados con la energía reactiva, como desbalances en la carga y factor de potencia inadecuado.

Analizar y comparar los costos asociados con la implementación de las soluciones propuestas frente a los beneficios esperados en términos de eficiencia energética, ahorro económico y cumplimiento normativo.

II. MARCO TEÓRICO

El desarrollo del proyecto implica tener claridad en muchos conceptos de la ingeniería eléctrica, como lo es la energía reactiva, calidad de la energía, factor de potencia y demás conceptos no menos importantes que serán abarcados durante el estudio y ejecución del proyecto. Es por esto por lo que se exponen algunos conceptos que serán tratados en el transcurso del informe.

a. Energía Activa

Tu plancha, calefactor o tu horno funciona gracias a ella. Comúnmente se conoce como “energía útil” y resulta de transformar la energía eléctrica en trabajo mecánico. Es la que más relevancia tiene en la factura y se mide en kWh.

Esta energía limita el proceso de distribución, ya que incrementa las pérdidas en las redes eléctricas durante el recorrido desde la fuente de generación hasta el cliente final; es por esta razón que se penalizan los excesos de consumo o inyección de este tipo de energía. [1]

b. Energía Reactiva:

La energía reactiva es un tipo de energía eléctrica absorbida de la red (reactiva inductiva) o inyectada a esta (reactiva capacitiva), por algunos equipos eléctricos que necesitan un campo magnético para su funcionamiento, tales como motores, transformadores, iluminación fluorescente, ascensores, entre otros. La CREG en Colombia busca minimizar el tránsito de energía reactiva en las redes del país, definiendo una metodología para el cobro de la penalización de energía reactiva a los clientes que la consumen o la inyectan en la red. [2]

Es importante mencionar que, la penalización económica por exceso dependerá del incremento de una variable denominada ‘M’, esta variable es la que representa un impacto en el monto que finalmente paga un cliente por transporte de energía reactiva, ya que su valor se incrementa siempre que el cliente no corrija su condición de transporte de energía reactiva. El cálculo de cobro es muy sencillo: se mide el consumo de energía activa y se saca un 50% del valor total en kWh, luego se mide el consumo de energía reactiva. Si este consumo (energía reactiva)

supera el 50% sobre el consumo total de energía activa, la energía excedente se cobra y si está por debajo no hay penalización alguna. Veamos un ejemplo:

Si una empresa tiene un total de 100 kWh de consumo de energía activa, su 50% es 50 kWh, y, si tiene 80 kVArh de energía reactiva, el cobro sería de 30 kVArh según la regulación CREG (solo se contaría el porcentaje que sobrepasa el 50%). [2]

c. Cobro de penalización de Energía Reactiva Capacitiva

Antes del 2018 este tipo de energía reactiva no era cobrada, y, a diferencia de la inductiva, la energía reactiva capacitiva siempre se cobra y no tiene límite inferior. ¿Por qué? Porque es muy probable que entregues energía a la red, lo que significa que el operador de energía debe transportarla. [3]

d. Comportamiento de la variable M.

Entendamos las medidas de incremento en cinco pasos:

El incremento de la variable “M” se evalúa desde los consumos de enero 2021.

Cuando la penalización por energía reactiva se realice durante diez (10) días o menos, la variable toma el valor de $M = 1$

Si durante el año 2021 en todos los meses presentaste penalización por más de 10 días (mínimo 1 hora por día), la variable M será igual a 1 durante esos primeros 12 meses. A partir del decimotercer esta variable se incrementará mensualmente en una unidad hasta alcanzar el valor de 6

Si el transporte de energía reactiva desaparece durante más de tres meses consecutivos, la variable reiniciará a partir de 1

Cuando el valor de la variable sea ‘6’ y se haya mantenido durante 12 meses (en caso de persistir el consumo de energía reactiva en exceso) a partir del mes siguiente la variable continuará incrementándose mensualmente en una unidad hasta alcanzar el valor de 12

e. Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), es una Unidad Administrativa Especial, con autonomía administrativa, técnica y financiera, sin personería jurídica, adscrita al Ministerio de Minas y Energía. La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) tiene por objeto regular los monopolios en la prestación de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica y gas combustible, cuando la competencia no sea, de hecho, posible; y, en los demás casos, la de promover la competencia entre quienes presten servicios públicos, para que las operaciones de los monopolistas o de los competidores sean económicamente eficientes, no impliquen abusos de la posición dominante, y produzcan servicios de calidad.[5]

f. Calidad de la Energía:

La Calidad de la Potencia o energía eléctrica se refiere al estudio de las perturbaciones y variaciones de estado estacionario de las variables de un sistema eléctrico cuyo suministro depende del operador de la red o empresas de distribución de energía eléctrica, estas perturbaciones pueden ser de tensión y frecuencia, contenido de armónicos de las ondas de tensión y corriente, flickers, (fluctuaciones o “parpadeos” rápidos de tensión), factor de potencia, transitorios electromagnéticos rápidos, entre otros.

Dentro de las variables que determinan la calidad de la potencia, en el presente estudio se hace de vital importancia el FACTOR DE POTENCIA, que es un indicador de la cantidad de energía reactiva que consume la instalación con respecto a la energía total, ya que actualmente el excesivo consumo de este tipo de energía genera penalizaciones económicas por parte del operador de red [5]

g. Fórmula de cobro de penalización Energía Reactiva

A continuación, se muestra la fórmula matemática que es usada para el cobro de transporte de energía en exceso.

$$CTER_{u,n,h,m,j} = ER_{u,h,m,j} * M * D_{n,h,m} \quad (\text{ecuación 1})$$

- $CTER_{u,n,h,m,j}$: Cobro de transporte de energía en exceso (\$)
- $ER_{u,h,m,j}$: Cantidad de energía reactiva transportada en exceso
- M : Variable de incremento
- $D_{n,h,m}$: Componente “D” de la factura ($\frac{\$}{kWh}$)

h. Variable de incremento

Esta variable aplica únicamente para los clientes que tienen un medidor que realiza registros de manera horaria, es decir, los clientes que, por su actividad económica, maquinarias y equipos, requieren medir hora a hora su consumo de energía activa y reactiva, las que son utilizadas para realizar el respectivo cobro según su comportamiento.

Para entender de mejor manera la variable de incremento se presenta un ejemplo; supongamos que, si el valor de la variable es “1”, entonces se paga el equivalente al consumo de energía reactiva; pero si el valor es “12”, se paga 12 veces el valor del consumo total; dicho de otra forma, lo que son \$10.000, podrían convertirse en \$120.000 si esta variable incrementa. [6]

i. Algunas desventajas de los bancos de capacitores:

dado que generalmente estos solo toman corriente de una sola línea y presentan retardos a la conexión y desconexión del orden de 10 a 20 segundos o más. Por otro lado, no corrigen adecuadamente ante cambios bruscos de corriente producidos por las cargas, Inyección Trifásica a la red, no compensan por fase. Otro detalle que es válido mencionar es que no corrigen reactiva capacitiva y otro factor no menos importante es que pueden amplificar armónicos presentes en la red generando en ocasiones resonancia.

j. Algunas ventajas del filtro activo:

Toman corrientes de las 3 líneas, dan respuesta en 10 a 15 milisegundos independientemente de los cambios bruscos de corriente en las cargas. Permiten la inyección trifásica a la red, compensación por fase. Corrigen, además, tanto reactiva inductiva como capacitiva. Actúa eficientemente cuando hay inyección solar colocando en fase la tensión y corriente. En ocasiones donde se tenga alta distorsión de armónicos este permite corregirla.

k. Armónicos

En un sistema de energía eléctrica, un armónico es un voltaje o corriente en un múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema. Los armónicos se pueden describir mejor como las características de una forma de onda de voltaje o corriente en relación con su frecuencia fundamental. Cuando las formas de onda se desvían de una forma de onda sinusoidal, contienen armónicos.

Las frecuencias armónicas en la red eléctrica son una causa frecuente de problemas de calidad de la energía, lo que resulta en un aumento del calentamiento en los equipos y conductores, fallas en los variadores de velocidad y pulsaciones de torque en los motores. [7]

IV. METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento con el proyecto que se resume en este informe se llevaron a cabo diferentes actividades las cuáles se describen a continuación.

Actividad 1:

Familiarización con el proyecto con el propósito de conocer los requerimientos internos (personal operativo, ingeniería, administrativo). Así como también el alcance que va a tener el proyecto.

Actividad 2:

Conocer y evaluar las diferentes estaciones de GNV que tienen la necesidad de corregir el factor de potencia y compensar el exceso de energía reactiva.

Actividad 3:

Recolección de la información de las matrices de consumo suministrado por el cliente para análisis de variables donde se confirma la penalización por consumo excesivo de energía reactiva.

Actividad 4:

Estudio de la calidad de la energía en las estaciones de servicio a intervenir.

Actividad 5:

Propuesta de solución de acuerdo con el análisis de la calidad de la energía previamente realizado.

Actividad 6:

Instalación de filtro AHF-PRO para corrección del F.P y compensación de reactiva, según los resultados obtenido en el estudio de calidad de la energía.

Actividad 7:

Seguimiento de las matrices de consumo posterior a la instalación de los equipos que corrigen el factor de potencia y compensan la energía reactiva.

V. RESULTADOS

En ILUX INGENIERÍA S.A.S se han ejecutado múltiples proyectos de la ingeniería eléctrica, así como también se han llevado a cabo mantenimientos eléctricos específicamente en subestaciones de media – baja tensión y durante la etapa de prácticas se tuvo la oportunidad de participar en diferentes servicios y proyectos. Por otra parte, para efectos del presente informe, se mostrarán los resultados de los estudios de calidad de la energía que se realizaron en la EDS Tasajera 1 y EDS Belén. Además, se muestra la instalación del filtro en EDS Belén y la matriz de consumo del mes de enero del presente año, para validar el consumo de energía y el costo económico.

Estación de servicio de GNV Tasajera 1:

En esta estación se presta servicio de recarga de gas para vehículos de la empresa EMVARIAS que prestan servicio en gran parte del Valle de Aburrá. La ubicación de la EDS es en el municipio de Girardota en la Autopista Norte, Km2 después del parque de las aguas.



Figura 1. EDS Tasajera.

Nota: Elaboración propia

En tasajera, además de tanquear camiones de EMVARIAS se encargan de distribuir Gas Natural Comprimido (GNC) para diferentes puntos de la región a partir del llenado de tanques de camiones cisterna

Para el proceso de tanqueo o recarga de gas natural, se disponen de compresores que permiten aumentar la presión del fluido desde el punto de almacenamiento para permitir la circulación por las mangueras surtidoras. Estos compresores se alimentan eléctricamente cada uno de una subestación eléctrica. Actualmente, en Tasajera se tienen dos subestaciones y que han sido nombradas como “Subestación Eléctrica Tasajera 1” y “Subestación Eléctrica Tasajera 2”.

A continuación, se hará una descripción de las subestaciones Tasajera 1 con el propósito de identificar los diferentes componentes que constituyen esta subestación, además, mostrar los resultados del estudio de calidad de la energía que se llevaron a cabo en esta subestación.

Caracterización de la SE Tasajera 1, 13200 V, Transformador 300 kVA

En esta subestación se transfiere la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de las islas surtidoras, además de alimentar eléctricamente otros espacios de la estación de servicio

En la Figura 2 se muestra la ubicación física de la subestación, así como los cuartos técnicos. Puede identificarse además que en un cuarto se encuentra la celda de medida, celda de

seccionador y transformador. En el cuarto del medio se encuentra el gabinete de distribución general.



Figura 2. Subestación eléctrica Tasajera 1.

Nota: Elaboración propia

A continuación, se muestran los componentes principales de la subestación eléctrica Tasajera 1.

Celda de medida:

En la celda de medida se encuentran los equipos de instrumentación que permiten normalizar los valores de voltaje y corriente para la medición en media tensión. El medidor que se encuentra en la celda de medida es propiedad de EPM y registra las pérdidas del transformador principal de la subestación.



Figura 3. Celda de medida en media tensión.

Nota: Elaboración propia

Transformadores de instrumentación y medidor electrónico:

En la Figura 5 se muestran los componentes internos de la celda de medida. En la parte superior se evidencia el medidor electrónico propio de EPM el cuál cumple la función de registrar las pérdidas del transformador principal, además, se evidencia un modem que permite monitorear de forma remota los registros, lo que se conoce como telemedida. Por otro lado, en la parte inferior se encuentran los transformadores de potencia cuya función principal es la de transformar los valores de tensión de 13200 a valores normalizados o seguros que puedan ser censados por el medidor de media tensión.

Antes de que los 13200 V que vienen de la red primaria atraviesen el transformador deben pasar por el seccionador de media tensión. A continuación, se muestra la celda del seccionador de la subestación.

Celda del seccionador:

En Figura 4 puede observarse la celda del seccionador de la subestación, cuya función principal es permitir la desconexión segura de secciones específicas de la red eléctrica para mantenimiento, reparación o en situaciones de emergencia.



Figura 4. Celda del seccionador.

Nota: Elaboración propia



Figura 5. Seccionador SOCOL.

Nota: Elaboración propia

En al interior de la celda de medida se muestra en la parte inferior las fases que transportan los 13,200 voltios, pero antes deben conducirse a través de tres fusibles de corriente nominal I_n 25 amperios c/u. Figura 6.



Figura 6. Referencia del fusible por fase.

Nota: Elaboración propia

Estudio de Calidad de La Energía SE EDS Tasajera 1

Se realizó estudio de calidad de la energía con el fin hacer un estudio de las variables eléctricas que permiten dar un diagnóstico de la fiabilidad eléctrica del sistema, cumplimiento de normativas y estándares, y por último no menos importante, la prevención de pérdidas económicas, etc.

Para ejecutar este estudio fue necesario utilizar un analizador de redes de referencia AEMC 3945, el cual fue conectado a la red secundaria del sistema durante un tiempo determinado, y posteriormente se desconectó para analizar los resultados que se registraron y que se muestran a continuación:

Transformador de placas N.º 73724 propiedad de EPM, con potencia de 300 kVA y una protección general de 3 x 400 amperios. Figura 7



Figura 7. Protección general de la subestación 3x400A.

Nota: Elaboración propia

Se registró una cargabilidad máxima del 61.16% (201.47 kVA) y disponibilidad de 32.84% es decir, 98.53 kVA. En la tabla que se presenta a continuación se muestran los valores de cargabilidad y disponibilidad.

TABLA I
GARGABILIDAD ELÉCTRICA DE LA EDS

Fase	Corriente total (A)	Corriente máxima (A)	Corriente disponible (A)
1	400	264.40	135.2
2	400	263.80	136.2
3	400	279.20	120.8

TABLA II
POTENCIA DISPONIBLE EN KVA

Fase	Potencia total (A)	Potencia máxima (kVA)	Potencia disponible (kVA)
1	100	66.74	33.26
2	100	65.43	34.57
3	100	70.07	29.93
Total	300	201.47	93.53

El periodo de medida fue de 90 horas y se analizaron las siguientes variables:

- Frecuencia
- Tensión
- Corrientes
- Potencia activa
- Potencia reactiva
- Potencia aparente
- Factor de potencia
- THD
- Energías (kWh, kVarh, kVAh)

En la Figura 8 se muestra la conexión de los sensores de corriente y, para su correcta instalación, se tuvo en cuenta el sentido del flujo de corriente. La función principal de estas pinzas es censar la corriente durante el tiempo de la medida. Además, se puede observar la conexión de las pinzas de tensión en el barraje principal, además, se conecta otra pinza de tensión en barraje de neutro para medir tensiones de fase.



Figura 8. Montaje en sitio del analizador de redes.

Nota: Elaboración propia

frecuencia [Hz]:

TABLA III
FRECUENCIA DEL SISTEMA

Variables medidas			Valoración
Mínimo	Máximo	Promedio	
59.83	60.11	59.99	CUMPLE

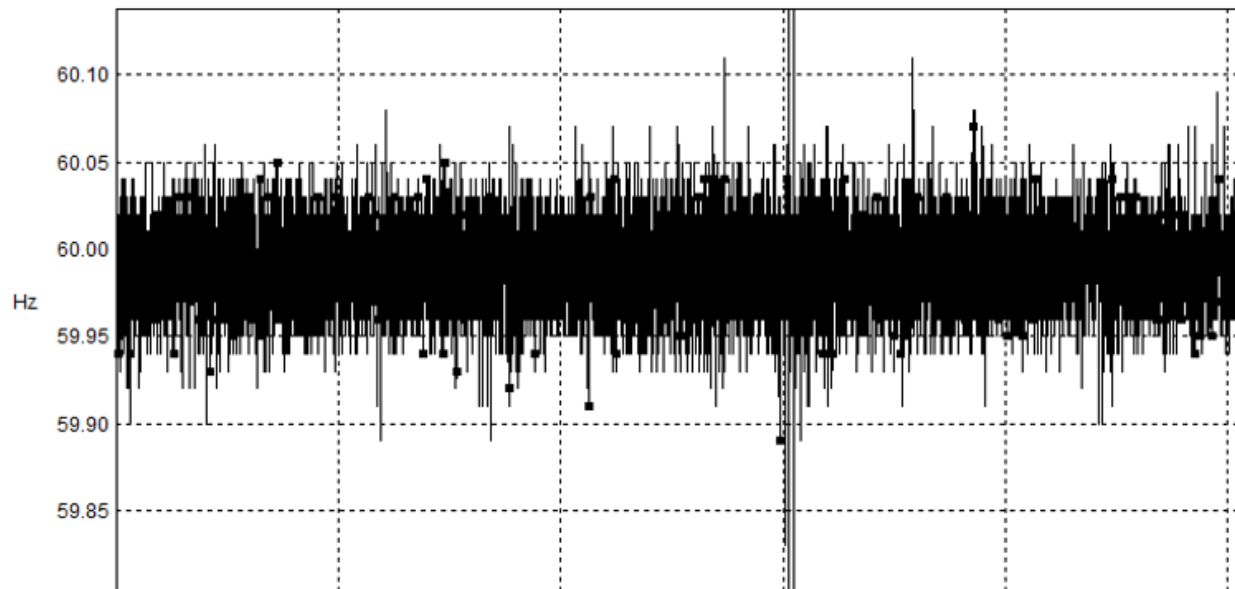


Figura 9. Frecuencia del sistema.

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

En condiciones normales de operación la frecuencia debe estar entre 59,8 y 60,2 Hz, el intervalo de medida debe ser de una semana según el numeral 7.12 de la norma NTC 5001. Los valores de frecuencia aceptables durante el 100% de los datos tomados deberán estar entre 57.50Hz y 63.00Hz en condiciones de emergencia. Es válido mencionar que son excluidos los valores de frecuencia durante períodos de interrupciones de servicio.

Tensiones Fase – Neutro (V_{rms}), Tensión Fase – Fase (U_{RMS}) [V]:

TABLA IV
TENSIONES DE FASE

Fase	Rango de medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	promedio	
1 - N	243	264	253	CUMPLE
2 - N	243	262	253	
3- N	244	262	253	

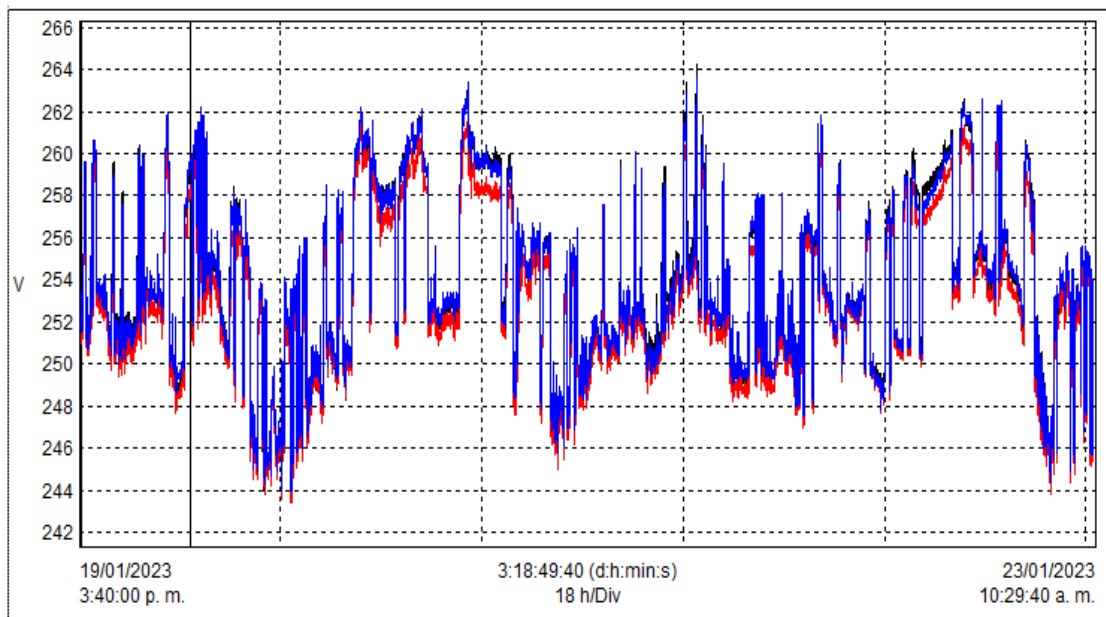


Figura 10. Tensión de fase.

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

TABLA V
TENSIONES DE LÍNEA

Fase	Rango de medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	promedio	
1 – 2	421	456	438	CUMPLE
2 - 3	421	454	438	
3- 1	422	457	440	

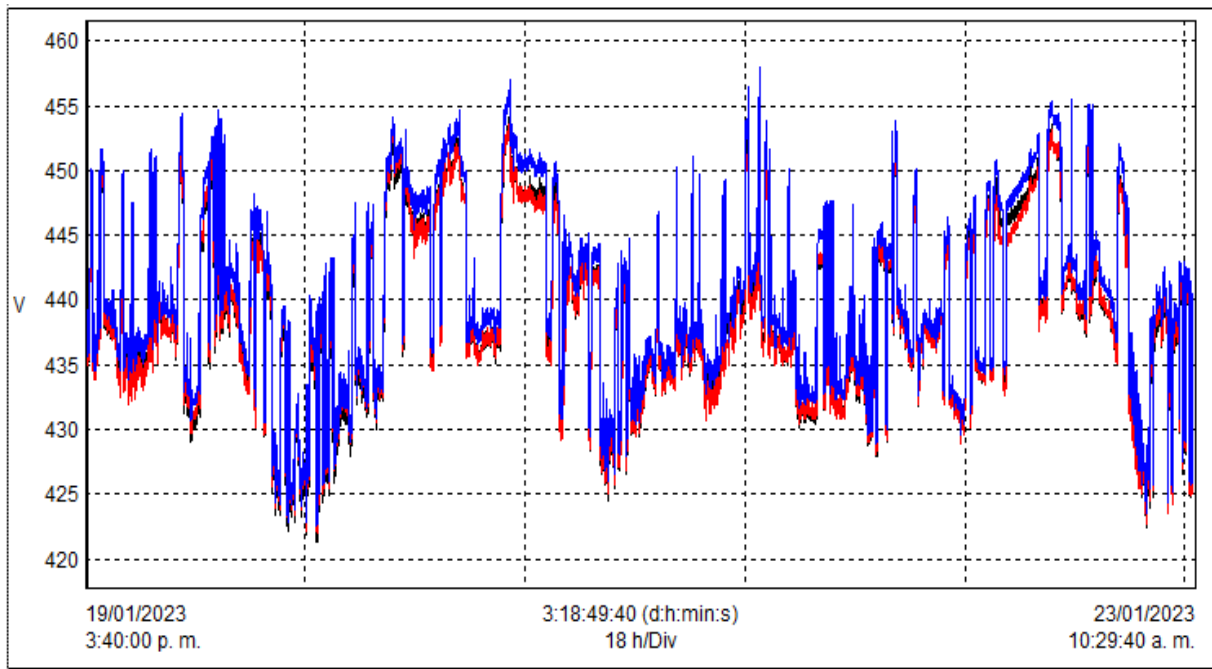


Figura 11. Tensiones línea – línea.

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

En condiciones normales de suministro, aparte de las interrupciones, para cada periodo de semana, el 95% de los valores eficaces promediados en 10 min están situados en el intervalo definido por norma como +5% y -8% (urbano). Las tensiones de línea-línea y fase-neutro deben estar dentro de los rangos permisibles según la norma NTC 1340 de 2004.

Corrientes [A] – Desbalance de corrientes:

TABLA VI
CORRIENTES

Fase	Rango de medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	promedio	
1	0.0	264	138	CUMPLE
2	0.0	263	136	
3	0.0	279	146	

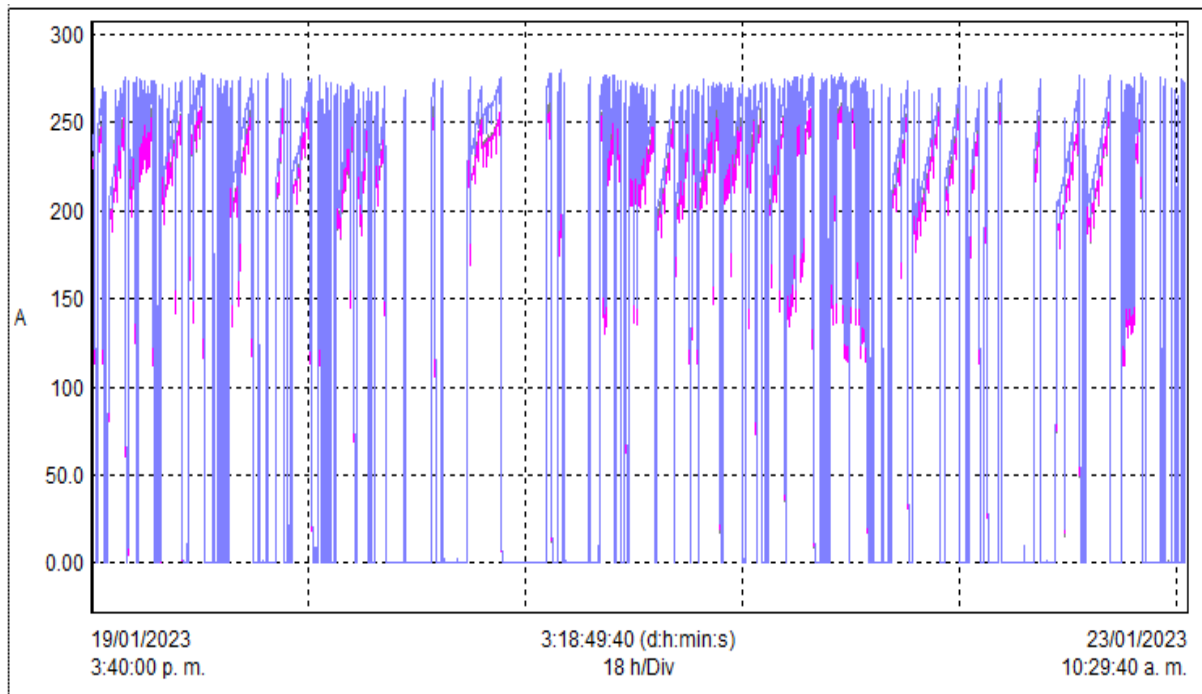


Figura 12. Corriente por fase del sistema

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

La corriente máxima de la protección principal es de 400 A y según los valores de corriente máximos registrados por el analizador de redes, no se superó en ningún momento dicho límite.

Factor de potencia:

La Resolución CREG-108 de 1997, en su Artículo 25, establece parámetros específicos para el control del factor de potencia en el servicio de energía eléctrica. Por otro lado, la nueva Resolución CREG-015 de 2018, en su capítulo 12, aborda el mismo tema.

Según el Parágrafo 1° de la Resolución CREG-015 de 2018, se estipula que el factor de potencia inductiva (coseno phi inductivo) de las instalaciones debe ser igual o superior a 0.90. En caso de que el factor de potencia sea inferior a este límite, es necesario realizar un análisis para asegurar que la energía reactiva no contravenga las disposiciones establecidas en el Parágrafo 3° de la misma resolución.

TABLA VII
FACTOR DE POTENCIA SIN B.C

Fase	Variables medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	promedio	
1	0.0	0.84	0.48	CUMPLE
2	0.0	0.86	0.50	
3	0.0	0.86	0.50	
TOTAL	0.0	0.85	0.50	

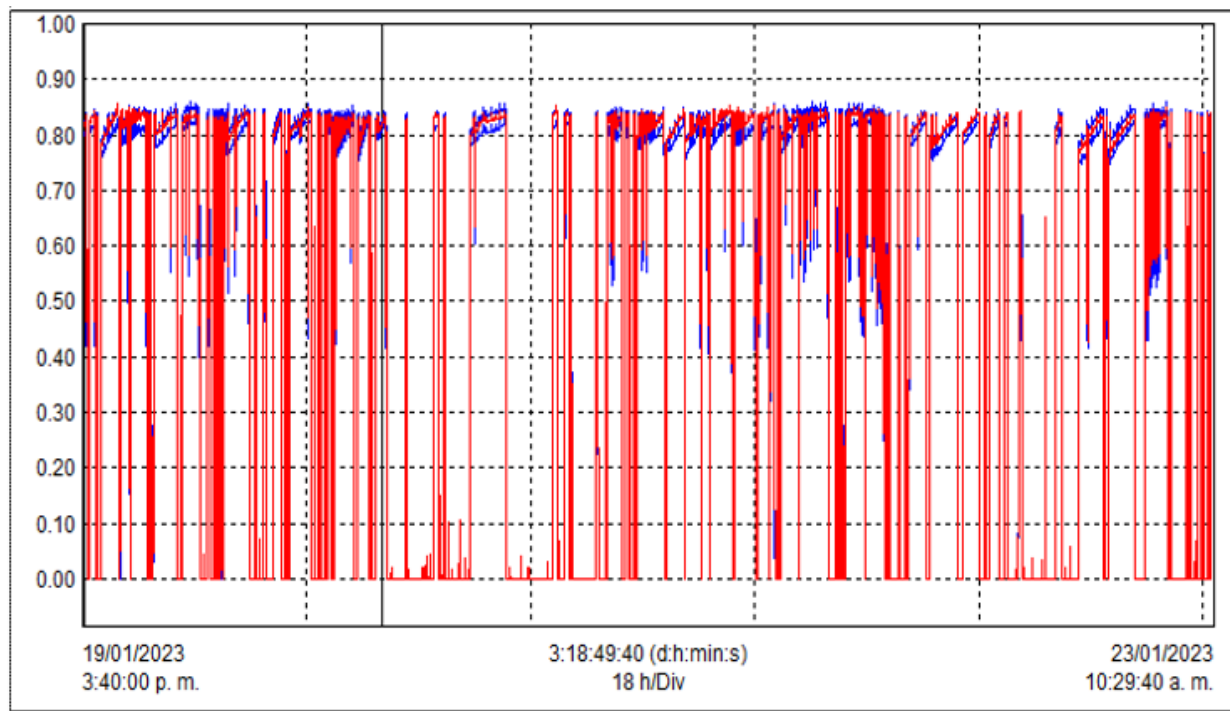


Figura 13. Factor de potencia sin B.C.

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

TABLA VIII
FACTOR DE POTENCIA CON B.C

Fase	Variables medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	promedio	
1	-0.01	0.99	0.69	NO CUMPLE
2	0.0	1.00	0.71	
3	0.0	0.99	0.71	
TOTAL	0.0	0.99	0.71	

En la TABLA VIII puede verse que el Factor de Potencia en promedio no se encuentra dentro de los rangos permitidos por la norma.

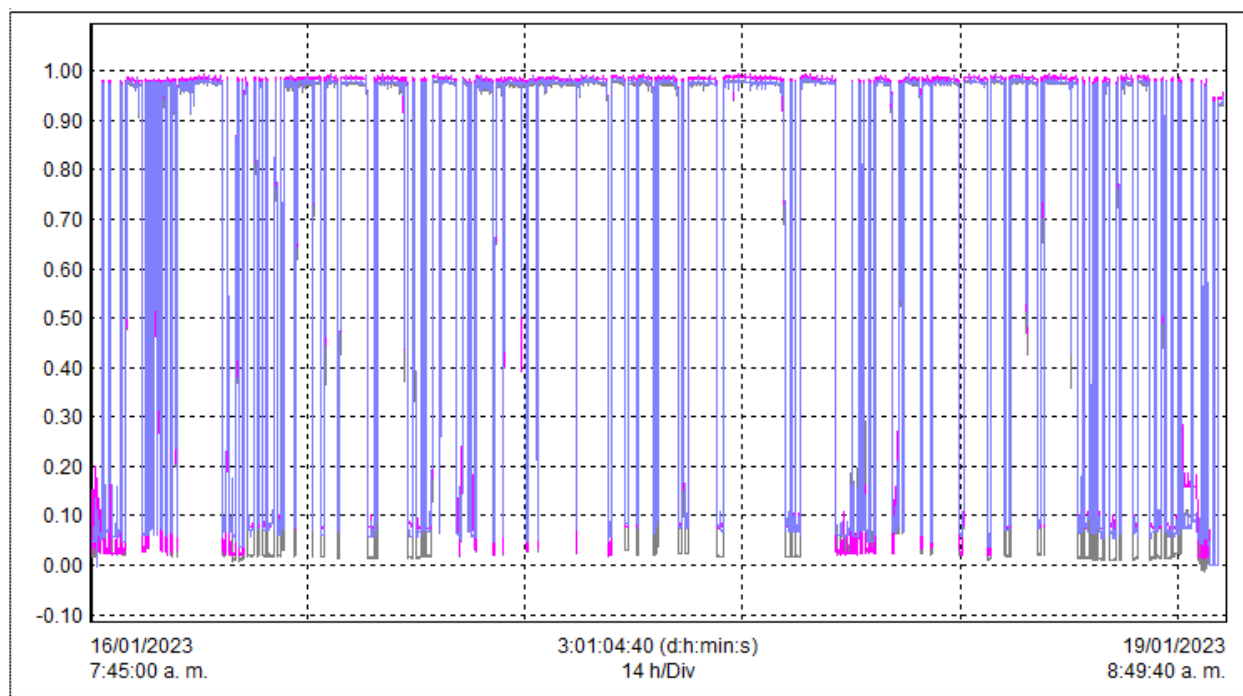


Figura 14. Factor de potencia con B.C.

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

Potencia y Energía:

A continuación, se muestran la potencia activa, reactiva y aparente del sistema registrada durante el periodo de medidas.

TABLA IX
POTENCIAS DEL SISTEMA

Fase	Variables Medidas								
	Potencia Activa [kW]			Potencia Reactiva [kVAr]			Potencia Aparente [kVA]		
	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.
1	0.0	54.49	27.41	0.0	50.25	21.01	0.0	66.74	34.71
2	0.0	55.49	27.99	0.0	48.95	19.58	0.0	65.43	34.33
3	0.0	58.99	29.81	-1.86	51.94	21.37	0.0	70.07	36.86
TOTAL	0.0	167.93	85.21	-1.86	151.13	61.96	0.0	201.47	105.90

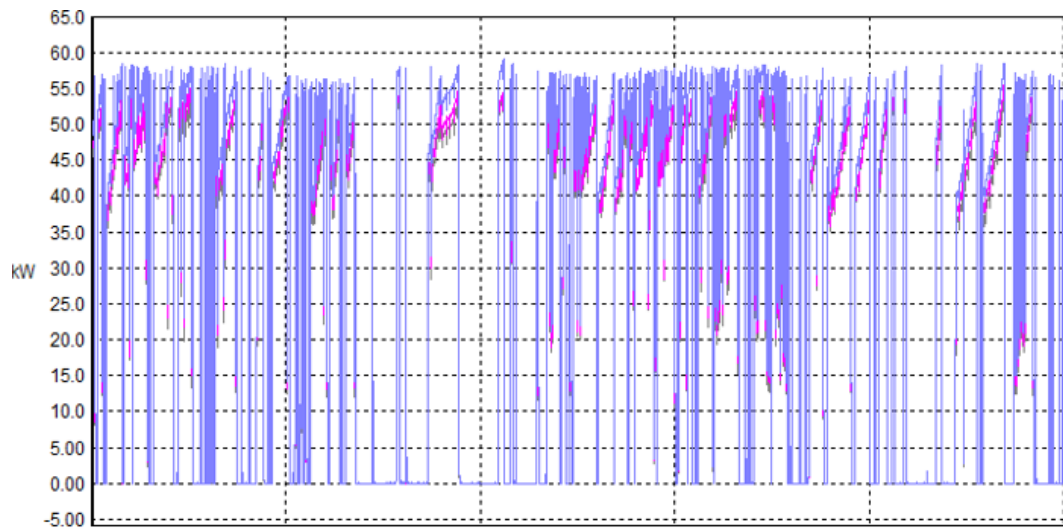


Figura 15. Potencia activa del sistema.

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

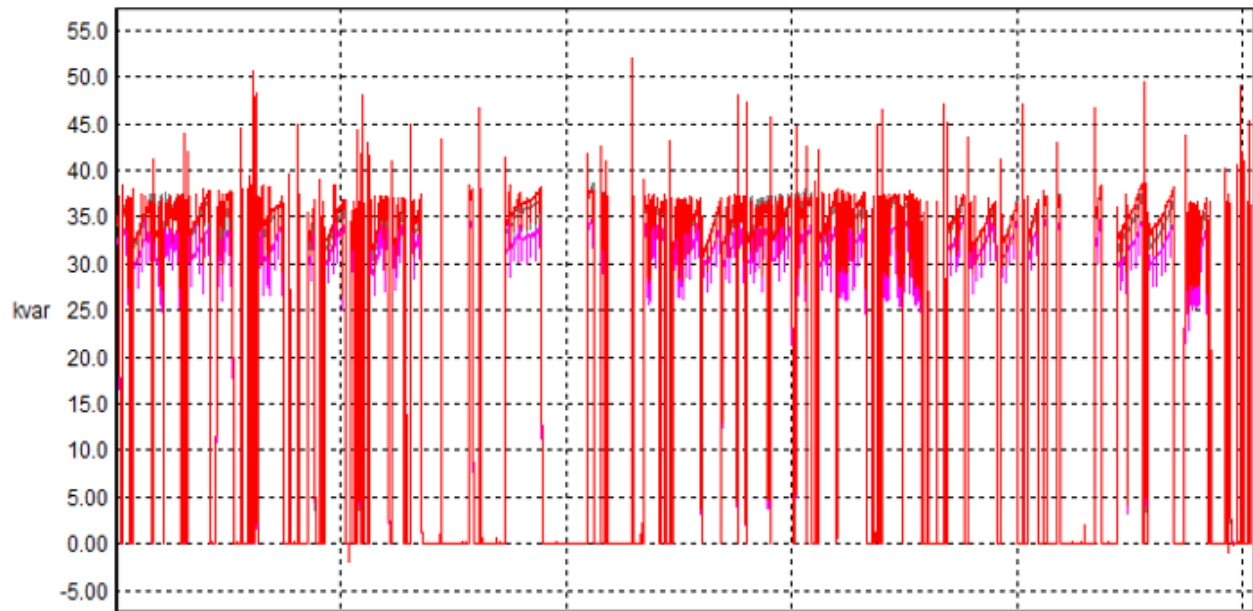


Figura 16. Potencia reactiva del sistema

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

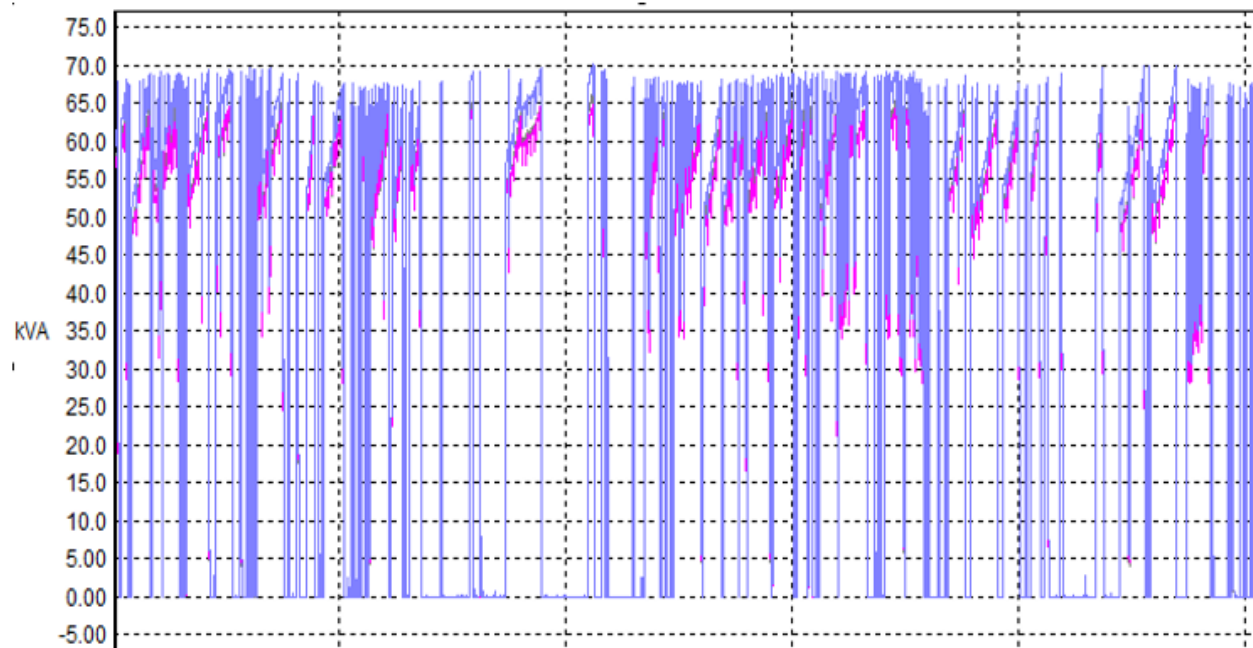


Figura 17. Potencia aparente del sistema

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

Según la resolución CREG 108 de 1997 Parágrafo 3° y resolución CREG 015 de 2018 capítulo 12 dice: “A partir de la vigencia de la presente resolución, y hasta tanto la Comisión

reglamente el suministro y consumo de energía reactiva en el Sistema Interconectado Nacional, en caso de que la energía reactiva sea mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (KWh) consumida por un suscriptor o usuario, el exceso sobre este límite se considerará como consumo de energía activa para efectos de determinar el consumo facturable.

TABLA X
ENERGÍAS DEL SISTEMA.

Fase	Variables medidas			Valoración
	Energía activa (kWh)	Energía reactiva (kVarh)	Energía aparente (kVAh)	
1	1277.57	974.86	1614.76	NO CUMPLE
2	1305.18	907.19	1597.05	
3	1390.54	991.85	1716.18	
TOTAL	3973.54	2873.90	4927.98	

De acuerdo con la relación entre energía activa y reactiva según el párrafo 3, **NO CUMPLE** para las medidas y periodos realizado.

Distorsión Armónica Total de Tensión THD – V [%]:

Los armónicos de voltaje son consecuencia de las impedancias de las redes de distribución y se originan debido al impacto sobre la red que causa la distorsión de corriente. La norma NTC 5001-2008 recomienda como máximo 5% de distorsión total en el punto de conexión y para este caso no se alcanza ni se supera el valor establecido por la norma.

A continuación, se muestran los valores mínimos, máximos y promedios de la Distorsión Armónica Total de Tensión THD-V.

TABLA XI
DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE TENSIÓN.

Fase	Variables medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	promedio	
1	0.60	3.40	1.68	CUMPLE
2	0.60	3.30	1.65	
3	0.60	3.40	1.67	

Análisis de carga:

Para el transformador principal de la subestación eléctrica, la máxima potencia demandada por la carga que se presentó durante el periodo medida fue de 201.47 kVA, de esta manera se obtuvo un porcentaje de carga máximo de 67,16%, resultando en una disponibilidad de 32.84 % (98.53 kVA).

En la Figura 18. Curva de carga del Transformador 300kVA. se muestra la probabilidad acumulada del porcentaje real de carga de la instalación eléctrica, para el periodo de medida registrado.

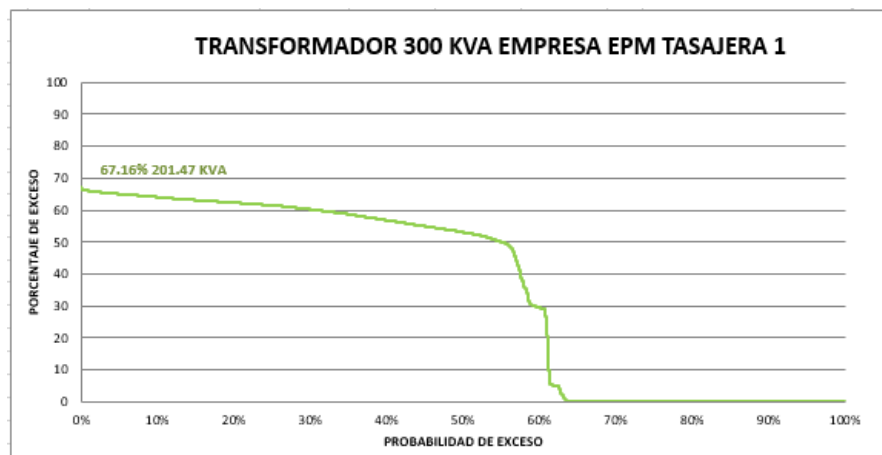


Figura 18. Curva de carga del Transformador 300kVA.

Nota: Elaboración propia obtenidas del analizador de redes

Carga por fase:

Teniendo en cuenta que, a la hora de realizar aumentos de carga, éstas pueden ser monofásicas, es importante conocer el estado actual de cada una de ellas y tomar la correcta decisión de la fase a intervenir. En la siguiente tabla se muestra el estado actual de carga con respecto a la corriente y potencia aparente máximas registradas en las fases 1 y 2.

TABLA XII
CORRIENTE POR FASE DEL SISTEMA.

	Máximo	Porcentaje de carga (%)
Fase	Corriente (A)	
1	264.40	67.17 %
2	263.80	65.43 %
3	279.20	70.07 %
Fase	Potencia aparente (kVA)	
1	66.74	66.74%
2	65.43	65.43%
3	70.07	70.07%

Estudio de calidad de la energía en EDS BELÉN.

Para este estudio fue necesario un periodo de medidas de 120 horas, donde se monitorearon las siguientes variables:

- Frecuencia
- Tensión
- Corrientes
- Potencia activa
- Potencia reactiva
- Potencia aparente
- Factor de potencia
- THD
- Energías (kWh, kVarh, kVAh)

Las pinzas de corriente y pinzas de voltaje se conectan en el barraje del ML principal, es decir, aguas abajo del transformador principal de la subestación.



Figura 19. Montaje en sitio del analizador de redes.

Nota: Elaboración propia

La protección o breaker general se muestra en la Figura 20, cuya corriente nominal es de 600 A.



Figura 20. Protección general trifásica de 3x600A.

Nota: Elaboración propia

frecuencia [Hz]:

Puede verse en la figura mostrada a continuación, que la frecuencia de operación del sistema cumple para la norma

TABLA XIII
FRECUENCIA DEL SISTEMA.

Variables medidas			Valoración
Mínimo	Máximo	Promedio	
59.91	60.08	59.99	CUMPLE

Tensiones Fase – Neutro (V_{rms}), Tensión Fase – Fase (U_{RMS}) [V]:

TABLA XIV
TENSIONES DE FASE.

Fase	Variables medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	promedio	
1 – N	256	274	266	CUMPLE
2 – N	257	275	268	
3- N	257	275	268	

TABLA XV
TENSIONES DE FASE.

Fase	Variables medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	promedio	
1 – 2	443.5	476.1	463.0	CUMPLE
2 – 3	446.6	478.5	466.0	
3- 1	444.9	475.4	463.5	

Corrientes [A] – Desbalance de corrientes:

TABLA XVI
CORRIENTES DEL SISTEMA.

Fase	Variables medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	promedio	
1	0.0	223	56.65	CUMPLE
2	0.0	239	61.03	
3	0.0	224	58.04	

La corriente máxima de la protección principal es de 600A y según los valores de corriente registrados por el analizador de redes, no se superó en ningún momento dicho límite. Para observar la disponibilidad de la instalación, ver el análisis de cargabilidad en el numeral 4.8 del presente informe.

Para determinar el rango permitido por norma para desbalance de corriente, se toma como límite el desbalance de tensión del 2% propuesto por la norma IEC 61000-2-2, la ecuación permite

concluir que el desbalance máximo en corriente compatible con el desbalance admisible en tensión debe ser 40 %.

Aunque el desbalance medido no supera el máximo recomendado, teniendo en cuenta las corrientes promedio de cada fase, se concluye que la fase 2 se encuentra en un nivel de carga superior al de la fase 1 Y 3.

Desbalance de tensión (%):

Cuando un sistema trifásico o bifásico está balanceado, significa que las tensiones de las fases son iguales en magnitud y ángulo. El porcentaje de desbalance se define como la desviación máxima de la tensión de línea del promedio dividido sobre el promedio (IEEE 1159 – 2005):

De acuerdo con la norma, IEEE 1159-2005, el porcentaje de desbalance debería ser inferior 2%.

TABLA XVII
DESBALANCE DE TENSIÓN.

Variables Medidas			Valoración
Mínimo	Máximo	Promedio	
0.20	0.50	0.39	CUMPLE

Durante el periodo de medida, el desbalance de tensión promedio fue inferior al 2% (límite recomendado).

Factor de Potencia

TABLA XVIII
FACTOR DE POTENCIA.

Fase	Variables medidas			Valoración
	Mínimo	Máximo	Promedio	
1	0.0	0.82	0.26	NO CUMPLE
2	0.0	0.79	0.25	
3	0.0	0.78	0.24	
TOTAL	0.0	0.80	0.25	

Potencia y Energía:

TABLA XIX
POTENCIA Y ENERGÍA DEL SISTEMA

Variables Medidas									
Fase	Potencia Activa [kW]			Potencia Reactiva [kVAr]			Potencia Aparente [kVA]		
	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.
1	0.0	48.08	11.15	0.0	39.55	9.69	0.0	59.32	14.91
2	0.0	49.97	11.75	0.0	43.38	10.86	0.0	63.42	16.13
3	0.0	46.25	10.80	-0.04	42.97	10.74	0.0	60.54	15.36
TOTAL	0.0	143.96	33.69	-0.04	125.36	31.28	0.0	183.08	46.40

TABLA XX
POTENCIA Y ENERGÍA DEL SISTEMA

Variables Medidas				
Fase	Energía activa (kWh)	Energía reactiva (kVarh)	Energía aparente (kVAh)	Valoración
1	1337.4	1162.2	1789.1	NO CUMPLE
2	1409.7	1302.9	1935.1	
3	1296.1	1288.8	1843.5	
TOTAL	4043.31	3754.0	5568.3	

La relación entre energía activa y reactiva según el parágrafo 3, **NO CUMPLE** para las medidas en el periodo realizado.

Teniendo en cuenta que en esta subestación se instaló un banco de capacitores para la compensación de energía reactiva, y a raíz de que este no alcanza a compensar los kVAr necesarios por inyección de capacitiva, fue necesario instalar un filtro activo en paralelo con el ML de distribución general de la subestación. Esto, brinda unas ventajas notables a diferencia de los bancos de capacitores

Montaje de filtro activo en EDS Belén:

A continuación, se presenta la instalación final del filtro activo AHFpro. La instalación de este filtro implicó la suspensión de la energía eléctrica durante el periodo de montaje; dado que es necesario conectar los transformadores de corriente en el barraje principal de alimentación, cuya función es medir la corriente demandada, posterior, leída por el filtro activo.



Figura 21. Instalación exitosa de filtro activo en EDS Belén.

Nota: Elaboración propia

El filtro se instaló en el mes de diciembre del 2023, por lo tanto, la estación de servicio venía siendo penalizada por consumo excesivo de energía reactiva. A continuación, se presentan los resultados de la factura de servicios del mes de noviembre cuyo consumo corresponde a mes vencido, es decir, el mes de octubre. Además, se muestra el consumo del mes de noviembre donde el filtro entró en servicio. Esto, con la finalidad de comparar los beneficios económicos.



Figura 22. Consumo de energía mes de octubre.

Nota: Tomada de parte del cliente

En la Figura 21 se evidencia que para el mes de octubre la estación ya venía siendo penalizada por consumo excesivo de reactiva. Por otra parte, en la Figura 22 puede verse una disminución considerable en el costo de penalización de energía reactiva. La estación a la fecha de noviembre continuaba penalizada puesto que, aunque se compensó la energía reactiva inductiva, aún se presenta una capacitiva, la cual no es subsidiada por el OR, sin embargo, esta situación está siendo evaluada para dar solución.



Figura 23. Consumo de energía mes de noviembre.

Nota: Tomada de parte del cliente

Dado lo anterior, se hace ver la importancia del estudio de calidad de la energía que se llevó a cabo en SE de Tasajera 1 y SE de EDS Belén; estas subestaciones presentaron las siguientes observaciones y/o recomendaciones.

relación entre energía activa y reactiva inductiva Según la resolución CREG 108 de 1997 Parágrafo 3°, NO CUMPLE para las medidas y periodo realizado.

La relación entre energía activa y reactiva capacitiva Según la resolución CREG 015 de 2018 capitulo 12, NO CUMPLE para las medidas y periodo realizado.

El factor de potencia inductivo se encuentra por debajo de lo establecido (0,9), con un promedio total de 0.50. Se observan intervalos de tiempo considerables donde el factor de potencia es capacitivo por encima de 1.00 sin embargo, es de notar que estas fluctuaciones se generan por la apertura y cierre del motor, cuando se estabiliza la corriente del motor, el factor de potencia es ideal cumpliendo con CREG 108 de 1997 Parágrafo 3°.

Del periodo de consumo en corriente se puede afirmar que son valores normales de acuerdo Con la carga cuando se estabiliza, sin embargo, es de notar que cuando el motor del compresor arranca se eleva una corriente instantánea a valores muy altos.

VII. CONCLUSIONES

En conclusión, la participación en el semestre de industria ha permitido alcanzar de manera satisfactoria los objetivos específicos propuestos, brindando un panorama integral sobre la problemática asociada a la energía reactiva.

Se logró un profundo entendimiento de la normativa establecida en la resolución CREG 015 de 2018, Capítulo 12, que sirve como piedra angular para comprender la metodología del costo de transporte excesivo de energía reactiva. Este análisis ha proporcionado la base normativa necesaria para abordar la problemática y proponer soluciones acordes con los lineamientos establecidos.

Las mediciones realizadas en las diferentes estaciones de servicio de GNV arrojaron datos valiosos sobre variables relacionadas con la calidad de la energía. Se identificaron problemas asociados a la energía reactiva, como desbalances en la carga y factor de potencia inadecuado. Estos hallazgos brindan información detallada que sirvieron como punto de partida para la implementación de soluciones específicas

La comparación de los costos asociados con la implementación de las soluciones propuestas frente a los beneficios esperados ha proporcionado una visión clara de la viabilidad económica y la eficiencia energética de dichas soluciones. Se ha demostrado que las medidas propuestas no solo cumplen con los requisitos normativos, sino que también representan un ahorro económico significativo a largo plazo.

En resumen, este trabajo no solo ha abordado de manera integral la problemática de la energía reactiva en estaciones de servicio de GNV, sino que también ha proporcionado soluciones prácticas y eficientes. La consecución exitosa de los objetivos específicos confirma la relevancia y la aplicabilidad de las medidas propuestas, contribuyendo así al mejoramiento de la eficiencia energética y al cumplimiento de las normativas vigentes en este sector.

III. REFERENCIAS

- [1] DRECRETO 1260 DE 2013, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, BOGOTÁ COLOMBIA, 1998. Accedido el 27 de enero de 2024.
- [2] “Energía reactiva”. Clientes y usuarios. Accedido el 25 de enero de 2024.
- [3] smk_admin. “Conoce todo lo que debes saber sobre energía reactiva. ¿Por qué se refleja este cobro en la factura de tu empresa?” Celsia. Accedido el 27 de enero de 2024.
- [4] SMK_ADMIN. Resolución CREG 015 DE 2018. Celsia [página web]. (26, febrero, 2021). [Consultado el 5, septiembre, 2023].
- [5] “Calidad de energía: definición, por qué y cómo la medimos | Hioki”. Hioki : Corporate | World-class Test & Measurement Equipment. Accedido el 27 de enero de 2024.
- [6] “Sede electrónica Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)”. Portal CREG. Accedido el 25 de enero de 2024.
- [7] “Armónicos eléctricos - CIRCUTOR”. CIRCUTOR. Accedido el 28 de enero de 2024. [En línea].