



**ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN
LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA**

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica

Jhon Eduardo García Aricapa

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesor

Johnatan Mauricio Rodríguez Serna, Doctor (PhD) en Ingeniería Eléctrica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	García Aricapa [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	J. García Aricapa, “ANÁLISIS Y COMPENSACIÓN DE FACTOR DE POTENCIA EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.



Superintendente de Confiabilidad, Aris Mining Segovia: Cesar Alfonso Moreno Ayala.

Jefe de Gestión de Energía, Aris Mining Segovia: Helberth Fabian León Dávila.

Profesor, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia: Johnatan Mauricio Rodríguez Serna.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

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

A mi familia, por la motivación, el apoyo y el fundamento de principios que son guía para nuevos objetivos.

Agradecimientos

A Dios por ser el camino de vida, a mi familia por ser incondicionales, a la Universidad de Antioquia por contribuir en mi formación profesional, sincera gratitud a la Empresa Aris Mining Segovia y al equipo de Confiabilidad, por el aprendizaje, respeto y bienestar.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
I. INTRODUCCIÓN.....	12
II. OBJETIVOS.....	14
A. Objetivo general.....	14
B. Objetivos específicos.....	14
III. MARCO TEÓRICO.....	14
IV. METODOLOGÍA.....	20
V. RESULTADOS.....	22
VI. ANÁLISIS.....	59
VII. CONCLUSIONES.....	63
VIII. RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS.....	66
ANEXOS.....	69

LISTA DE TABLAS

TABLA I COMPORTAMIENTO DE LA VARIABLE M	32
TABLA II CONSUMO TOTAL DE LA ENERGÍA.....	32
TABLA III COSTO TOTAL DE LA ENERGÍA	33
TABLA IV RESUMEN DEMANDA DE ENERGIA	36
TABLA V LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE TENSIÓN (THD _v).....	39
TABLA VI VALORES DE DISTORSION ARMÓNICA TOTAL MARIA DAMA	39
TABLA VII VALORES DE DISTORSION ARMÓNICA TOTAL EL SILENCIO	41
TABLA VIII POTENCIA REACTIVA A COMPENSAR (kVAr).....	44
TABLA IX POTENCIA REACTIVA A COMPENSAR RED MARIA DAMA EN BT	44
TABLA X POTENCIA REACTIVA A COMPENSAR RED EL SILENCIO EN BT	45
TABLA XI CARACTERISTERISTICAS PRELIMINARES DE BANCOS DE CAPACITORES EN MT CON REACTOR	46
TABLA XII CARACTERISTERISTICAS PRELIMINARES DE BANCOS DE CAPACITORES EN BT CON REACTOR – 30% S _n	47
TABLA XIII CARACTERISTERISTICAS PRELIMINARES DE BANCOS DE CAPACITORES EN BT CON REACTOR – FP = 0,95 P.U	49
TABLA XIV ESTADO ACTUAL DE LOS BANCOS DE CONDENSADORES AUTOMÁTICOS.....	51
TABLA XV CONSUMO DE POTENCIA DE LA RED BAJO ANÁLISIS.....	53
TABLA XVI GENERACIÓN DE POTENCIA DE LA PCH.....	53
TABLA XVII SIMULACIÓN EN MEDIA TENSION	56
TABLA XVIII SIMULACIÓN EN BAJA TENSION	57

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Triángulo de potencia	16
Fig. 2. Comportamiento de la variable M	19
Fig. 3. Diagrama Unifilar simplificado red de la mina El Silencio.....	22
Fig. 4. Subestación de 44 kV mina el Silencio.....	24
Fig. 5. Conexión analizador Celda de medida	24
Fig. 6. Señalización de puntos de interés	25
Fig. 7. Perfil de energía activa consumida	26
Fig. 8. Costo kWh para cada mes.....	27
Fig. 9. Costo mensual de la energía activa.....	28
Fig. 10. Perfil de energía reactiva	28
Fig. 11. Perfil de los excesos de energía reactiva inductiva.....	29
Fig. 12. Cargos SDL liquidados en el mes	30
Fig. 13. Costos de los excesos de energía reactiva inductiva por mes	31
Fig. 14. Costo de energía reactiva capacitiva por mes	31
Fig. 15. Perfil del Factor de Potencia	34
Fig. 16. Perfil de energía reactiva generada en la PCH Doña Teresa	34
Fig. 17. Comparativa del consumo de energía activa	35
Fig. 18. Comparativa de energía activa total consumida	36
Fig. 19. Perfil de FP de operación PCH	37
Fig. 20. Perfiles de potencia total promedio.....	38
Fig. 21. Perfil de FP planta Maria Dama.....	39
Fig. 22. Potencia promedio total circuito Maria Dama	40
Fig. 23. Perfil de FP circuito mina el Silencio	41
Fig. 24. Perfil de excesos de potencia reactiva a compensar	44
Fig. 25. Zoom al diagrama unifilar en ETAP.....	52
Fig. 26. Modelo de red elaborado en ETAP.....	54
Fig. 27. Simulación alternativa en MT.....	55
Fig. 28. Parte del circuito en BT red mina El Silencio.....	57
Fig. 29. Condensador Síncrono ABB.....	71

Fig. 30. Imagen ilustrativa del DVR	71
Fig. 31. Banco automático de condensadores	71
Fig. 32. Imagen ilustrativa SVC.....	71
Fig. 33. Banco de capacitores fijo	71
Fig. 34. Banco automático de condensadores tipo poste – MT.....	71
Fig. 35. Ilustración de la compensación individual.....	72
Fig. 36. Ilustración de compensación en grupo.....	72
Fig. 37. Ilustración de compensación central o global	72
Fig. 38. Barraje de la subestación eléctrica de 44 kV	73
Fig. 39. Parte del circuito de alimentación planta Maria Dama	74
Fig. 40. Parte del circuito de alimentación planta mina el Silencio	75
Fig. 41. Parte del circuito de alimentación planta mina el Silencio	76
Fig. 42. Parte del circuito de alimentación planta mina el Silencio	77

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

A	Amperio
ANSI	American National Standards Institute - Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
BT	Baja Tensión
CA	Corriente Alterna
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
EPM	Empresas Públicas de Medellín
FACTS	Flexible AC Transmission System - Sistema flexible de transmisión de corriente alterna
FP	Factor de Potencia
FPD	Factor de Potencia de Desplazamiento
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
LAC	Liquidación y Administración de Cuentas
MT	Media Tensión
OR	Operador de Red
PhD	Philosophiae Doctor – Doctor en Filosofía
PCH	Pequeña Central Hidroeléctrica
p.u.	Por unidad
RMS	Root Mean Square - Raíz Media Cuadrática
SDL	Sistema de Distribución Local
STATCOM	Static Synchronous Compensator - Compensador síncrono estático
STN	Sistema de Transmisión Nacional
STR	Sistema de transmisión Regional
THD	Total Harmonic Distortion - distorsión armónica total
UdeA	Universidad de Antioquia
UPS	Uninterruptable Power Supply - fuente de alimentación ininterrumpida
V	Voltio
VA	Voltio-Amperio

VA

Voltio-Amperio-reactivo

W

Watts - Vatio

RESUMEN

El presente documento corresponde al informe final de prácticas realizado en la empresa ARIS Mining de Segovia, Antioquia. Se presentan resultados del estudio de FP y compensación de reactivos en la barra de 44 kV de una subestación en la cual se tiene la frontera comercial con el operador de red. Esta instalación presenta grandes inconvenientes en el transporte de excesos de energía reactiva; al ser un mercado no regulado las mediciones se realizan de manera horaria y las variaciones en la demanda de potencia hacen que el control de los excesos sea complejo y requiera de métodos de compensación dinámicos y que se incorporen sistemas de control adecuados para mantener el FP en un valor de referencia.

Se utilizó una metodología de investigación cuantitativa reuniendo información de históricos reportados por EPM y mediciones en puntos estratégicos de la red, analizando el comportamiento del flujo de potencia, identificando los puntos de inflexión en la demanda de energía, proponiendo alternativas de solución para corrección del FP en la frontera comercial con EPM y determinando un promedio de consumo de potencia activa y reactiva con el cual se realizaron simulaciones. Así mismo, se presentan las condiciones mínimas para la compensación de reactivos y se recopiló la información de los recursos disponibles como son los bancos de capacitores automáticos ya instalados en baja tensión, sus condiciones operativas y estado general. Se concluye, como clave fundamental en la minimización de los costos por transporte de reactivos en la red, que son necesarias la estandarización e instalación de nuevos bancos de condensadores y el inventario de las condiciones actuales de los bancos en las subestaciones, además, debe hacerse mayor aprovechamiento de la energía disponible no transformada en la PCH y es necesaria la automatización de los mismos.

Palabras clave — Calidad de la energía, compensación de reactivos, factor de potencia, generación PCH, minimización de costos, optimización del FP, penalizaciones por excesos de reactivos.

ABSTRACT

This document corresponds to the final report of practices carried out in the company ARIS Mining of Segovia, Antioquia. Results of the study of FP and compensation of reagents in the 44 kV bar of a substation in which the commercial border with the network operator is held. This installation has great drawbacks in the transport of excess reactive energy; Being an unregulated market, measurements are made hourly and variations in power demand make the control of excesses complex and require dynamic compensation methods and the incorporation of adequate control systems to maintain the FP at a reference value.

A quantitative research methodology was used, gathering information from historical reports by EPM and measurements at strategic points of the network, analyzing the behavior of the power flow, identifying the turning points in the energy demand, proposing alternative solutions for correction of the FP in the commercial border with EPM and determining an average of active and reactive power consumption with the which simulations were performed. Likewise, the minimum conditions for the compensation of reagents are presented and the information of the available resources was collected, such as the banks of automatic capacitors already installed in low voltage, their operating conditions and general condition. It is included, as a fundamental key in the minimization of the costs for transporting reagents in the network, that the standardization and installation of new capacitor banks and the inventory of the current conditions of the banks in the substations are necessary, in addition, it must be done greater use of the available energy not transformed in the PCH and it is necessary to automate them.

Keywords — Power quality, reactive compensation, power factor, PCH generation, cost minimization, PF optimization, penalties for reactive excess.

I. INTRODUCCIÓN

La relevancia que ha tomado actualmente el concepto de calidad de la energía[1], se debe al crecimiento de la demanda de energía eléctrica y a la preocupación por garantizar altos estándares de abastecimiento y eficiencia. Las empresas han optado por llevar a cabo análisis y estudios de calidad de la energía con el fin de optimizar sus procesos y minimizar los costos generados por las pérdidas y las penalizaciones por el transporte de energía reactiva en la red[2]. En la operación de los sistemas eléctricos, es indispensable mantener la regulación de tensión y el factor de potencia dentro de rangos debidamente establecidos por los operadores de red, para ello se lleva a cabo la compensación de reactivos utilizando, comúnmente, bancos de capacitores. De igual manera, muchas empresas deciden instalar motores síncronos sobreexcitados que operan en vacío e inyectan potencia reactiva en la red para corregir el factor de potencia [3]. Ahora bien, otra manera de regular la tensión mediante la compensación de potencia reactiva, es la implementación de compensadores estáticos de potencia reactiva, sistemas flexibles de transmisión en CA (FACTS- por sus siglas en inglés), incluso se puede emplear el uso de compensadores síncronos estáticos (STATCOM - por sus siglas en inglés), los cuales poseen almacenamiento de energía para la compensación de potencia activa y reactiva, la regulación de tensión y la disminución de las afectaciones producto de las perturbaciones en el sistema eléctrico[4]. En la industria, predomina el uso de bancos automáticos de condensadores especialmente en el sector minero donde la demanda de energía varía con respecto a la producción y las distintas contingencias que se dan en las redes de distribución eléctrica[5].

El trabajo se centra en el estudio de la calidad de la energía, con relación a la corrección del factor de potencia en el barraje de 44 kV de la Subestación la Cruzada, frontera comercial de EPM, en donde se llevan a cabo las mediciones para la facturación de los servicios de energía eléctrica para la Empresa Aris Mining Segovia, se elige la red de la mina el Silencio y la planta de beneficio Maria Dama porque esta se encuentra conectada mediante un nodo de interconexión a la red de EPM y la PCH Doña Teresa, mientras que las redes de alimentación de la mina Providencia, mina Sandra K y mina Carla, se encuentran conectadas directamente a la red de EPM, a 13,2 kV. Con base en lo anterior, se proponen alternativas de solución que permiten optimizar el FP, mediante la compensación de la potencia reactiva que se inyecta como excedentes en la red y que causan penalizaciones económicas para la empresa. La metodología consiste en analizar datos históricos,

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 13

facturaciones y costos, monitoreo del FP en puntos estratégicos, análisis de excesos de energía reactiva, simulación del circuito de la red bajo análisis en busca de los nodos óptimos para la ubicación de bancos de capacitores y la evaluación de alternativas para la compensación de reactivos que sean eficientes, de bajo costo y viables para su implementación. Al mismo tiempo, establecer un reporte del estado de los bancos de condensadores instalados en la red, que permita identificar las causas que influyen en la problemática de los excesos de energía reactiva y los costos por penalizaciones. No se profundiza en los diseños de los bancos de condensadores dependiendo de las alternativas en baja y media tensión, tampoco se realiza una cotización para la adquisición de nuevos bancos de capacitores.

II. OBJETIVOS

A. *Objetivo general*

Realizar el análisis del factor de potencia y de compensación de reactivos en la barra de 44 kV de la subestación La Cruzada de la empresa Aris Mining Segovia.

B. *Objetivos específicos*

Monitorear el factor de potencia en la frontera comercial de EPM en la subestación la Cruzada en la barra de 44kV, con la finalidad de usarse en estudios de factor de potencia.

Hacer el seguimiento técnico y el registro estadístico de las variables medidas para determinar variaciones, hacer validaciones y comparar resultados.

Realizar un estudio para la determinación de una solución técnico-económica de corto plazo que permita minimizar las penalizaciones por consumo de potencia reactiva.

Presentar el informe correspondiente a la solución propuesta.

III. MARCO TEÓRICO

La calidad de la energía, como tema de estudio, abarca múltiples problemáticas que impactan directamente el funcionamiento de los sistemas de potencia, causan repercusiones técnicas y económicas con respecto a la vida útil de los equipos, el aumento en el consumo de energía y en los costos de mantenimiento y operación de los equipos. Según se describe en [6], existe un problema de calidad de la energía cuando ocurre una desviación en los niveles de tensión, corriente o frecuencia provocando la inadecuada operación de los equipos de uso final, deteriorando el consumo y bienestar de los usuarios; así mismo, cuando se produce la interrupción del suministro de energía eléctrica.

C. *Factor de potencia.*

Dentro de las problemáticas más relevantes en la operación de los sistemas de potencia se encuentra el bajo factor de potencia que se pueda presentar en las instalaciones eléctricas. Como consecuencia, los excesos de energía reactiva suelen ser penalizados, aumentando costos en la facturación del servicio de energía eléctrica. Algunas de las consecuencias tanto en alta tensión como en baja tensión que provoca este fenómeno eléctrico están relacionadas con el calentamiento de embobinados en transformadores de distribución, disparo de los dispositivos de protección,

sobrecarga de generadores, transformadores y líneas de distribución, mayor caída de tensión, aumento en el consumo de corriente, aumento en el consumo de potencia debido a las pérdidas[7].

1. *Potencia Activa.*

La potencia activa o potencia real es aquella en la que en el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo, sus unidades son el W y se simboliza con la letra P[7].

2. *Potencia reactiva.*

La potencia reactiva se encarga de generar el campo magnético que requieren los equipos eléctricos para su funcionamiento, como es el caso de los motores y los transformadores. Se expresa en unidades de VAR, se simboliza con la letra Q[7].

3. *Potencia Aparente.*

Es la potencia eléctrica que realmente es absorbida por la carga y se puede obtener mediante la suma geométrica de la potencia activa y la potencia reactiva, de forma similar se puede calcular como el producto de los valores de tensión y corriente, se expresa en unidades de VA, y se simboliza con la letra S[7].

4. *Generalidades para el concepto de Factor de Potencia.*

Se conoce como FP a la relación entre la potencia activa y la potencia aparente, las instalaciones que poseen grandes cantidades de máquinas eléctricas, con comportamiento de carga no lineal, debido a la distorsión armónica; presentan un bajo factor de potencia, además de pérdidas en potencia activa por el transporte de potencia reactiva en la red. Este aspecto influye en el exceso de energía reactiva y su penalización, por lo que es necesario, el uso de medidas correctivas, por ejemplo, la instalación de banco de condensadores, una tecnología que además de mejorar el factor de potencia y la caída de tensión en la red, la hace más eficiente[8].

La Ecuación (1), muestra el cálculo del factor de potencia en función de la potencia activa, reactiva y la distorsión armónica[9].

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1)$$

Cuando la onda de corriente alterna es perfectamente senoidal el FP y $\cos(\varphi)$ coinciden.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos(\varphi) \quad (2)$$

No obstante, cuando la onda no es perfectamente senoidal por la presencia de armónicos, existe una componente conocida como potencia de distorsión (D). En la Figura 1, se observa que el triángulo de potencia es tridimensional, esto se debe a que en las instalaciones eléctricas pueden existir cargas no lineales, para nombrar algunas, componentes electrónicos, UPS, variadores de velocidad y computadoras. Lo que genera corrientes armónicas y por consiguiente potencia de distorsión [8].

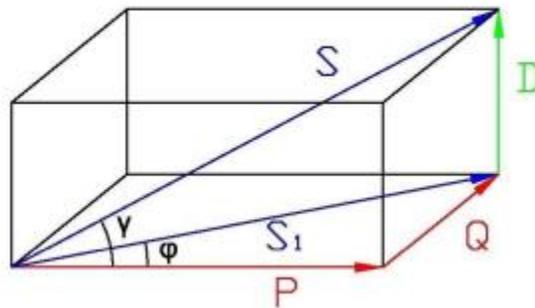


Fig. 1. Triángulo de potencia

Nota: Fuente[8]

5. Corrección del Factor de Potencia.

Para la corrección del factor de potencia, es necesario realizar la compensación de potencia reactiva que se transporta en exceso por la red, además de filtrar los armónicos que suman pérdidas de potencia causadas por la distorsión de las señales de corriente y tensión. Es indispensable integrar tecnologías de compensación óptimas que puedan automatizarse para obtener un mayor control del flujo de reactivos en la red [10]. Algunos ejemplos de tales tecnologías son:

- ✓ Dispositivos dinámicos de compensación de reactivos.
- ✓ Dispositivos convertidores de compensación.
- ✓ Dispositivos estáticos de compensación continua.
- ✓ Dispositivos estáticos de compensación escalonada.
- ✓ Dispositivos estáticos de compensación fija.

5.1. Corrección de FP.

Para el dimensionamiento de los bancos de capacitores se emplea la Ecuación (3) [9].

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)) \quad (3)$$

donde Q_c es la potencia reactiva a compensar, Q_1 es el valor de potencia reactiva inicial y Q_2 es el valor de potencia reactiva final o de referencia.

A partir del resultado obtenido con la Ecuación (3), la capacitancia requerida en Faradios para una conexión en estrella, se puede determinar mediante la Ecuación (4)[9].

$$C_Y = C = \frac{Q_c}{2\pi * f * U^2} \quad (4)$$

donde C es la capacitancia en F, Q_c es la potencia reactiva en VAr, f es la frecuencia Hz y U es la tensión nominal en V. Para una conexión en delta se utiliza la Ecuación (5)[9].

$$C_\Delta = \frac{C}{3} = \frac{Q_c}{6\pi * f * U^2} \quad (5)$$

Para conocer el valor de la potencia reactiva de salida se puede emplear la Ecuación (6)[9].

$$Q_{op} = Q_R * \left(\frac{V_A}{V_R}\right)^2 \quad (6)$$

donde Q_{op} , se define como la potencia reactiva de operación del capacitor medida en kVAr, Q_R es la potencia reactiva nominal del capacitor en kVAr, V_A es la tensión aplicada y V_R es la tensión nominal [9].

Para evitar los problemas de resonancia en la instalación de bancos de condensadores, se suelen instalar reactores en serie con los condensadores. Para especificar el reactor a utilizar se utiliza la impedancia relativa usando la Ecuación (7) [9].

$$\frac{f_{LC}}{f_1} = \sqrt{\frac{100}{\rho}} \quad (7)$$

donde f_{LC} es la frecuencia de sintonía en Hz, f_1 es la frecuencia fundamental en Hz y ρ es el factor de sobretensión dado en %. Considerando el quinto armónico como la frecuencia más baja, pero de gran amplitud, se puede elegir una conexión de capacitor - reactor con una frecuencia de sintonización menor a $5f_1$, es decir; un valor de $\rho < 4\%$ [9].

Considerando el aumento de la tensión en el condensador por causa de la conexión en serie del reactor, se puede usar la Ecuación (8) para estimar dicho valor[9].

$$U_c = \frac{UN}{1 - \frac{\rho}{100}} \quad (8)$$

6. *Métodos de corrección de FP utilizando bancos de condensadores.*

Los métodos presentados para la compensación del FP en los diferentes sistemas de potencia usando bancos de condensadores se clasifican dependiendo del punto de conexión y agrupación de la carga, se presentan 3 categorías[11].

- ✓ Compensación Individual.
- ✓ Compensación en grupo.
- ✓ Compensación central.

D. *Penalización por excesos de potencia reactiva.*

7. *Mercado regulado.*

Es directamente contratado y servido por las compañías distribución, abarca usuarios industriales, comerciales y residenciales con una demanda de energía eléctrica inferior a 55 MWh. La estructura tarifaria es establecida por la CREG y en este tipo de mercado se encuentran concentrados casi la totalidad de los usuarios del país. La fórmula de cobro es aprobada por el ente regulador y todos los usuarios son atendidos sin importar el consumo[12].

8. *Mercado no regulado.*

En este tipo de mercado participan voluntariamente la industria y todos aquellos usuarios que posean un alto consumo de energía eléctrica; las demandas de energía suelen ser superiores a 55 MWh/mes, o demanden una potencia mayor o igual a 0,1 MW. A diferencia del mercado regulado las tarifas de comercialización y generación son pactadas libremente mediante negociaciones entre los consumidores y el comercializador[12].

9. *Costos por transporte de energía reactiva.*

Según [10], se calcula el costo de transporte de energía reactiva mediante la Ecuación (9). Ver anexo A.

$$CTER_{u,n,h,m,j} = ER_{u,h,m,j} * M * D_{n,h,m} \quad (9)$$

La Figura 2(**Fig. 2**), representa el comportamiento de la variable M en el tiempo a medida que se van presentando los excesos de energía reactiva en la red.

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 19

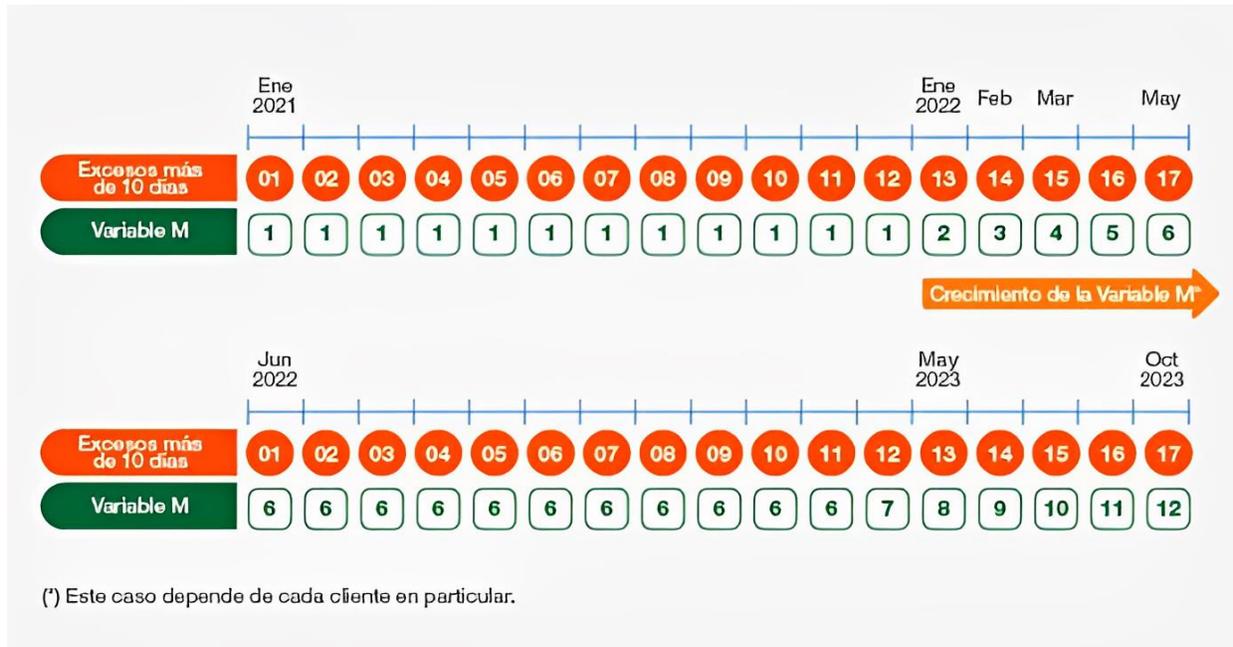


Fig. 2. Comportamiento de la variable M

Nota: Imagen tomada de <http://bit.ly/3nxsh5D>

El 50% de los valores en el costo de transporte de energía reactiva deben ser reportados al LAC para ser restados de la liquidación de ingresos, aspecto económico mencionado en el capítulo 2, de la resolución CREG 015 de 2018. Se exceptúa el pago del costo de transporte de energía reactiva a las plantas generadoras, quienes se encuentran obligadas a participar en el control de la tensión por medio de la generación y absorción de potencia reactiva [13]. Según, la misma fuente [13], en los primeros 10 días calendario de cada año en cada nivel de tensión, el OR deberá reportar al LAC el valor de la variable $IReactiva_{j,n,t}$. Ecuación (10). Ver anexo A.

$$IReactiva_{j,n,t} = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^U \sum_{m=1}^{12} \sum_{h=1}^{24} CTER_{u,n,h,m,j,t-1} \quad (10)$$

IV. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la práctica se empleó una metodología de investigación cuantitativa, reuniendo información del portal para clientes corporativos de EPM y realizando mediciones en la subestación principal de 44 kV de la empresa para determinar un promedio de potencia activa y reactiva en la carga, se simuló el escenario de máxima demanda de potencia tanto para la generación como para la demanda en los intervalos de tiempo en los que se realizaron las mediciones, cumpliendo con los objetivos propuestos, se ejecutaron diferentes pasos a seguir dando claridad sobre los procedimientos empleados.

E. Planteamiento del problema.

Se identificó la problemática a abordar que se centra en los registros de excesos de energía reactiva y los costos por penalizaciones, buscando la corrección del FP en la frontera comercial que se presenta como un desafío dadas las limitaciones para establecer una referencia de medida con el que se puedan automatizar los sistemas de compensación ya instalados, además que respondan dinámicamente ante las variaciones en la carga y los efectos de la generación en la PCH.

F. Revisión general del circuito Unifilar.

Se realizó el estudio del diagrama unifilar de la red bajo análisis, identificando la potencia instalada, ubicando las distribuciones de carga, ubicando subestaciones y determinando puntos factibles de medición del FP. Así mismo, elaborando el circuito en el Software ETAP para realizar simulaciones de flujo de carga.

G. Recolección de datos del portal.

Se empleó el método de recolección de datos basado en documentos y registros históricos reportados en el portal de EPM, y toma de medidas usando el analizador Fluke 1777 en la subestación de 44 kV de la mina El Silencio en la Empresa Aris Mining Segovia.

H. Revisión de datos históricos.

Se aplicó el método de análisis estadístico descriptivo, para determinar tendencias en los datos obtenidos. Se buscó realizar un comparativo del factor de potencia, perfiles de demanda de potencia activa y reactiva, y los costos derivados por los excesos de energía reactiva inductiva y capacitiva.

I. Revisión de datos del analizador.

Fue necesario para las aplicaciones de simulación conocer las características de la demanda de energía eléctrica, se estableció un promedio de consumo de potencia activa y reactiva, se revisaron los porcentajes de distorsión armónica para determinar si existe la necesidad de conectar reactores en serie con los condensadores, así mismo, conocer los nivel de potencia reactiva de distorsión y el FPD.

J. Dimensionamiento básico de bancos de capacitores.

Con el fin de dimensionar las características técnicas principales de los bancos de capacitores que se pueden instalar en media o baja tensión, se realizaron los cálculos de potencia reactiva a compensar y se determinaron las capacidades nominales de los mismos.

K. Revisión del estado actual de los bancos de condensadores.

Con base en la programación de las inspecciones eléctricas de subestaciones en la mina El Silencio, se elaboró el inventario de las condiciones operativas de los bancos de condensadores que actualmente se encuentran en servicio y de igual manera, se realizó un reporte para mantenimiento eléctrico para lograr un mejoramiento en la compensación de reactiva inductiva individual y localizada en baja tensión.

L. Simulación de alternativas de compensación en el Software ETAP.

Con base en el cálculo de las capacidades de los bancos automáticos de condensadores se realizó la simulación de flujo de potencia de acuerdo con diferentes escenarios de operación y la implementación de bancos en los distintos nodos del sistema de potencia.

V. RESULTADOS

F. Revisión general del circuito Unifilar.

En la Figura 3 (**Fig. 3**), se presenta la topología del unifilar en media tensión para mostrar, de manera resumida y compacta, la configuración de la red bajo análisis, además; se presentan los puntos de interés tanto para la optimización del FP, como para la medida de esta variable usando el analizador de redes. El unifilar completo se modeló en el Software ETAP para simular el flujo de potencia bajo unas condiciones de carga determinadas por los datos promedio que se obtuvieron en los intervalos de tiempo en los que se conectó el analizador de redes en la subestación de 44 kV en la mina el Silencio.

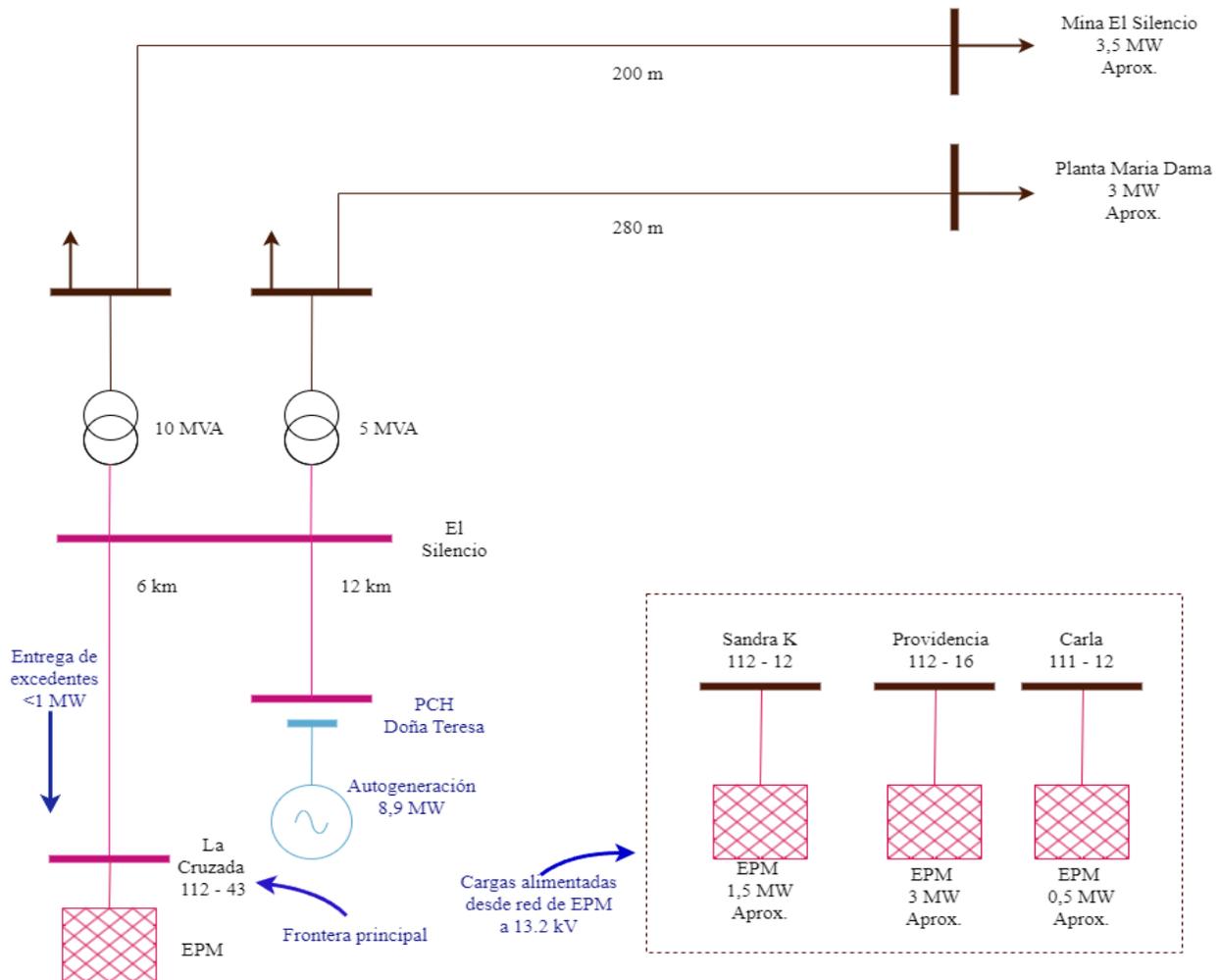


Fig. 3. Diagrama Unifilar simplificado red de la mina El Silencio

Nota: elaborado con base en el diagrama unifilar de la red.

G. Recolección de datos del portal de EPM.

El primer objetivo específico, se centra en la recolección de datos y el monitoreo mediante el uso del analizador de redes, para dar cumplimiento se realizó la búsqueda mediante el uso del portal VIP de EPM, y se conectó el analizador de redes en la subestación de 44 kV por un intervalo de tiempo dependiendo de la disponibilidad del equipo y la programación de mantenimiento preventivo en la subestación.

9. Datos históricos reportados por EPM.

Para la recolección de datos se acudió a la base de datos del portal para clientes corporativos de EPM, en el que se pueden extraer los históricos de mediciones de energía activa consumida, energía activa entregada por la Empresa como excedente, energía reactiva inductiva consumida y energía reactiva capacitiva exportada a la red de EPM. De forma análoga, se descargaron los datos históricos de facturación de energía, para evaluar los costos que se generan por transporte de energía activa y por excesos de energía reactiva inductiva y capacitiva.

10. Captura de datos con el analizador de redes Fluke 1777.

Dentro de la práctica, se realizó la medición del FP en la subestación de 44 kV dentro de las instalaciones de la empresa Aris Mining Segovia, no se logró obtener autorización de EPM para realizar mediciones en la frontera comercial de la subestación La Cruzada, punto donde se desea realizar la optimización del FP. De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se decidió monitorear el FP en el punto de medida que tiene la empresa dentro de las instalaciones y en el que se supervisa por medio de SCADA el comportamiento de los niveles de potencia, tensión y corriente en la red de distribución eléctrica de la empresa. La Figura 4(**Fig. 4**), muestra la subestación de 44 kV dentro de las instalaciones de la mina el Silencio.

Se conectó el analizador en la celda de medida, se realizó el registro en dos intervalos de tiempo, entre el 14 y 29 de diciembre de 2022 se conectó el analizador de redes para la medida del transformador de potencia de 5 MVA, en el circuito de alimentación de la planta de beneficio y transformación de minerales Maria Dama. El segundo intervalo de tiempo, entre el 17 de enero y el 2 de febrero de 2023 se conectó el analizador de redes en la celda medida del transformador de 10 MVA en el circuito de alimentación de la mina El Silencio.

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 24



Fig. 4. Subestación de 44 kV mina el Silencio

Nota: fuente propia.

La Figura 5 (**Fig. 5**), muestra el montaje realizado para el monitoreo del FP, se realizó la conexión en delta [14], con una relación de transformación de corriente igual 200/5 y una relación de transformación de tensión igual a 44.000/110.



Fig. 5. Conexión analizador Celda de medida

Nota: fuente propia.

H. Revisión de datos históricos.

Una vez descargados del portal de EPM los históricos de energía activa de generación y de consumo, la energía reactiva inductiva y capacitiva, se calculó el FP en el punto de medida, en subestación La Cruzada. Para conocer la tendencia de los valores de FP, se realizaron los cálculos

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 25

empleando los datos de energía reportados, dada las condiciones en el cambio de contrato, solamente se tiene acceso a los registros a partir del 26 de mayo de 2022. Con esto se cumplió con el segundo objetivo propuesto sobre el seguimiento técnico y registro estadístico de datos, la comparación entre las medidas obtenidas, la observación de tendencias y la validación de los resultados obtenidos mediante simulación.

11. Consumo de energía activa en la frontera.

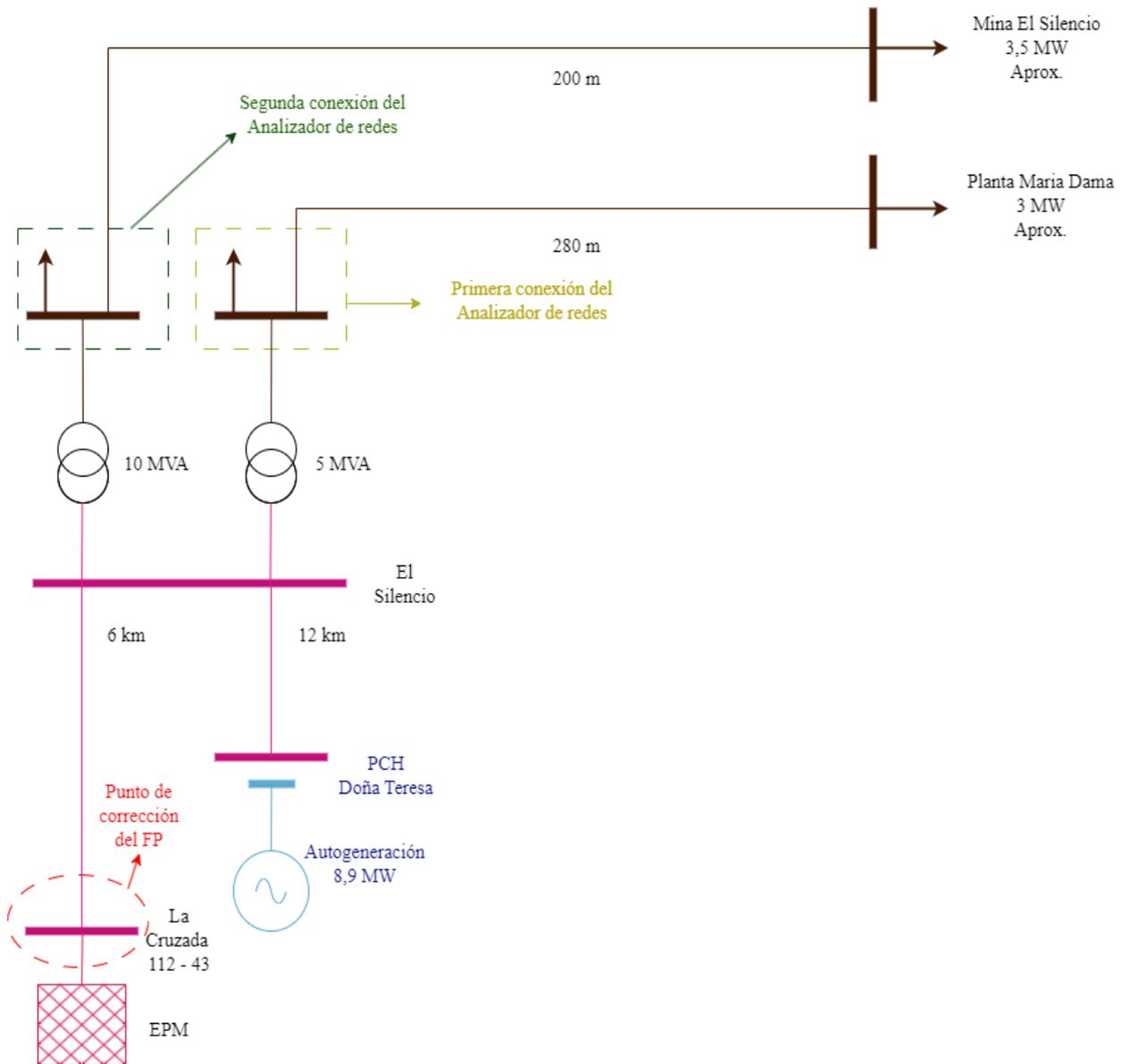


Fig. 6. Señalización de puntos de interés

Nota: elaborado con base en el diagrama unifilar de la red.

La Figura 6(**Fig. 6**), representa de forma simplificada la red de distribución eléctrica de la mina El Silencio y la planta de beneficio Maria Dama, se señalan los puntos de interés, para el análisis del comportamiento del FP en el punto de medida de EPM, y se señalan los puntos de conexión del analizador de redes Fluke 1777, teniendo en cuenta la dificultad para realizar las mediciones en la frontera comercial con EPM. Cabe aclarar, que se realizó solicitud por parte del área de Gestión de la Energía para realizar la conexión del analizador de redes en la subestación La Cruzada, pero no fue posible obtener autorización y realizar las medidas para establecer comparativos con los registros históricos que reporta EPM.

Filtrando los valores en los días donde se presentan contingencias por interrupción del suministro de energía y donde se producen indeterminaciones en los cálculos, se obtuvieron valores diarios y horarios, lo anterior debido a que la red bajo análisis pertenece al mercado no regulado y la facturación de energía se realiza por horas, y así las penalizaciones por los excesos también se realizan de forma horaria. En el momento en que la energía reactiva supera el 50% del valor de energía activa se incurre en exceso.

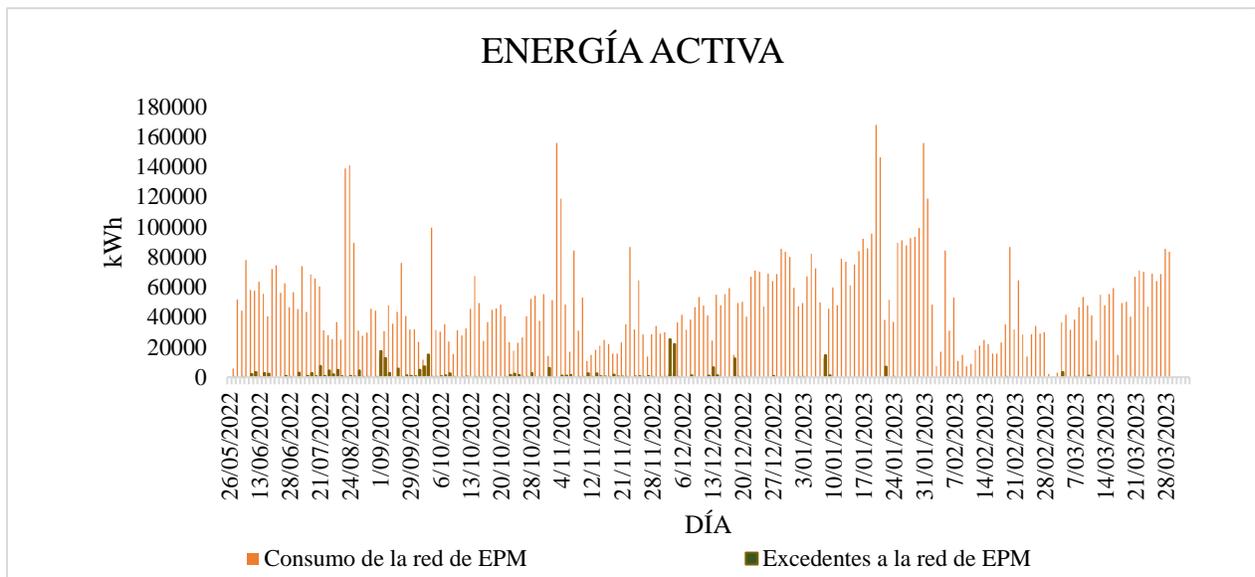


Fig. 7. Perfil de energía activa consumida

Nota: Fuente históricos de datos portal VIP EPM.

Los valores de energía activa demandada (**Fig. 7**) son completamente variables, dependen de las condiciones en la producción de la Empresa y de los equipos que se encuentren operando tanto en una hora, como en un día en específico. La energía activa para los meses en los que se

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 27

efectúa el análisis, se factura de manera horaria, realizando la sumatoria para cada hora del día en los 30 días del mes bajo cuestión. El costo del kWh varía en promedio para cada hora en específico. Para efectuar el cobro de la energía por hora en el mes, se deben tener en cuenta las variaciones en el precio del kWh. De esto depende el costo por hora del total facturado en el mes. Teniendo en cuenta las variaciones de los costos del kWh se muestran los valores para cada mes (**Fig. 8**) con el fin de establecer un comparativo y la tendencia que mantiene el histórico de datos.

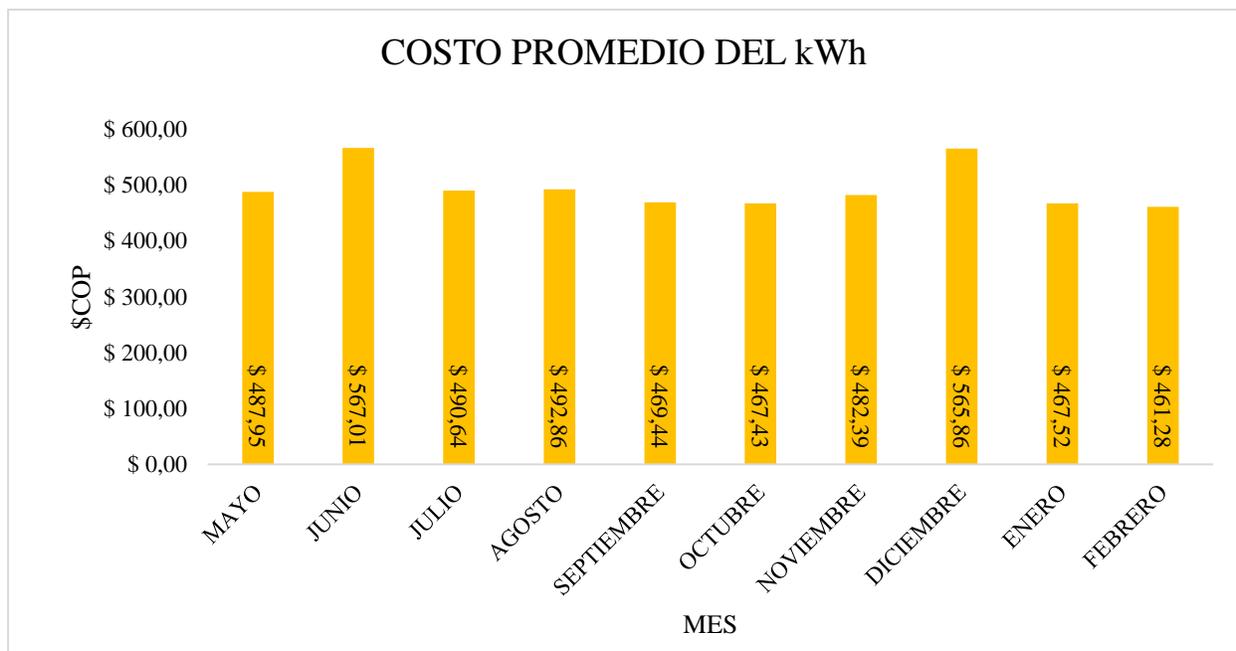


Fig. 8. Costo kWh para cada mes

Nota: Fuente históricos de datos portal VIP EPM.

Los costos mensuales de la energía activa se presentan variables conforme se comporta la demanda en la carga (**Fig. 9**) y los costos del kWh, el mes de febrero de 2023 es el mes con mayor costo en la energía activa liquidada, lo que evidencia el crecimiento en el consumo de energía causado por la repotencialización e instalación de nuevos circuitos, por otra parte; se deben tener en cuenta los paros programados en la producción por contingencias presentadas en la red de alimentación, por mantenimiento programado a los equipos o bien por la generación de la PCH teniendo en donde la autogeneración depende de las variaciones en el caudal disponible y el factor de aprovechamiento del recurso hídrico.

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 28

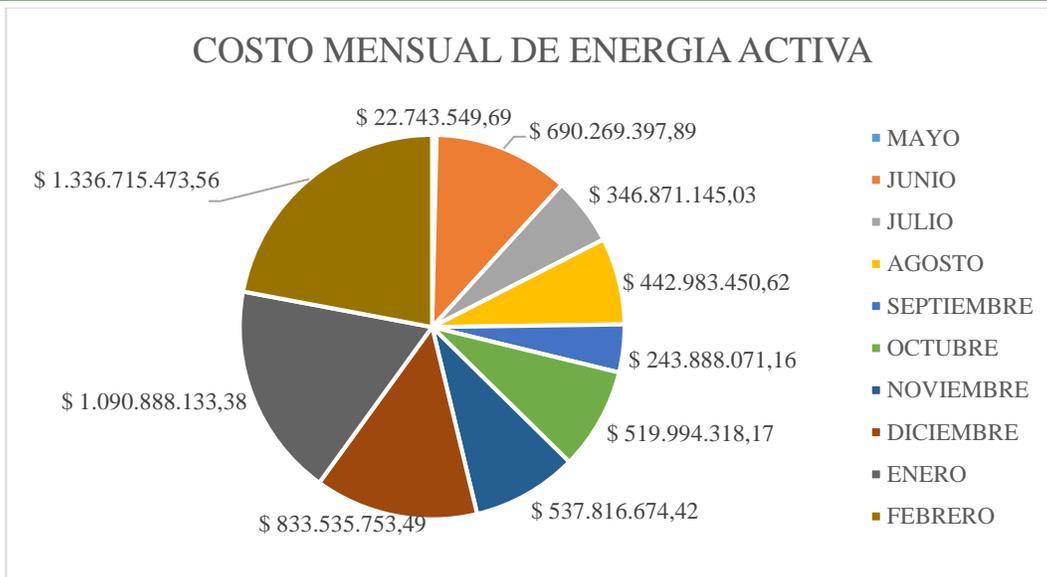


Fig. 9. Costo mensual de la energía activa

Nota: Fuente históricos de datos portal VIP EPM.

12. Transporte de energía reactiva.

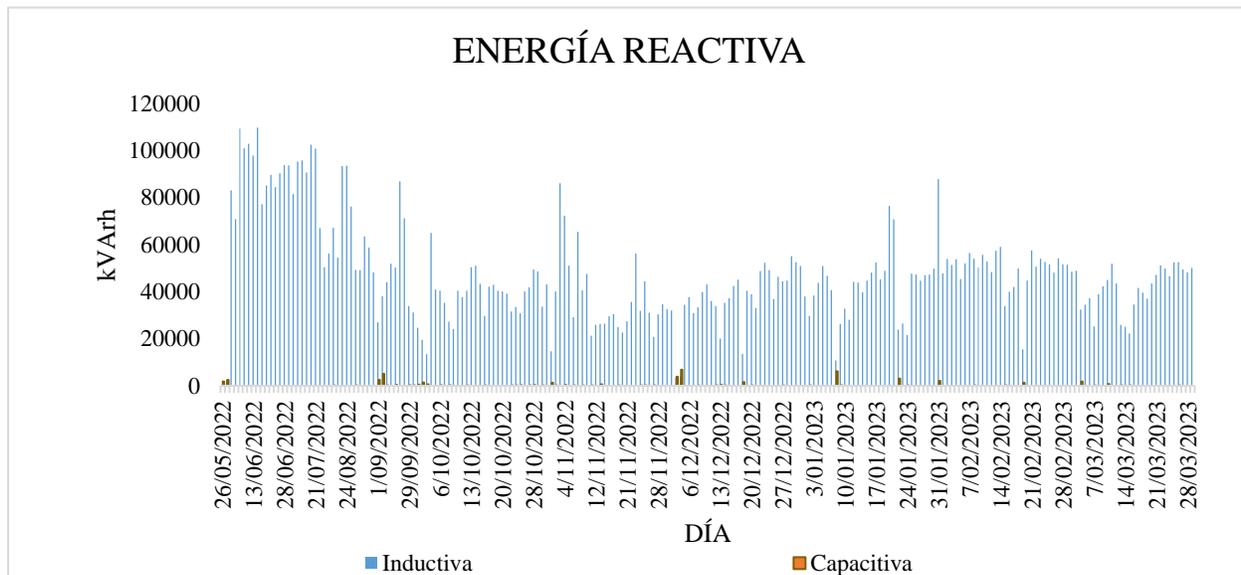


Fig. 10. Perfil de energía reactiva

Nota: Fuente históricos de datos portal VIP EPM.

Para el perfil de energía reactiva capacitiva (**Fig. 10**), en el intervalo de tiempo en el que se filtraron los datos, se puede observar que la mayoría de los días no hubo transporte de energía reactiva capacitiva por la red, por lo que no hubo penalizaciones por los excesos de este tipo de

potencia. Dado que las cargas más relevantes en la producción que demandan reactiva son motores, usados para sistemas de bombeo, elevadoras de mineral y personal, sistemas de ventilación, etc., los bancos aportan potencia reactiva inductiva, y en algunas ocasiones cuando dichos motores no se encuentran operando y si los bancos de capacitores no se encuentran automatizados para realizar una compensación que varíe de acuerdo con el comportamiento dinámico de la carga, se inyecta innecesariamente potencia reactiva capacitiva en exceso.

De forma similar, el perfil de energía reactiva inductiva (**Fig. 10**) evidencia los excesos de este tipo de energía. En el intervalo de tiempo seleccionado se observa que la tendencia a disminuir los excesos de reactivos inductivos se da a partir del 30 de septiembre de 2022, como preocupación ante el incremento de la variable M que multiplica la facturación debido a penalizaciones, ver Ecuación (9), y el mejoramiento en la calidad de la energía por parte del área de Confiabilidad y Gestión de la Energía en la Empresa Aris Mining Segovia.

Se realizó el cálculo de los excesos de energía reactiva (**Fig. 11**), teniendo los valores de energía activa consumida, y energía reactiva inductiva, se comparó el valor de esta última con el 50% del valor de la energía activa consumida, en caso de ser mayor se resta el 50% y así se estima el exceso de energía reactiva inductiva.

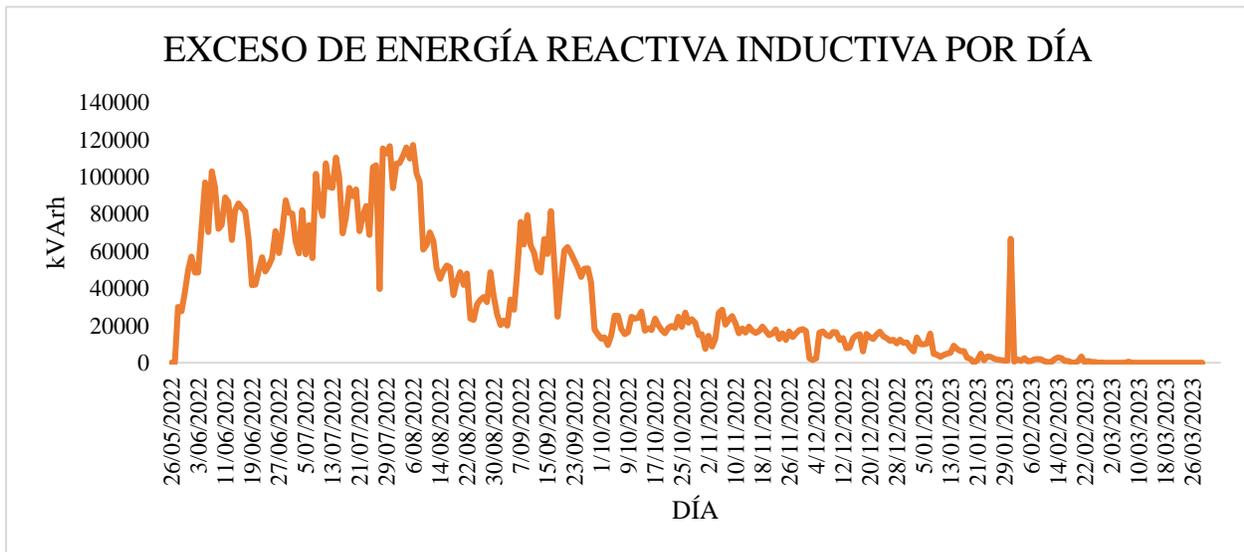


Fig. 11. Perfil de los excesos de energía reactiva inductiva

Nota: Fuente históricos de datos portal VIP EPM.

Con la información que arroja los excesos de energía y con los valores de factor de potencia se pueden determinar los valores de potencia reactiva y las capacitancias que se deben implementar

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 30

en los bancos de capacitores a instalar en cada una de las subestaciones de la red bajo análisis y en los cuales es necesario una adecuada automatización para garantizar una compensación dinámica de acuerdo con las variaciones en la carga. Para continuar con el análisis se presenta de acuerdo con las facturaciones que presenta EPM en su portal para clientes los costos que se han derivado con respecto a los excesos de energía reactiva para la red de suministro eléctrico de la mina El Silencio.

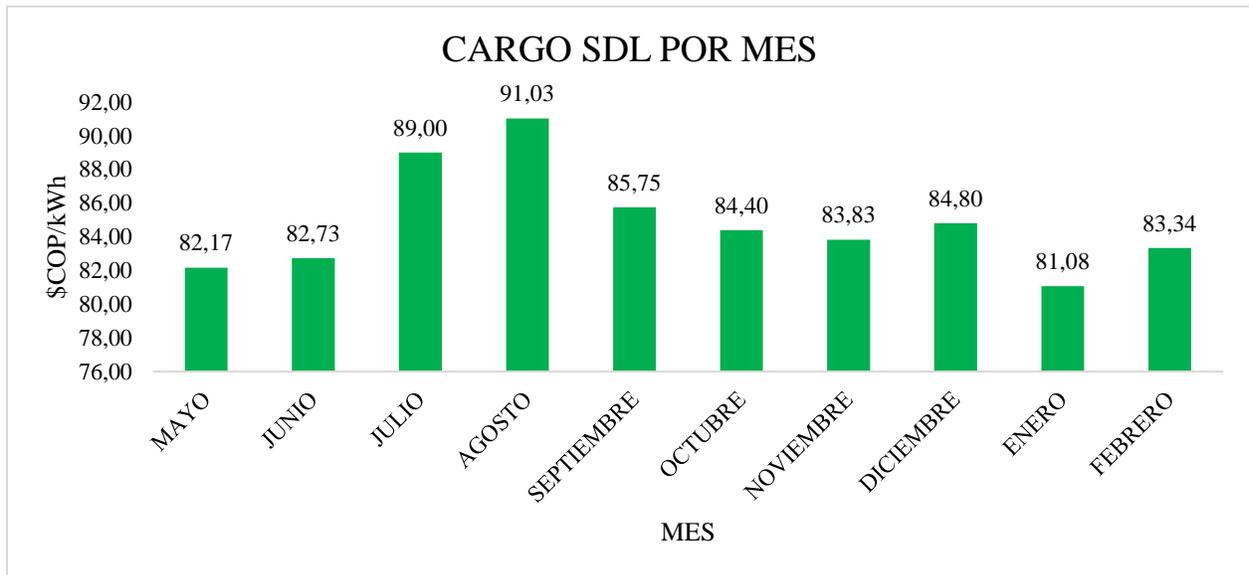


Fig. 12. Cargos SDL liquidados en el mes

Nota: Fuente históricos de datos portal VIP EPM.

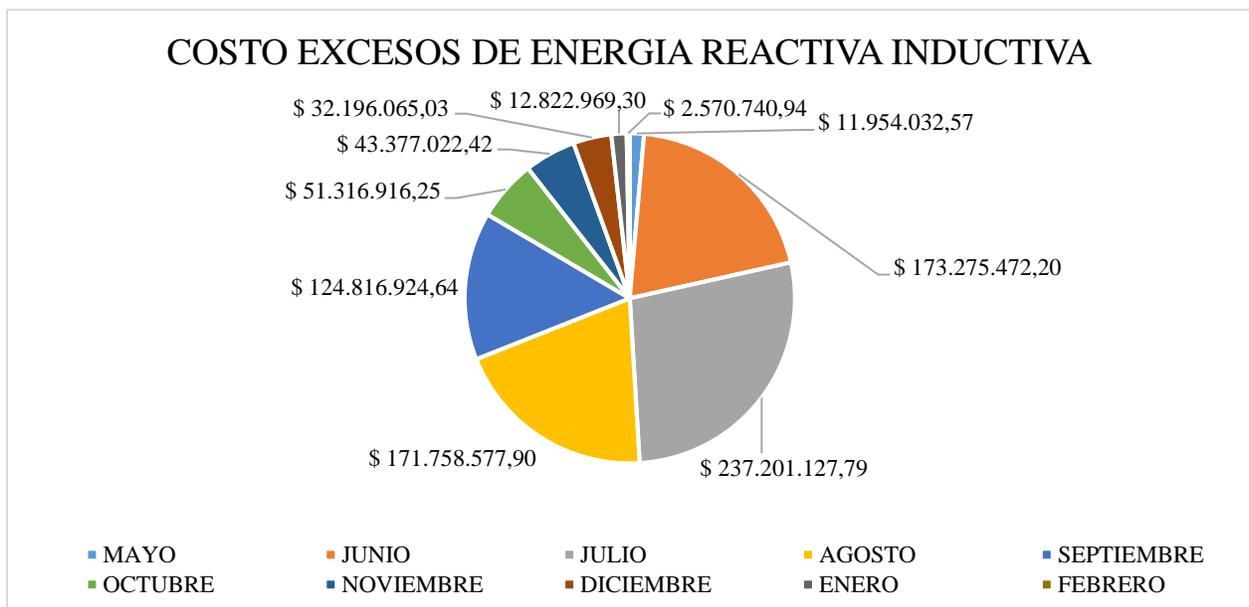


Fig. 13. Costos de los excesos de energía reactiva inductiva por mes

Nota: Fuente históricos de datos portal VIP EPM.

La Figura 12 (**Fig. 12**), muestra las variaciones en el cargo SDL o cargo por el uso de nivel de tensión 3, correspondiente a los costos por transporte de energía reactiva inductiva horaria, y que se mantiene constante en las 24 horas liquidadas en el mes. La Figura 13(**Fig. 13**) presenta los costos calculados para los excesos de energía reactiva inductiva liquidada por mes, con respecto al medidor principal.

Continuando con los costos generados por el transporte de energía reactiva, la Figura 14(**Fig. 14**) contiene los costos de potencia reactiva capacitiva transportada por la red, según la CREG, se debe penalizar el transporte de este tipo de energía en su totalidad sin importar el nivel que indiquen sus cantidades.

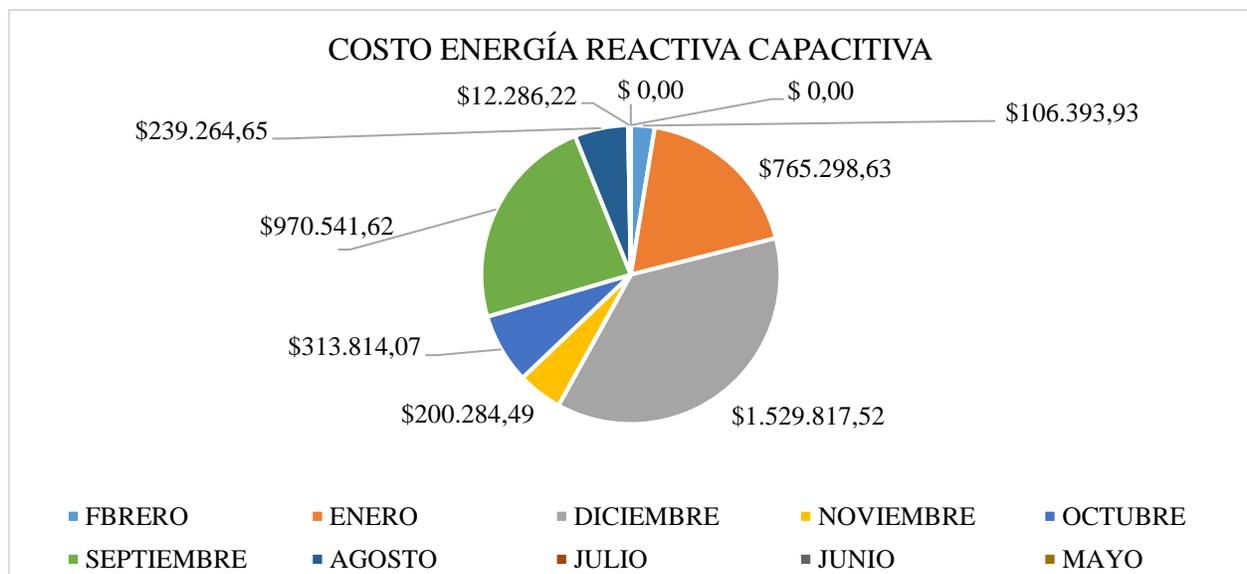


Fig. 14. Costo de energía reactiva capacitiva por mes

Nota: Fuente históricos de datos portal VIP EPM.

La **TABLA I** muestra la cantidad de días con exceso de energía reactiva inductiva para los últimos 11 meses posteriores al cambio de contrato con EPM, además se muestra el comportamiento del factor multiplicador M con el cual se establece la liquidación de los excesos. Según los históricos, el mes de mayo de 2022 solo presenta 5 días de excesos de reactiva inductiva,

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 32

pero durante los 9 meses posteriores se presentan excesos por más de 10 días, y en el mes de marzo del año 2023 solamente hay un día con excesos de reactivos.

TABLA I COMPORTAMIENTO DE LA VARIABLE M

Mes	Cantidad de días con Reactiva	Variable M
Marzo 2023	1	1
Febrero 2023	26	1
Enero 2023	30	1
Diciembre 2022	31	1
Noviembre 2022	30	1
Octubre 2022	31	1
Septiembre 2022	30	1
Agosto 2022	31	1
Julio 2022	31	1
Junio 2022	30	1
Mayo 2022	5	1

Nota: Históricos de número de días con exceso de energía reactiva inductiva y el valor de la variable M.

13. Costo total de la energía consumida en la frontera.

La **TABLA II** presenta el consumo de energía activa, energía reactiva inductiva y capacitiva, junto al consumo de energía activa para los últimos 10 meses.

TABLA II CONSUMO TOTAL DE LA ENERGÍA

Mes	Consumo de energía reactiva inductiva (kVArh)	Consumo de energía reactiva capacitiva (kVArh)	Consumo de energía activa (kWh)
Mayo 2022	145.476,98	14.559,6	46.610,3
Junio 2022	2.094.396,21	875,6	1.217.392,55
Julio 2022	2.665.232,12	138,05	706.973,85
Agosto 2022	1.886.859,74	2.628,45	898.807,8
Septiembre 2022	1.455.543,43	11.317,9	519.532,75
Octubre 2022	607.991,52	3.718	1.112.461,35
Noviembre 2022	517.445,88	2.389,2	1.114.910,15

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 33

Diciembre 2022	379.652,67	18.039,45	1.473.054
Enero 2023	158.156,94	9.439,1	2.333.335,95
Febrero 2023	30.844,61	1.276,55	2.799.442,25
Total	9.941.600,1	64.381,9	12.222.520,95

Nota: totales del consumo de energía para un intervalo de 10 meses.

La **TABLA III** presenta los costos totales por concepto de energía activa, energía reactiva inductiva y energía reactiva capacitiva, para 8 meses del año 2022 y 2 meses del año 2023. En el año 2022, el mes de mayo solo registra 5 días en la liquidación de energía eléctrica por motivo del cambio de contrato, por lo que es el mes con menor costo, seguido del mes de septiembre. El mes de febrero del año 2023, presenta el mayor costo con respecto a los registros de los 9 meses anteriores, y presenta un aumento del 17,5% con respecto al costo de energía del mes de enero del año 2023.

TABLA III COSTO TOTAL DE LA ENERGÍA

Mes	Costo energía reactiva inductiva (\$COP)	Costo energía reactiva capacitiva (\$COP)	Costo energía activa (\$COP)	Total en el mes (\$)
Febrero 2023	2.570.589,00	106.393,93	1.336.715.478,00	1.339.392.460,93
Enero 2023	12.822.969,30	765.298,63	1.090.888.134,69	1.104.476.402,62
Diciembre 2022	32.196.065,03	1.529.817,52	694.613.126,57	728.339.009,12
Noviembre 2022	43.377.022,42	200.284,49	537.816.673,01	581.393.979,91
Octubre 2022	51.316.916,25	313.814,07	519.994.319,04	571.625.049,37
Septiembre 2022	124.816.924,64	970.541,62	243.888.073,76	369.675.540,02
Agosto 2022	171.758.577,90	239.264,65	442.983.450,74	614.981.293,29
Julio 2022	237.201.127,79	12.286,22	346.871.145,01	584.084.559,01
Junio 2022	173.275.472,20	0,00	575.224.497,79	748.499.970,00
Mayo 2022	11.954.032,57	0,00	22.743.549,02	34.697.581,59
Total	\$ 861.289.697,10	\$ 4.137.701,12	\$ 5.811.738.447,63	\$ 6.677.165.845,85

Nota: Costos mensuales y total de la energía para un intervalo de 10 meses.

14. Tendencia del FP.

Con base en los datos suministrados de energía activa y reactiva para el intervalo bajo análisis y de acuerdo con las mediciones históricas, se calculó el factor de potencia (**Fig. 15**) para analizar su comportamiento de acuerdo con los excesos de reactivos que se generan dentro de la

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 34

red y por los que la Empresa incurre en costos por penalizaciones. Para el mes de marzo del año 2023, no se registran excesos de energía reactiva por más de un día, lo que indica un control más eficiente en la demanda de energía reactiva mediante la compensación utilizando la generación en la PCH Doña Teresa.

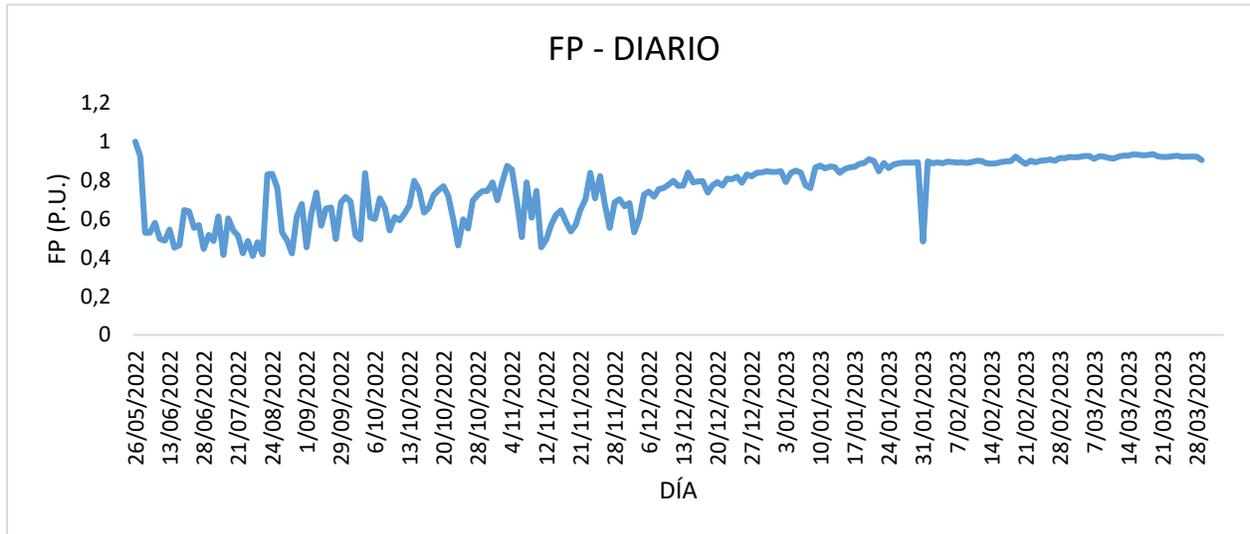


Fig. 15. Perfil del Factor de Potencia

Nota: Fuente históricos de datos portal VIP EPM.

15. Revisión de datos suministrados por la PCH Doña Teresa.

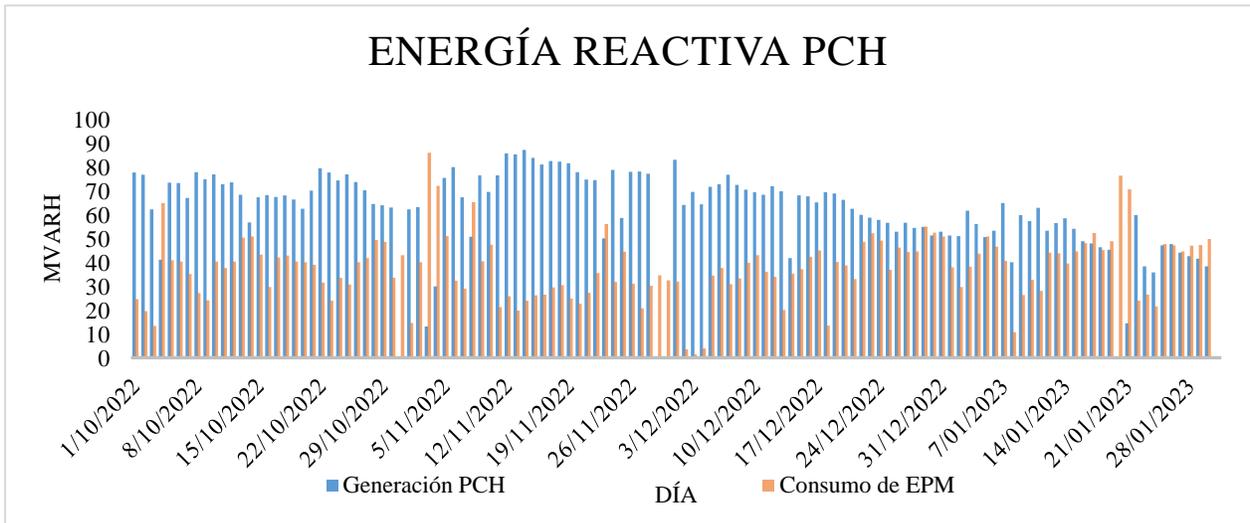


Fig. 16. Perfil de energía reactiva generada en la PCH Doña Teresa

Nota: Información suministrada por el área Gestión de la Energía

La Figura 16 (**Fig. 16**), representa los valores de energía reactiva diaria generada en la PCH para los últimos tres meses del año 2022 y el mes de enero del año 2023. Únicamente se tiene acceso a los datos registrados en los últimos 4 meses, no obstante, se emplean para fundamentar el impacto que tiene dicha generación mediante el control por FP en el generador, para los excesos de reactivos que hasta el mes de septiembre del año 2022, permanecieron con altos nivel de transporte en la red bajo análisis. Para el mes de enero de 2023, los excesos de reactivos se redujeron en un 94,07% con respecto al máximo exceso de energía reactiva, valor aproximadamente igual a 2.665.232,12 kVArh en el mes de julio del año 2022. Lo anterior, debido a que la generación de energía en la PCH lleva inherente la optimización del factor de potencia con el objetivo de ejercer control sobre los excesos de energía reactiva que se producen en la frontera comercial con EPM en la subestación la Cruzada.

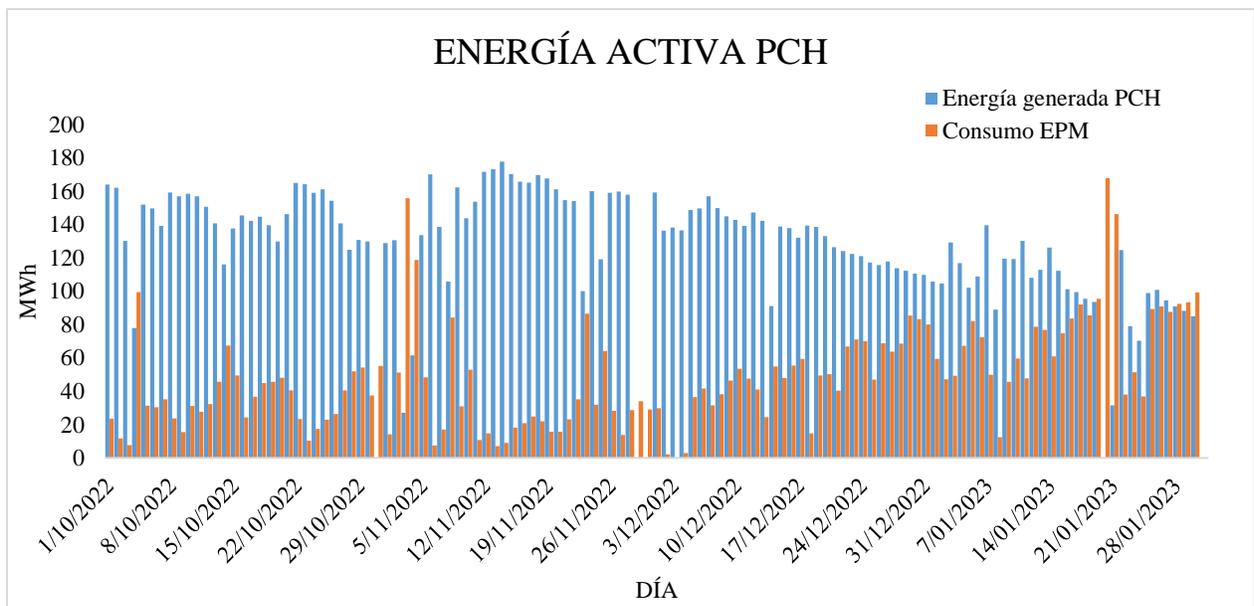


Fig. 17. Comparativa del consumo de energía activa

Nota: Información suministrada por el área Gestión de la Energía.

La energía activa que se consume en la frontera (**Fig. 17**) tiende a aumentar para el primer mes del año 2023, alcanzando incluso el nivel de generación de la PCH, aumento en la demanda. Para conocer el consumo total de energía activa consumida por la mina el Silencio junto con la planta de Beneficio María Dama, se suman la energía activa generada por la PCH restandole los excedentes exportados, con la energía entregada por la red de EPM en la frontera comercial (**Fig.**

18). El transporte de energía reactiva incrementa las pérdidas de potencia activa y el deterioro de conductores dentro de la instalación lo que aumenta los costos por mantenimiento de las redes.

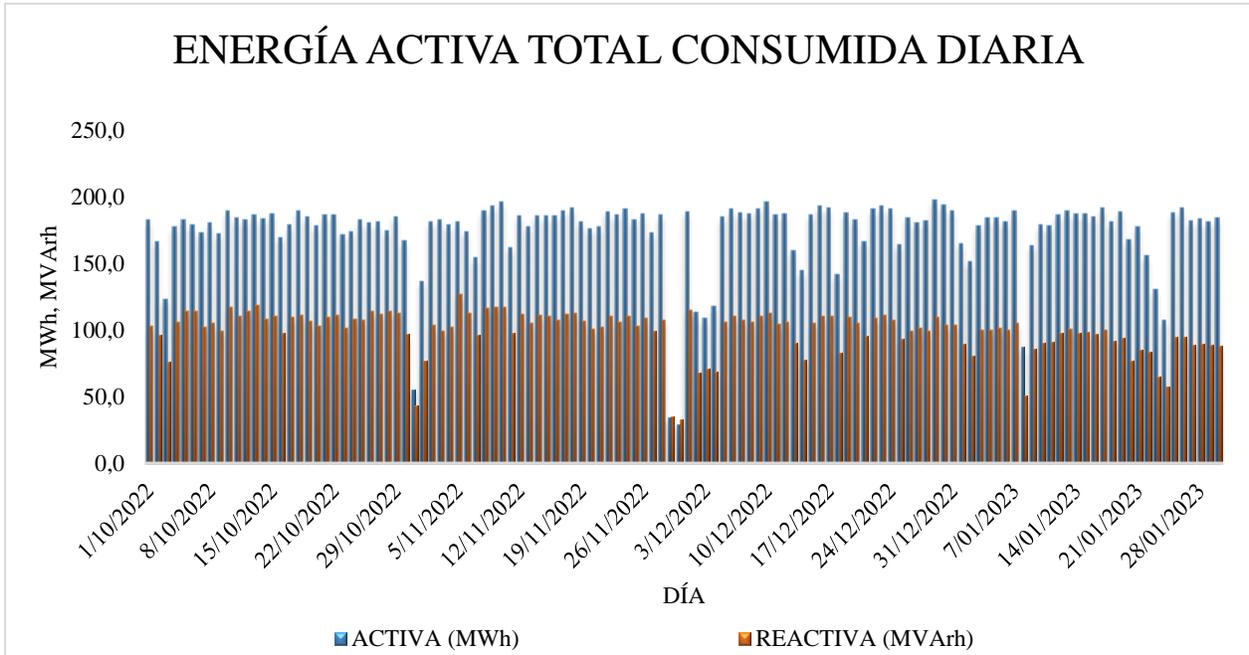


Fig. 18. Comparativa de energía activa total consumida

Nota: Información suministrada por el área Gestión de la Energía.

La **TABLA IV** resume los datos presentados, tanto para la generación en la PCH y el consumo de energía medido en la frontera comercial con EPM. Se hace énfasis en los valores mensuales y se establece un total de consumo que durante los últimos 4 meses alcanza los 21,38 GWh y 12,1 GVarh.

TABLA IV RESUMEN DEMANDA DE ENERGIA

Mes	Registro PCH		Registro EPM		Total		
	Energía PCH (MWh)	Consumo Aris (MWh)	Energía reactiva (MVarh)	Energía reactiva EPM (MVarh)	Energía activa EPM (MWh)	Energía reactiva (MVarh)	Energía activa (MWh)
Octubre	4.331,04	5.137,78	2.090,69	1.163,7	1.112,5	3.251,1	5.443,5
Noviembre	4.042,87	5.010,66	1.983,08	1.074,3	1.114,9	3.057,4	5.157,8
Diciembre	4.094,62	5.483,81	1.996,88	1.115,9	1.473,1	3.107,9	5.567,7

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 37

Enero	2.978,70	4.977,60	1.435,84	1.254,9	2.234,9	2.685,4	5.213,6
-------	----------	----------	----------	---------	---------	---------	---------

Nota: Datos mensuales para la generación y demanda de energía según la medida.

El FP con el que opera la PCH se muestra en la Figura 19(**Fig. 19**), se observa la variabilidad en los valores mientras se efectúa regulación en los niveles de potencia activa y reactiva para satisfacer la demanda en la red del Silencio y Maria Dama. El mínimo valor de FP es igual a 0,87 para el día 5 de noviembre de 2022, y el máximo alcanza un valor de 0,91 para varios días en el intervalo analizado que comprende desde el 1 de octubre de 2022 hasta el 30 de enero de 2023. En promedio, el factor de potencia diariamente es igual a 0,90 p.u. El control de excitación del generador en la PCH mediante FP ha permitido en los últimos meses minimizar los excesos de energía reactiva que se producen en la frontera comercial de la subestación la cruzada, y en cierta medida se han venido reduciendo los costos por penalizaciones, con el objetivo de mantener estable en la unidad la variable M y eliminar por completo el registro de excesos.

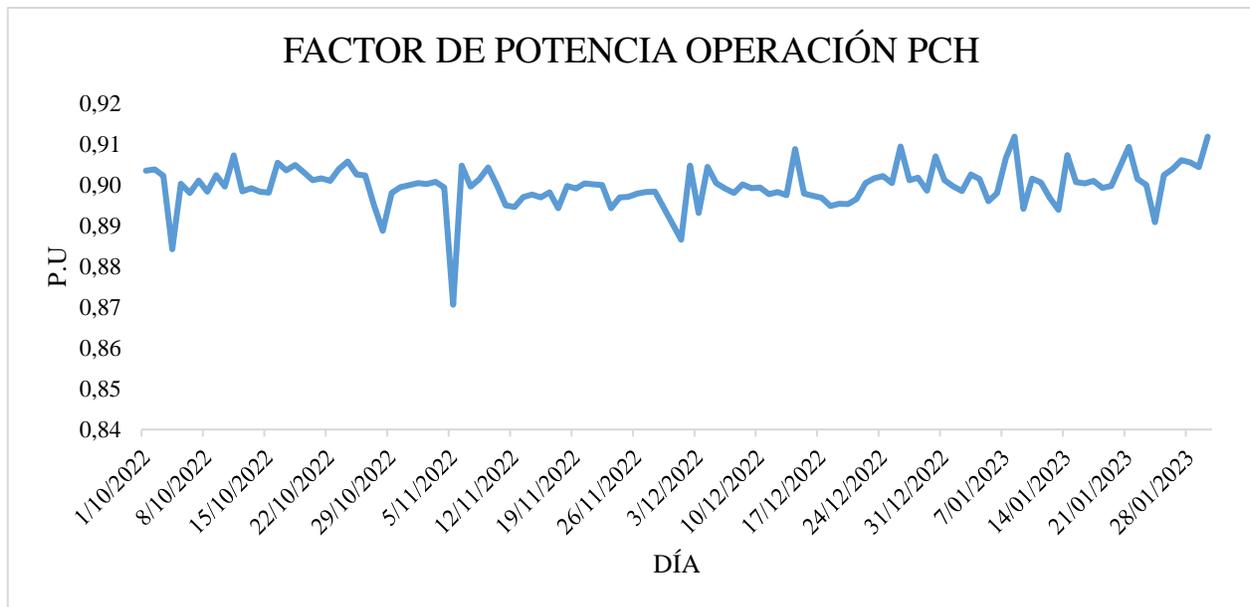


Fig. 19. Perfil de FP de operación PCH

Nota: Información suministrada por el área Gestión de la Energía.

I. Revisión de datos Analizador de redes Fluke 1777.

16. Medición del comportamiento de la demanda circuito Maria Dama.

El segundo intervalo de tiempo en las mediciones se realizó en el mes de diciembre de 2023. Entre el 14 de noviembre y el 29 de diciembre, con el objetivo de conocer la demanda promedio

de energía en la red de distribución de la planta de beneficio Maria Dama, por motivos de disponibilidad del equipo se hizo el registro en este intervalo de tiempo. En la Figura 20(**Fig. 20**) se presentan los perfiles de potencia, se deben tener en cuenta las contingencias que afectan las tendencias del comportamiento temporal de las señales.

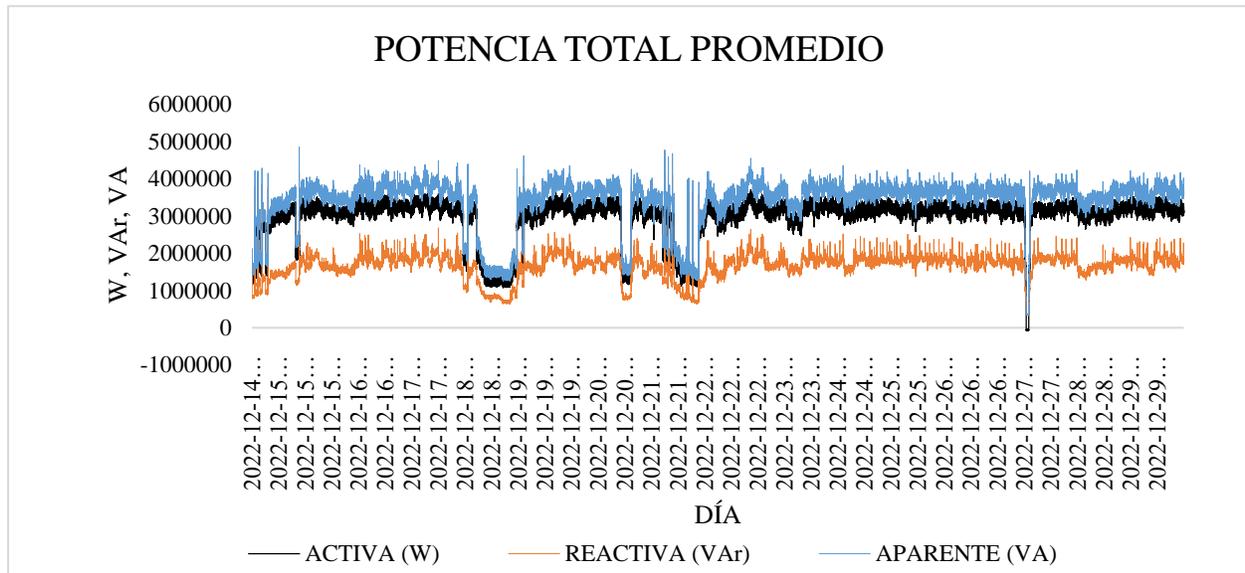


Fig. 20. Perfiles de potencia total promedio

Nota: Datos tomados del informe del Software Fluke Energy Analyze.

Se muestra el perfil de FP en el punto de medida (**Fig. 21**), para tener idea del comportamiento de la señal y los valores máximos y mínimos en los que varía el promedio total. El máximo valor de FP se presenta el día 21 de diciembre de 2022, alcanzando los 0,94 p.u. El mínimo valor de FP se presenta el mismo día en otro instante de tiempo, aproximadamente igual a 0,39 p.u. El promedio diario para el intervalo de tiempo en el que se realiza el análisis es de 0,88 en p.u, con una desviación estándar de 0,018 p.u. Cabe aclarar que en las mediciones se realizan en intervalos de 10 segundos y registran datos no válidos, los cuales son desechados en los resultados que entrega el Software del analizador de redes Fluke 1777. Ahora bien; la red de alimentación de Maria Dama, presenta mayores fluctuaciones en los perfiles de carga y el FP es menor en promedio con respecto al FP total de la red de alimentación de la Mina El Silencio, lo que indica una mayor compensación de potencia reactiva. Según los datos registrados por el analizador en promedio se tiene cada 10 segundos un FPD igual a 0,88 p.u, mientras que en promedio el FP real es aproximadamente igual a 0,87 p.u.

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 39

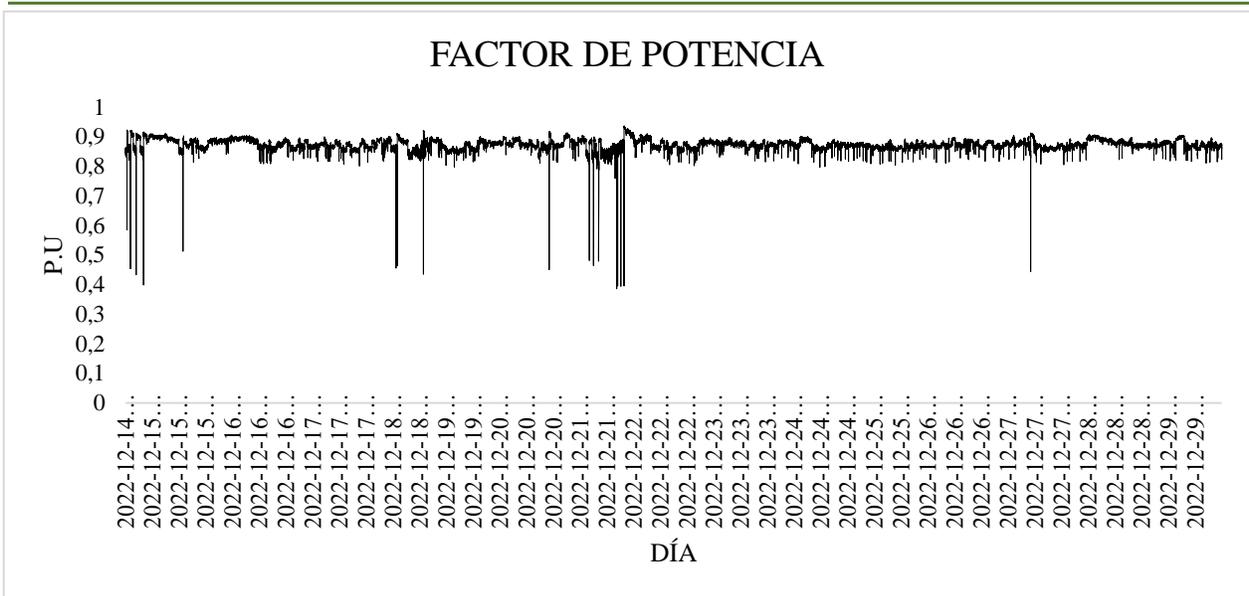


Fig. 21. Perfil de FP planta Maria Dama

Nota: Datos tomados del informe del Software Fluke Energy Analyze.

La **TABLA V** contiene los límites de THD de tensión permisibles especificados por la norma IEEE Std 519-2014 y se determina la necesidad de conectar reactores en serie con los condensadores siempre y cuando se superen dichos límites.

TABLA V LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE TENSIÓN (THD_v)

Nivel de tensión (kV)	THD _v (%)
$V \leq 69$	5,0
$69 > V \leq 161$	2,5
$V > 161$	1,5

Nota: Tabla extraída del informe del Software Fluke Analyze Energy.

En la **TABLA VI** se muestran los porcentajes de THD de tensión y corriente medidos por el analizador de redes en el circuito de alimentación eléctrica de la planta Maria Dama. De acuerdo a lo presentado en la TABLA V, se concluye que los valores de THD de tensión cumplen con los límites establecidos por la norma, por lo que no es necesario el uso de reactores en serie con los condensadores en los bancos automáticos.

TABLA VI VALORES DE DISTORSION ARMÓNICA TOTAL MARIA DAMA

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 40

	THDv (%)			THDi (%)		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Máximo	1,57	1,67	1,65	4,82	4,73	7,88
Promedio	1,16	1,24	1,19	3,59	4,06	6,55
Mínimo	0,81	0,86	0,84	3,07	3,58	5,98

Nota: Tabla extraída del informe del Software Fluke Analyze Energy.

17. Medición del comportamiento de la demanda circuito mina el Silencio.

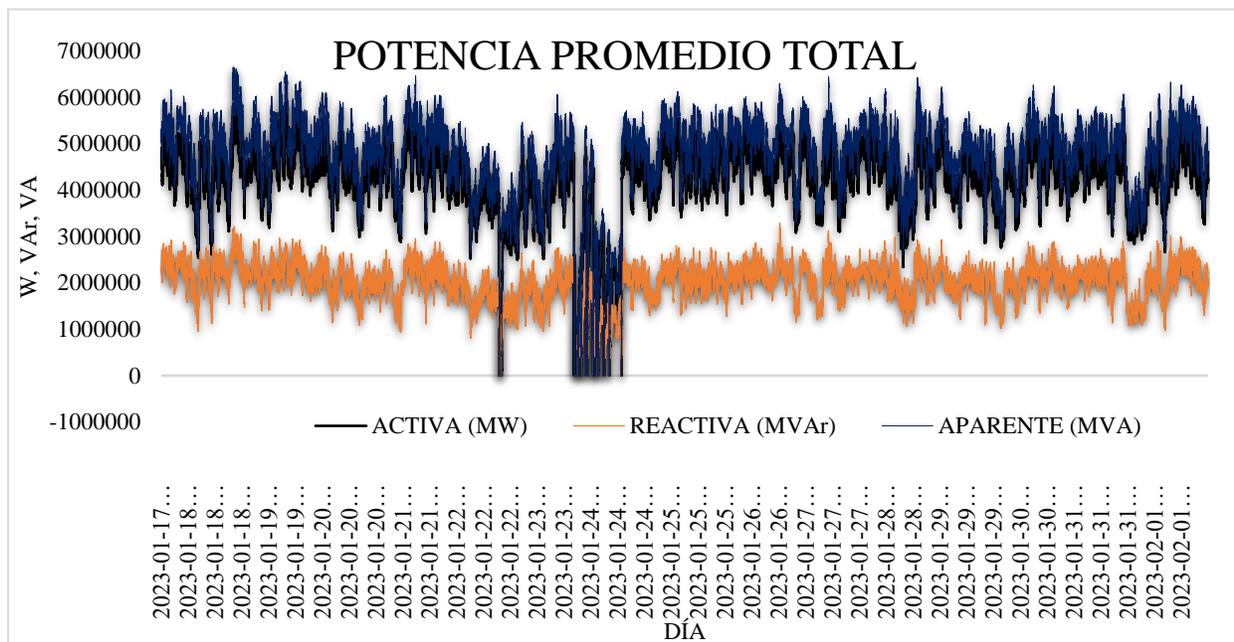


Fig. 22. Potencia promedio total circuito Maria Dama

Nota: Datos tomados del informe del Software Fluke Energy Analyze.

La Figura 22(Fig. 22), muestra los perfiles de potencia activa, reactiva, y aparente. Para el intervalo de tiempo máximo que se pudo programar el analizador de redes Fluke 1777. El máximo valor de potencia activa se registró el día 18 de enero de 2023 a las 19:41:30 horas, con un valor de 5,877 MW, y el mínimo valor se produjo el día 23 de enero de 2023 debido a la desenergización por mantenimiento en redes. En el caso de la potencia reactiva el máximo se alcanzó el día 26 de enero de 2023, con un valor igual a 3,287 MVar; el valor mínimo, igual a 0,0007 MVar, se registró

el día 24 de enero de 2023. De acuerdo con los datos de potencia aparente, el máximo valor, igual a 6,64 MVA, se registró el 18 de enero.

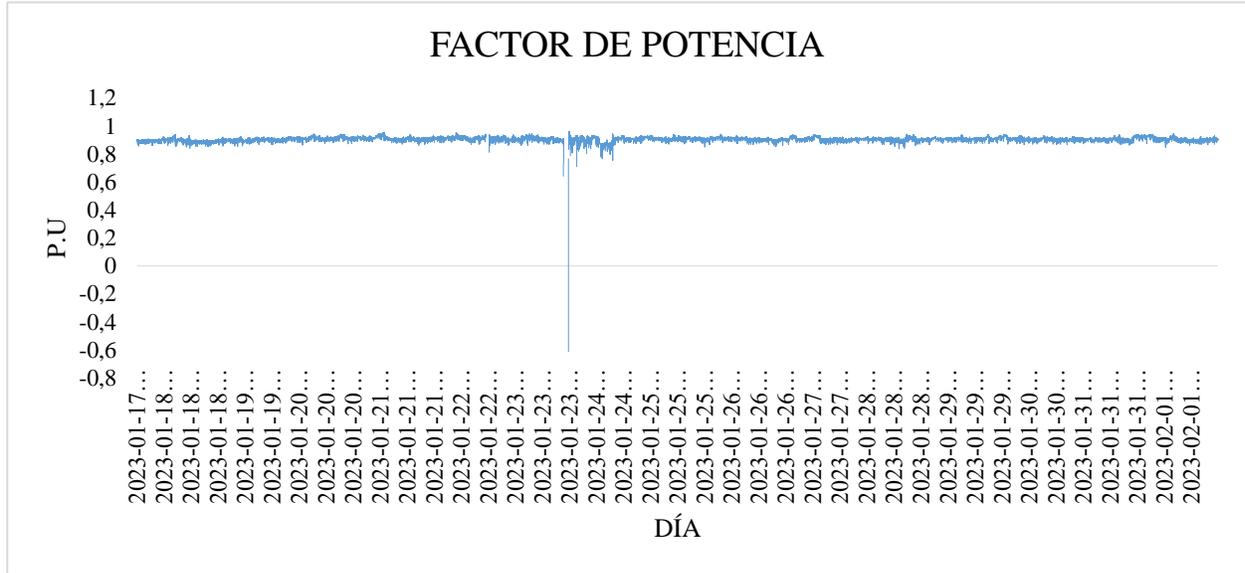


Fig. 23. Perfil de FP circuito mina el Silencio

Nota: Datos tomados del informe del Software Fluke Energy Analyze.

Considerando los datos del perfil de FP (**Fig. 23**), el máximo valor del FP real, se registró el día 23 de enero de 2023 a las 20:46:30 horas, aproximadamente igual a 0,96 p.u., el mínimo valor igual a 0,11 se registró el mismo día a las 17:42:00 horas, el promedio diario en el intervalo de tiempo del monitoreo es aproximadamente igual a 0,9 p.u. Los valores mínimos de FP se presentan el día 23 de enero de 2023, fecha en la que se realizó parada de planta y se programa el mantenimiento preventivo y correctivo en la subestación. El máximo valor del FPD se presentó el día 23 de enero a las 20:46:30 con un valor aproximadamente igual a 0,962 p.u. El mínimo valor es aproximadamente igual a 0,656 p.u., y se presentó el día 23 de enero a las 17:42:20 horas, los cambios instantáneos en el comportamiento de la señal se deben a la desenergización de la red, no obstante, en condiciones normales de operación el FPD oscila entre 0,84 y 0,96. El promedio diario del FPD se estima aproximadamente igual a 0,9103 p.u. y una desviación estándar igual a 0,0125 p.u.

TABLA VII VALORES DE DISTORSION ARMÓNICA TOTAL EL SILENCIO

THDv (%)			THDi (%)		
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 42

Máximo	2,31	2,37	2,41	5,91	5,7	7,59
Promedio	1,26	1,32	1,32	2,64	2,69	4,58
Mínimo	0,49	0,52	0,49	1,19	1,44	3,41

Nota: Tabla extraída del informe del Software Fluke Analyze Energy.

La **TABLA VII** reúne los valores de porcentaje de armónicos en la señal de tensión y de corriente presentados en el circuito de alimentación de la mina el Silencio, de acuerdo con los límites de THDv para un nivel de tensión menor a o igual a 69 kV, el límite es igual al 5% (**TABLA V**). Teniendo en cuenta lo anterior, los bancos de condensadores instalados en este circuito no requieren reactores en serie con los capacitores.

J. Dimensionamiento de bancos de capacitores.

En el tercer objetivo se propone el planteamiento de alternativas para la corrección del FP en el punto de medida de EPM., la idea es determinar las características básicas de los bancos de condensadores y teniendo en cuenta las referencias de los bancos de condensadores automáticos instalados y monitoreados en inspecciones eléctricas en cada una de las subestaciones de la mina el Silencio, se determina la potencia reactiva necesaria a compensar y la potencia nominal de los bancos de capacitores. Es necesario aclarar, que muchas de las subestaciones son supervisadas y monitoreadas por pequeña minería, como es el caso del Grupo Empresarial Damasa, quien posee autonomía en la operación y mantenimiento de sus activos. No obstante, localizar estratégicamente puntos en los que se maximicen y se pueda optimizar el FP resulta ser difícil dadas las condiciones físicas donde se encuentran las instalaciones y la dificultad que se presenta para acceder a las subestaciones, por lo que las inspecciones y programas de mantenimiento preventivo se hacen mucho menos frecuentes.

Para el cálculo de la potencia reactiva a compensar, se determina el FP mínimo usando la ecuación (2), con base en el objetivo final en el que la potencia reactiva no supere el 50% del valor de potencia activa en una hora en específico en un determinado día, teniendo en cuenta las mediciones realizadas con el analizador de redes se puede observar que el FP, es mucho más estable después del nodo de interconexión, las variaciones dependen de la salida de equipos de operación o desenergización de la red por contingencia o mantenimiento. Por otra parte dado que la generación aporta reactivos de acuerdo a la demanda en la carga, el punto más crítico en la medida

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 43

se encuentra en la subestación La Cruzada, en el punto de medida para la facturación, es allí donde se transportan los excesos de reactivos y es de acuerdo a estos datos, tanto de FP promedio como los valores de potencia reactiva que registra EPM en sus informes, con los que se propone dimensionar las capacidades de los bancos de condensadores automáticos que permitan la compensación. Para ello no se tiene en cuenta la potencia de distorsión y se establece la relación con el FPD.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (11)$$

Estableciendo el valor de potencia activa como base $P = 1 p.u.$

$$FP = \frac{P}{\sqrt{1^2 + Q^2}} \quad (12)$$

Bajo la hipótesis de que la potencia reactiva no debe superar el 50% del valor de la potencia activa, se define la igualdad: $Q = 0,5P$.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{1^2 + 0,5^2}} \quad (13)$$

Finalmente se tiene:

$$FP = 0,894 p.u \quad (14)$$

De esta forma, para que la energía reactiva no supere el 50% del valor de la energía activa es necesario que el valor de FP sea mayor o igual a 0,894 p.u. Usando la Ecuación (3), se calculan los valores de potencia reactiva a compensar (**Fig. 24**).



Fig. 24. Perfil de excesos de potencia reactiva a compensar

Nota: cálculos realizados con datos históricos de EPM.

Con base en la práctica y con el fin de dimensionar la capacidad de los bancos de condensadores en la Empresa se realiza el cálculo usando una regla rápida que asume que la compensación debe ser igual al 30% de la capacidad instalada en cada subestación.

La **TABLA VIII** presenta los valores de potencia reactiva a compensar, suponiendo el 30% de la potencia nominal instalada en cada subestación, usando la Ecuación (3), y usando 3 valores de FP de referencia.

TABLA VIII POTENCIA REACTIVA A COMPENSAR (kVAr)

Método	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación estándar
Ecuación (3), FP = 0.9	4883,3	3,21	1655,65	1348,97
Ecuación (3), FP = 0.95	4929,4	21,99	1665,97	1272,06
Ecuación (3), FP = 1	5146,4	59,42	1510,66	1364,69
Excesos	4884,1	0,55	1353,71	1371,65
30% de Sn	6414	-	-	-

Nota: Elaboración propia.

Se calculan los valores de potencia reactiva a compensar para cada subestación aplicando diferentes valores de referencia para el FP. La **TABLA IX** presenta los valores calculados en función del FP usando los históricos de medida reportados por EPM, corresponde a los valores de potencia reactiva a compensar en cada subestación.

TABLA IX POTENCIA REACTIVA A COMPENSAR RED MARIA DAMA EN BT

S/E	Qc con 30% (kVAr)	FP = 0,9 p.u (kVAr)	FP = 0,95 p.u (kVAr)	FP = 1 p.u (kVAr)
Polimetálicos	300	228,5	230,6	240,7
Molino	750	571,2	576,4	601,8
Planta	750	571,2	576,4	601,9
Relaves	600	456,9	461,1	481,4

Nota: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 45

La **TABLA X** muestra los valores de potencia reactiva a compensar para la red de distribución eléctrica de la mina El Silencio.

TABLA X POTENCIA REACTIVA A COMPENSAR RED EL SILENCIO EN BT

S/E	Qc con 30% (kVAr)	FP = 0,9 p.u (kVAr)	FP = 0,95 p.u (kVAr)	FP = 1 p.u (kVAr)
Compresores	600	456,89	461,16	481,43
Plaza Bolivia	150	114,22	115,28	120,36
Bolivia	189	143,92	145,26	151,65
N 18	150	114,22	115,28	120,36
Shaft Silencio	225	171,33	172,92	180,53
N 23	150	114,22	115,28	120,36
N 28 -950	150	114,22	115,28	120,36
N 32 - 1130 TF1	150	114,22	115,28	120,36
N 32 - 1130 TF2	150	114,22	115,28	120,36
N 10	150	114,22	115,28	120,36
N 17	150	114,22	115,28	120,36
N 21	150	114,22	115,28	120,36
N 23	150	114,22	115,28	120,36
N 28 -450 TF1	150	114,22	115,28	120,36
N 28 -450 TF2	150	114,22	115,28	120,36
N 32 - 450	150	114,22	115,28	120,36
N 38 - 120	150	114,22	115,28	120,36
N 43 - 120	150	114,22	115,28	120,36
N 46 - 400	150	114,22	115,28	120,36
N 38 - 450	150	114,22	115,28	120,36
N 38 - N TF1	150	114,22	115,28	120,36
N 38 - N TF2	150	114,22	115,28	120,36
N 25 - 450	150	114,22	115,28	120,36

Nota: Elaboración propia.

18. Diseño preliminar en media tensión.

La **TABLA XI** presenta las características preliminares de los bancos de condensadores en MT. De acuerdo con el tercer objetivo, se plantean para la simulación dos escenarios con diferentes formas de operación, el primer escenario consiste en simular una alternativa de compensación en media tensión, para ello se conectan baterías de condensadores automáticas en media tensión, de acuerdo con el catálogo presentado por Circutor[15], la serie de baterías de condensadores en MT, vienen diseñadas para cada cliente en específico, para el caso bajo estudio se selecciona capacidades nominales de la serie BMFC3-066-120, con respecto a la tensión nominal, el estándar llega hasta los 33 kV, con una capacidad nominal de potencia para cada condensador de la serie CIRKAP BM hasta los 750 kVAr. Para diseños con niveles de tensión superior a los 36 kV estas baterías se diseñan con un bastidor por fase con aisladores de soporte del nivel de aislamiento adecuado a la tensión de servicio de la red. Es necesario indicar, que según la **TABLA V** el límite de THDv debe ser menor o igual al 5% para niveles de tensión menores o iguales a 69 kV, en la **TABLA VI** se evidencia que el THDv máximo para la red de Maria Dama se presenta en la fase B con un valor de 1,67%; mientras que para la red de la mina El Silencio según la **TABLA VII** el máximo THDv se registra en la fase B aproximadamente igual a 2,41%. De acuerdo con lo expuesto anteriormente no se requieren instalar reactores en serie con los condensadores.

TABLA XI CARACTERÍSTICAS PRELIMINARES DE BANCOS DE CAPACITORES EN MT CON REACTOR

Ítem	Qc con 30% de Sn	FP = 0,95 p.u
Qc (kVAr)	6414,0	4929,4
Q_n (kVAr) por paso	750,0	750,0
# Condensadores MT	9	7
h_r	5	6
ρ % calculado	3,8	3,0
ρ % comercial	7,0	7,0
f_{LC}	226,8	226,8
U_C	47,3	47,3
Q_o (kVAr)	728,6	728,6
C_Y (nF)	863,5	863,5

C_{Δ} (nF)	287,8	287,8
-------------------	-------	-------

Nota: Elaboración propia.

Dado que los porcentajes de distorsión armónica en la red son de baja magnitud, las especificaciones para los bancos de condensadores sin la instalación de reactores, se presenta como alternativa mucho más económica para el dimensionamiento, selección, compra e instalación de baterías de condensadores en MT. Mientras que se instale reactor en el banco de condensadores, la tensión nominal para cada condensador debe ser de 48 kV, ya que, aunque la red trabaje a una tensión de 44 kV, al conectar reactores en serie la tensión en los bornes del condensador aumenta a una tensión U_C , mientras que si se diseñan baterías de condensadores sin conectar reactores en serie cada unidad individual de condensadores operará a la misma tensión de la red.

19. Diseño en baja tensión.

Para realizar el diseño preliminar de los bancos de condensadores en baja tensión, se emplea el cotizador online de Alianza eléctrica para bancos de condensadores automáticos de ABB[16], línea de negocio actualmente perteneciente a la empresa Hitachi Energy, además en las especificaciones técnicas dadas en [17]. Con base en lo anterior se presenta la **TABLA XII** con las especificaciones básicas de los bancos de condensadores, se debe resaltar que para la compensación de reactivos en el transformador que alimenta el molino en la planta de beneficio Maria Dama, en el lado de baja tiene una tensión de 4160 V, por lo que se presenta variación en los respectivos cálculos.

TABLA XII CARACTERÍSTICAS PRELIMINARES DE BANCOS DE CAPACITORES EN BT CON REACTOR – 30% Sn

S/E	Q_c de 30% Sn (kVAr)	N° Bancos - kVAr	Uc (V)	Qn condensador (kVAr)	Q_o (kVAr)	N° pasos	Capacitancia en Y (pF)	Capacitancia en Delta (pF)
Polimetálicos	300	1 - 300	516	25	24	12	0,249	0,083
Molino	750	1 - 750	4473	100	80	8	0,013	0,004
		2- 300		25		12		
Planta	750	1- 150	516	25	24	6	0,249	0,083
		2 - 300		25		24		
Relaves	600	2 - 300	516	25	24	24	0,249	0,083
Compresores	600	2 - 300	516	25	24	24	0,249	0,083

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 48

Plaza Bolivia	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Bolivia	189	1 - 200	516	25	24	8	0,249	0,083
Nivel 18	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Shaft Silencio	225	1 - 225	516	25	24	9	0,249	0,083
Nivel 23	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 28 - 950	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 32 - 1130 TF1	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 32 - 1130 TF2	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 10	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 17	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 21	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 23	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 28 - 450 TF1	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 28 - 450 TF2	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 32 - 450	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 38 - 120	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 43 - 120	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 46 - 400	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 38 - 450	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 38 - N TF1	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 38 - N TF2	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 49

Nivel 25 - 450	150	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
-------------------	-----	---------	-----	----	----	---	-------	-------

Nota: Elaboración propia, se realizan los mismos cálculos de la **TABLA XI**, por simplicidad no se presentan todos ellos.

La **TABLA XIII** contiene las características técnicas para la selección de bancos de condensadores en baja tensión, a excepción de la carga que representa el molino en la planta de beneficio Maria Dama, cuyo diseño se realiza en media tensión con valores comerciales de condensadores.

TABLA XIII CARACTERÍSTICAS PRELIMINARES DE BANCOS DE CAPACITORES EN BT CON REACTOR – FP = 0,95 P.U

S/E	Q _c de 30% Sn (kVAr)	Nº Bancos - kVAr	U _c (V)	Q _n condensador (kVAr)	Q _o (kVAr)	Nº pasos	Capacitancia en Y (pF)	Capacitancia en Delta (pF)
Polimetálicos	230,6	1 - 250	516	25	24	10	0,249	0,083
Molino	576,4	1 - 600	4473	100	80	6	0,013	0,004
Planta	576,4	2- 300	516	25	24	12	0,249	0,083
Relaves	461,1	1 - 300	516	25	24	12	0,249	0,083
		1 - 200	516	25	24	8	0,249	0,083
Compresores	461,1	1 - 300	516	25	24	12	0,249	0,083
		1 - 200	516	25	24	8	0,249	0,083
Plaza Bolivia	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Bolivia	145,3	1 - 150	516	25	24	6	0,249	0,083
Nivel 18	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Shaft Silencio	172,9	1 - 200	516	25	24	7	0,249	0,083
Nivel 23	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 28 - 950	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 32 - 1130 TF1	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 32 - 1130 TF2	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 50

Nivel 10	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 17	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 21	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 23	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 28 - 450 TF1	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 28 - 450 TF2	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 32 - 450	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 38 - 120	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 43 - 120	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 46 - 400	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 38 - 450	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 38 - N TF1	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 38 - N TF2	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083
Nivel 25 - 450	115,3	1 - 125	516	25	24	5	0,249	0,083

Nota: Elaboración propia, se realizan los mismos cálculos de la **TABLA XI**, por simplicidad no se presentan todos ellos.

K. Revisión del estado actual de los bancos de condensadores.

La **TABLA XIV** sección reúne información del estado de la mayoría de bancos automáticos de capacitores instalados en baja tensión en la mina El Silencio, se debe aclarar, que la revisión de los bancos se hizo dependiendo de la programación de inspecciones para las subestaciones de la mina y que se encuentran bajo la supervisión de la empresa Aris Mining. Esto se debe, a que parte de las subestaciones se encuentra bajo el mantenimiento de la empresa Navar, contratista que realiza labores de explotación y pertenece al Grupo Empresarial Damasa.

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 51

TABLA XIV ESTADO ACTUAL DE LOS BANCOS DE CONDENSADORES AUTOMÁTICOS

S/E	Banco de condensadores				Relé corrector de FP		
	Estado general	Tensión (V)	In (A)	Capacidad (kVAr)	Estado	Parametrización	Modo de Operación
Nivel 18	Conectado	480	25	50	Operativo	Desparametrizado	Manual
Nivel 21	Desconectado	440	10	60	No operativo	Ninguna	Ninguno
Nivel 25 - 450	Conectado	480	8	60	Operativo	Ninguna	Manual
Nivel 23	No hay	-	-	-	-	-	-
Nivel 28 -950	Conectado	440	10	150	No operativo	Ninguna	Ninguno
Nivel 32 - 1130	Banco - 1 desconectado	440	10	165	No operativo	Ninguna	Ninguno
	Banco - 2 desconectado	440	10	165	No operativo	Ninguna	Ninguno
Bolivia Alto	No hay	-	-	-	-	-	-
Compresores	Banco - 1 conectado	440	25	180	Operativo	Parametrizado	Automático
	Banco - 2 conectado	480	35	265	Operativo	Parametrizado	Automático
	Banco - 3 conectado	440	10	300	Operativo	Parametrizado	Automático
Shaft Silencio	Banco - 1 desconectado	440	10	300	No operativo	Ninguna	Ninguno
	Banco - 2 desconectado	440	25	150	No operativo	Ninguna	Ninguno
Polimetálicos	Conectado	440	10	165	Operativo	Parametrizado	Manual
Nivel 38 - 120	Conectado	440	25	110	No operativo	Ninguna	Manual
Nivel 28 - 0	Banco - 1 conectado	40	440	25	Operativo	Desparametrizado	Manual

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 52

	Banco - 2 desconectado	40	440	25	No operativo	Ninguna	Ninguno
Nivel 38 - N	Conectado	40	440	25	Operativo	Parametrizado	Automático
Nivel 28 - 450	Conectado	40	440	25	Operativo	Desparametrizado	Automático

Nota: Se describe el estado y algunas características de los bancos de condensadores y el relé corrector de FP.

L. Simulación de alternativas de compensación en el Software ETAP.

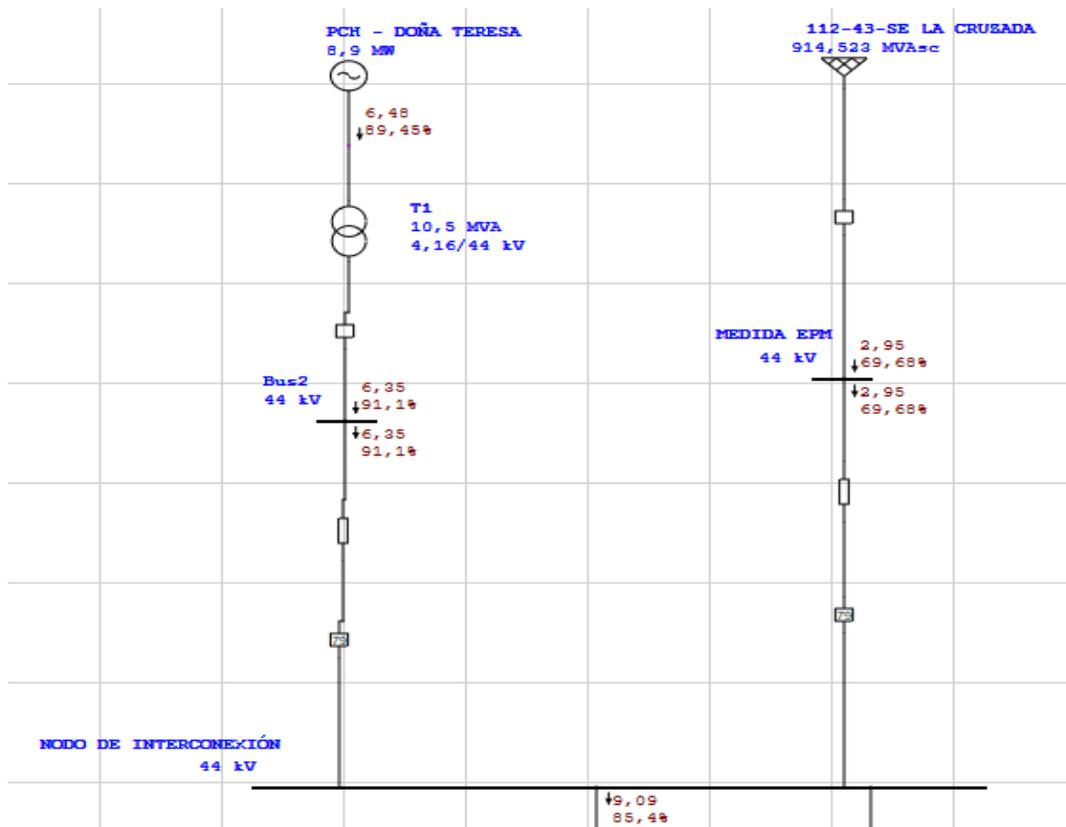


Fig. 25. Zoom al diagrama unifilar en ETAP

Nota: elaborado con simulaciones previas realizadas por el área de Gestión de la energía.

La simulación del circuito de alimentación de la mina el Silencio y la planta de beneficio Maria Dama se realizó en el Software ETAP 16.0.0, para cumplir con el tercer objetivo específico y validar la alternativa de solución técnico – económica planteada. Se presenta una vista general del circuito (**Fig. 26**), en el cual se implementan las alternativas de compensación de reactivos tanto en BT como en MT. En la Figura 25(**Fig. 25**), se realiza un zoom para ubicar el punto de interés donde se desea controlar los excesos de reactivos para cada hora del día y mejorar el FP. La

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 53

información suministrada por el analizador de redes, permite obtener los máximos, mínimos y el promedio de demanda de potencia eléctrica (**TABLA XV**) tanto para el circuito de distribución de la planta de beneficio Maria Dama, como para el circuito de distribución de la mina el Silencio. Con base en estos valores de máxima demanda de potencia activa y potencia reactiva se realiza la simulación de las alternativas de compensación propuestas.

TABLA XV CONSUMO DE POTENCIA DE LA RED BAJO ANÁLISIS

Potencia	Máximo		Mínimo		Promedio	
	El Silencio	Maria Dama	El Silencio	Maria Dama	El Silencio	Maria Dama
Activa (MW)	4,96	3,27	3,50	2,31	4,51	2,97
Reactiva (MVar)	2,58	1,89	1,78	1,25	2,34	3,39

Nota: Elaboración propia, datos tomados de las lecturas del analizador de redes Fluke 1777.

La **TABLA XVI** resume los valores de potencia activa y potencia reactiva máxima, mínima y promedio generada por la PCH en los intervalos de tiempo donde se registraron las mediciones del analizador de redes, valores utilizados en la simulación del flujo de potencia de la red como una aproximación al modelo real y validar los efectos de la generación de la PCH Doña Teresa en el mismo.

TABLA XVI GENERACIÓN DE POTENCIA DE LA PCH

Potencia	Máximo	Mínimo	Promedio
Activa (MW)	5,81	3,79	5,16
Reactiva (MVar)	2,89	1,74	2,51

Nota: Elaboración propia, datos tomados de los reportes mensuales de la administración de la PCH, Proeléctrica.

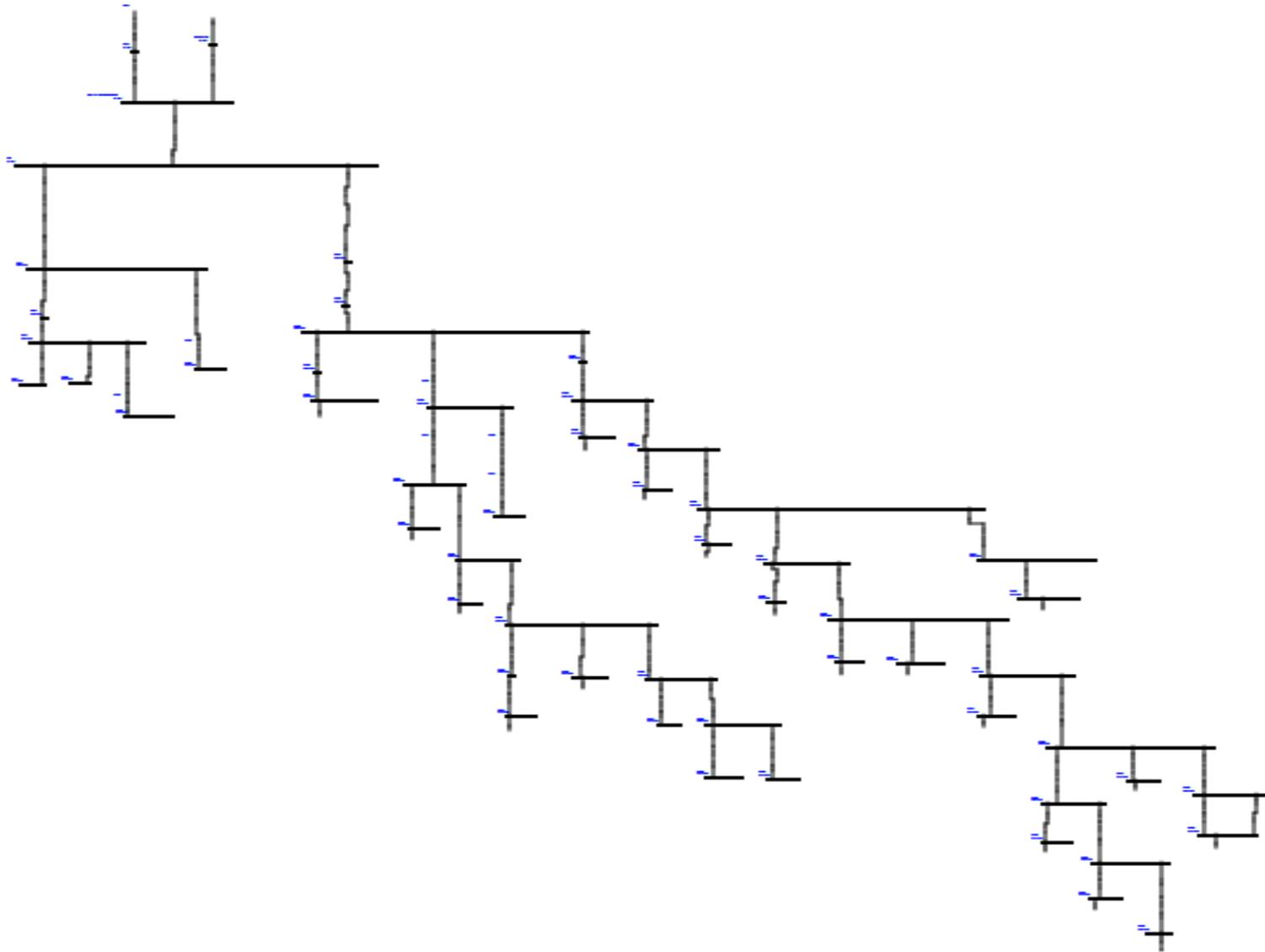


Fig. 26. Modelo de red elaborado en ETAP

Nota: elaborado con simulaciones previas realizadas por el área de Gestión de la energía. Ver Anexo D.

20. Simulación de alternativas en MT.

La primera simulación se realizó con la alternativa de compensación centralizada en el nodo de interconexión de la Empresa (Fig. 27), según los excesos que se registran en el punto de medida en la frontera comercial con EPM, la compensación sería ideal si se realiza lo más cerca posible al punto de interés. No obstante, como la subestación eléctrica La Cruzada en términos legales pertenece a EPM, se estudia la posibilidad de conexión de un banco automático de condensadores en MT.

La **TABLA XVII** muestra los distintos resultados dependiendo del modo de operación de la red, se simula el flujo de potencia y la configuración de los bancos por pasos dependiendo de la demanda de potencia reactiva y el FP de referencia. Es indispensable saber que para que la compensación se realice de forma óptima es necesario para este caso sensar la corriente y la tensión de la línea de alimentación que une la subestación La Cruzada con el nodo de interconexión y automatizar el banco de condensadores con respecto a esta medida o establecer un valor de FP de referencia mayor a 0,91 p.u, en el barraje del nodo.

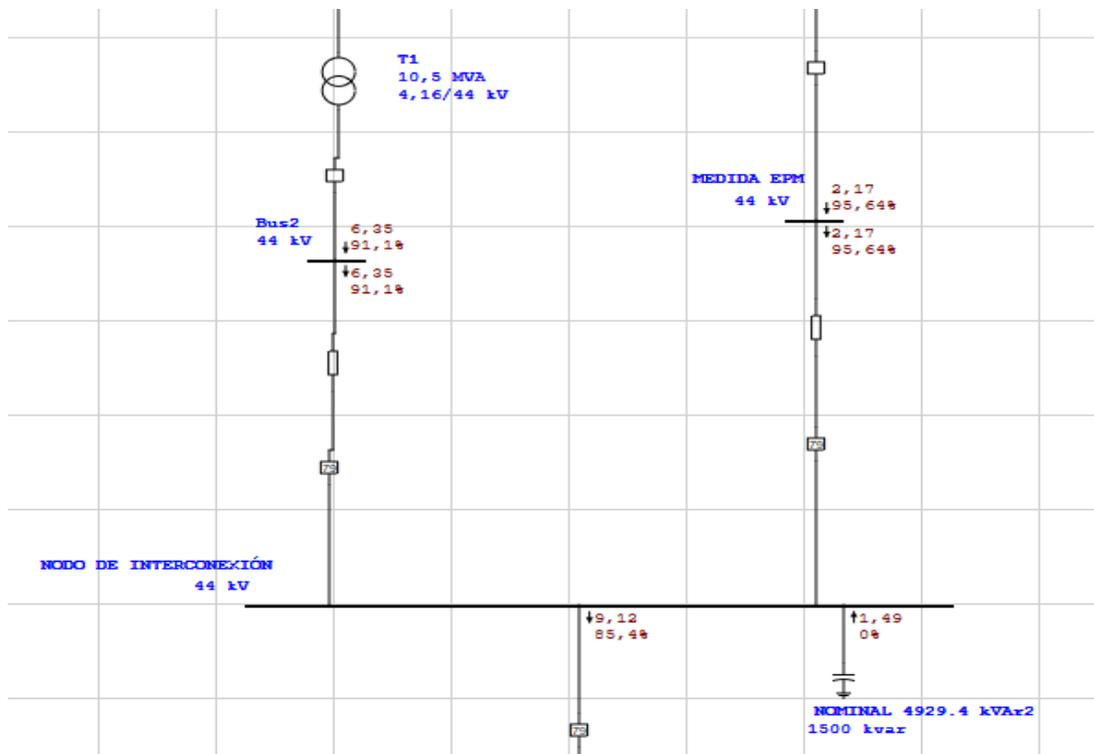


Fig. 27. Simulación alternativa en MT

Nota: elaborado con simulaciones previas realizadas por el área de Gestión de la energía.

La segunda alternativa de compensación en MT, es conectar el banco de condensadores automático en el barraje de la subestación de 44 kV. Y establecer un FP de referencia entre 0,91 y 0,95 p.u. De tal forma, que permita mejorar el FP aguas arriba, sin depender estrictamente de la medida del FP en la frontera comercial con EPM.

TABLA XVII SIMULACIÓN EN MEDIA TENSION

Escenario	Descripción	FP referencia del punto de conexión del banco de condensadores	FP Punto de medida de EPM
1	Sin compensación y sin generación de la PCH	-	0,86
2	Sin compensación y con generación de la PCH	-	0,7
3	Compensando en el nodo de interconexión	0,95	0,96
4	Compensando en el barraje de la S/E de 44 kV	0,92	0,955

Nota: Elaborada con los resultados de la simulación en ETAP 16.0.0.

21. Simulación alternativa en BT.

La alternativa de compensación individual en BT (**Fig. 28**) se muestra como la alternativa más viable económicamente y ofrece buenos resultados dentro de la simulación. Los costos para el diseño y la construcción de baterías de condensadores en MT, dentro de los estudios ya realizados en la Empresa, se muestran muy elevados en comparación a las soluciones de corrección de FP en BT.

La mina el Silencio posee el mayor número de subestaciones subterráneas y de acuerdo con las inspecciones eléctricas realizadas en la mayoría de subestaciones los bancos de condensadores si bien no se encuentran conectados, la subestación no cuenta con estos equipos o no se encuentran automatizados. Lo que indica un nivel de compensación muy bajo en comparación a los excesos de reactivos que se transportan en la red y que conlleva a las penalizaciones económicas por parte de EPM.

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 57

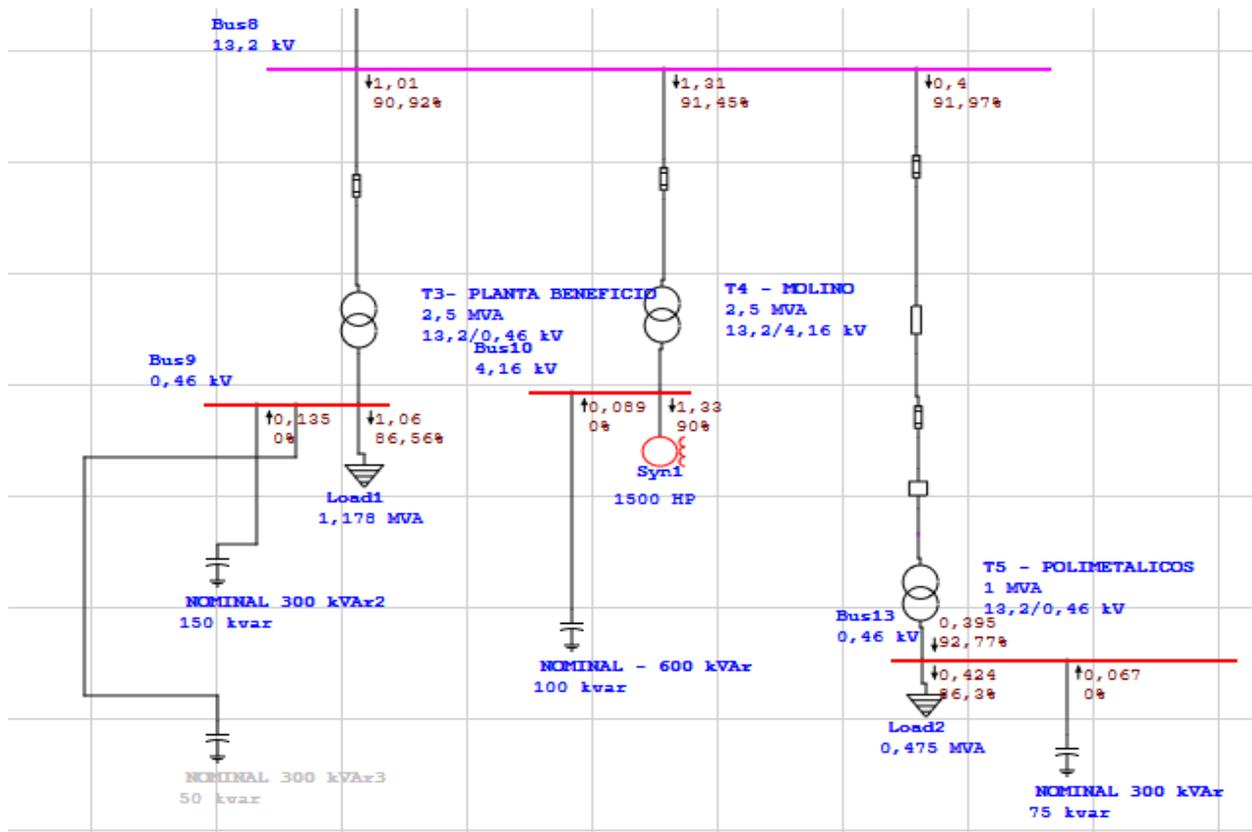


Fig. 28. Parte del circuito en BT red mina El Silencio

Nota: elaborado con simulaciones previas realizadas por el área de Gestión de la energía.

La **TABLA XVIII** muestra los resultados del valor de FP en el punto de medida en la barra de 44 kV en la subestación eléctrica La Cruzada, conforme a la simulación del flujo de potencia en la red y la variación de los pasos en los bancos de condensadores propuestos. De acuerdo con la variación de los pasos se determinan un FP de referencia en un intervalo entre 0,91 y 0,95 p.u.

TABLA XVIII SIMULACIÓN EN BAJA TENSION

Escenario	Descripción	FP referencia del punto de conexión del banco de condensadores (p.u)	FP Punto de medida de EPM (p.u)
1	FP de referencia en cada barra de las subestaciones igual a 0,91.	0,91	0,87

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 58

2	FP de referencia en cada barra de las subestaciones igual a 0,92.	0,92	0,89
3	FP de referencia en cada barra de las subestaciones igual a 0,93.	0,93	0,92
4	FP de referencia en cada barra de las subestaciones igual a 0,94.	0,94	0,93
5	FP de referencia en cada barra de las subestaciones igual a 0,95.	0,95	0,99

Nota: Elaborada con los resultados de la simulación en ETAP 16.0.0.

Las simulaciones realizadas son una aproximación al modelo de flujo de potencia real en el circuito de distribución eléctrica de la mina el Silencio y la planta de beneficio Maria Dama. Dado que se emplean las librerías del Software ETAP 16.0.0, los parámetros en la red difieren con respecto a los de la realidad, no obstante; se obtienen buenos resultados teniendo en cuenta que la carga es variable, no se entra en detalle en las simulaciones por cuestiones prácticas y se centra en validar las alternativas de solución que se proponen dentro del presente informe.

VI. ANÁLISIS

A. *Análisis técnico.*

El problema de excesos de energía reactiva en la red de la mina el Silencio y planta de beneficio Maria Dama, se encuentra directamente relacionado con las variaciones en la demanda de energía en la carga, las pérdidas en las redes de distribución subterráneas, pérdidas en la transformación, sumado a los efectos en la variación de la generación de energía por parte de la PCH, lo que hace que en determinadas horas del día no se alcance a cubrir el consumo de energía reactiva y se requiera mayor consumo en la frontera comercial con EPM, de forma análoga, se debe considerar el mal estado de los dispositivos de compensación que se encuentran instalados en baja tensión, complicando el panorama en los casos donde el FP disminuya por debajo de 0,9 p.u, en los barrajes de las subestaciones y se requiera la compensación en BT o en caso contrario si los bancos no se encuentren automáticos se produzca sobrecompensación y registro de energía capacitiva en el punto de medida de EPM. Otro factor importante que limita la compensación efectiva es la medición del FP en la frontera y que pueda servir de referencia para la inyección de reactivos en la red. El control de los excesos (**Fig. 11**), ha mejorado después del 30 de septiembre de 2022, hasta el punto de que para el mes de marzo del año 2023 no se registran excesos por más de un día, evidenciando el efectivo control que se viene adelantando. El impacto por ineficiencia y pérdidas de potencia por transporte de reactivos es otro de los efectos negativos que conllevan dichos excesos, sumado a ello se deben tener en cuenta las pérdidas por distorsión armónica que afectan la calidad del suministro eléctrico y el funcionamiento de los equipos dentro de las instalaciones de usuario final. Durante el mes de julio del año 2022 se presentó el mayor exceso de energía reactiva inductiva con un total de 2.665.232,12 kVArh, por lo que se ha venido realizando un control de los excesos mediante la generación de reactivos usando los valores de FP de referencia en la generación de la PCH Doña Teresa. Para enero de 2023 se disminuyó el exceso en un 94,07% y se obtuvo un valor de aproximadamente 158.156,94 kVArh, un valor muy cercano a la cantidad liquidada en el mes de mayo del año 2022, cuyo total es de 145.476,98 kVArh. El FP promedio (**Fig. 15**) para los 10 meses en los que se centra el análisis en el punto de medida de EPM tiene un valor horario de 0,7 p.u; con base en este promedio se efectuaron las simulaciones para las alternativas de compensación en BT y MT.

En las inspecciones realizadas por el área de confiabilidad en la mayoría de subestaciones de la mina el Silencio, se observaron bancos de condensadores en malas condiciones (**TABLA XIV**), en total fueron inspeccionadas 18 subestaciones, de las cuales 5 no cuentan con bancos de condensadores, fueron 17 bancos de capacitores inspeccionados, el 64,7% no se encuentra conectado, por consiguiente el 29,4% se encuentra conectado y el 36,4% de dicho porcentaje se encuentran en modo automático. La alternativa de compensación en BT, resulta ser una muy buena alternativa siempre y cuando el FP en el barraje de alimentación principal se mantenga en 0,95 p.u y todas las subestaciones cuenten con sus respectivos bancos automatizados (**TABLA XIV**).

Según las simulaciones en MT (**TABLA XVII**), la alternativa de compensación es efectiva siempre y cuando la medida del FP de referencia se tome lo más cerca posible al punto de medida de EPM, se simuló la compensación en el nodo de interconexión suponiendo que la señales de tensión y corriente se toman de la línea que conecta con la subestación La Cruzada. La segunda alternativa es la conexión del banco en la subestación de 44 kV, sin embargo; en el barraje debe conservarse como referencia un FP mínimo de 0,91 p.u. Además, se necesita que la batería de condensadores en MT, sean automáticos y respondan al consumo dinámico en la frontera, tal como sucede con la alternativa en BT. Los planes de mantenimiento y supervisión de los bancos de condensadores en las subestaciones de la mina el Silencio son indispensables como activos críticos en la calidad del suministro de energía eléctrica, en donde las pérdidas de energía son mayores, las redes son menos óptimas y las condiciones físicas del entorno son desfavorables, con respecto a las altas temperaturas, contaminación por polvo y material particulado, condiciones de humedad y la fluctuaciones de la tensión por contingencias o variabilidad de la carga. Lo que aumenta el transporte de energía reactiva en la red. En el plan de mantenimiento e instalación de bancos de condensadores en la red de baja tensión es estrictamente necesario automatizar y parametrizar correctamente los bancos de condensadores, bajo capacidades nominales acordes a lo que se desea compensar y el FP de referencia adecuado para hacer la efectiva compensación. Dentro de las inspecciones eléctricas por parte de mantenimiento eléctrico y confiabilidad se debe reportar las condiciones de cada banco de condensadores para intervenir fallas en equipos y asegurar la operación normal de los mismos. La estandarización de bancos de condensadores es importante teniendo en cuenta que se puede tener un solo proveedor con una sola marca o diferentes marcas en los componentes de los bancos, pero manteniendo dispositivos con iguales características, de

tal forma que elementos de un banco de condensadores puedan ser reutilizados en otros dispositivos, además de capacitar al personal técnico en el mantenimiento y ensamble de los mismos. Es importante adquirir bancos de condensadores con configuraciones adecuadas para el entorno donde van a ser instalados, sistemas de ventilación acordes y disposición espacial de los componentes electrónicos y condensadores con la finalidad de evitar el sobrecalentamiento en ellos.

Los reportes de EPM registran un solo día con excesos de energía reactiva en el mes de Marzo de 2023; el inventario de bancos de condensadores se encuentra actualizado con respecto al mismo mes, dado que no se pudo acceder al registro de datos para el mes de febrero del año 2023 y analizar el comportamiento de la generación de energía reactiva, queda bajo hipótesis de acuerdo con la tendencia en la generación para el intervalo de datos disponible, que el resultado es el mejoramiento del FP en la frontera y basta únicamente con el mantenimiento y automatización de los bancos de condensadores ya instalados.

El dimensionamiento de los bancos y las alternativas de compensación se presentan siguiendo el punto de operación más crítico en donde la generación de la PCH no satisface completamente la demanda de energía en el circuito y se alcanzan niveles máximos históricos en el consumo de energía reactiva en la frontera. El ideal de la propuesta es garantizar la instalación de bancos de condensadores en BT para cada subestación, esta alternativa se presenta más viable y económica, teniendo en cuenta los dispositivos ya instalados y que requieren mantenimiento y automatización.

A. Análisis económico.

El cálculo del costo de energía reactiva en exceso total, se realiza mediante la sumatoria de los excesos para cada hora en específico, por ejemplo, para la hora 1 se suman todos los excesos de energía reactiva inductiva en los 30 días del mes y se multiplica por el cargo SDL debido al transporte de energía reactiva en la red, finalmente el costo mensual es la sumatoria de dichas cantidades. El mes de julio de 2022, por presentar mayor consumo de energía reactiva inductiva (**Fig. 13**), el exceso presenta un costo aproximadamente igual a \$237.201.127,79; para el mes de mayo de 2022 ya que solo se facturan únicamente 5 días de exceso de reactivos el costo es igual a \$11.954.032,57. Mientras que para el mes de febrero de 2023, el costo por excesos de energía reactiva inductiva suman en total \$ 2.570.589 el equivalente al 29,8% de la suma total en los 10

meses; una reducción considerable si se analizan los meses previos y con respecto al máximo costo liquidado en el mes de julio del año 2022, el costo total de energía reactiva inductiva en los 10 meses es igual a COP\$ 861.289.697,1; equivalente al 12,9% del costo total facturado en los 10 meses.

En los excesos de energía reactiva capacitiva (Fig. 14), los meses de mayo y junio no se refleja ningún costo. El mayor costo y transporte de energía reactiva capacitiva se da el mes de diciembre de 2022, con un total de 180.039,45 kVArh y un costo de COP\$1.529.817,52. El costo total de energía reactiva capacitiva para los 10 meses es igual a COP\$ \$ 4.137.701,12 equivalente al 0.06% de la suma total en los 10 meses. El costo total de energía activa en los 10 meses aproximadamente igual a COP\$ \$ 5.811.738.447,63 equivalente al 87% del total en los 10 meses, que es igual a COP\$ \$ 6.677.165.845,85. El balance de los costos de facturación de energía eléctrica, para el inicio el consumo de energía activa, del año 2023 ha aumentado considerablemente teniendo en cuenta el aumento en la producción. Pero es necesario aclarar, que en los últimos 3 meses el aumento se encuentra relacionado con el consumo de energía activa, el cobro por penalización de excesos de energía reactiva inductiva y capacitiva ha disminuido considerablemente, hasta el registro de excesos de 1 día para el mes de marzo de 2023, la razón principal es la compensación por parte de la generación en la PCH, operando a un FP en promedio por hora de 0,9 p.u.

La inversión en bancos de condensadores es rentable analizándolo desde el histórico de costos por penalizaciones reportados por EPM. En pocas palabras la liquidación de energía por excesos de reactivos es alta y económicamente es más viable la compensación en BT, aprovechando los equipos ya instalados, almacenados y realizar futuras compras, por otra parte; es necesario un trabajo colaborativo con la empresa Navar, de tal forma que se instalen los bancos de condensadores en las subestaciones eléctricas que no cuentan con ellos. La compensación en MT para el nodo de interconexión es una opción viable siempre y cuando las baterías de condensadores sean automáticas, generalmente este tipo de sistemas son fijos y al utilizar esta tecnología puede existir el riesgo de existir sobrecompensación y transporte de energía reactiva capacitiva en la red. Por otra parte, la instalación de baterías de condensadores en MT suelen ser costoso. Por lo que la alternativa de compensación en BT se presenta más económica.

VII. CONCLUSIONES

Se monitoreó el FP en la frontera comercial con EPM en la subestación la Cruzada en la barra de 44 kV, conectando el analizador de redes en la subestación de 44 kV dentro de la zona industrial de la empresa, se obtuvieron los perfiles de carga individuales para cada circuito, haciendo el pertinente diagnóstico a la red, en temas de distorsión armónica, desequilibrios y variaciones de la tensión, mediante el comportamiento del FP con los efectos de generación de la PCH, y un FP de referencia para los barrajes de las subestaciones se simuló los efectos de la compensación en BT observando el mejorando del FP en el punto de medida de EPM. El problema de optimización del FP en la subestación La Cruzada es muy complejo debido al flujo bidireccional variable en la frontera, tomar la medida en este punto se dificultó dadas las restricciones de EPM dentro de la subestación.

Se hizo el seguimiento técnico y registros estadísticos de las variables medidas, además del consumo de energía de la red de EPM, se determinaron los costos y consumos totales de energía mensual, al conocer la tendencia de los excesos de energía reactiva inductiva y los niveles de energía reactiva capacitiva que se dan por sobrecompensación, se observa que a partir del mes de marzo los excesos de energía reactiva inductiva son nulos disminuyendo los costos por penalizaciones, el consumo de energía activa para el último mes aumenta, obedeciendo a las exigencias en la producción.

Se realizó la propuesta técnica y económica a corto plazo buscando minimizar los costos por penalizaciones, usando el máximo valor de la generación en la PCH, junto con el consumos de potencia máximo en la carga para el mismo intervalo de tiempo, se realizó la simulación de la red con dos alternativas de compensación, se dimensionaron las características principales de los bancos de condensadores que se pueden conectar tanto en baja como en media tensión, y que se pueden implementar para compensar energía reactiva en las condiciones de operación más críticas de la red, es decir, en el momento en que se alcancen los valores máximos históricos de energía reactiva inductiva en el punto de medida de EPM. Para ese caso, la compensación es útil siempre y cuando el control de pasos del banco de condensadores se realice con el FP del punto de medida

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 64

de EPM, en caso contrario; se debe definir un FP de referencia igual a 0,95 p.u. en los puntos donde se encuentren conectados, de tal forma que se optimice esta variable hacia el nodo de interconexión.

Se presenta el informe correspondiente a la solución propuesta, teniendo en cuenta el alcance en términos académicos y basándose en el estado de los bancos de condensadores instalados en BT en la mayoría de subestaciones de la red, se estableció oportunidades de mejora en la compensación de los excesos de energía reactiva y evidenciando las causas de los mismos en los registros estadísticos, resaltando la importancia del mantenimiento preventivo y correctivo en estos dispositivos y que a pesar de existir una mejora en el FP en las mediciones hechas por EPM para el mes de marzo, es necesario tener un plan de respaldo en la compensación de energía reactiva inductiva, sin depender estrictamente de la generación de reactivos en la PCH.

VIII. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se presentan, se realizan con el fin de profundizar en temas relacionados con las tecnologías de compensación de potencia reactiva y el mantenimiento eléctrico de los dispositivos instalados en la red, la primera tiene que ver con el estudio completo de compensación en MT, es necesario realizarse en puntos cercanos a la frontera comercial, ya sea en el nodo de interconexión, abarcando el diseño, evaluación y cotización de sistemas que se puedan automatizar. Una tecnología importante a explorar es la compensación utilizando bancos de condensadores automáticos tipo poste, evaluar la viabilidad de ser instalados en la línea de conexión entre el nodo y la subestación La Cruzada.

La segunda recomendación tiene que ver con el uso de la electrónica de potencia y la utilización de dispositivos de compensación basados en esta tecnología, analizar las ventajas y desventajas, verificar si pueden ofrecer mejores resultados en comparación con los esquemas de compensación de reactivos tradicionales. El estudio de su implementación para las redes de distribución eléctrica de la mina el Silencio y la planta de beneficio Maria Dama puede significar una solución para la sobrecompensación y el transporte de energía reactiva capacitiva en la red.

El establecimiento y elaboración de planes de mantenimiento preventivo para los bancos de condensadores instalados en la mina son claves para garantizar la operación normal de los mismos en la red. Como recomendación se necesita mayor conocimiento en los temas de calidad de la energía, la implementación de planes de inspección, mantenimiento y automatización de los dispositivos instalados en la mina.

Se recomienda el estudio de la compensación de potencia reactiva por medio de la generación de energía en la PCH, buscando maximizar el factor de aprovechamiento en la generación de energía, de acuerdo con la curva de capacidad del generador. En especial, cuando no se registren los excesos de energía reactiva en la frontera comercial con EPM, buscando puntos de referencia en la operación, de tal forma, que se pueda suplir la demanda de la mina y se pueda mantener más constante la exportación de excedentes de energía activa en la frontera.

Para finalizar, se recomienda hacer un estudio de mercado de las alternativas modernas disponibles para la compensación de energía reactiva, buscando la manera de hacer un análisis financiero que facilite identificar nuevos proyectos e instalación de dichas tecnologías, conocer su aplicabilidad y eficiencia en la compensación de energía reactiva.

REFERENCIAS

- [1] E. DAZA, “MÉTODOS AVANZADOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA,” UNIVERSIDAD DE PAMPLONA, PAMPLONA N. DE S., 2021. Accessed: Apr. 10, 2023. [Online]. Available: [Online]. Available: <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/4878>
- [2] M. Quintero Quiñonez, K. Y. Simisterra Quiñonez, M. R. Ibarra Caicedo, and V. E. Reyes Bone, “Impacto de la iluminación LED en la calidad de la energía de los circuitos de alumbrado público,” *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, vol. 3, no. 4, pp. 286–301, Aug. 2022, doi: 10.51798/sijis.v3i4.472.
- [3] C. Esquivel and A. Ramírez, ““DISEÑO DE UN SISTEMA DE CARGAS R, L Y C PARA EL ESTUDIO DE UN GENERADOR SÍNCRONO EDUCACIONAL,”” Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2019. Accessed: Apr. 10, 2023. [Online]. Available: [Online]. Available: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/28144>
- [4] O. A. Morfín-Garduño *et al.*, “Compensación de potencia reactiva mediante el control robusto de un STATCOM en un sistema de potencia,” *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 22, no. 3, pp. 0–0, Jul. 2021, doi: 10.22201/FI.25940732E.2021.22.3.020.
- [5] P. Rojas, “Optimización del sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en la Unidad Minera Chungar e Islay,” Universidad Continental, Huancayo, 2021. Accessed: Apr. 10, 2023. [Online]. Available: [Online]. Available: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10518>
- [6] “Evaluación económica del proyecto de mejora de la calidad de la energía eléctrica en el sistema eléctrico de Nexans S.A.” <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/1153> (accessed Jan. 14, 2023).
- [7] F. LLumiquinga Loya, “Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: Diseño de un banco de condensadores para la corrección del factor de potencia de la empresa Banchisfoof S.A.,” 2012. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1888> (accessed Jan. 14, 2023).
- [8] A. Y. Albornoz Contreras, “Análisis Y Propuesta De Mejora Tarifaria Para Reducir Costos En Facturación Eléctrica En La Empresa Sipfsa Sa Ubicada En El Distrito De Villa El

-
- Salvador, Departamento De Lima,” *DSpace JSPUI*, 2021, Accessed: Jan. 14, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/805>
- [9] J. Pérez, “DISEÑO DE UN BANCO DE CAPACITORES EN EL MÓDULO A PARA LA EMPRESA COMPAÑÍA DE EMPAQUES ,” 2021. [Online]. Available: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/21602/11/AriasJohan_2021_BancoCapacitoresModulo.pdf (accessed Apr. 07, 2023).
- [10] D. B. Vasconcellos and V. L. Martínez, “Evolución y desarrollo de los dispositivos compensadores de potencia reactiva,” *Ingeniería Energética*, vol. XXVI, no. 2, pp. 48–52, 2005, Accessed: Jan. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329127736010>
- [11] J. Pimienta, “Sistemas de Compensacion Impulsando la transformación energética,” 2017. Accessed: Feb. 11, 2023. [Online]. Available: [Online]. Available: https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/eventos/abb-high-voltage-customer-day-2017/sistemas-de-compensacion-para-l%C3%ADneas-de-distribuci%C3%B3n.pdf?sfvrsn=d13f9612_2
- [12] VATIA, “Así funciona el mercado regulado y el no regulado.” [Online]. Available: <https://www.vatia.com.co/as237-funciona-el-mercado-regulado-y-el-no-regulado> (accessed Apr. 07, 2023).
- [13] CREG, “Alejandría - Resolución 15 de 2018 CREG,” [Online]. Available, Feb. 2018. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0015_2018.htm (accessed Apr. 07, 2023).
- [14] Grupo EPM, “SELECCIÓN Y CONEXIÓN DE EQUIPOS DEL SISTEMA DE MEDIDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA,” 2021. [Online]. Available: https://cu.epm.com.co/Portals/proveedores_y_contratistas/proveedores-y-contratistas/normas-tecnicas/documentos/DOCUMENTOS-ENERGIA/NORMAS-TECNICAS-PARA-REDES-AEREAS/NORMAS-TECNICAS/RA8_030-R4-2021.pdf?ver=lasf0xiK5EOWWAim2Fa8Bw%3d%3d (accessed Apr. 07, 2023).
- [15] “Baterías de Condensadores MT,” *CIRCUTOR*. [Online]. Available: [https://circutor.com/productos/compensacion-de-energia-reactiva-y-filtrado-de-armonicos/baterias-de-condensadores-mt/product/R9BMF0./](https://circutor.com/productos/compensacion-de-energia-reactiva-y-filtrado-de-armonicos/baterias-de-condensadores-mt/product/R9BMF0/) (accessed Apr. 10, 2023).

- [16] Alianza Eléctrica, “BANCOS DE CAPACITORES,” 2022. [Online]. Available: <https://tienda.alianzaelectrica.com/collections/capacitores-abb-1> (accessed Apr. 10, 2023).
- [17] Schneider Electric, “Banco de Condensadores VarSet,” 2022. [Online]. Available: <https://www.se.com/es/es/product/VLVAW2N03511AA/banco-de-condensadores-varset-auto-175kvar-com-entrada-bat-xxb-400v-50hz/> (accessed Apr. 10, 2023).
- [18] “Statkraft elige los condensadores síncronos de ABB para conseguir que la operadora National Grid cumpla sus objetivos de cero emisiones de carbono.” [Online]. Available: <https://new.abb.com/news/es/detail/74025/statkraft-elige-los-condensadores-sincronos-de-abb-para-conseguir-que-la-operadora-national-grid-cumpla-sus-objetivos-de-cero-emisiones-de-carbono> (accessed Jan. 14, 2023).
- [19] Fluke Corporation, “1773/1775/1777 3 Phase Power Quality Analyzer Manual de uso,” Sep. 2021. [Online]. Available: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/177x____umspa0000_0.pdf?23iejQwxa0DXvUepLNdaQwoZDD8EFiI (accessed Apr. 07, 2023).

ANEXOS

Anexo A. Descripción de la fórmula para el cálculo de costos por transporte de energía reactiva.

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

En donde:

$CTER_{u,n,h,m,j}$: Costo en pesos del transporte de energía reactiva en exceso sobre el límite asignado al usuario del STR o SDL u, en el nivel de tensión n, en la hora h del mes m, del sistema operado por el OR j.

$ER_{u,h,m,j}$: Cantidad en exceso de energía reactiva sobre el límite asignado al usuario del SDL u, en la hora h del mes m, en el sistema del OR j, medido en kVArh.

$D_{n,h,m}$: Cargo debido al uso del sistema de distribución para el transporte de energía reactiva, es igual al cargo por uso del nivel de tensión n, en la hora h del mes m.

M : Es la variable asociada al periodo mensual en donde se presentan excesos de energía reactiva, variando entre 1 y 12. Cuando el exceso de energía reactiva sobre el límite establecido se presente durante cualquier periodo horario en un mismo mes calendario en 10 días o menos, la variable M será igual a 1. En el caso de que exista exceso de energía reactiva sobre el límite se presente en cualquier periodo horario en más de 10 días en un mismo mes calendario, la variable M será igual a 1 durante los primeros 12 meses en los que se presente esta condición, después del mes número 13, con transporte de energía reactiva bajo las mismas condiciones, la variable incrementará hasta 6. Si los excesos de energía reactiva sobre el límite desaparecen durante 3 meses consecutivos la variable M reiniciará a partir de 1. Cuando el valor $M = 6$, se haya mantenido por más de 12 meses, en caso de seguir presentándose exceso de energía reactiva sobre el límite, a partir del mes siguiente la variable incrementará en 1 de forma mensual hasta alcanzar el valor de 12 [13].

Como condiciones para el pago del transporte de energía reactiva en el caso de que el OR o un usuario final incurra en ellas, se tiene:

La energía reactiva inductiva consumida, en kVArh, por un OR sea mayor al 50% de la energía activa, en kWh, que se le entrega en cada periodo horario en los niveles de tensión 1, 2 o 3. El cálculo del exceso se efectúa sumando la energía reactiva horaria de los puntos de frontera en un mismo sistema, es decir puntos de conexión con otros sistemas (STN, OR) en el mismo nivel

de tensión, el balance se calcula mediante sumas aritméticas considerando los flujos de energía activa y reactiva en los puntos de frontera [13].

Cuando el usuario final registre en su frontera comercial excesos de energía reactiva inductiva superior al 50% de la energía activa entregada en cada periodo horario y en caso de que el valor de energía activa sea igual a 0 kWh en algún periodo, el costo de transporte de energía reactiva inductiva se efectuará sobre la totalidad de energía reactiva registrada en el periodo bajo cuestión [13].

Cuando se registre en la frontera comercial transporte de energía reactiva capacitiva, sin importar el valor de energía activa se cobrará el costo de transporte de energía reactiva sobre la totalidad registrada [13].

El valor de la variable $IReactiva_{j,n,t}$, se puede calcular con la Ecuación (A.2).

$$IReactiva_{j,n,t} = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^U \sum_{m=1}^{12} \sum_{h=1}^{24} CTER_{u,n,h,m,j,t-1} \quad (A.2)$$

Donde, según la resolución se pueden definir las variables de la Ecuación (A.2) como:

$IReactiva_{j,n,t}$: Ingresos a descontar al OR j con el nivel de tensión n debido al transporte de energía reactiva en exceso durante el año t.

$CTER_{u,n,h,m,j,t-1}$: Costo del transporte de energía reactiva en exceso teniendo en cuenta el límite asignado al usuario del STR o SDL u, en pesos en un nivel de tensión n, en la hora h del mes m, del sistema operado por el OR j.

U : Cantidad de usuarios u que pagaron al OR j los cargos por transporte de energía reactiva durante el año t en un mismo nivel de tensión n.

En caso de que el LAC no reciba información de un OR determinado, para el cálculo de la liquidación correspondiente, se le asignará la variable $IReactiva_{j,n,t}$, de mayor valor entre las presentadas.

Anexo B. Dispositivos de compensación de potencia reactiva

Se ilustran los diferentes dispositivos para la compensación de potencia reactiva y el mejoramiento en el FP dentro de las instalaciones eléctricas. Los dispositivos se clasifican

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 71

dependiendo de la tecnología y el modo de operación ya sea dinámico, estático, de compensación fija o escalonada.



Fig. 29. Condensador Síncrono ABB

Nota: Fuente[18]



Fig. 30. Imagen ilustrativa del DVR

Nota: Imagen tomada de <https://bit.ly/3INsOjo>



Fig. 31. Banco automático de condensadores

Nota: Fuente propia.



Fig. 32. Imagen ilustrativa SVC

Nota: Imagen tomada de <http://bit.ly/3JZ2pqG>



Fig. 33. Banco de capacitores fijo

Nota: Imagen tomada de <http://bit.ly/3nx3df1>



Fig. 34. Banco automático de condensadores tipo poste - MT

Nota: Imagen tomada de Anexo E1.

Anexo C. Métodos de compensación de potencia reactiva.

Se ilustran los métodos utilizados en la compensación de reactivos usando la tecnología convencional del uso de condensadores.

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.

Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 72

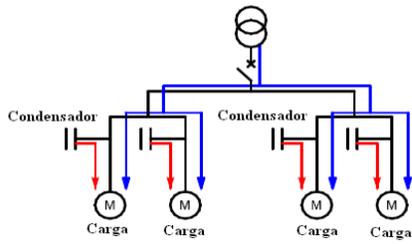


Fig. 35. Ilustración de la compensación individual

Nota: Fuente [3].

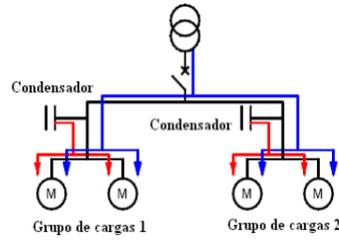


Fig. 36. Ilustración de compensación en grupo

Nota: Fuente [3].

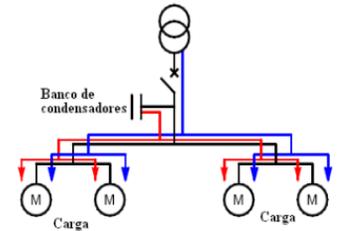


Fig. 37. Ilustración de compensación central o global

Nota: Fuente [3].

Anexo D. Imágenes ilustrativas del modelo de red en ETAP.

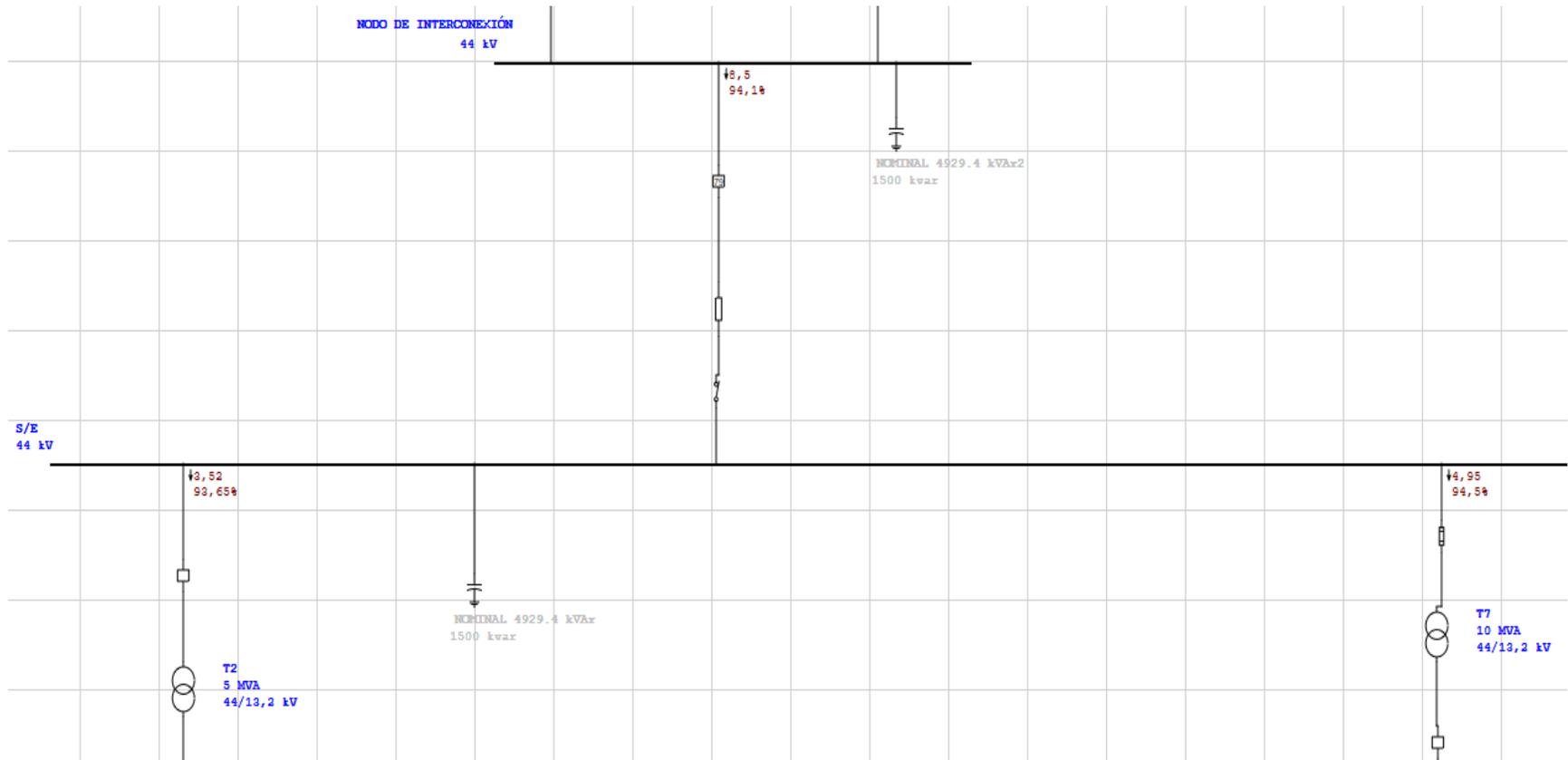


Fig. 38. Barraje de la subestación eléctrica de 44 kV

Nota: Imagen extraída de la simulación en ETAP 16.0.0.

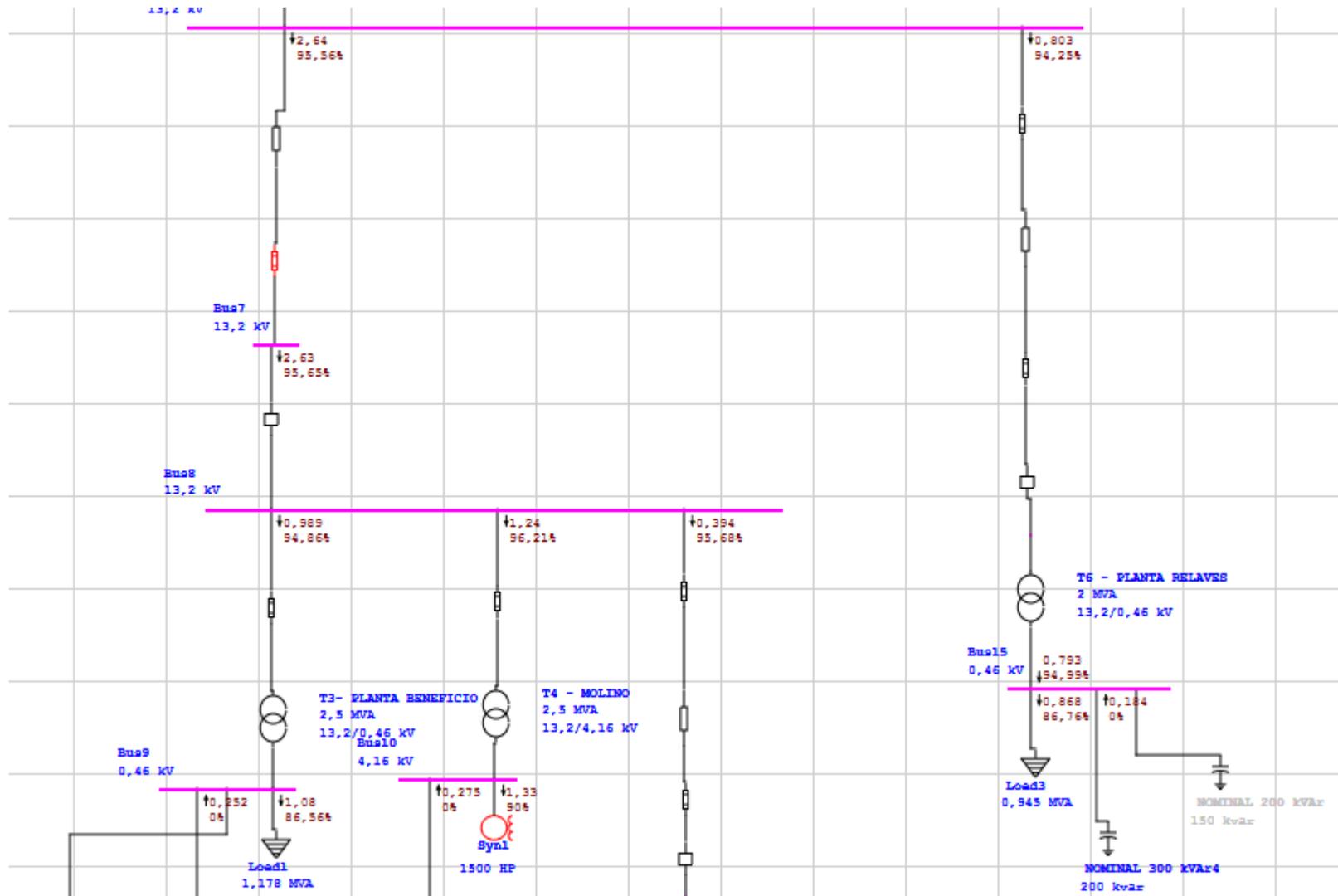


Fig. 39. Parte del circuito de alimentación planta Maria Dama

Nota: Imagen extraída de la simulación en ETAP 16.0.0.

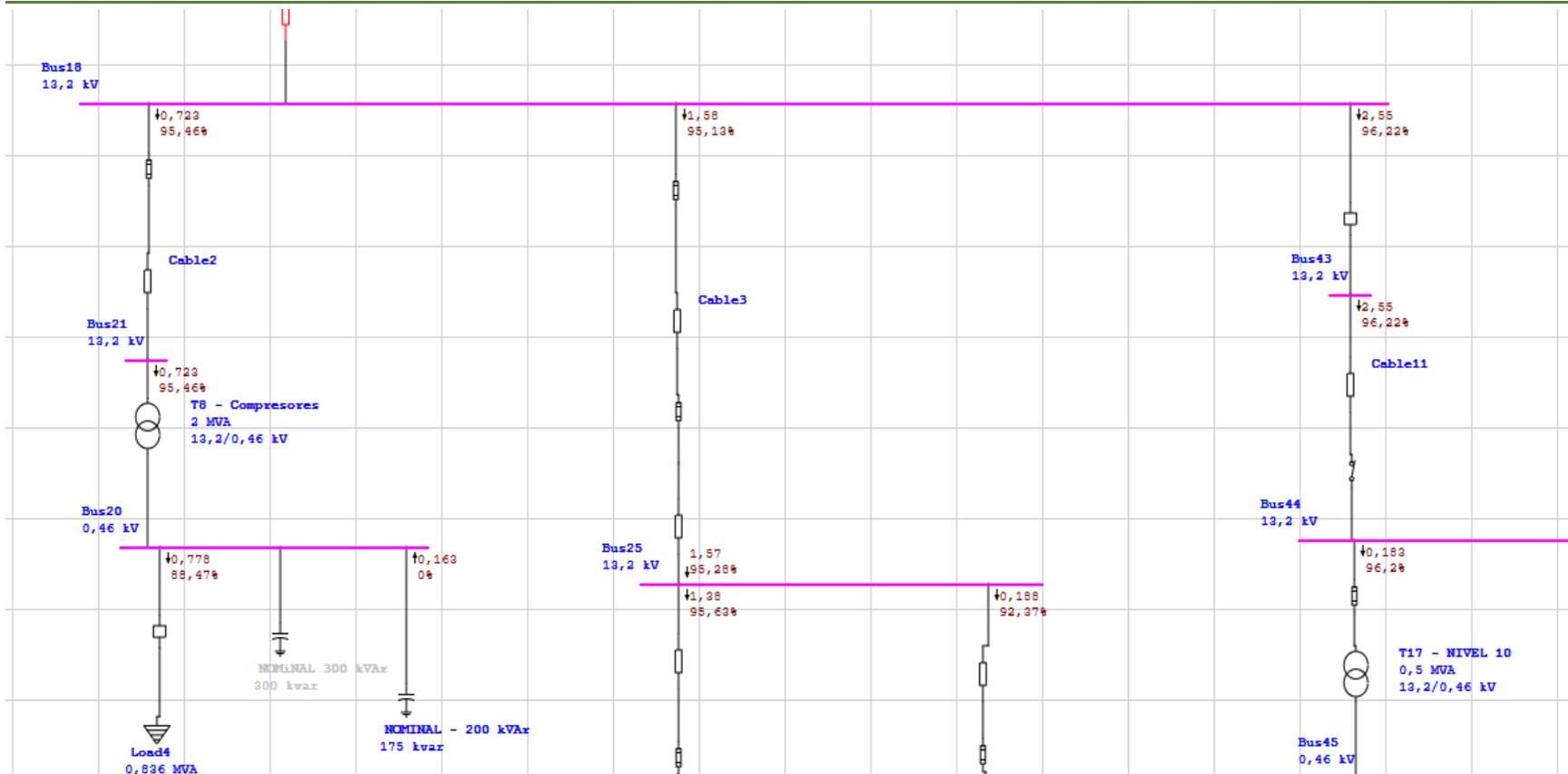


Fig. 40. Parte del circuito de alimentación planta mina el Silencio

Nota: Imagen extraída de la simulación en ETAP 16.0.0.

ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN LA BARRA DE 44 kV LA CRUZADA DE ARIS MINING SEGOVIA.
 Análisis y corrección del factor de potencia de la barra de 44 kV de la subestación la Cruzada teniendo en cuenta el modo de operación de la PCH Doña Teresa y los efectos de transformación y transmisión de energía eléctrica. 76

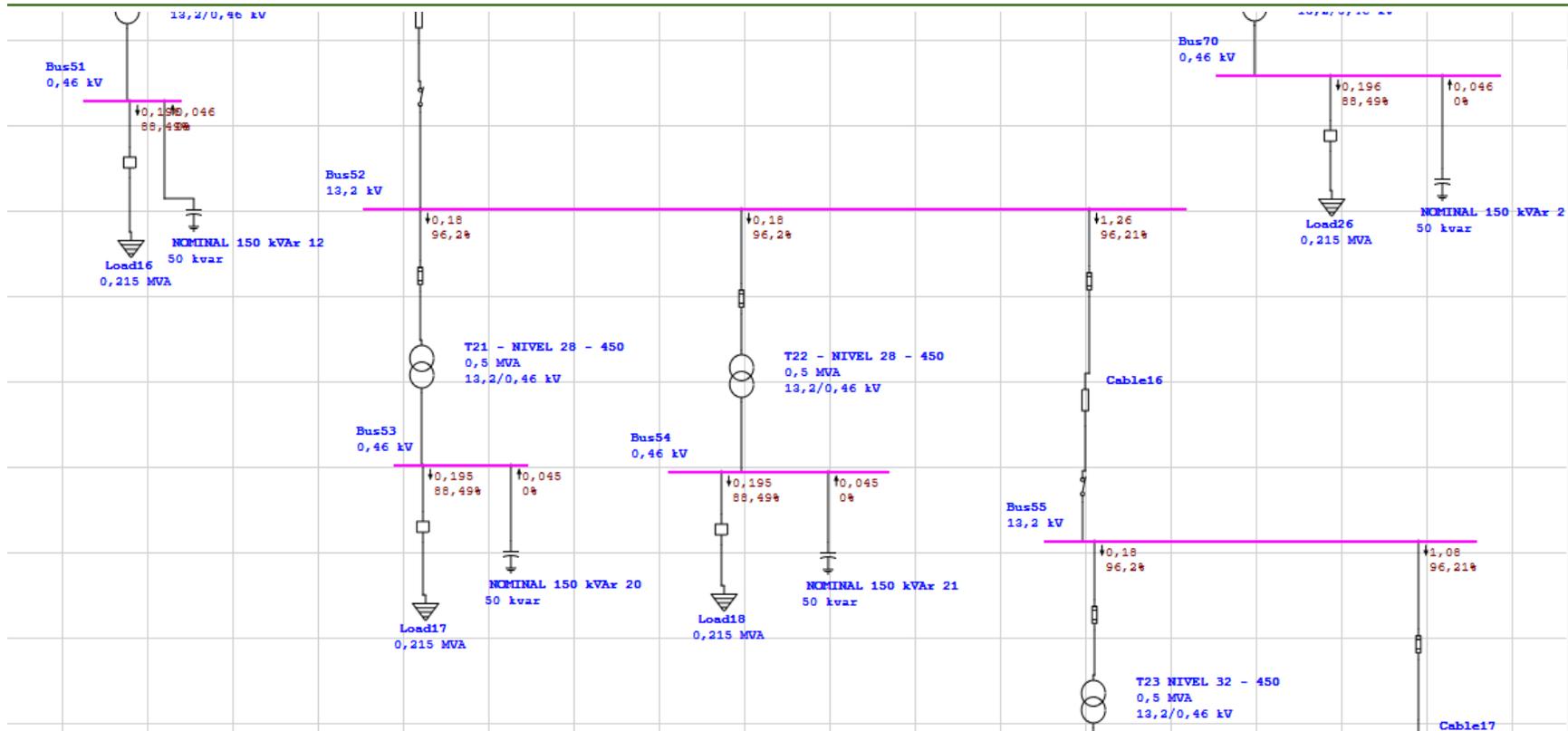


Fig. 41. Parte del circuito de alimentación planta mina el Silencio

Nota: Imagen extraida de la simulación en ETAP 16.0.0

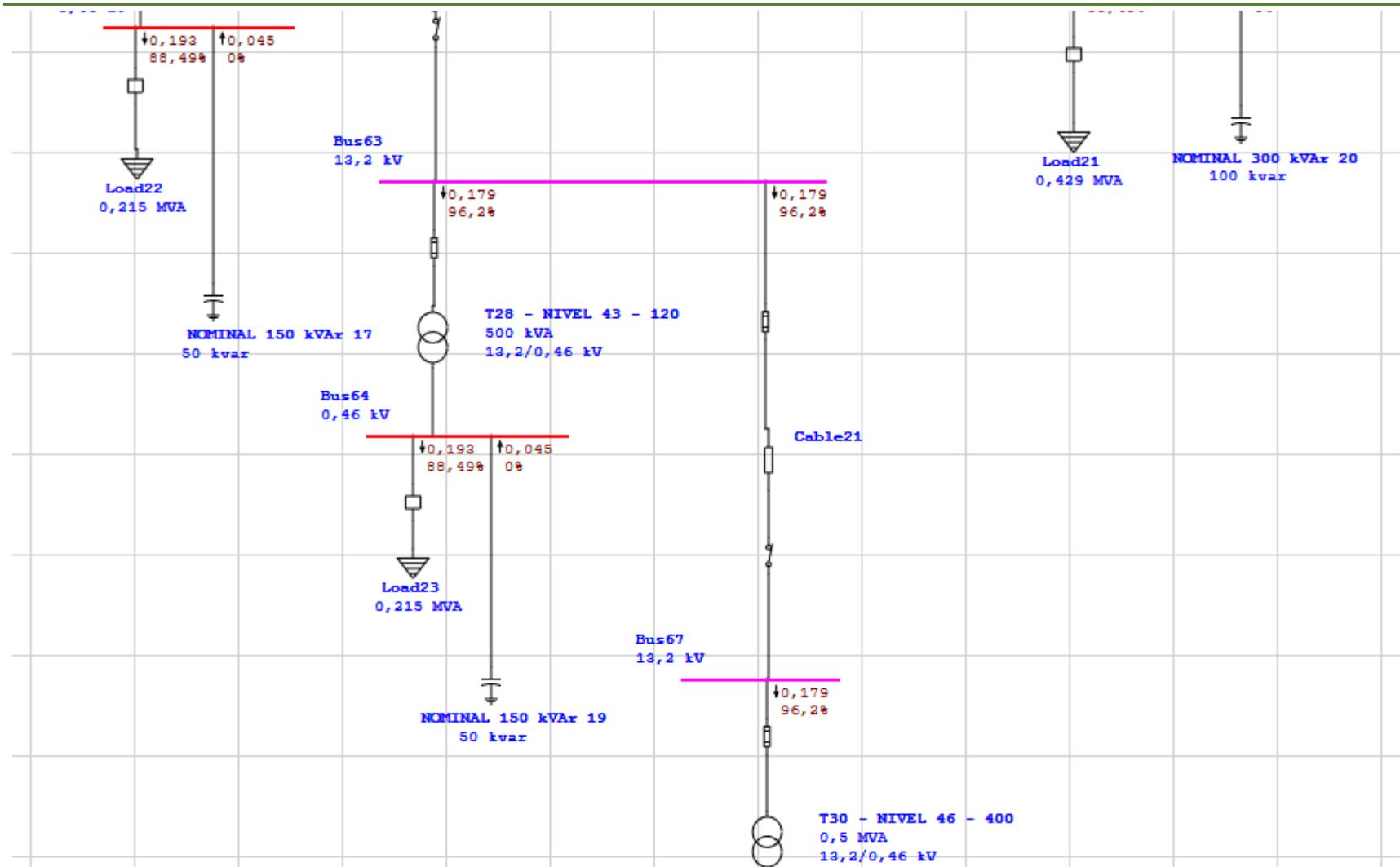


Fig. 42. Parte del circuito de alimentación planta mina el Silencio

Nota: Imagen extraída de la simulación en ETAP 16.0.0