

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Optimización del sistema de compensación reactiva
para mejorar la calidad de energía eléctrica en la Unidad
Minera Chungar e Islay**

Percy Frank Rojas Palacios

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR

MSc. Joel Colonio Llacua

AGRADECIMIENTO

A Dios que ilumina mi camino, a mis padres que me dieron educación y mis maestros por transmitirme sus conocimientos.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por su apoyo y buenos consejos.

A Nathaly, por su ayuda incondicional y a mis hijos Frank y Percy en los momentos difíciles de la vida.

ÍNDICE

Asesor	ii
Agradecimiento	iii
Dedicatoria	iv
Índice.....	v
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	x
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
Introducción.....	xiv
CAPÍTULO I.....	15
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	15
1.1 Planteamiento y formulación del problema	15
1.1.1 Problema general	15
1.1.2 Problemas específicos	16
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo general	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 Justificación e importancia	17
1.3.1 Justificación.....	17
1.3.2 Importancia.....	17
1.4 Hipótesis y descripción de variables	17
1.4.1 Hipótesis general.....	17
1.4.2 Hipótesis específicas	17
1.4.3 Variables	18
1.4.4 Operación de variables.....	18
CAPÍTULO II.....	19
MARCO TEÓRICO	19
2.1 Antecedentes del problema	19
2.1.1 Antecedentes internacionales	19
2.1.2 Antecedentes nacionales	20
2.1.3 Antecedente regional.....	21
2.2 Bases teóricas	22

2.2.1 Norma técnica de calidad de servicios eléctricos	22
2.2.1.1 Tensión RMS	23
2.2.1.2 Tensiones armónicas.....	24
2.2.1.3 IEEE 519.....	25
2.2.1.4 La norma IEC 61000.....	26
2.2.2 Métodos de compensación reactiva	29
2.2.2.1 Compensación mediante máquinas sincrónicas.....	29
2.2.2.2 Compensación de potencia	29
2.2.2.3 Compensación de potencia mediante banco de condensadores	30
2.2.2.4 Tipos de compensación	30
2.2.3 Definición de términos	31
CAPÍTULO III.....	32
METODOLOGÍA	32
3.1 Tipo de investigación	32
3.2 Método de la investigación.....	32
3.3 Nivel de la investigación.....	32
3.4 Diseño de la investigación	33
3.5 Población y muestra	33
3.6 Técnicas e instrumento de recolección de datos	33
3.6.1 Técnicas de recolección de datos	33
3.6.2 Instrumentos de la recolección de datos	34
CAPÍTULO IV.....	35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información	35
4.1.1 Evaluación de la calidad de energía.....	35
4.1.1.1 Subestación Animón.....	36
4.1.1.2 Jacob Pique Timmers	45
4.1.2 Modelado de la red.....	57
4.1.3 Compensación reactiva	57
4.1.3.1 Compensación reactiva de las unidades mineras Chungar e Islay	57
4.1.4 Localización óptima de capacitores en las unidades mineras Chungar e Islay	58

4.1.4.1 Alternativa 1: compensación reactiva localizada en la carga	58
4.1.4.2 Alternativa 2: centralizada en la subestación Animón.....	60
4.1.4.3 Alternativa 3: compensación centralizada en media tensión	61
4.1.4.4 Alternativa 4: compensación mixta en 0.48 kV y 4.16 kV ...	62
4.1.4.5 Alternativa 5: compensación mixta en 0.48 kV y 22.9 kV ...	63
4.1.5 Comparación de alternativas.....	64
4.1.6 Estandarización de sistemas de compensación reactiva	66
4.1.7 Niveles de tensión en barras candidatas.....	67
4.1.8 Compensación reactiva mixta.....	68
4.1.8.1 Alternativa óptima obtenida mediante OCP	68
4.1.8.2 Sobre el pago por exceso de energía reactiva	69
4.1.8.3 Sobre la compensación reactiva del pique Timmers	69
4.1.8.4 Red eléctrica.....	70
4.1.8.5 Modelo eléctrico.....	71
4.1.8.6 Oferta y demanda	73
4.1.8.7 Escenario de simulación	73
4.1.9 Cálculo de capacidad de sistema de compensación reactiva mediante flujo de potencia	74
4.1.9.1 Determinación de pasos	75
4.1.9.2 Simulación de armónicos.....	76
4.1.9.3 Cálculo de distorsión armónica.....	80
4.1.9.4 Cálculo de la impedancia armónica	80
4.1.9.5 Cargabilidad del sistema de compensación reactiva	82
4.2 Pruebas de hipótesis	82
4.3 Discusión de resultados	83
Conclusiones.....	86
Recomendaciones.....	87
Lista de referencias	88
Anexos	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Límites de armónicos individuales según NTCSE.....	25
Figura 2. Límites de armónicos individuales según IEC 61000.....	29
Figura 3. Formato de recolección de datos.....	33
Figura 4. Instrumento de recolección de datos.....	34
Figura 5. Sistema eléctrico Chungar.....	35
Figura 6. Distribución normal de la tensión RMS en la subestación Animón ...	37
Figura 7. Espectro armónico de tensión – Bahía L-6542.....	41
Figura 8. Distorsión armónica de tensión y corriente – Bahía de L-6542.....	42
Figura 9. Espectro armónico de tensión en TR-03 (lado 23 kV).....	43
Figura 10. Espectro armónico de corriente en SE Animón 23 kV.....	44
Figura 11. Espectro armónico de corriente en LP 13.....	44
Figura 12. Corriente de arranque de motor 2,150 HP (Winche Producción Nordberg) y su impacto en la tensión.....	47
Figura 13. Espectro armónico de tensión en bornes de convertidores de motor 2,150 HP.....	52
Figura 14. Espectro armónico de tensión transformador TR-084 lado 4.16 kV	53
Figura 15. Espectro armónico de corriente de transformador TR-084 (lado 4.16 kV) hacia motor 2,150 HP.....	54
Figura 16. Espectro armónico de corriente en bornes de convertidores de motor 2,150 HP.....	55
Figura 17. Pérdidas de potencia del sistema Chungar.....	64
Figura 18. Costo de instalación de compensación reactiva en el sistema de la unidad minera Chungar.....	64
Figura 19. Factor de potencia visto desde Francoise 50 kV.....	65
Figura 20. Dependencia en la frecuencia de la resistencia e inductancia del transformador.....	72
Figura 21. Tensión RMS ante la conexión de 3,000 kVAr en la subestación Animón 22.9 kV.....	76
Figura 22. Espectro de tensión armónica simulada Paragsha II 220 kV.....	77
Figura 23. Esquema simplificado del modelo desarrollado para simulación de armónicos.....	78
Figura 24. Espectro armónico de corriente en base a mediciones de LP-13 ...	78

Figura 25. Impedancia armónica en la SE Animón 23 kV	80
Figura 26. Impedancia armónica en la SE Animón 220 kV	81
Figura 27. Corriente armónica máxima consumida por el banco de capacitores	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	18
Tabla 2. Tolerancias de Vh y THDv según NTCSE.....	24
Tabla 3. Tolerancias de Vh y THDv según IEEE 519.....	26
Tabla 4. Límites de emisión de corriente armónica según IEEE 519	26
Tabla 5. Tolerancia para la tensión RMS según IEC 61000-2-4	27
Tabla 6. Tolerancias de huecos de tensión al año según IEC 61000-4-11	27
Tabla 7. Tolerancias de armónicos individuales de tensión de impares no múltiplos de 3	28
Tabla 8. Tolerancias de armónicos individuales de tensión de impares múltiplos de 3	28
Tabla 9. Tolerancias de armónicos individuales de tensión de pares según IEC 61000-2-4	28
Tabla 10. Tensión RMS en la subestación Animón.....	36
Tabla 11. Potencia activa, reactiva y factor de potencia en la SE Animón.....	37
Tabla 12. Índice de severidad por Flicker en la subestación Animón.....	39
Tabla 13. Distorsión total de tensión en la subestación Animón	40
Tabla 14. Tensión armónica individual de orden 5 – subestación Animón.....	40
Tabla 15. Tensión RMS en SE Montenegro (casa Winche).....	45
Tabla 16. Potencia activa, reactiva y factor de potencia en la subestación Montenegro (casa Winche).....	48
Tabla 17. Índice de severidad por Flicker en la subestación Montenegro (casa Winche)	50
Tabla 18. Distorsión total de tensión en la subestación Montenegro (casa Winche)	51
Tabla 19. Distorsión total de la demanda en la subestación Montenegro (casa Winche)	54
Tabla 20. Resultados de simulación OCP – Alternativa 1	59
Tabla 21. Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 1	59
Tabla 22. Resultados de simulación OCP – Alternativa 2	60
Tabla 23. Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 2	60
Tabla 24. Resultados de simulación OCP – Alternativa 3.....	61
Tabla 25. Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 3	61

Tabla 26. Resultados de simulación OCP – Alternativa 4	62
Tabla 27. Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 4	63
Tabla 28. Resultados de simulación OCP – Alternativa 5	63
Tabla 29. Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 5	63
Tabla 30. Capacidad de sistema de compensación reactiva calculada por OCP	66
Tabla 31. Capacidad estándar de los bancos de capacitores	67
Tabla 32. Nivel de tensión en barras de 0.48 kV	68
Tabla 33. Cortocircuito trifásico en Paragsha II 220 kV.....	70
Tabla 34. Parámetros de transformadores de potencia	72
Tabla 35. Parámetros eléctricos de líneas de transmisión	73
Tabla 36. Simulación de flujo de potencia.....	74
Tabla 37. Factor de potencia visto desde 50 kV con bancos de capacitores ...	75
Tabla 38. Potencia reactiva vista desde 50 kV y 23 kV con bancos de capacitores	75
Tabla 39. Distorsión total de tensión simulada en la SE Animón	79

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo optimizar el sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

El método de la investigación es el cuantitativo porque se realizaron un conjunto de procedimientos para encontrar la respuesta a la investigación. El diseño de la investigación es preexperimental porque se trabajó con un grupo de investigación y se evaluó un antes y un después del comportamiento del grupo. La muestra y la población es el sistema eléctrico de las unidades mineras Chungar e Islay. La técnica que se utilizó es la observación del sistema de compensación reactiva, también se utilizó información de la tecnología.

De acuerdo a la simulación de 5 alternativas de solución, se precisa que las alternativas 1 y 5 presentan las mismas barras candidatas en BT. Con la diferencia en la consigna o restricción para el OCP. En el caso de la alternativa 1 se considera una consigna por factor de potencia y en la alternativa 5 se considera una consigna por regulación de tensión. Si bien es cierto, la alternativa 5 es la óptima, por fines de diseño se considera la mayor capacidad del sistema de compensación reactiva en BT, que es obtenida mediante la alternativa 1.

ABSTRACT

The present research work aims to optimize the reactive compensation system to improve the quality of electrical energy in the electrical system at the Chungar and Islay mining unit.

The research method is quantitative because we will perform a set of procedures to find the answer to our research. The research design is pre-experimental because we worked with a research group, and we will evaluate a before and after of the group's behavior. The sample and the population are the electrical system of the Chungar and Islay mining unit. The technique that was used is the observation of the reactive compensation system, technology information was also used.

According to the simulation of 5 solution alternatives. It is specified that Alternatives 1 and 5 present the same candidate bars in BT. With the difference in the slogan or restriction for the OCP. In the case of alternative 1, a power factor command is considered and in Alternative 5 it is considered a voltage regulation command. Although it is true, alternative 5 is the optimal one, for design purposes it is considered the greater capacity of the LV reactive compensation system, which is obtained through Alternative 1.

INTRODUCCIÓN

La compensación en los sistemas eléctricos industriales en la actualidad es un tema importante por la cantidad de energía reactiva que se viene generando. La compensación reactiva puede aplicar con varios métodos, pero en la tesis se aplicó el método de compensación por banco de condensadores, la característica principal de este tipo de compensación es que es la más económica. El interés en esta investigación es proponer un tipo de solución al problema de la investigación (compensación reactiva) y para ello se utilizó una metodología que tiene una secuencia de la investigación científica.

La estructura de la tesis está dividida en cuatro capítulos siendo el Capítulo I en donde se realiza el planteamiento del problema y se plantean los objetivos, justificando la investigación. En el Capítulo II se realiza un marco teórico adecuado para la investigación como son teorías de las variables de la investigación. El Capítulo III contiene la metodología de estudio de la tesis y por último se tiene el Capítulo IV donde se muestran los resultados y su discusión.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

Las unidades mineras Chungar e Islay son empresas subsidiarias de Volcan que se encuentra ubicada a 4600 m s. n. m. en el departamento de Pasco, presenta problemas de compensación de energía reactiva en su sistema eléctrico, este problema se viene presentando desde el año 2017, para lo cual se desarrollaron una serie de proyectos de mejora de la compensación reactiva focalizadas, pero estos esfuerzos de minimizar los reactivos no lograron solucionar el problema. Este se manifiesta en variaciones del nivel de tensión, perturbaciones e interrupciones del servicio eléctrico. Esta mala calidad de energía eléctrica trae como consecuencia el deterioro, mal funcionamiento de los equipos y el incremento del costo total de facturación mensual.

El tema de investigación tiene por objetivo principal optimizar el sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

1.1.1 Problema general

¿Cómo optimizar el sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay?

1.1.2 Problemas específicos

¿De qué manera dimensionar la capacidad de los bancos de capacitores para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay?

¿De qué manera ubicar los bancos de capacitores para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay?

¿De qué manera corregir el factor de potencia para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay?

1.2 Objetivos

La investigación presenta un objetivo general y tres específicos que ayudaron al propósito del estudio.

1.2.1 Objetivo general

Optimizar el sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

1.2.2 Objetivos específicos

Dimensionar bancos de capacitores para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

Localizar bancos de capacitores para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

Corregir el factor de potencia para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación

La presente tesis tiene justificación práctica porque servirá como propuesta técnica para plantear soluciones al problema de los reactivos generados en las unidades mineras Chungar e Islay, y así la unidad minera Chungar tomará decisiones para mejorar la calidad de energía en su sistema eléctrico.

El tema de investigación tiene justificación metodológica, porque se realiza unos procedimientos para la solución de la calidad de energía.

La presente investigación tiene justificación teórica, porque aportan aspectos teóricos en relación a la compensación de reactivos en los sistemas eléctricos de las unidades mineras.

1.3.2 Importancia

La presente tesis es importante, porque permite actuar de forma inmediata al problema encontrado, con la aplicación de esta tesis se optimizará y mejorará la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

1.4 Hipótesis y descripción de variables

A continuación, se presentan las hipótesis propuestas y las variables de la investigación.

1.4.1 Hipótesis general

La optimización del sistema de compensación reactiva mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

1.4.2 Hipótesis específicas

El dimensionamiento adecuado de los bancos de capacitores mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

La localización de bancos de capacitores mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

La corrección del factor de potencia mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

1.4.3 Variables

Variable independiente (x): compensación reactiva.

Variable dependiente (y): calidad de energía eléctrica.

1.4.4 Operación de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Tipo
Variable independiente Sistema de compensación reactiva	Es un proceso de reducir el consumo de energía reactiva presente en un sistema eléctrico.	• Dimensionamiento del banco de capacitores	• Potencia reactiva KVAR	Cuantitativa continua
		• Localización del banco de capacitores	• Lugar de instalación	Cuantitativa continua
		• Cálculo del factor de potencia	• $\cos \phi$	Cuantitativa continua
Variable dependiente Calidad de energía eléctrica	La calidad de energía es una característica del sistema eléctrico de sus parámetros eléctricos.	• Distorsión armónica	• THD %	Cuantitativa continua
		• Impedancia armónica	• Ohmios	Cuantitativa continua

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

2.1.1 Antecedentes internacionales

En la tesis “*Ubicación óptima de compensación para alimentadores mediante el uso de métodos heurísticos y contrastado con CYMDIST*” (1), concluye lo siguiente: se desarrolla un programa mediante Matlab para el cálculo de flujos de potencia y la ubicación óptima de bancos de condensadores en las redes de distribución urbana y rural, mediante la implementación de métodos heurísticos y comparación de los resultados con el programa CYMDIST, cuya licencia de utilización posee la empresa Eléctrica Regional Centro Sur C. A. quien ha provisto la información necesaria para poder realizar los análisis, cálculos y comparación de resultados (1).

En el presente trabajo se encuentra primero una sustentación teórica de los componentes del CYMDIST y de toda la metodología aplicada en el programa desarrollado, como los métodos de distribución de carga, el método Ardivinson para la resolución de flujos, la estimación de las pérdidas en los transformadores monofásicos y trifásicos según la normativa ecuatoriana, como estimar una curva de perfil de carga diario, el principio de la compensación de reactivos y su efecto en una red de

distribución, por lo que una vez fundamentado esto se continúa con la ubicación de bancos de compensación en donde se implementan los métodos heurísticos, se utilizan los de dos fases, más específicamente el modelo de asignación elemental y el modelo de búsqueda local, además de las restricciones del sistema para que sea óptima la compensación obtenida al ubicar los bancos, y finalmente los parámetros necesarios para determinar la rentabilidad del proyecto (1).

Una vez que se tiene la sustentación teórica, se procede con el desarrollo de la metodología implementada en el programa, iniciando con la preparación de los reportes generados desde CYMDIST y de cómo se los debe cargar al programa, se continúa con el ingreso de los parámetros del sistema a analizar, el cálculo de los flujos de potencia, la ubicación de los bancos de condensadores, la determinación de la rentabilidad, la estimación del error porcentual en los resultados generados en contraste con los obtenidos del CYMDIST y, finalmente, de cómo se exportan y guardan los reportes con la información generada por el programa (1).

Además, se cuenta con una sección en la que se procede a validar la metodología utilizada en el cálculo de las pérdidas de los transformadores, los flujos de potencia y la ubicación de bancos, utilizando los valores del CYMDIST y, adicionalmente, un modelo de pruebas y validación IEEE. Con lo que se procede a la implementación del programa donde se realiza el estudio en alimentadores de la empresa eléctrica regional Centro Sur C. A., calculando los flujos de potencia, ubicando los bancos de condensadores y el análisis económico, confirmando su rentabilidad para que en la sección de análisis de resultados se pueda verificar mediante contraste de los valores generados por el programa como los obtenidos del CYMDIST y determinar su validez (1).

2.1.2 Antecedentes nacionales

En la tesis *“Compensación de la energía reactiva para la optimización del alimentador de media tensión Coishco Industrial de la*

unidad de negocios Hidrandina Sur S. A.” (2), concluye lo siguiente: se presenta un análisis integral para la compensación de potencia reactiva, que auxilia en la solución del problema de compensación de reactivos en una red de distribución primaria.

Para la realización de la tesis, el factor de potencia que presenta la red es de 0.914, y en base a esto, se desarrolla el método de compensación a través de bancos de capacitores en un alimentador primario principal. Este análisis se aplicó a la red de distribución del alimentador de media tensión Coishco Industrial de la unidad de negocios Hidrandina Sur S. A. Se logró diseñar un banco de condensador que compensa la energía reactiva de la línea de media tensión, incrementándose el factor de potencia de 0.914, hasta un valor de 0.97 (2).

Se logró incrementar la tensión primaria en un 1.124%. Se logró la reducción de corriente en línea de media tensión nominal, donde se tiene un valor de reducción de 12.5%. Una vez diseñado el banco de condensadores en el circuito eléctrico de media tensión se observará la viabilidad en cuanto a disminución de pérdidas y mejoramiento del factor de potencia, determinándose que para el segundo año, el proyecto ya sería rentable (2).

2.1.3 Antecedente regional

En la tesis *“Ubicación óptima de bancos de condensadores para mejorar la eficiencia de energía en sistema de bombeo de la mina Animon”* (3), concluye lo siguiente: se realizó en el sistema eléctrico de la mina Animon de la unidad minera Chungar de la empresa Volcan Compañía Minera S. A. A. con el objetivo de hallar la ubicación óptima del banco de capacitores, que dé la optimización energética del sistema. El problema nace con el crecimiento del sistema por la implementación del proyecto “Cámara de Bombeo 2 Etapas” con la implementación de 21 motores de inducción, de los cuales 9 son de 550 HP para el nivel 355 y 12 son de 500 HP para el nivel 100 (3).

Con este crecimiento de la carga, el sistema se ve afectado por distintas perturbaciones que dejan a los parámetros del sistema fuera de los rangos de seguridad y calidad. Para solucionar el problema se utilizaron algoritmos genéticos de sistemas artificiales, el software ETAP 12.6 especializado en la simulación de sistemas de potencias da la herramienta OCP (*Optimal Capacitor Placement*). Herramienta que, aparte de las diversas funciones de simulación que brinda, da un análisis de compensación reactiva para poder realizar una comparación en costos de consumo de energía y potencia entre el sistema compensado y sin compensar (3).

De los estudios realizados se concluye principalmente que es necesaria la implementación de un banco de condensadores de 600 kVAr en el nivel 355 y de 650 kVAr en el nivel 100, con esto se evitan que los arranques de motores sean severos para el sistema (3).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Norma técnica de calidad de servicios eléctricos

La NTCSE es la referencia normativa de Calidad de Energía del Perú. Esta norma busca establecer los niveles mínimos de calidad de los servicios eléctricos, incluido el alumbrado público y obligaciones de las empresas de electricidad y los usuarios que operan bajo el régimen de la Ley de Concesiones Eléctricas (Ley N.º 25844). Es de aplicación imperativa para el suministro de servicios sujetos al régimen de libertad de precios, en todo aquello que las partes no hayan acordado o no hayan pactado en contrario.

El control de la calidad de los servicios eléctricos se realiza en los siguientes aspectos:

a) Calidad de producto

- Tensión
- Frecuencia
- Perturbaciones (*flicker* y tensiones armónicas)

b) Calidad de Suministro

- Interrupciones

c) Calidad de servicio comercial

- Trato al usuario
- Medios de atención
- Precisión de medida

d) Calidad de alumbrado público

- Deficiencias del alumbrado público

2.2.1.1 Tensión RMS

El indicador para evaluar la tensión RMS (ΔV) en un intervalo de medición de 15 minutos, es la diferencia entre la medida de valores eficaces (RMS) instantáneos medidos respecto al valor de la tensión nominal. Este indicador está expresado como un porcentaje de la tensión nominal del punto eléctrico medido. Para el caso de barras en alta y muy alta tensión se toma como referencia el valor de la tensión de operación (V_{OP}) en lugar de la tensión nominal. En la siguiente ecuación se muestra la forma de calcular la desviación de tensión RMS.

$$\Delta V_K = \frac{(V_K - V_{OP})}{V_{OP}} \times 100\%$$

Las tolerancias admitidas de los puntos de entrega de energía en todos los niveles de tensión son de hasta el $\pm 5.00\%$ de las tensiones de operación por un tiempo de hasta el 5% del periodo de medición. Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad si la cantidad de intervalos de medición que resulta fuera de rango son mayores al 5% del total de intervalos de medición.

2.2.1.2 Tensiones armónicas

El indicador para evaluar las tensiones armónicas en un intervalo de medición de 10 minutos se define en la siguiente ecuación:

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,4..}^{40} (Vh)^2}}{Vop}$$

Donde Vop es la tensión de operación de la barra donde se está evaluando el indicador. Cabe precisar que la NTCSE solo exige la evaluación de armónicos hasta el orden 40.

Tabla 2. Tolerancias de Vh y THDv según NTCSE

Orden de la armónica (h)	Tolerancia Vh y THDv (% con respecto a la tensión de operación del punto de medición)	
	Alta y Muy alta tensión	Media y Baja tensión
(Armónicas impares no múltiplos de 3)		
5	2,00	6,00
7	2,00	5,00
11	1,50	3,50
13	1,50	3,00
17	1,00	2,00
19	1,00	1,50
23	0,70	1,50
25	0,70	1,50
mayores de 25	0.1+2.5/h	0.2+12.5/h
(Armónicas impares múltiplos de 3)		
3	1,50	5,00
9	1,00	1,50
15	0,30	0,30
21	0,20	0,20
mayores de 21	0,20	0,20
(pares)		
2	1,50	2,00
4	1,00	1,00

6	0,50	0,50
8	0,20	0,50
10	0,20	0,50
12	0,20	0,20
mayores de 12	0,20	0,50
THDv	3,00	8,00

Nota: tomada de NTCSE

Límites de armónicos individuales hasta el orden 40, según la NTCSE.

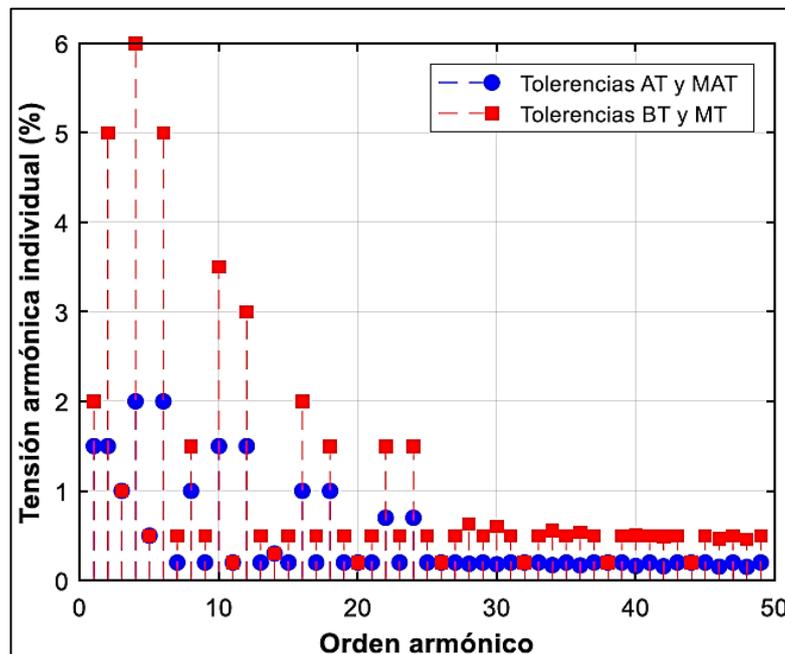


Figura 1. Límites de armónicos individuales según NTCSE

2.2.1.3 IEEE 519

Para la evaluación de distorsión armónica individual de tensión la IEEE considera la siguiente ecuación:

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,4..}^{50} (Vh)^2}}{V1}$$

La IEEE 519 en su versión 2014 sugiere la evaluación de armónicos de tensión cada 10 min por el intervalo de una semana considerando las magnitudes del percentil del 95%. Tabla de

límites operativos de esta norma – Tolerancia de Vh y THDv según IEEE 519.

Tabla 3. Tolerancias de Vh y THDv según IEEE 519

Tensión en barras en punto de conexión	Tensión armónica individual Vh (%)	Tensión armónica total THDv (%)
V≤1.0 kV	5,00	8,00
1.0 kV<V≤69 kV	3,00	5,00
69 kV<V≤161 kV	1,50	2,50
v>161 kV	1,00	1,50

Nota: tomada de IEEE 519

Esta referencia recomienda límites de emisión de corriente armónica a través del indicador de Distorsión Total de Demanda (TDD). Tabla de límites de emisión de corriente armónica según la IEEE 519:

Tabla 4. Límites de emisión de corriente armónica según IEEE 519

Isc/IL	Máxima corriente armónica respecto a IL (%)					TDD
	Armónicos individuales					
	3≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h<50	
<20	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
20<50	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
50<100	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
100<1000	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
>1000	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00

Nota: tomada de IEEE 519

2.2.1.4 La norma IEC 61000

La norma IEC 61000 establece los límites para la operación del equipamiento eléctrico en un entorno electromagnético industrial. Se pueden definir varios tipos de entorno electromagnéticos; sin embargo, por simplicidad solo se habla de tres clases y son las siguientes:

Clase 1: esta clase se aplica a los suministros protegidos y tiene niveles de compatibilidad inferiores de las redes públicas. Se refiere al uso de equipos muy sensibles a perturbaciones en el

suministro de energía, por ejemplo, instrumentación eléctrica en laboratorios, algún equipo de automatización y protección, algunas computadoras, etc.

Clase 2: esta clase se aplica generalmente a los PCC e IPC, en ambientes industriales y otras fuentes de alimentación no públicas. Los niveles de compatibilidad de esta clase son generalmente idénticos a los de las redes públicas. Por lo tanto, los componentes diseñados para el suministro de redes públicas pueden ser utilizados en esta clase de entorno industrial.

Clase 3: esta clase se aplica solo a los IPC en entornos industriales. Tiene niveles de compatibilidad más altos que los de clase 2 para algunas perturbaciones. Por ejemplo, esta clase debe ser considerada cuando se cumple cualquiera de las siguientes condiciones:

- Cargas alimentadas por convertidores
- Equipos de fundición
- Motores muy grandes
- Carga que varía muy rápido

Tabla 5. Tolerancia para la tensión RMS según IEC 61000-2-4

Perturbación	Clase 1	Clase 2	Clase3
Tolerancia de tensión respecto a la nominal	±8%	±10%	10%-15%
Desbalance	2%	2%	3%

Nota: tomada de IEC 61000

Tabla 6. Tolerancias de huecos de tensión al año según IEC 61000-4-11

Perturbación	10 ms<100 ms	100 ms<500 ms	500 ms<1 s	1 s<3 s
10% a 30%	61	66	12	6
30% a 60%	8	36	4	1
60% a 100%	2	17	3	2
100%	0	12	24	5

Nota: tomada de IEC 61000

Tabla 7. Tolerancias de armónicos individuales de tensión de impares no múltiplos de 3

Orden armónico	Tensión armónica individual (%)		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
5	3,0	6,0	8,0
7	3,0	5,0	7,0
11	3,0	3,5	5,0
13	3,0	3,0	4,5
17	2,0	2,0	4,0
17<h≤49	2.27x(17/h)-0.27	2.27x(17/h)-0.27	4.5x(17/h)-0.5
THD (%)	5,0	8,0	10,0

Nota: tomada de IEC 61000

Tabla 8. Tolerancias de armónicos individuales de tensión de impares múltiplos de 3

Orden armónico	Tensión armónica individual (%)		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
3	3,0	5,0	6,0
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,4	2,0
21	0,2	0,3	1,8
21<h≤45	0,2	0,2	1,0
THD(%)	5,0	8,0	10,0

Nota: tomada de IEC 61000

Tabla 9. Tolerancias de armónicos individuales de tensión de pares según IEC 61000-2-4

Orden armónica	Tensión armónica individual (%)		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
2	2,0	2,0	3,0
4	1,0	1,0	1,5
6	0,5	0,5	1,0
8	0,5	0,5	1,0
10	0,5	0,5	1,0
10<h≤50	0.25x(10/h)+0.25	0.25x(10/h)+0.25	1,0
THD (%)	5,0	8,0	10,0

Nota: tomada de IEC 61000

En la figura siguiente se presentan los límites de armónicos individuales hasta el orden 50 según la IEC 61000.

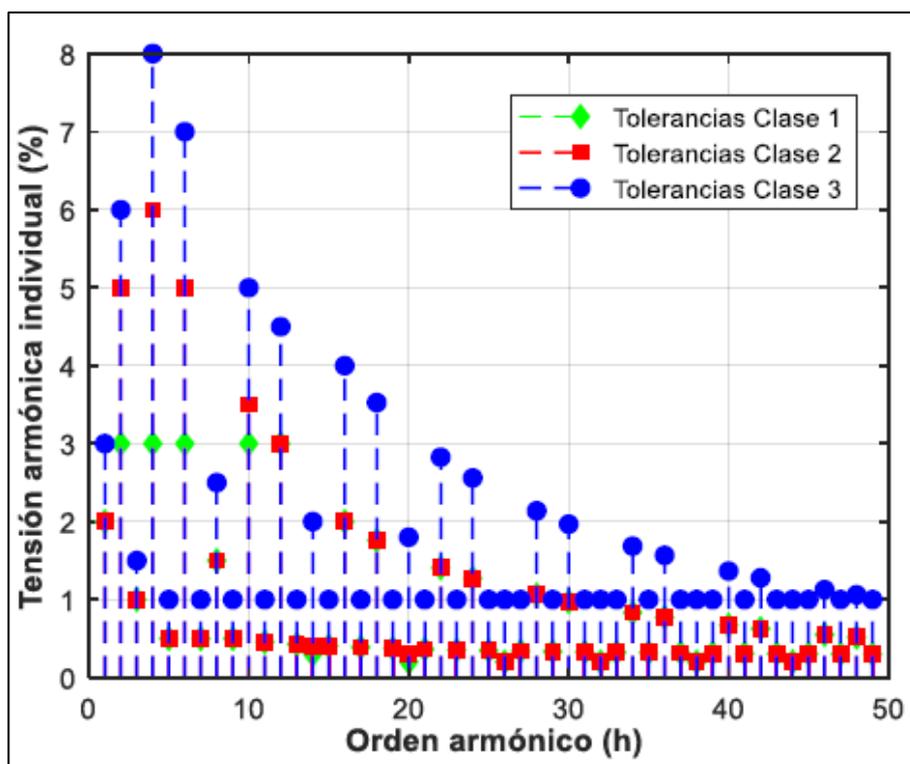


Figura 2. Límites de armónicos individuales según IEC 61000

2.2.2 Métodos de compensación reactiva

Los métodos de la compensación reactiva son muchos, en este marco teórico se presentan tres métodos:

2.2.2.1 Compensación mediante máquinas sincrónicas

Las compensaciones reactivas con máquinas sincrónicas son adecuadas porque generan potencia reactiva dependiendo de la excitación, necesitando ser sobreexcitadas para poder satisfacer sus propias necesidades de energía reactiva y entregar, a su vez, energía reactiva al sistema, porque el motor síncrono está diseñado para trabajar en vacío con un amplio rango de regulación, estas máquinas son susceptibles de trabajar con potencia reactiva inductiva o capacitiva según el grado de excitación (4).

2.2.2.2 Compensación de potencia

Un compensador estático de VAR (CEV), se emplea para compensar potencia reactiva usando un control de la magnitud de tensión en un bus particular de un sistema eléctrico de potencia. Estos

dispositivos comprenden el banco de capacitores fijo o conmutado (controlado) o un banco fijo y un banco de reactores conmutados en paralelo, se emplean principalmente en alta tensión debido a la conmutación para controlar la compensación (4).

2.2.2.3 Compensación de potencia mediante banco de condensadores

Este método es el que se utiliza en la actualidad en la mayoría de las instalaciones industriales, dado que es más económico y permite una mayor flexibilidad. Se pueden fabricar en configuraciones distintas. Sin embargo, son muy sensibles a las armónicas presentes en la red, los bancos de capacitores elevan el factor de potencia, con lo cual aumenta la potencia transmitida por la línea, porque no necesita conducir la potencia reactiva (4).

2.2.2.4 Tipos de compensación

Compensación fija

Consta de una o más baterías de condensadores que suministran un valor constante de potencia reactiva. Los condensadores pueden ser comandados mediante interruptores, contactores o conectados directamente a los bornes de la carga inductiva (4).

Compensación automática

En general se trata de un banco de varios pasos, que son controlados según la variación del factor de potencia de la instalación por un relé varimétrico. Cada paso del banco está conformado por un elemento de protección (interruptor automático o fusible), un elemento de maniobra (contactor) y una batería de condensadores trifásicos. El relé varimétrico mide el factor de potencia de la instalación y conecta los pasos mediante los contactores de maniobra (4).

2.2.3 Definición de términos

Compensación reactiva: consiste en instalar equipamiento para producir la potencia reactiva de forma local y atenuar el consumo reactivo por parte de la red.

Localización óptima de capacitores (OCP): algoritmo genético cuya función objetivo es conseguir el mínimo de pérdidas técnicas con el mínimo costo de implementar un sistema de compensación reactiva considerando restricciones de regulación de tensión y factor de potencia en barras.

Calidad de energía: se dice que un entorno electromagnético opera con calidad de energía cuando está limpio de perturbaciones.

Sistema eléctrico: es un conjunto de instalaciones que opera de forma confiable.

SE: subestación eléctrica

NTCSE: Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IEC:. *International Electrotechnical Commission*

PCC: Punto de Acoplamiento Común

OCP: Localización Óptima de Capacitores

COES: Comité de Operación Económica del Sistema

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

En tipo de investigación de la tesis es aplicada, porque se propuso una solución al problema de la calidad de energía del sistema eléctrico en estudio.

Este tipo de investigación “está más interesada en la aplicación inmediata sobre una problemática antes que el desarrollo de un conocimiento de valor universal” (5).

3.2 Método de la investigación

El método de la investigación es cuantitativo, porque utilizó la recolección de datos y se probó la hipótesis en base a la cuantificación estableciendo el comportamiento del sistema (6).

3.3 Nivel de la investigación

El grado de investigación es aplicativo porque se planteó de resolver el problema de la investigación con la propuesta de mejorar la calidad de energía eléctrica a través de la mejora de la compensación reactiva.

3.4 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es preexperimental, este tipo de diseño ayudó a proceder cómo demostrar la hipótesis, entonces se define como la estrategia para el desarrollo de la tesis (5).

El esquema lógico que ayudó al desarrollo es:

O X M

O: objeto de estudio

X: estímulo variable independiente (sistema de compensación reactiva)

M: medición de la variable dependiente (calidad de energía)

3.5 Población y muestra

En este trabajo de investigación la muestra y la población es el sistema eléctrico de las unidades mineras Chungar e Islay.

3.6 Técnicas e instrumento de recolección de datos

3.6.1 Técnicas de recolección de datos

La técnica que se utilizó es la observación del sistema de compensación reactiva, que se digitó en formato Excel para el estudio.

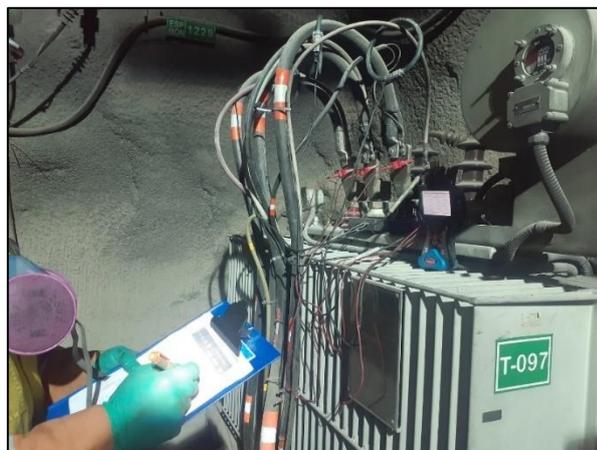


Figura 3. Formato de recolección de datos

3.6.2 Instrumentos de la recolección de datos

Para la recolección de los datos en la presente investigación se tomó como instrumento el analizador de redes.



Figura 4. Instrumento de recolección de datos

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

4.1.1 Evaluación de la calidad de energía

El sistema eléctrico Chungar cuenta con dos transformadores de potencia TR-03 y TR-04 de 15/18 MVA y 48/23 kV respectivamente, a la subestación Animón se suministra energía eléctrica con las líneas L-6542 que viene de Francoise, L301 que viene de San José, L302 que viene de Baños IV y L303 que viene de Baños IV.

En lado de 23 kV Animón distribuye a las diferentes subestaciones para el consumo de la energía eléctrica en la unidad minera.

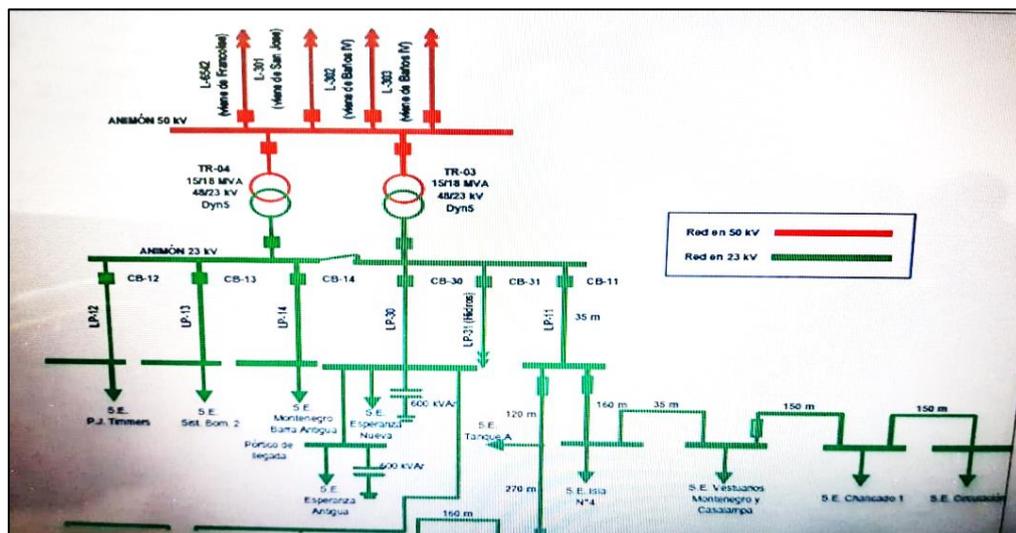


Figura 5. Sistema eléctrico Chungar

4.1.1.1 Subestación Animón

A. Tensión RMS

Para la evaluación de las tensiones se midieron por un tiempo de 7 días continuos en los puntos eléctricos L-6542, L-302, L-303, TR-3 y LP13 de la subestación Animón, como indica la NTCSE. Cabe precisar que la aplicación de los límites de compatibilidad de la NTCSE es solo referencial, porque esta normativa tiene aplicación solo en los puntos de compraventa de energía. En la tabla siguiente se muestra el resultado estadístico de las mediciones de tensión RMS en la subestación Animón.

Tabla 10. Tensión RMS en la subestación Animón

Ítem	Subestación	Punto eléctrico	Tensión de operación (kv)	Tensión de operación (kv)									Tolerancia (kv)		
				Fase RS			Fase ST			Fase TR			Máx.	Mín.	Normativa.
				μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅			
1	L-6542	47,500*	47,252	359	47,795	47,380	363	47,940	47,122	360	47,670	45,125	49,875	NTCSE	
2	L-302	47,500	47,385	360	47,986	47,139	361	47,273	47,273	362	47,859	45,125	49,875	NTCSE	
3	L-303	47,500	47,196	359	47,786	47,345	358	47,936	47,100	358	47,686	45,125	49,875	NTCSE	
4	TR-03	47,500	47,263	362	47,850	47,408	360	48,005	47,163	361	47,752	45,125	49,875	NTCSE	
5	TR-03	23,000 ^e	22,961	233	23,396	22,909	234	23,348	22,866	234	23,301	21,850	24,150	NTCSE	
6	LP-13	23,000	22,960	233	23,394	22,906	233	23,343	22,861	234	23,292	21,850	24,150	NTCSE	

Se puede observar que las tensiones en 47.5 kV son muy estables – debido a la regulación del transformador de Francoise – ya que σ no supera los 363 V. Por ejemplo, para el punto eléctrico de la bahía L-6542 el valor medio es de 47,251 V. Entonces el 95% del periodo de medición, la tensión en dicho punto eléctrico varía entre 46,525 V y 47,977 V, cumpliendo con las tolerancias de la NTCSE. Lo mismo aplica para el resto de los puntos de medición de la subestación Animón, obteniéndose tensiones que cumplen con la NTCSE.

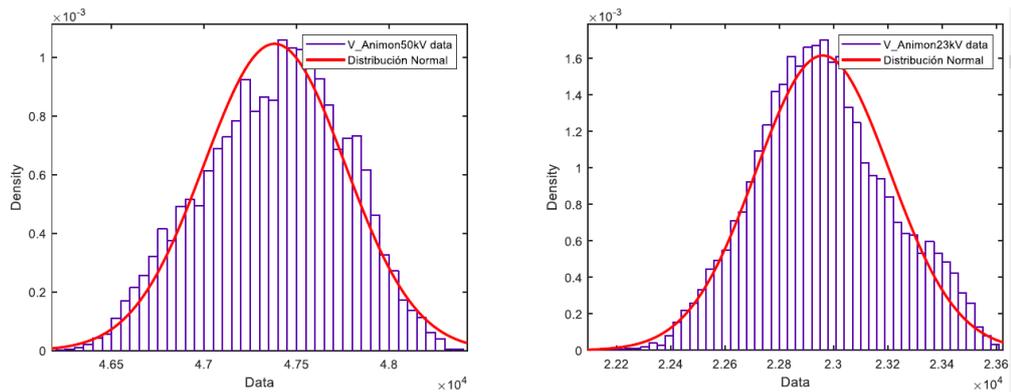


Figura 6. Distribución normal de la tensión RMS en la subestación Animón

En el anexo 1 se muestra, con más detalle, el perfil del comportamiento de la tensión para los puntos de medición de la subestación Animón.

B. Potencia activa, reactiva y factor de potencia

En la tabla siguiente se muestra el resultado estadístico de las mediciones de potencia activa, reactiva y factor de potencia en la subestación Animón.

Tabla 11. Potencia activa, reactiva y factor de potencia en la subestación Animón

Ítem	Subestación	Punto Eléctrico	Tensión de operación (kV)	Potencia activa, reactiva y factor de potencia								
				Potencia activa (kW)			Potencia reactiva (kVAR)			Factor de potencia		
				μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅
1,0	Animón	L-6542	47,5	16,59	2,52	19,91	11,13	1,13	13,11	0,81	0,03	0,85
2,0		L-302	47,5	2,85	342	3,35	460	249	851	0,93	0,13	0,98
3,0		L-303	47,5	3,96	285	4,36	512	253	880	0,96	0,12	1,00
4,0		TR-03	47,5	12,63	878	13,86	7,01	614	7,86	0,87	0,01	0,88
5,0		TR-03	23,0	12,55	863	13,79	5,94	496	6,60	0,90	0,01	0,91
6,0		LP-13	23,0	770	332	1,43	907	350	1,40	0,44	0,16	0,73

La carga de las unidades mineras Chungar e Islay presentan un bajo factor de potencia (entre 0.75 a 0.87 inductivo) visto desde Françoise 50 kV. Que conlleva a un consumo de potencia reactiva entre 8,861 kVAR a 13,397 kVAR. Este registro de medición de una

semana guarda coherencia con la información del SCADA de 9 meses de registro. Estas magnitudes de potencia reactiva limitan el consumo reactivo y la capacidad de un Sistema de Compensación Reactiva.

Desde la barra en 23 kV de la subestación Animón se consume una potencia activa entre 21,656 kW a 28,560 kW con variaciones máximas del orden de $\pm 1,726$ kW. Respecto a la potencia reactiva desde la barra en 23 kV de la subestación Animón se consume entre 9,904 kVAr a 13,872 kVAr con variaciones máximas del orden de ± 992 kVAr.

Otro aspecto que causa especial interés es la variabilidad de la carga hacia el alimentador LP-13 (hacia Montenegro que alimenta a Pique J. Timmers). De acuerdo a los resultados de medición la desviación estándar de la potencia activa es el 43% del valor medio, lo cual implica una alta variabilidad en la demanda durante el periodo de medición. La potencia activa registrada hacia el alimentador LP-13 varía entre 106 kW a 1,434 kW y la potencia reactiva varía entre 207 kVAr a 1,607 kVAr. Entonces, por el excesivo consumo reactivo se presenta un factor de potencia muy pobre que varía entre 0.12 a 0.76 inductivo. Más adelante se analizará más a detalle la carga del alimentador LP- 13.

En el anexo 4 se muestra con más detalle el comportamiento de la potencia activa, reactiva y factor de potencia de la subestación Animón.

C. Perturbaciones

Fluctuaciones de tensión

De acuerdo a la NTCSE y la IEC 61000-4-15 las fluctuaciones de tensión se miden con el indicador de índice de severidad de Flicker de corta duración (Pst). Al respecto se precisa que la carga minera no presenta grandes variaciones de la

corriente – al menos no en 23 kV – y, por tal, no se prevén fluctuaciones de tensión relevantes. En la siguiente tabla se muestran los resultados de la evaluación estadística del índice de severidad por Flicker en la subestación Animón.

Tabla 12. Índice de severidad por Flicker en la subestación Animón

Ítem	Sub estación	Punto eléctrico	Tensión de operación (kV)	Tensión de Severidad por Flicker (pst.)									Tolerancia	Normativa
				Fase RS			Fase ST			Fase TR				
				μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅		
1,0	Animón	L-6542	47,5	0,18	0,04	0,23	0,18	0,04	0,23	0,18	0,04	0,23	1,0	NTCSE
2,0		L-302	47,5	0,18	0,04	0,24	0,18	0,03	0,23	0,18	0,04	0,24	1,0	NTCSE
3,0		L-303	47,5	0,18	0,04	0,24	0,18	0,04	0,24	0,18	0,04	0,24	1,0	NTCSE
4,0		TR-03	47,5	0,19	0,04	0,25	0,19	0,04	0,25	0,19	0,03	0,25	1,0	NTCSE
5,0		TR-03	23,0	0,21	0,05	0,29	0,22	0,05	0,29	0,22	0,05	0,29	1,0	NTCSE
6,0		LP-13	23,0	0,22	0,05	0,28	0,22	0,05	0,29	0,22	0,05	0,29	1,0	NTCSE

La magnitud máxima del índice de severidad por Flicker en 47.5 kV es 0.25 durante todo el periodo de medición. Este valor está muy por debajo del límite de compatibilidad. En los puntos en 23 kV el máximo valor de índice de severidad por Flicker es 0.29, es un tanto mayor que en 47.5 kV y se debe a la variabilidad de la carga que produce la fluctuación en la tensión; sin embargo, la magnitud de 0.29 es mucho menor al límite de compatibilidad. Con lo que se estima que en el nivel de 47.5 kV y 23 kV no existen problema de fluctuación de la tensión.

En el anexo 5 se muestra el comportamiento del índice de severidad por Flicker en la subestación Animón.

Armónicos

Debido a la naturaleza de la carga – la gran mayoría de motores de la mina Chungar e Islay tienen arranque directo – se espera de antemano un nivel de contaminación armónica bastante baja. Los resultados THDV del registro de mediciones se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 13. Distorsión total de tensión en la subestación Animón

Ítem	Sub estación	Punto eléctrico	Tensión de operación (kV)	Tensión total de tensión (%)									Tolerancia	
				Fase RS			Fase ST			Fase TR			%	Normativa
				μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅		
1,0	Animón	L-6542	47,5	1,67	0,43	2,19	1,56	0,39	2,08	1,57	0,38	2,11	3,00	NTCSE
2,0		L-302	47,5	1,04	0,29	1,48	1,01	0,28	1,45	1,08	0,30	1,55	3,00	NTCSE
3,0		L-303	47,5	1,17	0,29	1,62	1,14	0,28	1,58	1,12	0,27	1,54	3,00	NTCSE
4,0		TR-03	47,5	1,08	0,30	1,54	1,06	0,29	1,50	1,03	0,28	1,47	3,00	NTCSE
5,0		TR-03	23	1,06	0,26	1,46	1,07	0,22	1,44	1,01	0,24	1,39	8,00	IEC Clase 2
6,0		LP-13	23	1,06	0,26	1,46	1,07	0,22	1,44	1,01	0,24	1,39	8,00	IEC Clase 3

En general, en 47.5 kV el disturbio armónico es bastante bajo y cumple para todos los casos con los límites de compatibilidad de la NTCSE e IEC 61000-2-4. En los puntos eléctricos en 23 kV el disturbio armónico está bastante controlado y se observa que el percentil al 95% no supera el 1.46%.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de la evaluación estadística de la tensión armónica de orden 5 para los puntos eléctricos de SE Animón.

Tabla 14. Tensión armónica individual de orden 5 – subestación Animón

Ítem	Sub estación	Punto eléctrico	Tensión de operación (kV)	Tensión armónica individual - orden 5 (%)									Tolerancia	
				Fase RS			Fase ST			Fase TR			%	Normativa
				μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅		
1,0	Animón	L-6542	47,5	1,59	0,46	2,13	1,47	0,42	2,02	1,50	0,39	2,05	2,00	NTCSE
2,0		L-302	47,5	0,93	0,33	1,40	0,91	0,32	1,39	1,00	0,33	1,49	2,00	NTCSE
3,0		L-303	47,5	1,02	0,33	1,52	0,96	0,33	1,43	0,94	0,32	1,43	2,00	NTCSE
4,0		TR-03	47,5	0,99	0,33	1,48	0,93	0,33	1,40	0,92	0,32	1,40	2,00	NTCSE
5,0		TR-03	23,0	0,78	0,38	1,37	0,76	0,35	1,34	0,71	0,36	1,28	6,00	IEC
6,0		LP-12	23,0	0,78	0,38	1,36	0,76	0,35	1,34	0,70	0,36	1,28	6,00	IEC

En todos los puntos de medición la armónica de orden 5 presenta un valor por debajo de los límites de compatibilidad. Salvo la excepción de la medición en la bahía de L-6542, donde el percentil del 95% excede los límites de compatibilidad.

En la figura siguiente se muestra el espectro armónico de tensión para el registro de medición en la subestación Animón 50 kV.

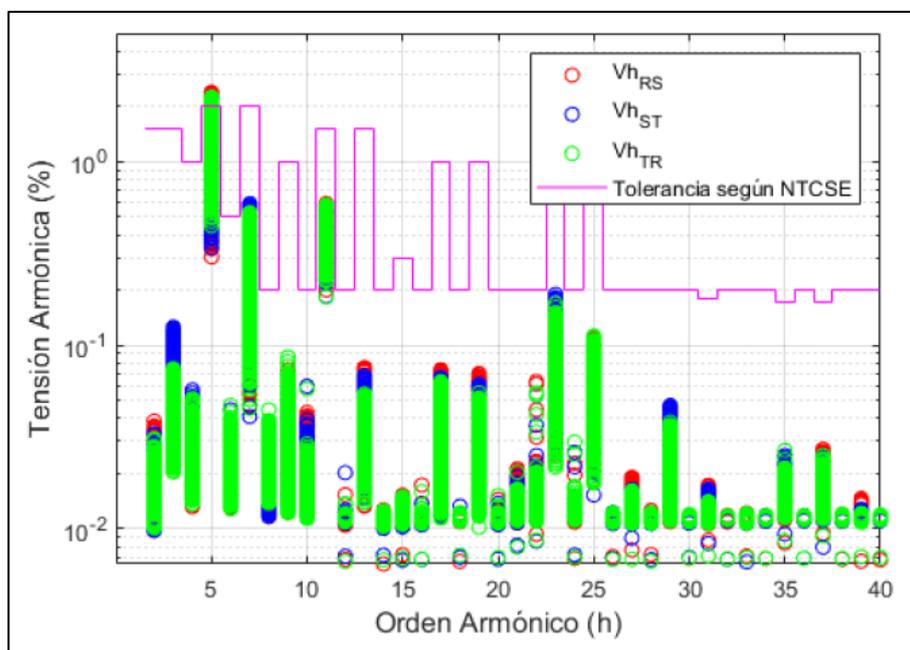


Figura 7. Espectro armónico de tensión – Bahía L-6542

La tensión armónica de orden 5 excede el límite de 2.00% de la NTCSE. Otros armónicos existentes en mayor magnitud son los de orden 7, 11, 23 y 25, que no son predominantes. Los armónicos de orden 7 y 11 no superan el 0.6% y el resto de los armónicos no supera el 0.1%.

El hallazgo de la armónica de orden 5 desde los últimos años – desde el 2012 a la fecha – es completamente normal en el SEIN. Análisis previos realizados por el COES concluyen en la mayoría de las barras AT del SEIN se exceden los límites de compatibilidad de la NTCSE y la armónica predominante en el SEIN es la de orden 5.

En la figura siguiente se muestra la distorsión total de la tensión (curva en rojo) y la corriente RMS (curva en azul), desde la bahía de L-6542.

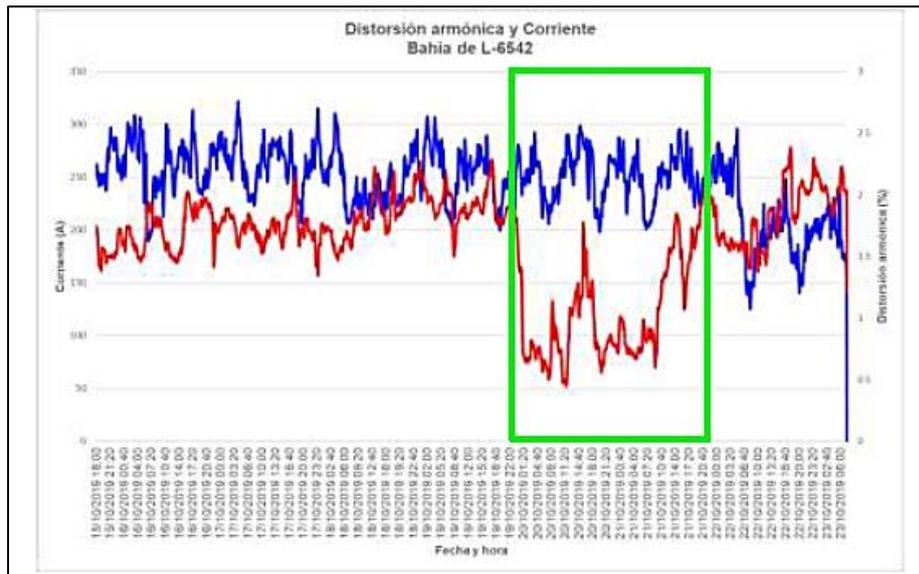


Figura 8. Distorsión armónica de tensión y corriente – Bahía de L-6542

Como se puede apreciar en octubre el disturbio armónico cae desde 2.00% hasta 0.5%; sin embargo, la corriente RMS (consumo de sistema Chungar) desde la bahía L-6542 varía siempre entre 200 A y 300 A. Esto evidencia que el consumo por parte del sistema Chungar no influye a la distorsión armónica en la subestación Animón 50 kV. Es probable que los días 20 y 21 de octubre – sábado y domingo – se maniobre algún equipo como compensación reactiva, transformador o línea de transmisión en el SEIN (aguas arriba de la subestación Paragsha II 220 kV) que cambió el disturbio armónico en el sistema Chungar. Por lo manifestado, se concluye que el disturbio armónico en la subestación Animón 50 kV es propio del SEIN y no influye en el disturbio la corriente consumida – o carga consumida – por parte del sistema Chungar. Un comportamiento similar se presenta en los otros puntos de medición en 50 kV de la subestación Animón.

En la figura siguiente se muestra el espectro armónico de tensión en la subestación Animón 23 kV.

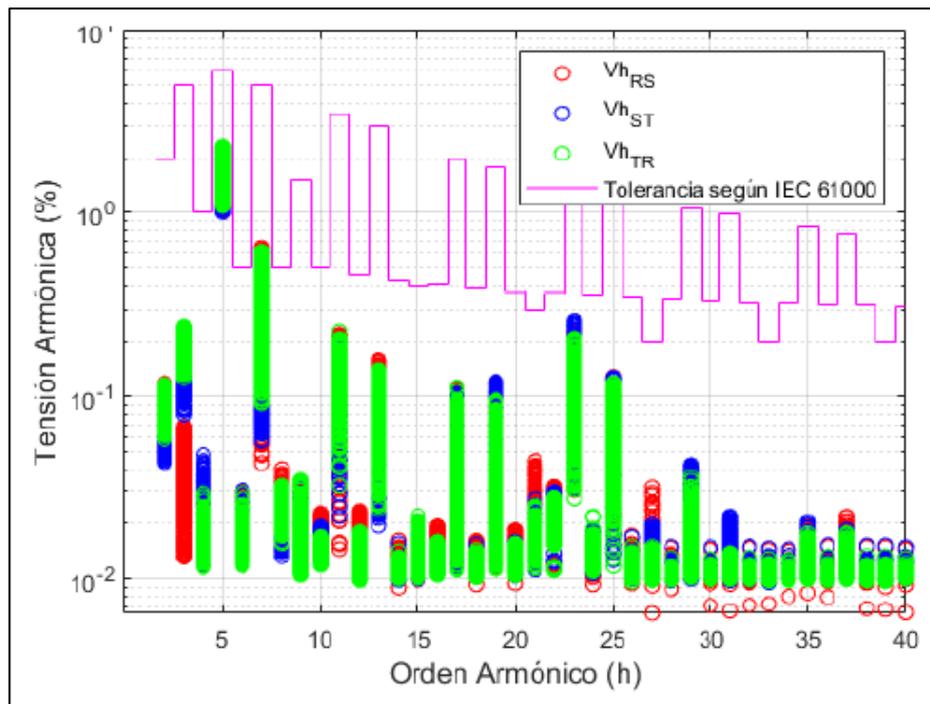


Figura 9. Espectro armónico de tensión en TR-03 (lado 23 kV)

El disturbio armónico en la subestación Animón 23 kV está bastante controlado, de hecho, el percentil al 95% no supera el 1.37%. El límite máximo según IEC 61000-2-4 es del 8%, entonces se está cumpliendo holgadamente con la referencia normativa. Los armónicos predominantes en la subestación Animón 23 kV son los de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29 y 31. El armónico predominante en el sistema Chungar es el de orden 5 que varía entre 1 a 2%, durante el periodo de medición.

Todos estos armónicos son compatibles con las características del espectro armónico para convertidores de 6 pulsos. Como se ve desde “Casa Winche” se inyecta corriente armónica hacia la subestación Animón 23 kV. En el anexo 6 se muestra la distorsión armónica de tensión de los puntos eléctricos de la subestación Animón.

La distorsión total se encuentra por debajo de los límites máximos de emisión recomendados en la IEEE 519. En el punto de

medición que presenta mayor distorsión total es en alimentador LP13, esto indica la presencia de carga con contenido armónico.

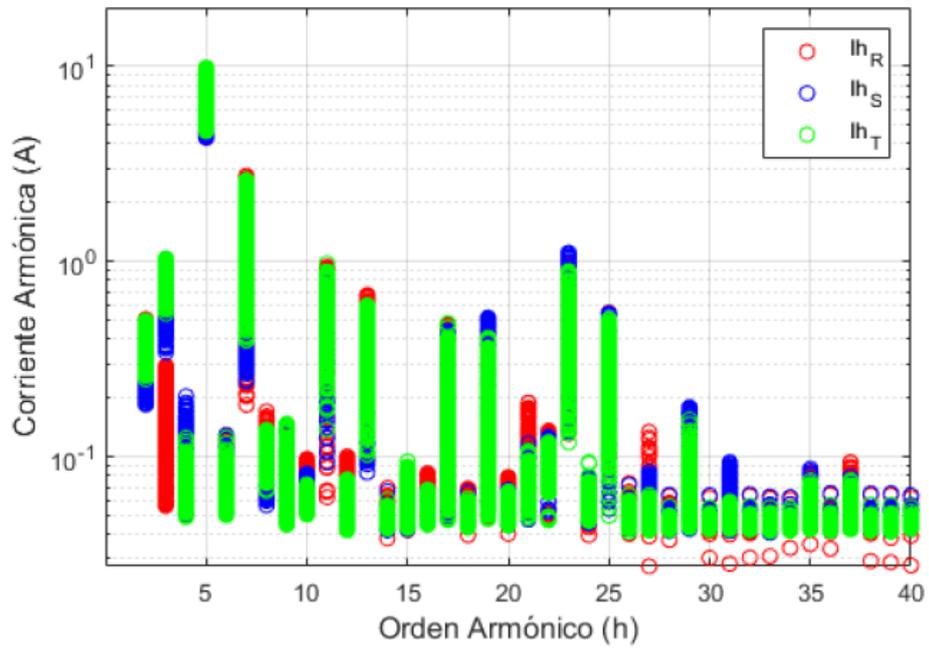


Figura 10. Espectro armónico de corriente en SE Animón 23 kV

Los armónicos predominantes son los de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 29 y 31.

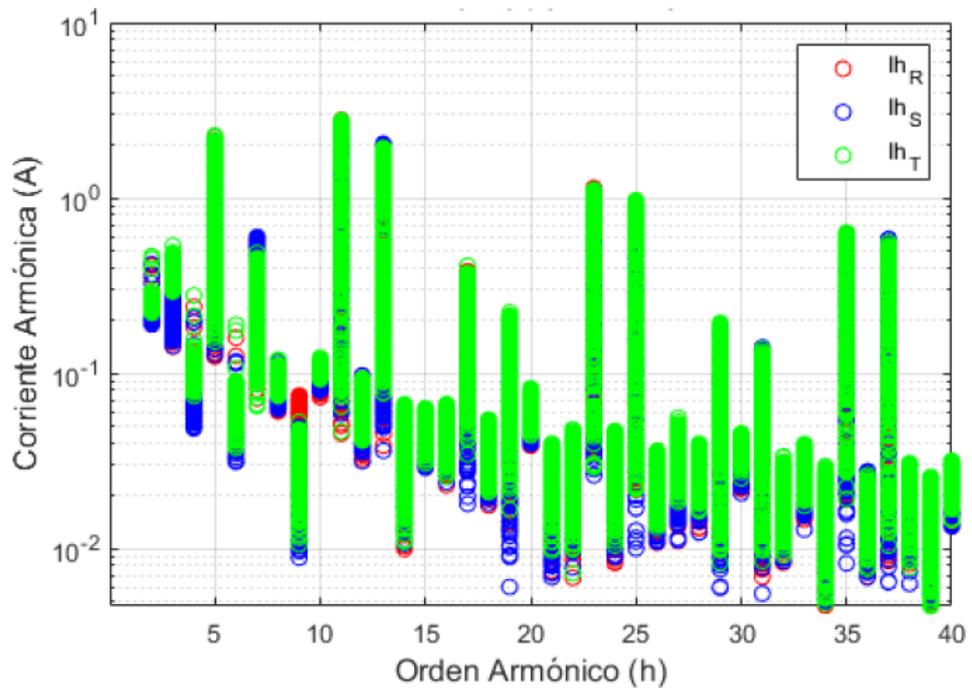


Figura 11. Espectro armónico de corriente en LP 13

Los armónicos predominantes son los de orden 5, 7, 11,13, 17, 19, 23, 25 29, 31, 35 y 37. Evidenciando que aguas abajo – como en la Casa Winche – existe equipamiento electrónico con tecnología de 6 pulsos.

4.1.1.2 Jacob Pique Timmers

A. Tensión RMS

Las mediciones realizadas en los puntos eléctricos de la subestación Montenegro tiene periodo de medición de 1 día. En tal sentido, no es posible aplicar los indicadores de la NTCSE. Si bien es cierto la IEC 61000 no hace referencia exacta del periodo de medición requerido para su aplicación, se utilizaron los indicadores de esta normativa por ser de uso exclusivo para los sistemas industriales. En la tabla siguiente se muestran los resultados de la evaluación estadística de la tensión RMS.

Tabla 15. Tensión RMS en SE Montenegro (Casa Winche)

Ítem	Subestación	Ubicación	Punto Eléctrico	Tensión de Operación (kV)	Tensión RMS (kV)									Tolerancia (kV)		Normativa
					Fase RS			Fase ST			Fase TR			Min	Max	
					μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅			
1			Winche maestro	660	654	12	681	651	13	679	650	12	678	561	726	IEC Clase 3
2	Montenegro	Casa Winche	Winche esclavo	660	650	12	679	647	13	675	649	13	678	561	726	IEC Clase 3
3			Winche personal	480	505	5	514	507	5	516	506	5	514	408	528	IEC Clase 3

4	Montenegro	TR-084 (salida hacia Winche)	4,16	4,23	66	4,35	4,21	67	4,33	4,23	66	4,35	2,74	4,58	IEC Clase 2
5,		TDF-310	460	456	5	464	457	5	465	454	5	463	414	506	IEC Clase 2

Los puntos eléctricos de los convertidores asociados al motor de 2,150 HP (*Winche Producción Nordberg*) son denominados en el presente estudio “Winche maestro” y “Winche esclavo”. Estos puntos eléctricos en 660 V mantienen una tensión que cumple con las tolerancias de la IEC 61000 Clase 3 para tensiones RMS procesadas cada 15 min.

De igual forma, el punto eléctrico que alimenta al motor de 500 HP (*Winche auxiliar*) es denominado “Winche personal” que mantiene una tensión entre 495 V y 516 V, cumpliendo así con las tolerancias de la IEC 61000 Clase 3.

Desde la subestación Montenegro se realizaron mediciones de los transformadores TR-084 y TDF-310. Para ambos casos se cumple con las tolerancias de la IEC 61000 Clase 2.

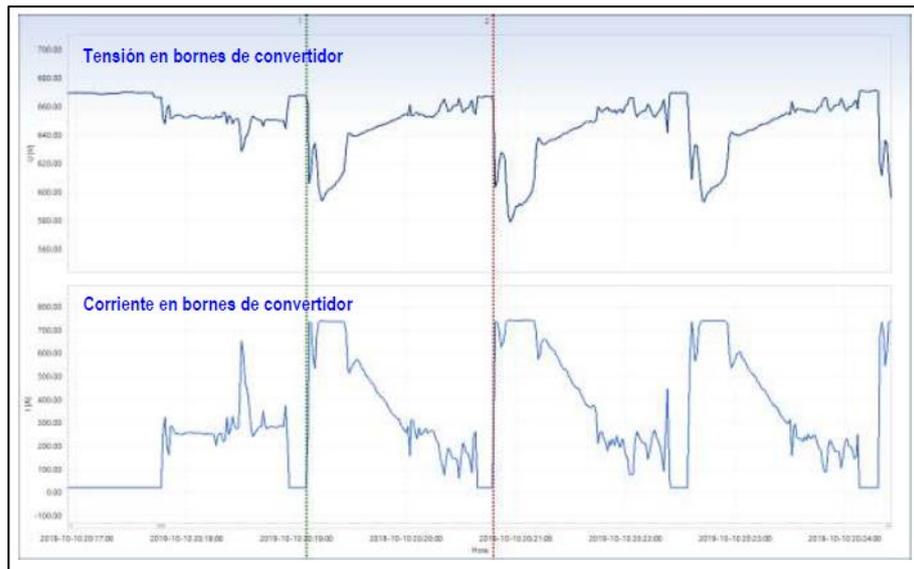


Figura 12. Corriente de arranque de motor 2,150 HP (Winche Producción Nordberg) y su impacto en la tensión

Del registro de corriente del convertidor “Winche Maestro” se estima que la corriente varía desde 23 A hasta los 739 A en 3 s aproximadamente. Y se mantiene con esa carga por alrededor de 20 s. Dicho cambio en la corriente ocasiona en bornes de los convertidores caídas de tensión del orden de 580V (“huecos de tensión” de 87 V equivalente al 13%).

De acuerdo a la referencia normativa IEC 61000-4-11 el número de huecos de tensión entre el 10% al 30% con periodos de 1 a 3 s, debe ser menor a 6 por cada año. El proceso de arranque del motor y operación tiene un periodo de 1 m y 40 s. Durante el transcurso de operaciones normales por día se excede fácilmente los límites recomendado por la IEC 61000-4-11. Lo cual puede llevar a un daño prematuro y la reducción del tiempo de la vida útil de los convertidores sujetos a dicho entorno electromagnético.

La aplicación de la norma IEC 61000-4-11 está sujeta a interpretación y por experiencia del consultor. No existe referencia normativa que recomiende la cantidad máxima de “huecos de tensión” para convertidores de uso industrial en 660 V; no obstante, la IEC 61000-4-11 brinda ciertos parámetros que se pueden aplicar

para prevenir el daño prematuro de los equipos electrónicos. Esta norma es una versión actualizada de las curvas “CBEMA” o ITIC”.

B. Potencia activa, reactiva y factor de potencia

En la tabla siguiente se muestran los resultados de la evaluación estadística de la potencia activa, reactiva y factor de potencia en la subestación Montenegro (Casa Winche).

Tabla 16. Potencia activa, reactiva y factor de potencia en la subestación Montenegro (Casa Winche)

Ítem	Subestación	Ubicación	Punto Eléctrico	Tensión de Operación (kV)	Potencia activa, reactiva y factor de potencia								
					Potencia activa (kW)			Potencia reactiva (kVAr)			Factor de potencia		
					μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅
1,0	Montenegro	Casa Winche	Winche maestro	660	183	72	251	220	86	305	0,53	0,22	0,72
2,0			Winche esclavo	660	168	61	216	270	95	355	0,46	0,05	0,56
3,0			Winche personal	480	13	22	72	8	15	44	0,22	0,17	0,55
4,0		Montenegro	TR-084 (salida hacia Winche)	4,16	323	231	535	506	349	836	0,44	0,05	0,54
5,0		Montenegro	TDF-310	460	37	12	49	7	4	15	0,74	0,23	0,98

Los denominados “Winche maestro” y “Winche esclavo” se conectan al transformador TR-084.

Por ello, visto desde el lado de 4.16 kV, el consumo en el percentil del 95% – cada 15 min – es de 535 kW ,836 kVAr y el factor de potencia de 0.54.

Este parámetro es compatible con el factor de potencia durante el arranque de un motor asíncrono conectado directamente a la red. El consumo de potencia reactiva durante el proceso de operación del motor de 2,150 HP es excesivo, esto se produce por

el tipo de tecnología asociada a la operación del arranque del motor (convertidores y motor de corriente continua).

Los convertidores no controlan la corriente en el arranque de la máquina CD, y por tal no tienen la facultad de controlar la potencia reactiva consumida desde el lado AC. Por otro lado, y como se muestra en la evaluación de calidad de energía, existen problemas para controlar el disturbio armónico de forma local en barras de 660 V.

El exceso de corriente armónica conlleva a un empobrecimiento del factor de potencia y así el incremento por armónicos de la potencia.

El mismo efecto detallado líneas arriba, puede explicar la operación del “Winche personal” y su pobre factor de potencia.

En el anexo 7 se muestran el comportamiento de potencia activa, reactiva y factor de potencia de la subestación Montenegro (casa Winche).

C. Perturbaciones

Fluctuaciones de tensión

De acuerdo a las decisiones de la NTCSE y la IEC 61000-4-15 las fluctuaciones de tensión se miden mediante el indicador de índice de severidad de Flicker de corta duración (Pst).

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del índice de severidad por *flickers* en la subestación Montenegro (casa winche).

Tabla 17. Índice de severidad por Flicker en la subestación Montenegro (casa Winche)

Ítem	Subestación	Ubicación	Punto Eléctrico	Tensión de Operación (kV)	Índice de severidad por Flicker (PST)									Tolerancia	Normativa
					Fase RS			Fase ST			Fase TR				
					μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅		
1,0	Montenegro	Casa Winche	Winche maestro	660	1,49	0,47	1,75	1,51	0,47	1,78	1,52	0,48	1,79	1,00	IEC
2,0			Winche esclavo	660	1,49	0,46	1,74	1,51	0,47	1,77	1,52	0,48	1,77	1,00	IEC
3,0		Winche personal	480	0,35	0,21	0,80	0,35	0,21	0,86	0,35	0,21	0,80	1,00	IEC	
4,0		Montenegro	TR-084 (salida hacia Winche)	4,16	0,22	0,04	0,31	0,22	0,05	0,30	0,22	0,05	0,31	1,00	IEC
5,0		TDF-310	460	0,65	0,30	0,91	0,65	0,30	0,93	0,64	0,29	0,90	1,00	IEC	

Debido a los “huecos de tensión” registrados durante el periodo de medición se producen fluctuaciones de tensión que excede los límites recomendados por la IEC 61000 [S3], para los puntos en 660 V (bornes de AC de convertidores de motor de 2,150 HP).

Para los puntos del “Winche personal”, y las salidas en 4.16 kV y 0.46 kV de los transformadores TR- 084 y TDF-310 se cumple holgadamente con los límites de la IEC 61000.

Armónicos

Se muestran los resultados de la evaluación estadística de la distorsión armónica de tensión en SE Montenegro (Casa Winche).

Tabla 18. Distorsión total de tensión en la subestación Montenegro (casa Winche)

Ítem	Subestación	Ubicación	Punto Eléctrico	Tensión de Operación (kV)	Distorsión total de tensión (%)									Tolerancia	Normativa
					Fase RS			Fase ST			Fase TR				
					μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅		
1,0	Montenegro	Casa Winche	Winche maestro	660	6,90	2,36	9,55	6,99	2,38	9,64	6,97	2,41	9,66	10	IEC Clase 3
2,0			Winche esclavo	660	7,40	2,56	9,99	7,38	2,57	9,97	7,45	2,63	10,09	10	IEC Clase 3
3,0			Winche personal	480	2,40	2,48	8,26	2,55	2,43	8,36	2,43	2,47	8,33	10	IEC Clase 3
4,0			TR-084 (salida hacia Winche)	4160	1,03	0,23	1,42	1,10	0,20	1,45	0,98	0,17	1,30	8	IEC Clase 2
5,0			TDF-310	460	3,04	1,42	4,47	2,98	1,45	4,43	2,91	1,42	4,34	8	IEC Clase 2

Los resultados del registro de medición en el lado AC de los bornes de los convertidores en 660 V, exceden los límites de compatibilidad recomendados por la IEC 61000 en Clase 3 (la mayor tolerancia). De hecho, el percentil al 95% ya excede el 10%. Esto exhibe grandes problemas de armónicos que deterioran el equipamiento eléctrico (convertidores) y reducen su expectativa de vida útil. Para los puntos “Winche personal”, TR-84 y TDF-310 se cumple holgadamente con los límites de compatibilidad de la IEC 61000.

En la siguiente figura se muestra el espectro armónico de tensión en bornes de convertidores de motor 2,150 HP (*Winche Producción Nordberg*)

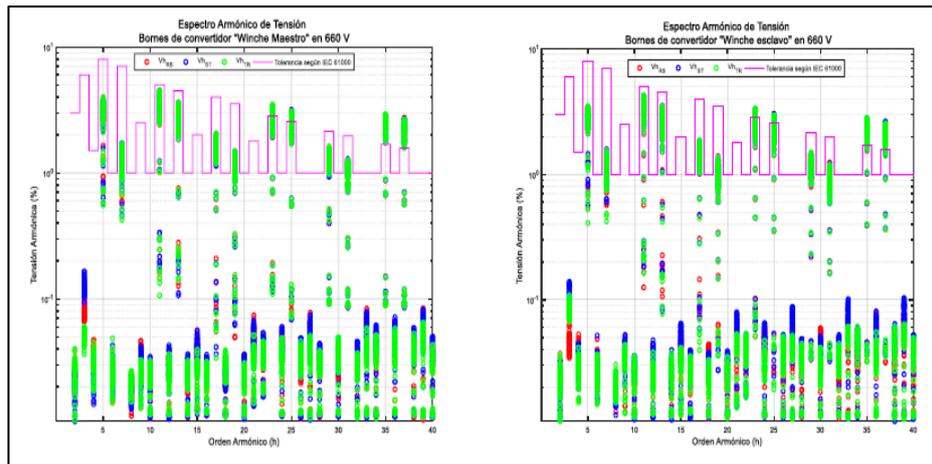


Figura 13. Espectro armónico de tensión en bornes de convertidores de motor 2,150 HP

En la figura anterior se evidencia que los armónicos que exceden los límites de la IEC 61000, son los de alta frecuencia. Se exceden los límites de tensión individual de los armónicos de orden 23, 25, 35 y 37. Y es seguro que si el espectro se extendiera a un mayor rango de frecuencias se encontrarían más armónicos que exceden las tolerancias. Este fenómeno es originado por las siguientes razones:

- La reducción de la potencia de cortocircuito desde 50 kV hasta 0.66 kV. La potencia de cortocircuito pasa desde 568 MVA11 desde la subestación Animón 50 kV hasta los 15 MVA en bornes del lado AC de los convertidores. Cabe precisar que una baja potencia de cortocircuito está asociada a problemas de regulación de tensión y, por tal, a problemas con los armónicos de tensión.
- Impedancia armónica altamente inductiva vista desde bornes de 660 V. Cuando la frecuencia incrementa la impedancia inductiva vista desde bornes de los convertidores también lo hace. A mayor frecuencia, mayor será la impedancia armónica. Y cuando se inyecta una pequeña cantidad de corriente armónica de alta frecuencia en composición con la impedancia se excede fácilmente los límites de la normativa.

En la siguiente figura se muestra el espectro armónico en bornes de 4,16 kV del transformador TR-084.

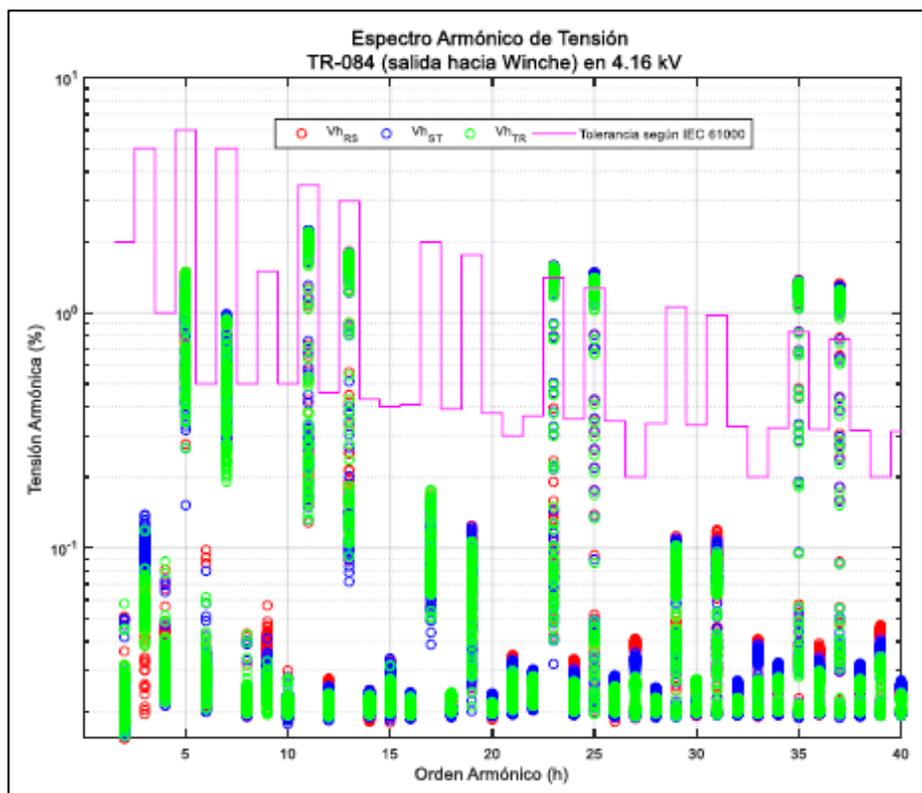


Figura 14. Espectro armónico de tensión transformador TR-084 lado 4.16 kV

En el lado de 4.16 kV asociado a la operación de los “Winches” también se exceden los límites de compatibilidad para los armónicos de orden 23, 25, 35 y 37. Esto es originado por la corriente de emisión por parte de los convertidores del motor de 2,150 HP.

En la tabla siguiente se muestran los resultados del análisis estadístico de la distorsión total de demanda de la subestación Montenegro (casa Winche).

Tabla 19. Distorsión total de la demanda en la subestación Montenegro (casa Winche)

Ítem	Subestación	Ubicación	Punto Eléctrico	Tensión de Operación (kV)	Distorsión total de demanda (%)									Tolerancia	Normativa
					Fase RS			Fase ST			Fase TR				
					μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅	μ	σ	P ₉₅		
1,0	Montenegro	Casa Winche	Winche maestro	660	22,5	8,5	29,0	22,5	8,5	28,9	22,8	8,3	29,3	8 ¹²	IEEE
2,0			Winche esclavo	660	23,6	8,0	30,5	23,8	7,7	30,8	23,8	7,7	30,8	8	IEEE
3,0			Winche personal	480	4,4	8,1	25,1	4,4	8,1	25,1	4,3	8,1	25,0	8	IEEE
4,0			TR-084 (salida hacia Winche)	4,16	0,8	0,2	1,1	0,8	0,2	1,1	0,7	0,2	1,1	8	IEEE
5,0			TDF-310	460	2,7	0,7	3,8	2,7	0,6	3,8	2,6	0,6	3,8	15 ¹³	IEEE

En la “Casa Winche” todos los equipos exceden los límites de emisión de corriente armónica recomendados por la IEEE 519. Para los puntos eléctricos TR-084 y TDF-310 las corrientes de emisión cumplen holgadamente con IEEE 519. Es justo el exceso de límites de emisión lo que origina el problema de tensión armónica.

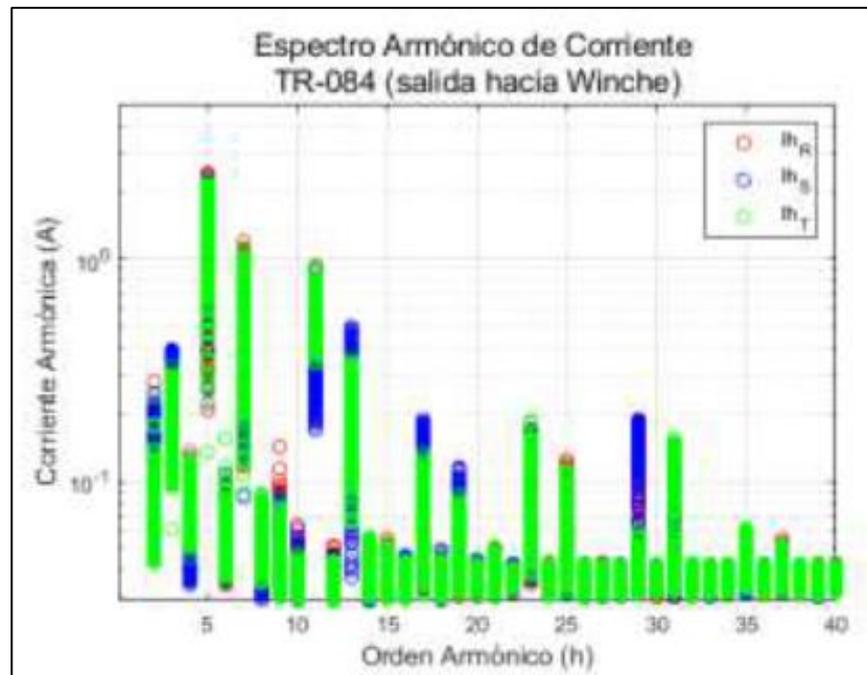


Figura 15. Espectro armónico de corriente de transformador TR-084 (lado 4.16 kV) hacia motor 2,150 HP

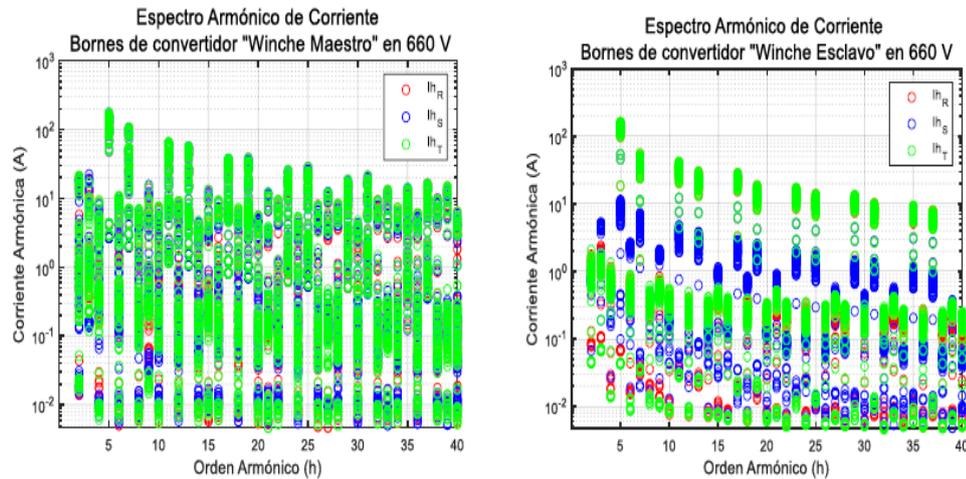


Figura 16. Espectro armónico de corriente en bornes de convertidores de motor 2,150 HP

El espectro presenta corriente armónica de orden 5, 7, 11, 13 entre otras, de acuerdo a los resultados del registro de medición se confirma la tecnología de 6 pulsos de los convertidores asociados a la operación del motor 2,150 HP. Debido al grupo de conexión del transformador asociado al motor de 2,150 HP no se espera corriente armónica desde el lado de 4.16 kV; sin embargo, de acuerdo a la figura anterior, la corriente armónica varía entre 0.20 A y 2 A. Esto puede ser originado por dos factores. El primero producido por la asimetría de la carga, asumida por los convertidores, y el segundo factor es producido por el consumo de corriente de orden 5 por parte de la carga, originada por el disturbio armónico elevado por parte del SEIN.

D. Sobre la compensación reactiva de la carga

Se hace referencia a la compensación de la carga asociada al motor de 2,150 HP o Winche de Producción. De acuerdo a los resultados de la tabla 18, no es requerida por la carga (44 kVAr al percentil al 95%) no es requerida la compensación reactiva para el “Winche Personal”.

En acuerdo, con los resultados, se tienen las siguientes conclusiones:

- Es necesario que la compensación reactiva ayude a superar los “huecos de tensión”. Cuya operación se dé en tiempos del orden de 1 s y se pueda desconectar posterior a la operación del motor 2,150 HP. Para este caso clasifican dos tipos de tecnología: bancos de capacitores automáticos con tiempos de operación ajustados por el sistema de control y los filtros activos.
- Es necesario que la compensación reactiva ayude a corregir el factor de potencia. Para este caso también clasifican los bancos de capacitores automáticos y filtros activos.
- Compensación reactiva que atenúen las corrientes armónicas. En este caso parecería ser que siguen siendo factible los bancos de capacitores (filtros de armónicos) y filtros activos. Sin embargo, un filtro de armónicos pasivo no es factible para este tipo de aplicación. Los filtros de armónicos para baja tensión son de sintonía simple. Estos equipos reducen la corriente armónica de solo un orden armónico. Como se muestra en las figuras 18 y 19, las corrientes armónicas a filtrar son de orden 5, 7, 11, 13, entre otras. Y las corrientes armónicas que producen problemas en la distorsión de tensión son las de orden 23, 25, 35 y 37. Un filtro de armónicos pasivo no puede “consumir” corrientes armónicas para un conjunto tan amplio de frecuencias y, por esa razón, se lo descarta como alternativa de solución. La única solución factible entonces resulta ser la de filtros activos conectados en bornes de 660.
- Un filtro activo además de corregir las corrientes de emisión armónica, producto de la inyección en contra fase de armónicos, puede corregir el factor de potencia de la carga.
- De acuerdo a los resultados de medición cada 15 m, determinan que por cada convertidor, se requieren filtros activos de 450 A conectados en 660 V.

- A manera de comentario, los filtros activos son equipos que pueden llegar a costar unos 50,000 USD por capacidades de 100 A. Entonces, para implementar una solución para la compensación y corrección de potencia para el motor de 2,150 HP se puede llegar a invertir cerca de 500,000 USD. Con un costo similar, se puede replantear la solución de forma integral. Es decir, se puede realizar la ingeniería e implementación de motor AC, con variadores de velocidad con frente activo (son mucho más limpios en términos de armónicos). De acuerdo al control del variador de velocidad se tendrá un menor consumo de potencia reactiva durante el arranque y, por tal, una mejor corrección del factor de potencia (teóricamente de 0.95 inductivo).

4.1.2 Modelado de la red

La representación del sistema eléctrico en estudio se realizó en software ETAP, este modelo se utilizó para determinar el sistema de compensación reactiva óptima en la mina.

4.1.3 Compensación reactiva

El análisis de la compensación reactiva se realiza en las unidades mineras Chungar e Islay y en la subestación Animón con la finalidad de reducir el exceso de energía reactiva y las pérdidas de potencia manteniendo los indicadores de calidad de energía.

4.1.3.1 Compensación reactiva de las unidades mineras Chungar e Islay

El consumo de potencia reactiva de las unidades mineras Chungar e Islay es entre 9,904 y 13,872 kVAr. La instalación de bancos de capacitores generará potencia reactiva de forma local y se podrán atenuar las pérdidas en los transformadores y regular el nivel de tensión.

Para determinar la capacidad y la localización óptima de los capacitores se realizó con el módulo *Optimal Capacitor Placement* del software ETAP.

4.1.4 Localización óptima de capacitores en las unidades mineras Chungar e Islay

Se realizaron cinco alternativas de ubicación óptima de los capacitores en las unidades mineras.

4.1.4.1 Alternativa 1: compensación reactiva localizada en la carga

Se considera la instalación de bancos de capacitores automáticos en la carga (0.46 kV y 0.48 kV). En las barras de los transformadores de potencia que conforman las subestaciones de las unidades mineras Chungar e Islay.

Se considera como consigna de diseño que el factor de potencia en la barra donde se instalará un banco de capacitores sea mayor a 0.95 inductivo. En la práctica, esto se obtiene mediante un automatismo que controla los pasos de los bancos de capacitores. Los costos de facturación de energía activa, oscila entre 24 a 25 USD/MWh. Para fines de prueba se considera 0.03 USD/kWh. Asimismo, de acuerdo a lo obtenido en el registro de mediciones el factor de carga es del orden de 0.80.

Se consideran los cambiadores de toma de TR-03/04 en posición -5% (posición 7). En el resto de los transformadores de potencia de las unidades mineras Chungar e Islay se considera la posición actual en los cambiadores de toma conforme a lo obtenido en campo.

Tabla 20. Resultados de simulación OCP – Alternativa 1

Descripción	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)
Demanda total	50,705	18,067
Carga tipo motor	45,589	22,853
Carga estática	2,709	-6,977
Pérdidas	2,408	2,191
Factor de potencia desde Francoise 50 kV		0,8868

Tabla 21. Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 1

Descripción	Magnitud
Capacidad total (kVAr)	6,050
Instalación (USD)	41,800
Costo de equipo (USD)	290,400
Operación y mantenimiento (USD)	43,560
Ahorro en pérdidas (USD)	129947,900

Al considerar bancos de capacitores localizados en la carga, todos los transformadores asociados operan con cambiador de tomas en posición nominal, lo que provee mayor rango de regulación. Los resultados de simulación OCP para la alternativa 1. Adicionalmente, se realiza la simulación de distorsión armónica en las barras de las unidades mineras Chungar e Islay. Mediante simulación se determina que todas las barras presentan distorsión armónica de tensión en cumplimiento de la IEC 61000. Esto significa que el disturbio armónico del sistema Chungar está bastante controlado y que los bancos de capacitores no producen resonancias en los armónicos característicos, por tal, no se amplifica el nivel de distorsión armónica. De otro lado, en las barras en 660 V y 480 V donde están conectados los “Winches de Producción” y “Winche de Personal”. En esas barras se exceden los límites de compatibilidad. Para estos casos, de acuerdo a lo evaluado sobre la compensación reactiva de la carga “casa Winche”, es requerida la implementación de filtros activos.

4.1.4.2 Alternativa 2: centralizada en la subestación Animón

La presente alternativa considera la instalación de bancos de capacitores en media tensión (22.9 kV) en barras del lado secundario de los transformadores de potencia de la subestación Animón. Se considera como consigna de diseño el control de la tensión entre 95% a 100% la barra candidata en la subestación Animón 22.9 kV

Los costos de facturación de energía activa, oscila entre 24 a 25 USD/MWh. Para fines de simulación se considera 0.03 USD/kWh. Asimismo, de acuerdo a lo obtenido en el registro de mediciones el factor de carga es del orden de 0.80.

Tabla 22. Resultados de simulación OCP – Alternativa 2

Descripción	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)
Demanda total	50,945	15,672
Carga tipo motor	45,588	22,850
Carga estática	2,569	-10,170
Pérdidas	2,788	2,992
Factor de potencia desde Francoise 50kv		0,931

Tabla 23. Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 2

Descripción	Magnitud
Capacidad total (kVAr)	10,000
Instalación (USD)	19,600
Costo de equipo (USD)	1060,000
Operación y Mantenimiento (USD)	14,250
Ahorro en pérdidas (USD)	93507,580

Adicionalmente, se realiza la simulación de distorsión armónica en las barras de las unidades mineras Chungar e Islay. Mediante simulación se determina que todas las barras presentan distorsión armónica de tensión en cumplimiento de la IEC 61000. Esto significa que el disturbio armónico del sistema Chungar está bastante controlado y que los bancos de capacitores no producen

resonancias en los armónicos característicos, por tal motivo, no se amplifica el nivel de distorsión armónica.

4.1.4.3 Alternativa 3: compensación centralizada en media tensión

La presente alternativa considera la instalación de bancos de capacitores en media tensión (barras candidatas en 4.16 kV) en barras del lado secundario de los transformadores de potencia de las subestaciones de las unidades mineras Chungar e Islay. Para la presente alternativa se considera como consigna de diseño el control de la tensión en la subestación Animón 22.9 kV entre 95% a 100%.

Los costos de facturación de energía activa, oscila entre 24 a 25 USD/MWh. Para fines de simulación se considera 0.03 USD/kWh. Asimismo, de acuerdo a lo obtenido en el registro de mediciones el factor de carga es del orden de 0.80.

Tabla 24. Resultados de simulación OCP – Alternativa 3

Descripción	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)
Demanda total	50,887	17,116
Carga tipo motor	45,588	22,852
Carga estática	2,559	-8,764
Pérdidas	2,739	3,028
Factor de potencia desde Francoise 50 kV		0,8599

Tabla 25. Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 3

Descripción	Magnitud
Capacidad total (kVAr)	9,000
Instalación (USD)	56,000
Costo de equipo (USD)	1260,000
Operación y mantenimiento (USD)	10,800
Ahorro en pérdidas (USD)	130261,600

Adicionalmente, se realiza la simulación de distorsión armónica en las barras de las unidades mineras Chungar e Islay. Mediante simulación se determina que todas las barras presentan distorsión armónica de tensión en cumplimiento de la IEC 61000. Esto significa que el disturbio armónico del sistema Chungar está bastante controlado y que los bancos de capacitores no producen resonancias en los armónicos característicos, por tal motivo, no se amplifica el nivel de distorsión armónica.

4.1.4.4 Alternativa 4: compensación mixta en 0.48 kV y 4.16 kV

La presente alternativa considera la instalación de bancos de capacitores en 0.48 kV y las barras en 4.16 kV de los principales transformadores de potencia de las unidades mineras Chungar e Islay. Para la presente alternativa se considera como consigna de diseño el control de la tensión en la subestación Animón 22.9 kV entre 95% a 100%. Los costos de facturación de energía activa, oscila entre 24 a 25 USD/MWh. Para fines de simulación se considera 0.03 USD/kWh. Asimismo, de acuerdo a lo obtenido en el registro de mediciones el factor de carga es del orden de 0.80.

Tabla 26. Resultados de simulación OCP – Alternativa 4

Descripción	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)
Demanda total	50,901	18,641
Carga tipo motor	45,588	22,852
Carga estática	2,544	-7,539
Pérdidas	2,770	3,328
Factor de potencia desde Francoise 50 kV		0,8788

Tabla 27. Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 4

Descripción	Magnitud
Capacidad total (kVAr)	7,275
Instalación (USD)	60,300
Costo de equipo (USD)	901,200
Operación y mantenimiento (USD)	16,380
Ahorro en pérdidas (USD)	104279,900

4.1.4.5 Alternativa 5: compensación mixta en 0.48 kV y 22.9 kV

La presente alternativa considera la instalación de bancos de capacitores en 0.48 kV y las barras en 22.9 kV de los principales transformadores de potencia de las unidades mineras Chungar e Islay. Para la presente alternativa se considera como consigna de diseño el control de la tensión en la subestación Animón 50 kV entre 95% a 100%. Los costos de facturación de energía activa, oscila entre 24 a 25 USD/MWh. Para fines de simulación se considera 0.03 USD/kWh. Asimismo, de acuerdo a lo obtenido en el registro de mediciones el factor de carga es del orden de 0.80.

Tabla 28. Resultados de simulación OCP – Alternativa 5

Descripción	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)
Demanda total	50,695	15,679
Carga tipo motor	45,588	22,851
Carga estática	2,591	-9,461
Pérdidas	2,517	2,290
Factor de potencia desde Francoise 50 kV		0,9288

Tabla 29 Compensación reactiva y costos OCP – Alternativa 5

Descripción	Magnitud
Capacidad total (kVAr)	9525,000
Instalación (USD)	70000,000
Costo de equipo (USD)	849200,000
Operación y mantenimiento (USD)	51780,000
Ahorro en pérdidas (USD)	177123,300

4.1.5 Comparación de alternativas

A continuación, se muestran algunas figuras donde se comparan variables trascendentes de las alternativas propuestas.

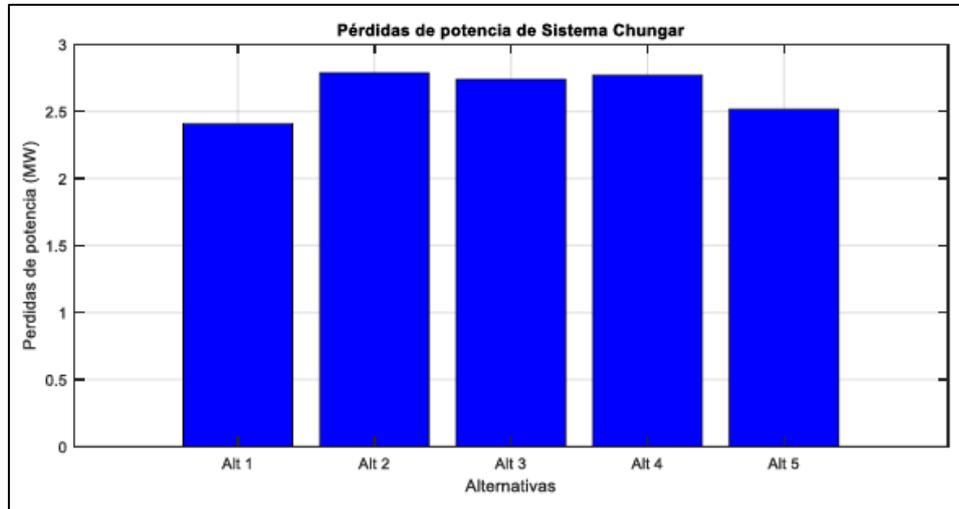


Figura 17. Pérdidas de potencia del sistema Chungar

Las alternativas 1 y 5 presentan menores pérdidas técnicas (y por tanto de mayor ahorro en pérdidas).

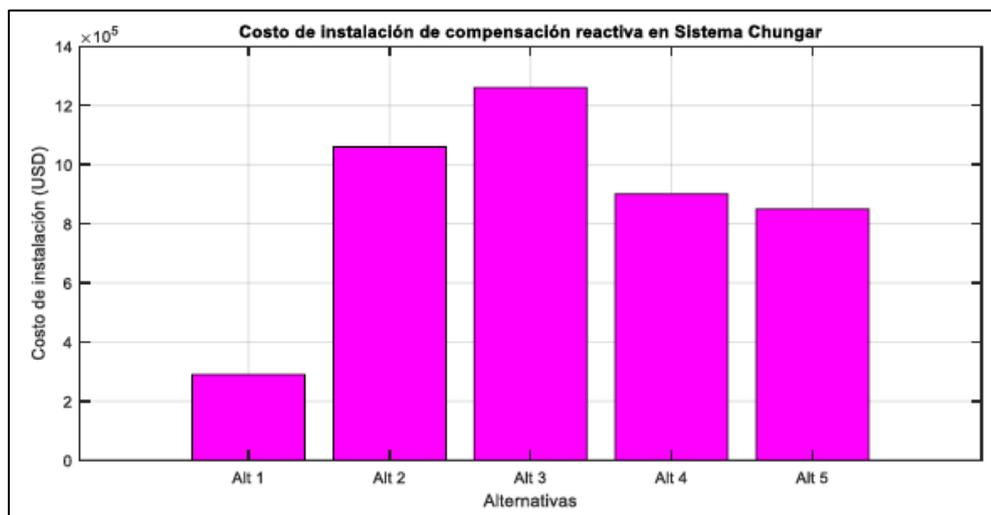


Figura 18. Costo de instalación de compensación reactiva en el sistema Chungar

Las alternativas 1 y 5 son las de menor costo de instalación de compensación reactiva.

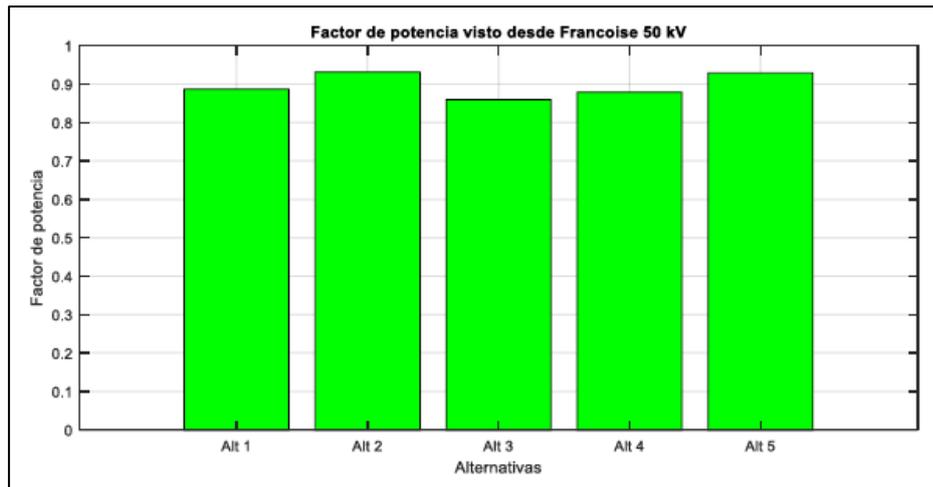


Figura 19. Factor de potencia visto desde Francoise 50 kV

Las alternativas 2 y 5 son las que presentan mejor el factor de potencia visto desde Francoise 50 kV. Se concluye que las mejores alternativas son la 1 y la 5, en lo que respecta al costo de instalación y menores pérdidas del sistema Chungar. Sin embargo, la alternativa 1 se descarta debido al pobre factor de potencia visto desde Francoise 50 kV. En tal sentido, se considera a la alternativa 5 (compensación mixta) la óptima para compensar la carga de las unidades mineras Chungar e Islay. Se precisa que las alternativas 1 y 5, presentan las mismas barras candidatas en BT. Con la diferencia en la consigna o restricción para el OCP. En el caso de la alternativa 1 se considera una consigna por factor de potencia y en la alternativa 5 se considera una consigna por regulación de tensión. Si bien es cierto, la alternativa 5 es la óptima, por fines de diseño se considera la mayor capacidad del sistema de compensación reactiva en BT, que es obtenida mediante la alternativa 1; esto por cuestiones operativas y de mayor control (acceso al equipamiento), por lo tanto, se propone que la compensación en MT sea centralizada. Es decir, la alternativa 5, propone 3,500 kVAr instalados en las principales barras en 22.9 kV de las unidades mineras Chungar e Islay. Se recomienda estos 3,500 kVAr – luego se determina que solo son necesarios 3,000 kVAr – sean instalados directamente en barras de 22.9 kV en la subestación Animón.

A continuación, se presentan las características básicas del sistema de compensación reactiva calculado por el OCP:

Tabla 30. Capacidad de sistema de compensación reactiva calculada por OCP

Ítem	Ubicación	Subestación (SE)	Transformador	Tensión nominal (kV)	Capacidad OCP (kVAr)
1			T-080	0,48	275
2		SE 9A	T-124	0,48	275
3			T-069	0,48	250
4		SE 21	T-096	0,48	300
5		SE 22	T-097	0,48	150
6		SE 25	T-113	0,48	350
7	Mina	SE 28	T-120	0,48	300
8	Chungar	SE 35	T-051	0,48	200
9		SE 37	T-01	0,48	150
10			T-74	0,48	250
11		SE 38	355-XFP-001	0,48	350
12			355-XFP-002	0,48	325
13		SE 39	100-XFP-001	0,48	600
14			100-XFP-002	0,48	600
15			T-132	0,48	350
16		SE 03	T-133	0,48	200
17			TRA-0165	0,48	250
18	Mina Islay		TRA-137	0,48	200
19		SE 05	TRA-138	0,48	325
20			TRA-139	0,48	175
21			TR-035	0,48	175

Es preciso mencionar que las capacidades determinadas no son necesariamente las definitivas para la solución. Para el caso de baja tensión la solución depende de la capacidad disponible en el mercado.

4.1.6 Estandarización de sistemas de compensación reactiva

Con la salvedad del requerimiento reactivo de SE 39 (requiere 600 kVAr por cada transformador), es posible determinar valores estándar para poder trasladar los bancos de capacitores por la exigencia de reubicación de la carga. Para tal efecto, se estandariza la capacidad en bancos de 200 kVAr y 300 kVAr. Se precisa que el traslado de los bancos de capacitores solo es posible porque el disturbio armónico está bastante controlado en las barras de baja tensión y no existen fuentes de emisión armónica en la carga.

Tabla 31. Capacidad estándar de los bancos de capacitores

Ítem	Ubicación	Subestación (SE)	Transformador	Tensión nominal (kV)	Capacidad OCP (kVAr)	Capacidad estándar (kVAr)
1,0			T-080	0,5	275	300
2,0		SE 9A	T-124	0,5	275	300
3,0			T-069	0,5	250	300
4,0		SE 21	T-096	0,5	300	300
5,0		SE 22	T-097	0,5	150	200
6,0		SE 25	T-113	0,5	350	300
7,0	Mina	SE 28	T-120	0,5	300	300
8,0	Chungar	SE 35	T-051	0,5	200	200
9,0			T-01	0,5	150	200
10,0			SE 37	T-74	250	300
11,0				355-XFP-001	350	300
12,0		SE 38		355-XFP-002	325	300
13,0				100-XFP-001	600	600
14,0		SE 39		100-XFP-002	600	600
15,0				T-132	350	300
16,0		SE 03		T-133	200	200
17,0				TRA-0165	250	300
18,0	Mina			TRA-137	200	200
19,0	Islay			TRA-138	325	300
20,0		SE 05		TRA-139	175	200
21,0				TR-035	175	200

La compensación reactiva total propuesta en BT es de 6,200 kVAr.

4.1.7 Niveles de tensión en barras candidatas

De acuerdo al sistema de compensación reactiva propuesto se realizan simulaciones de flujo de potencia con los equipos de compensación reactiva y, sin ellos, para validar los niveles de tensión en barras donde se conectan los bancos de capacitores. Se precisa que, para el caso con bancos de capacitores, los transformadores de potencia asociados presentan cambiadores de toma en posición nominal.

Tabla 32. Nivel de tensión en barras de 0.48 kV

Ítem	Ubicación	Subestación	Transformador	Tensión nominal (kV)	Nivel de tensión (%)	
					Sin bancos	Con bancos
1,0			T-080	0,48	94,34	102,90
2,0		SE 9A	T-124	0,48	94,55	103,00
3,0			T-069	0,48	96,69	102,60
4,0		SE 21	T-096	0,48	96,27	102,20
5,0		SE 22	T-097	0,48	95,34	103,20
6,0		SE 25	T-113	0,48	90,69	103,50
7,0	Mina	SE 28	T-120	0,48	97,44	98,39
8,0	Chungar	SE 35	T-051	0,48	95,96	99,85
9,0			T-01	0,48	97,21	101,00
10,0		SE 37	T-74	0,48	96,62	100,80
11,0			355-XFP-001	0,48	97,11	100,60
12,0		SE 38	355-XFP-002	0,48	97,22	100,70
13,0			100-XFP-001	0,48	94,83	99,85
14,0		SE 39	100-XFP-002	0,48	94,78	99,83
15,0			T-132	0,48	79,39	99,58
16,0		SE 03	T-133	0,48	81,20	100,80
17,0			TRA-0165	0,48	83,03	100,50
18,0	Mina Islay		TRA-137	0,48	85,12	99,26
19,0			TRA-138	0,48	84,21	98,89
20,0		SE 05	TRA-139	0,48	85,03	99,18
21,0			TR-035	0,48	86,51	102,40

Al considerar, la puesta en servicio de los bancos de capacitores propuestos en la tabla 32, se mejoran notablemente los niveles de tensión cumpliendo con los rangos recomendados por la IEC 61000-2-4.

4.1.8 Compensación reactiva mixta

4.1.8.1 Alternativa óptima obtenida mediante OCP

En conformidad con los análisis preliminares, la alternativa de compensación óptima del sistema Chungar es de compensación localizada en la carga y centralizada en la SE Animón 22.9 kV. De acuerdo a los resultados previos son requeridos 6,200 kVAr en 0.48 kV y 3,500 kVAr en 22.9 kV. Para efectos del análisis mediante *Power Factory DIgSILENT* la inclusión de 6,200 kVAr compensa el factor de potencia a 0.95 *ind* en los alimentadores de la SE Animón 23 kV, con la excepción, de LP-13. En este apartado, se calcula la capacidad del sistema de compensación reactiva a instalar en la

SE Animón 22.9 kV con la consigna de corregir el factor de potencia desde el punto de medición y facturación de energía.

4.1.8.2 Sobre el pago por exceso de energía reactiva

La facturación por peajes tiene como concepto el pago por exceso de energía reactiva. Se ha verificado que el pago es por el exceso del 30% de la energía activa con precio unitario de 4.44 cm S/ /kVAr-h lo cual representa un aproximado de 250 k USD por año. De acuerdo al consumo de energía activa y reactiva el factor de potencia registrado desde la SE Paragsha 220 kV es del orden de 0.85 inductivo. Es decir, si se considera que el valor medio de la potencia activa es 16,594 kW (ver tabla 15), se espera un consumo de potencia reactiva desde Paragsha II 220 kV de 10,284 kVAr. Este cálculo es coherente con el consumo reactivo medio visto desde Animón 50 kV (11,129 kVAr); sin embargo, no resultaría factible con una medición vista desde Paragsha II 220 kV. Puesto que la línea L-2271 tiene longitud de 44.33 km y en vacío inyecta unos 7 MVar, resultando en un factor de potencia visto desde Paragsha II 220 kV de 0.98 inductivo. En ese sentido, se concluye que para el pago por exceso de energía reactiva se está considerando el registro desde Francoise 50 kV, entonces el factor de potencia debe ser corregido a 0.95 inductivo en dicho punto de medición.

4.1.8.3 Sobre la compensación reactiva del pique Timmers

Evaluada en la calidad de energía, la SE Animón presenta disturbio armónico muy controlado y la única fuente de armónicos detectada – con las mediciones –es la proveniente del alimentador LP-13 (hacia pique Jacob Timmers). Sea cual fuese la alternativa de solución para atenuar el disturbio armónico de “Casa Winche”, por consigna de diseño es requerido obtener los resultados más críticos. En ese sentido, se realizan simulaciones considerando la máxima contribución de emisión armónica por parte de “Casa Winche”.

4.1.8.4 Red eléctrica

Para el desarrollo de simulaciones de flujo de potencia y armónicos, se utiliza el modelo de red completa del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) del COES, con el objetivo de obtener resultados más próximos a los “reales”. La base de datos SEIN del COES con la cual se desarrolla las simulaciones del presente estudio es la que comúnmente se utiliza en estudios de preoperatividad.

Tabla 33. Cortocircuito trifásico en Paragsha II 220 kV

Escenario	Potencia de cortocircuito Paragsha II 220 kV (MVA)	Escenario	Potencia de cortocircuito Paragsha II 220 kV (MVA)
Av20max	3968,75	Av24max	4120,52
Av20med	3994,74	Av24med	4118,20
Av20min	3971,14	Av24min	4021,59
Es20max	3971,20	Es24max	4121,74
Es20med	3969,41	Es24med	4120,71
Es20min	3821,35	Es24min	3924,23
Av21max	3951,97	Av28max	4190,01
Av21med	3947,81	Av28med	4189,35
Av21min	3946,32	Av28min	4090,91
Es21max	4363,66	Es28max	4189,26
Es21med	4362,69	Es28med	4187,92
Es21min	4241,73	Es28min	3764,68
Av22max	4273,46		
Av22med	4216,67		
Av22min	4204,90		
Es22max	4305,97		
Es22med	4304,54		
Es22min	3884,74		

Para los años 2020 al 2028 la variación de la potencia de cortocircuito es pequeña, entonces puede utilizarse cualquiera de los escenarios para realizar simulaciones. Sin embargo, para fines de diseño se opta por obtener las peores condiciones de distorsión armónica. En tal sentido, se selecciona para el desarrollo de simulaciones del presente estudio el escenario de Estiaje 2020 en mínima demanda.

4.1.8.5 Modelo eléctrico

La compañía minera Chungar S. A. A., como parte del desarrollo de sus operaciones mineras, requiere reforzar el sistema eléctrico principal de la SE Animón, en los niveles de 50 kV y 22.9 kV. El refuerzo debe permitir lo siguiente:

- Alimentación de alta confiabilidad y disponibilidad para las cargas críticas de bombeo y ventilación de las minas Chungar e Islay, mediante la incorporación de un tercer transformador de potencia: TR-05.
- *By Pass* de las bahías de 50 kV de los dos transformadores existentes, para facilitar las labores de mantenimiento.
- *By Pass* de las bahías de 22.9 kV de los dos transformadores existentes, para facilitar las labores de mantenimiento.
- Contingencias para incremento de carga y mantenimiento de los transformadores existentes.
- Compensación reactiva en la barra de 22.9 kV.
- Para el ingreso de la segunda terna de la línea de transmisión de 50 kV Francoise – Animón, se requiere implementar la bahía de conexión en 50 kV y el enlace mediante seccionador a las barras existentes en 50 kV.
- Bahía de tercer transformador TR-05. Para la conexión en 50 kV del transformador de 15/18 MVA 48/22.9 kV – TR-05, se implementarán los equipos de protección, maniobra y medida necesarios.

En ese sentido, para las simulaciones de armónicos se considera los proyectos mencionados.

Tabla 34. Parámetros de transformadores de potencia

Transformador	Código	Capacidad (MVA)	Relación de transformación (kV)	Grupo de conexión	Impedancia de cortocircuito (%)			Pérdidas en el cobre HV-MV (%)	Regulación por taps en HV (%)
					HV-MV	MV-LV	LV-HV		
Francoise	PT-01	60/60/10	220/50/10	Ynynd5	12,8	3,1	3,2	-	±10x1.0
Animón	TR-03	18,0	48/23	Dyn5	9,4	-	-	0,5	±4x2.5
Animón	TR-04	18,0	48/23	Dyn5	9,4	-	-	0,5	±4x2.5
Baños IV	PT-310	8/8/1.5	50/22/4.16	Ynyn+d	3,1	0,5	1,8	0,6	±2x2.5
Alpamarca	TR-05	18,0	50/22.9	Dyn5	10,2	-	-	0,5	±1x1.0
Magistral	TRP-07	3,0	22.9/10	Dyn5	6,0	-	-	1,0	±2x2.5
San José II	PT-100	3,0	48/5.5	Dyn5	6,8	-	-	1,0	±2x2.5
Yanahuin	PT-207	0,7	2.4/23	Dyn5	4,5	-	-	1,4	±2x2.5
Cacray	PT-210	0,6	0.48/23	Dy5	3,9	-	-	2,2	±2x2.5
Huanchay	PT-212	3,0	2.3/23	Ynd5	4,1	-	-	1,0	±3x2.5
Shagua	PT-215	1,8	2.3/23	Dyn5	6,4	-	-	1,0	±2x2.5
Baños I	PT-225	2,0	0.46/23	Ynd5	5,5	-	-	1,0	±2x2.5
Baños II	PT-228	2,0	0.46/23	Ynd5	5,5	-	-	1,0	±2x2.5
Baños III	PT-232	2,0	2.3/23	Ynd5	5,4	-	-	1,0	±3x2.5
Baños IV	PT-311	3,0	4.16/23	Ynd5	5,6	-	-	0,8	±2x2.5
Baños IV	PT-313	3,0	0.46/23	Dyn5	7,1	-	-	1,0	±2x2.5
Tingo	PT-205	2,0	2.3/24	Yd5	4,1	-	-	1,0	±2x2.5
Baños V	PT-401	6,0	50/4.16	Ynd5	6,6	-	-	0,8	±2x2.5
Baños V	PT-402	6,0	50/4.16	Ynd5	6,7	-	-	0,8	±2x2.5

El modelo de transformador de potencia considera la corrección de los parámetros R-L y su dependencia en la frecuencia de acuerdo a la bibliografía técnica de Electra “*The calculation of switching surges – network representation for energization and re-energization studies on lines fed by inductive source*”.

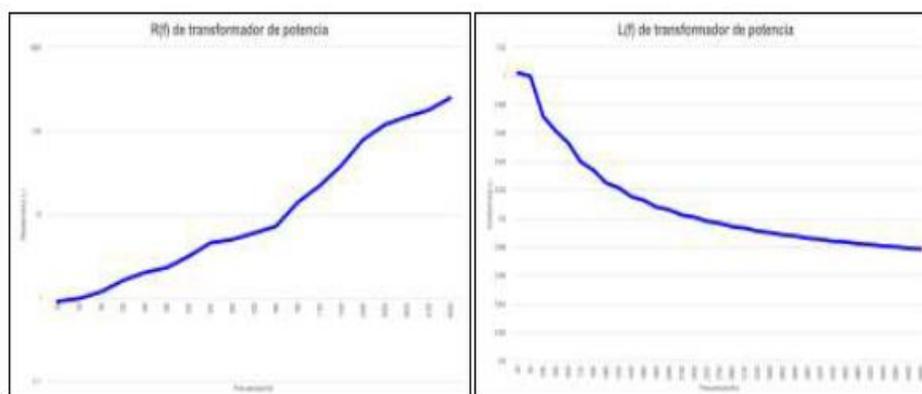


Figura 20. Dependencia en la frecuencia de la resistencia e inductancia del transformador

A continuación, se muestran los parámetros de las líneas de transmisión del sistema eléctrico.

Tabla 35. Parámetros eléctricos de líneas de transmisión

Línea	Código	Longitud (km)	Capacidad (MVA)	R1 (ohm/km)	X1 (ohm/km)	R0 (ohm/km)	X0 (ohm/km)	B1 (us/km)	B0 (us/km)
LT 220 kv Paragsha II-Francoise	L-2271	44,3	152,0	0,06	0,50	0,42	1,34	3,35	2,05
LT 50 kv Francoise-Animon	L-6542	4,9	30,0	0,17	0,46	0,62	1,35	3,66	1,97
LT 50 kv San Jose II-Animon	L-301	8,8	26,0	0,56	0,50	0,82	1,68	3,34	1,80
LT 50 kv Baños IV-Animon	L-303	41,6	29,0	0,29	0,49	0,55	1,68	3,41	2,02
LT 50 kv Baños IV-Derivación	L-302A1	15,7	29,0	0,29	0,49	0,55	1,68	3,41	2,02
LT 50 kv Derivación Animon	L-302A2	25,9	29,0	0,29	0,49	0,55	1,68	3,41	2,02
LT 50 kv Baños V-Baños IV	L-304	2,1	29,0	0,29	0,49	0,55	1,68	3,40	1,71
LT 50 kv Derivación-Alpamarca	L-305	3,0	26,0	0,29	0,49	0,55	1,68	3,41	2,02
LP 23 kv Deriv. Yanahuin (E-01)-Animon	L-201	18,0	14,0	0,33	0,88	0,60	1,91	3,26	1,71
LP 23 kv Cacray-Deriv. Yanahuin (E-01)	L-202	0,7	5,0	0,29	0,43	0,70	1,67	3,26	1,71
LP 23 kv Huanchay-Deriv. Yanahuin (E-01)	L-203	3,7	9,0	0,30	0,73	0,60	1,67	3,26	1,71
LP 23 kv Shahua-Huanchay	L-204	3,8	14,0	0,70	0,11	0,72	0,74	3,26	1,71
LP 23 kv Baños I-Deriv. E-39	L-205BI	0,3	14,0	0,28	0,51	0,53	1,66	3,26	1,71
LP 23 kv Baños II-Deriv. E-24	L-205BII	0,2	14,0	0,28	0,51	0,53	1,66	3,26	1,71
LP 23 kv Baños III-Deriv. E-24	L-205BIII	0,2	14,0	0,28	0,51	0,53	1,66	3,26	1,71
LP 23 kv Tingo-Deriv. Baños III	L-210A	9,8	13,0	0,28	0,28	0,53	1,66	3,26	1,71

El modelo de las líneas de transmisión considera la corrección de los parámetros R-L y su dependencia en la frecuencia de acuerdo a la bibliografía técnica de Electra “*The calculation of switching surges – Network representation for energization and re-energization studies on lines fed by inductive source*”.

4.1.8.6 Oferta y demanda

El modelo de las líneas de transmisión considera la corrección de los parámetros R-L y su dependencia en la frecuencia de acuerdo a la bibliografía técnica de Electra “*The calculation of switching surges – Network representation for energization and re-energization studies on lines fed by inductive source*”.

4.1.8.7 Escenario de simulación

En conformidad a la topología de red actual y proyectada se consideran los siguientes escenarios de simulación:

- Caso base (considerando compensación reactiva localizada en la carga de acuerdo a la alternativa 1)
- Con tercer transformador en la SE Animón
- Con segunda terna de L-6542
- Con tercer transformador en la SE Animón y segunda terna de L-6542

4.1.9 Cálculo de capacidad de sistema de compensación reactiva mediante flujo de potencia

En la tabla se muestran las simulaciones de flujo de potencia considerando la compensación reactiva localizada en la carga de la unidad minera Chungar.

Tabla 36. Simulación de flujo de potencia

Barra	Tensión (p.u.)	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)	Factor de potencia
Francoise 220 kV	1,0	30801,42	16668,78	0,88
Francoise 50 kV	1,0	20868,69	9188,91	0,92
Animón 50 kV	0,9	20679,41	8726,40	0,92
Animón 23 kV	1,0	32000,42	9837,10	0,96

La potencia reactiva consumida desde Animón 23 kV asciende a 9,837 kVAr, el cual será el límite de la capacidad del sistema de compensación reactiva. De acuerdo al cálculo preliminar, teóricamente se requieren 2,835 kVAr a instalar en Animón 23 kV. En las siguientes tablas se muestran los resultados de simulación de un conjunto de escenarios de flujo de potencia considerando la puesta en servicio de bancos de capacitores de 1,000 kVAr hasta los 3,000 kVAr.

Tabla 37. Factor de potencia visto desde 50 kV con bancos de capacitores

Barra	Factor de potencia				
	Banco de 1,000 kVAr	Banco de 1,500 kVAr	Banco de 2,000 kVAr	Banco de 2,500 kVAr	Banco de 3,000 kVAr
Francoise 50 kV	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
Animón 50 kV	0,94	0,94	0,95	0,96	0,96

Tabla 38. Potencia reactiva vista desde 50 kV y 23 kV con bancos de capacitores

Barra	Factor de potencia (kVAr)				
	Banco de 1,000 kVAr	Banco de 1,500 kVAr	Banco de 2,000 kVAr	Banco de 2,500 kVAr	Banco de 3,000 kVAr
Francoise 50 kV	7925,29	7584,48	6948,25	6305,50	5656,14
Animón 23 kV	8739,76	8299,00	7741,34	7174,54	6598,48

De acuerdo a las simulaciones realizadas, la capacidad óptima del sistema de compensación reactiva a instalar en Animón 23 kV es 3,000 kVAr. Con esta capacidad aún el consumo reactivo del sistema Chungar será de 5,656.14 kVAr evitando la inyección de potencia reactiva al SEIN. En el anexo 8 se muestran los resultados de flujo de potencia sin compensación en la SE Animón y con compensación en la SE Animón.

4.1.9.1 Determinación de pasos

Para evitar oscilaciones que puedan repercutir en la desconexión por las protecciones del equipamiento eléctrico, se debe limitar la variación de la tensión en Animón 23 kV por la conexión de cada paso de los bancos de capacitores al 3.00% de la tensión nominal.

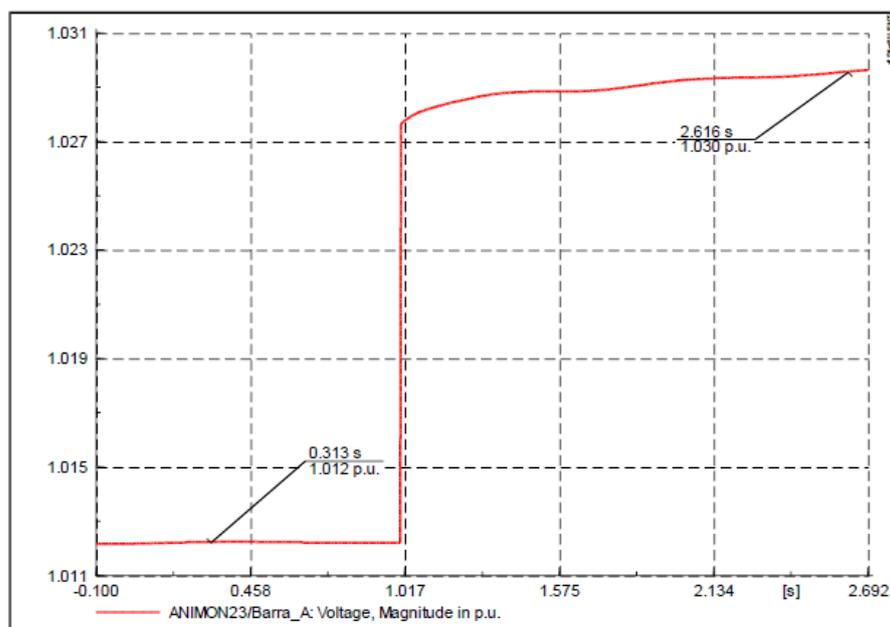


Figura 21. Tensión RMS ante la conexión de 3,000 kVAr en la SE Animón 22.9 kV

Al considerar la conexión de 3,000 kVAr en la barra Animón 23 kV la tensión varía hasta en 1.78%.

4.1.9.2 Simulación de armónicos

Es necesario disponer de un modelo capaz de representar de forma adecuada y coherente a los armónicos. Por tal razón, se debe validar la impedancia y la corriente armónicas inyectada en Paragsha II 220 kV, debido a que estos componentes en su conjunto originan la distorsión armónica de tensión. Respecto a la impedancia armónica es preciso representar la correcta dependencia en la frecuencia de los parámetros de las líneas de transmisión y transformadores de potencia. Por tal razón, se aplica la corrección de los parámetros R-L y su dependencia en la frecuencia de acuerdo a la bibliografía técnica de Electra “*The calculation of switching surges – Network representation for energization and re-energization studies on lines fed by inductive source*”.

Respecto a la corriente armónica inyectada en la barra Paragsha II 220 kV esta debe ser tal que pueda, de alguna forma,

replicarse lo obtenido en la medición descrita y analizada en la evaluación de la calidad de energía. Si bien es cierto, es un escenario conservador asumir que la distorsión armónica del año 2020 pueda representar a la distorsión del año 2019; sin embargo, para dicho año en la zona de influencia no se hallan proyectos de gran envergadura que puedan ocasionar un incremento significativo del disturbio armónico en la barra Paragsha II 220 kV, en tal sentido, es posible asumir que el disturbio armónico del año 2020 sea de similar característica al de este año 2019. Además, de acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación de las perturbaciones, es coherente asumir que el disturbio armónico en 50 kV es similar al disturbio en 220 kV en la zona de influencia, porque no existen proyectos relevantes operando en la zona de influencia.

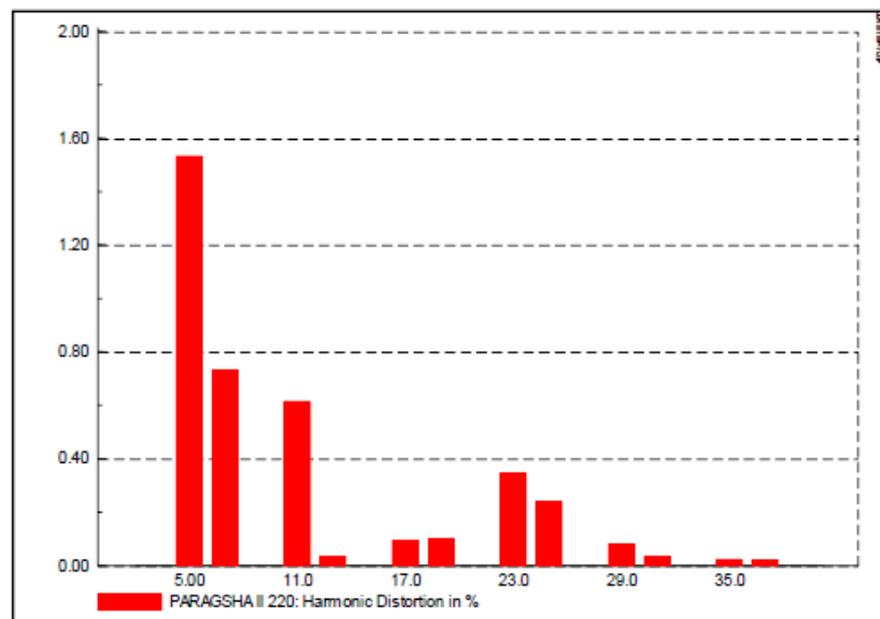


Figura 22. Espectro de tensión armónica simulada Paragsha II 220 kV

De otro lado, el modelo de armónicos en la SE Animón 23 kV se compone y se suma de acuerdo a la Ley de Suma de Corrientes establecida por la IEC 61000-3-6. En la figura siguiente se muestra el esquema simplificado del modelo de armónicos desarrollado para el presente estudio.

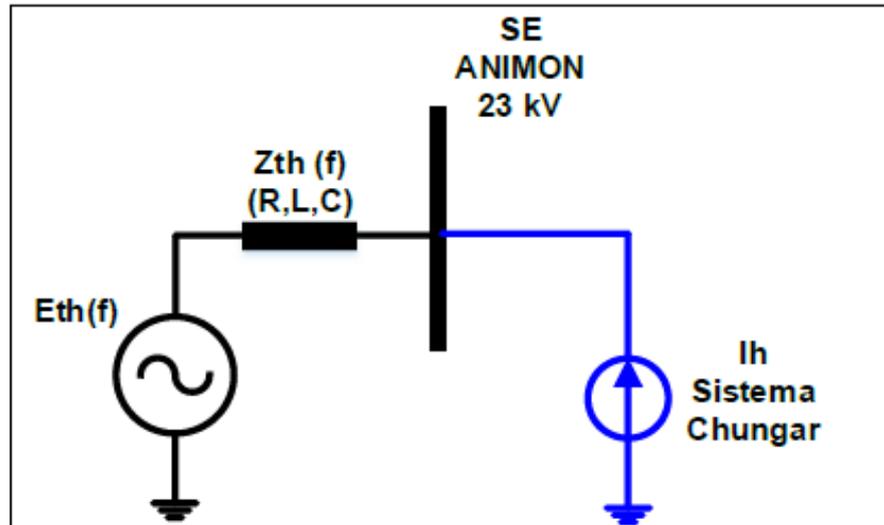


Figura 23. Esquema simplificado del modelo desarrollado para simulación de armónicos

La corriente armónica del sistema Chungar es obtenida de la medición de corriente armónica de LP- 13.

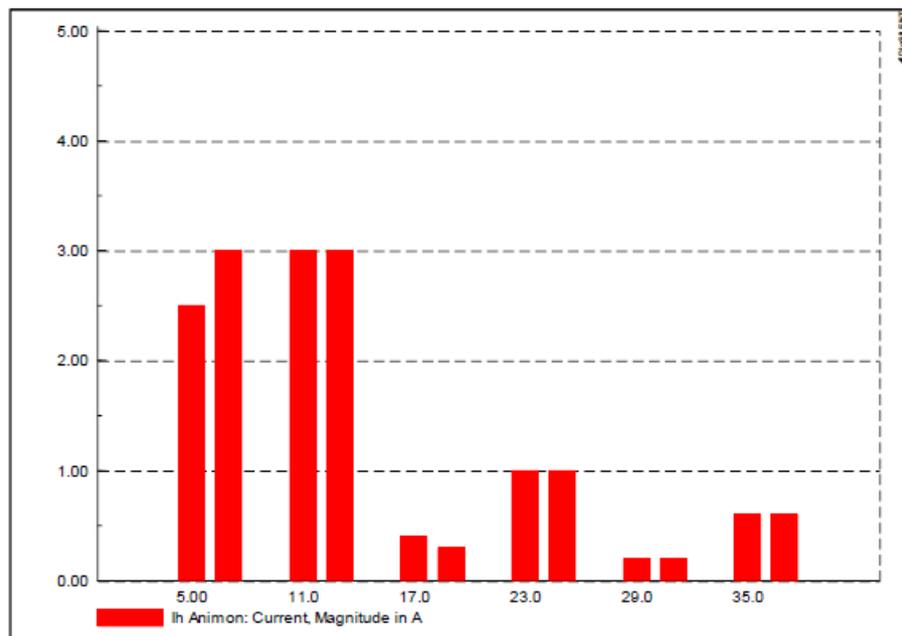


Figura 24. Espectro armónico de corriente en base a mediciones de LP-13

En la tabla se muestran los resultados de distorsión armónica en las barras del sistema Chungar considerando la alternativa 1 (compensación localizada en la carga) y con banco puro de 3,000 kVAr en la SE Animón 23 kV.

Tabla 39. Distorsión total de tensión simulada en la SE Animón

Barra	Distorsión armónica de tensión (%)					Límite
	Con alternativa 1	Con alternativa 1 y banco de capacitores puro de 3,000 kVAr en 23 KV	Condición proyectada 1	Condición proyectada 2	Condición proyectada 3	
Francoise 220 kV	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	3.00% (NTCSE)
Francoise 50 kV	2,1	2,8	3,1	2,6	2,6	3.00% (NTCSE)
Animón 50 kV	2,5	3,2	3,3	2,9	2,8	3.00% (NTCSE)
Animón 23 kV	3,2	3,9	3,8	3,4	3,2	8.00% (IEC 61000)

Alternativa 1: compensación reactiva localizada en la carga de las unidades mineras Chungar e Islay.

- Condición proyectada 1: con segunda terna de L-6592
- Condición proyectada 2: con tercer transformador en la SE Animón
- Condición proyectada 3: con tercer transformador en la SE Animón y segunda terna de L-6592

Al considerar la puesta en servicio de los bancos puros de 3,000 kVAr se amplifica la distorsión armónica en Animón 50 kV de 2.50% a 3.24%. Sin embargo, se debe precisar que la distorsión simulada es de 2.50% y la distorsión registrada es 2.80%. Esto evidencia que el problema de armónicos en Animón 50 kV es inherente al SEIN. De otro lado, al colocar un banco de capacitores de 3,000 kVAr el disturbio armónico en 23 kV se mantiene totalmente controlado. Esto evidencia que no existe necesidad de instalar un filtro de armónicos.

4.1.9.3 Cálculo de distorsión armónica

En el presente capítulo se presentan los resultados de simulación de la impedancia armónica para determinar si es requerida una solución tipo filtro de armónicos.

4.1.9.4 Cálculo de la impedancia armónica

Se muestran los resultados de la simulación de la impedancia armónica para determinar si es requerida una solución de tipo armónico.

Resonancia en paralelo

En la figura se muestra el cálculo de la impedancia armónica en la SE Animón 23 kV.

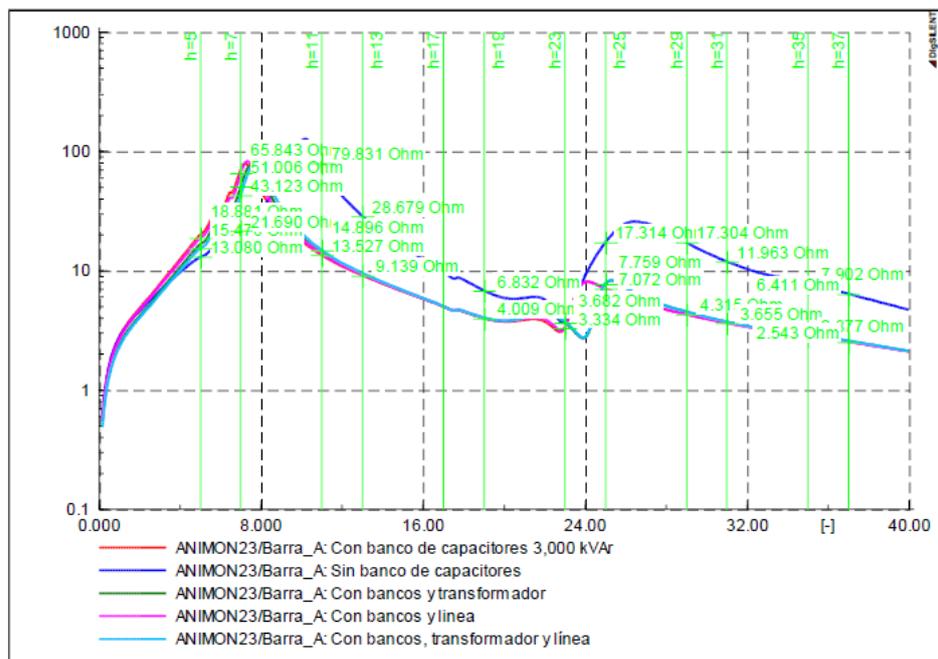


Figura 25. Impedancia armónica en la SE Animón 23 kV

Es notable que al considerar bancos puros se produce una resonancia en paralelo entre los armónicos de orden 7 al 11 (curva azul). El resto de las curvas son considerando los bancos de capacitores y los cambios en la topología del sistema de potencia. Al considerar la puesta en servicio del banco de capacitores se desplaza la resonancia hacia la armónica de orden 7. Esto produce

la amplificación de la distorsión armónica en barras de 50 kV y 23 kV de la SE Animón. Las barras de la SE Animón tienen el disturbio armónico bastante controlado y dentro de los límites de compatibilidad, por lo que no se considera necesaria la instalación de un filtro de armónicos.

Resonancia en serie

En la figura se muestra el cálculo de la impedancia armónica vista desde Paragsha II 220 kV.

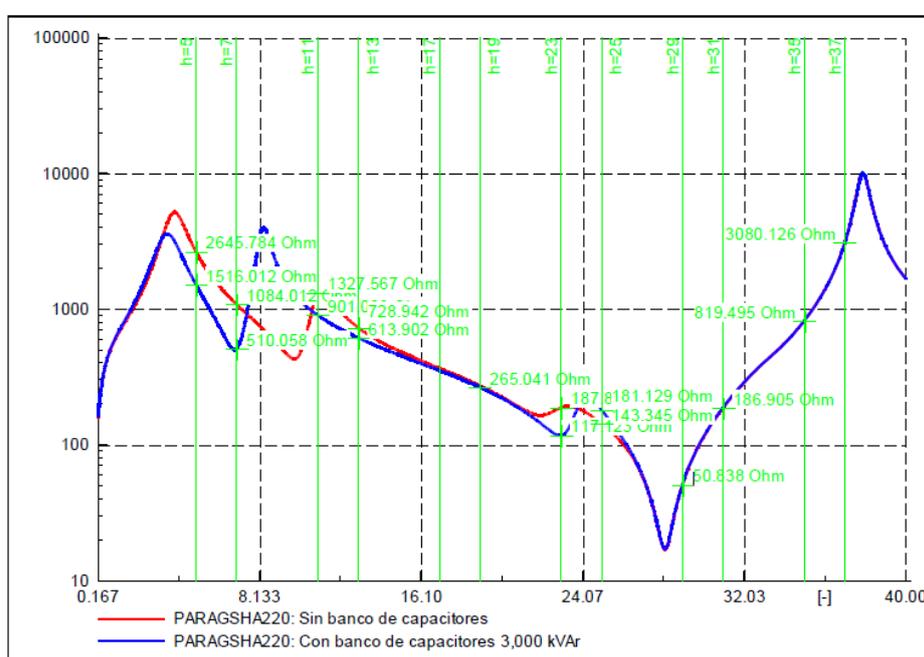


Figura 26. Impedancia armónica en la SE Animón 220 kV

En la figura se muestra en rojo la impedancia armónica vista desde Paragsha II 220 kV sin considerar los bancos de capacitores. Y en azul se muestra la impedancia armónica considerando la operación de los bancos de capacitores. Al considerar la operación de los bancos de capacitores la impedancia de orden 7 se reduce sustancialmente; sin embargo, esta armónica no es predominante en el SEIN por lo que no se prevé ningún incremento de la corriente RMS desde el SEIN hacia el sistema eléctrico. Por otro lado, existe una resonancia en serie en la armónica de orden 28 (sin considerar y considerando bancos), lo

que no es característica de un sistema de potencia y no causa perjuicio en la operación del sistema eléctrico.

4.1.9.5 Cargabilidad del sistema de compensación reactiva

De acuerdo a las normas de fabricación IEC 60871 los bancos de capacitores pueden tener una sobrecarga permanente – por armónicos - de hasta 130%. Conforme a las simulaciones realizadas la máxima corriente RMS, considerando armónicos es 78.76 A, lo cual representa el 104% de la corriente nominal del banco de capacitores. Es decir, se tiene un rango más que suficiente para la operación permanente del banco de capacitores sin sufrir problemas por efecto de armónicos.

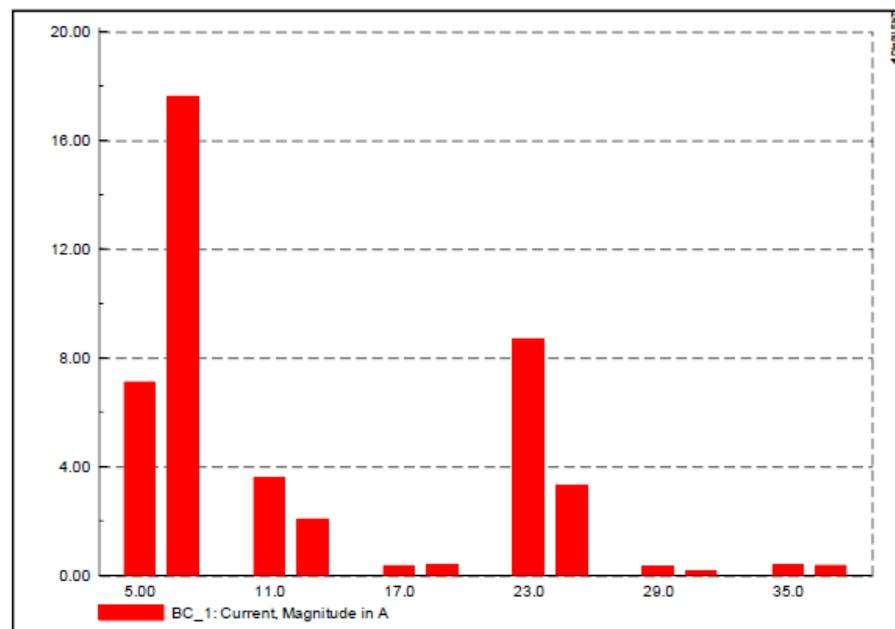


Figura 27. Corriente armónica máxima consumida por el banco de capacitores

4.2 Pruebas de hipótesis

H_1 : con la optimización del sistema de compensación reactiva mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.

H₀: se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna. Con la optimización de compensación reactiva se mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay

Hipótesis específicas

- H₀: con el dimensionamiento adecuado de los bancos de capacitores se mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.
 - Se acepta la hipótesis nula.

- H₀: con la localización de bancos de capacitores se mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.
 - Se acepta la hipótesis nula.

- H₀: con la corrección del factor de potencia se mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.
 - Se acepta la hipótesis nula.

4.3 Discusión de resultados

- **Evaluación de calidad de energía**
 - Se puede observar que las tensiones en 47.5 kV son muy estables – debido a la regulación del transformador de Francoise, ya que σ no supera los 363 V. Al mantener controlada la barra de 47.5 kV la tensión en 23 kV también se encuentra dentro de los rangos normativos.
 - La carga de las unidades mineras Chungar e Islay presentan un bajo factor de potencia (entre 0.75 a 0.87 inductivo) visto desde Francoise 50 kV. Lo cual conlleva a un consumo de potencia reactiva entre 8,861 kVAr a 13,397 kVAr.
 - Otro aspecto que causa especial interés es la variabilidad de la carga hacia el alimentador LP13 (hacia Montenegro que alimenta al pique J. Timmers). De acuerdo a los resultados de medición la desviación estándar de la potencia activa es el 43% del valor medio, lo cual implica una alta variabilidad en la demanda durante el periodo de medición. La potencia

activa registrada hacia el alimentador LP-13 varía entre 106 kW a 1,434 kW y la potencia reactiva varía entre 207 kVAr a 1,607 kVAr.

- En general, en 47.5 kV el disturbio armónico es bastante bajo y cumple para todos los casos con los límites de compatibilidad de la NTCSE e IEC 61000-2-4. En los puntos eléctricos en 23 kV el disturbio armónico está bastante controlado y se observa que el percentil al 95% no supera el 1.46%.
- En todos los puntos de medición la armónica de orden 5 presenta un valor por debajo de los límites de compatibilidad. Salvo la excepción de la medición en la bahía de L6542, donde el percentil del 95% excede los límites de compatibilidad.

- **Compensación reactiva de la carga**

- La única solución factible para solucionar los problemas de calidad de energía entonces resulta ser la de filtros activos conectados en bornes de 660 V. Un filtro activo además de corregir las corrientes de emisión armónica, producto de la inyección en contrafase de armónicos, puede corregir el factor de potencia de la carga. De acuerdo a los resultados de medición, cada 15 m, determinan que por cada convertidor se requieren filtros activos de 450 A conectados en 660 V. Los filtros activos son equipos que pueden llegar a costar unos 50,000 USD por capacidades de 100 A. Entonces, para implementar una solución para la compensación y corrección de factor de potencia para el motor de 2,150 HP se puede llegar a invertir cerca de 500,000 USD. Con un costo similar, se puede replantear la solución de forma integral. Es decir, se puede realizar la ingeniería e implementación de motor AC, con variadores de velocidad con frente activo (son mucho más limpios en términos de armónicos). De acuerdo al control del variador de velocidad se tendrá un menor consumo de potencia reactiva durante el arranque y, por tal motivo, una mejor corrección del factor de potencia (teóricamente de 0.95 inductivo).

- **Localización óptima de capacitadores - Chungar e Islay**

- Alternativas evaluadas mediante OCP
- Alternativa 1: compensación localizada en la carga (en 0.46 kV y 0.48 kV)
- Alternativa 2: compensación centralizada (en la SE Animón 23 kV)

- Alternativa 3: compensación centralizada (en 4.16 kV)
- Alternativa 4: compensación reactiva mixta (en 0.48 kV y 4.16 kV)
- Alternativa 5: compensación reactiva mixta (en 0.48 kV y 22.9 kV)

CONCLUSIONES

Se concluye que las mejores alternativas son la 1 y la 5, en lo que respecta al costo de instalación y menores pérdidas del sistema Chungar. Sin embargo, la alternativa 1 se descarta debido al pobre factor de potencia visto desde Francoise 50 kV. En tal sentido, se considera a la alternativa 5 (compensación mixta) como la óptima para compensar la carga de las unidades mineras Chungar e Islay. Se precisa que las alternativas 1 y 5, presentan las mismas barras candidatas en BT. Con la diferencia en la restricción para el OCP. En el caso de la alternativa 1 se considera una consigna por factor de potencia y en la alternativa 5 se considera una consigna por regulación de tensión. Si bien es cierto, la alternativa 5 es la óptima, por fines de diseño se considera la mayor capacidad del sistema de compensación reactiva en BT, que es obtenida mediante la alternativa 1.

Para evitar el pago por exceso de energía reactiva se propone la instalación de 3,000 kVAr en la subestación Animón en el lado de 23 kV.

De acuerdo a las simulaciones de armónicos no es requerida una solución tipo filtro de armónicos en tanto se cumplen con los límites de compatibilidad de la NTCSE e IEC 61000 y el nivel de carga del banco de capacitores de 3,000 kVAr es menor al 130%.

RECOMENDACIONES

Se recomienda, por cuestiones operativas y de mayor control (acceso al equipamiento), que la compensación en MT sea centralizada. Es decir, la alternativa 5, propone 3,500 kVAr instalados en las principales barras en 22.9kV de las unidades mineras Chungar e Islay.

Se recomienda que estos 3,500 kVAr, en los análisis, considerando el modelo SEIN, se determina que solo serán necesarios 3,000kVAr, y que sean instalados directamente en barras de 22.9 kV de la subestación Animón.

Para evitar el pago por exceso de energía reactiva se recomienda que la instalación de 3,000 kVAr en la subestación Animón en el lado de 23 kV. De acuerdo a las simulaciones de armónicos no es requerida una solución tipo filtro de armónicos, en tanto se cumplen con los límites de compatibilidad de la NTCSE e IEC 61000 y el nivel de carga del banco de capacitores de 3,000 kVAr es menor al 130%.

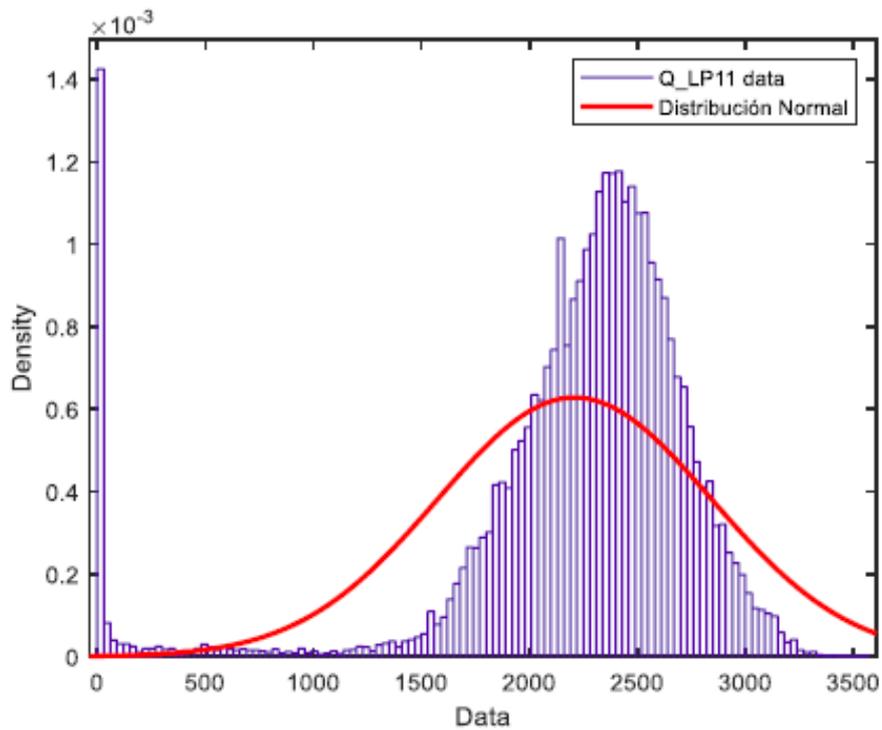
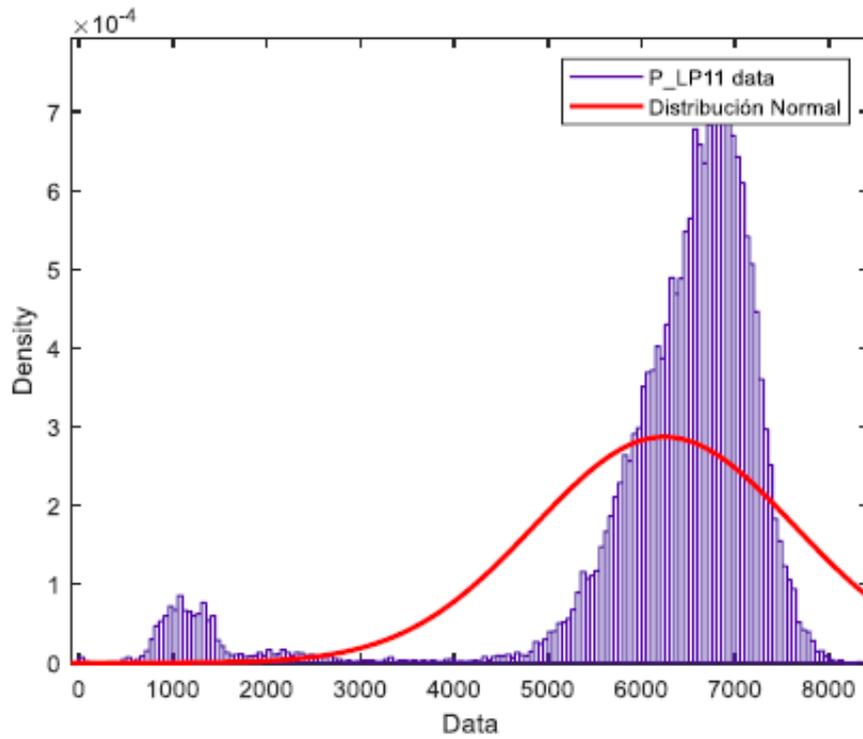
LISTA DE REFERENCIAS

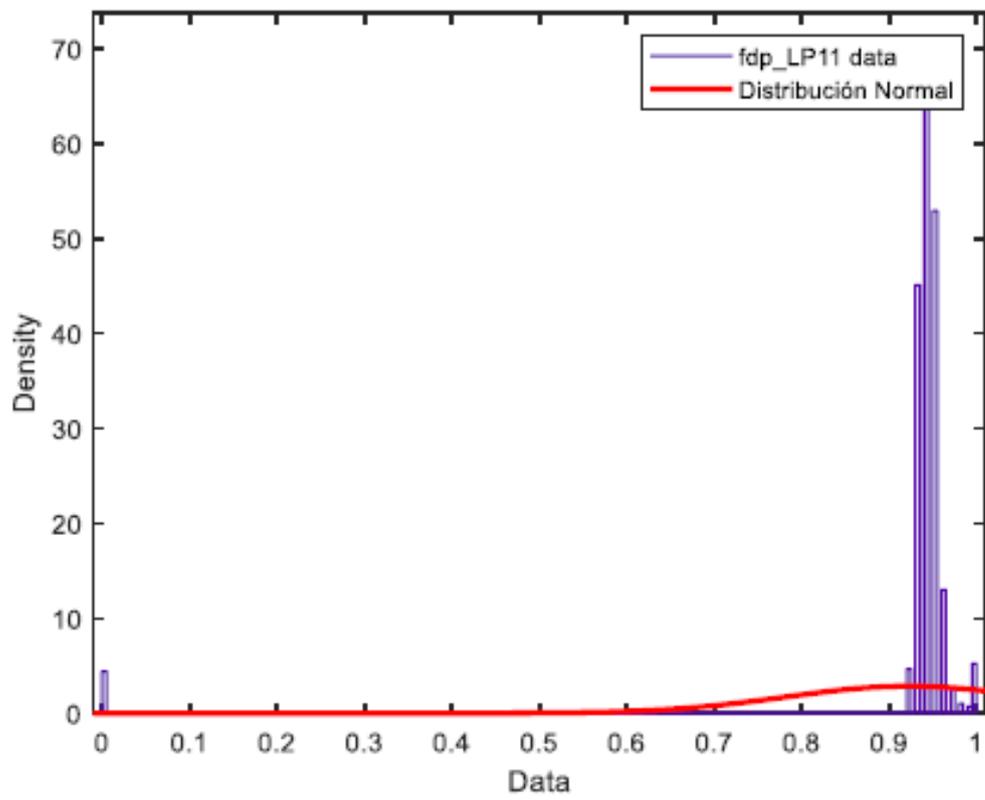
1. **QUEZADA VIÑANZACA, Cristhian Mauricio y TORRES ARIAS, Jaime Alexander.** *Ubicación óptima de compensadores para alimentadores mediante el uso de métodos heurísticos y contrastado con CYMDIST.* 2009.
2. **CANEPA SERRANO, Roberto.** *Compensacion de la energia reactiva para la optimizacion del alimentador de media tension Coishco Industrial de la unidad de negocios Hidrandina Sur S. A. .* 2012.
3. **UGARTE MARTÍNEZ, Rubén Juan.** *Ubicación optima de bancos de condensadores para mejorar la eficiencia de energía en sistema de bombeo de la mina Animon.* 2018.
4. **CALDERÓN, José y MEDINA, Edwin.** *Metodología de estudio del diagrama de carga para el mejoramiento del factor de potencia de la planta frigorífica de la corporación Hayduk S. A.* 2015.
5. **BORJA SUÁREZ, Manuel.** *Metodologia de la investigacion para Ingeniería.* 2016.
6. **HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, Pilar.** *Metodología dela investigación.* 1997. ISBN 9684229313.

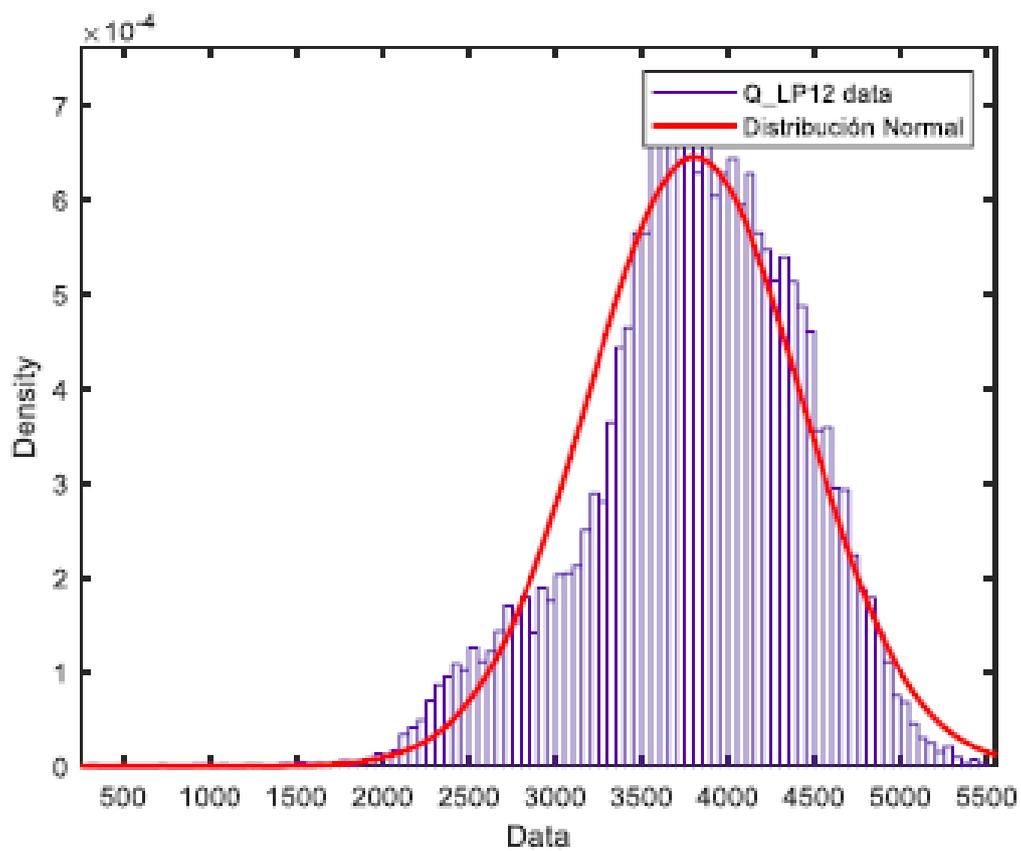
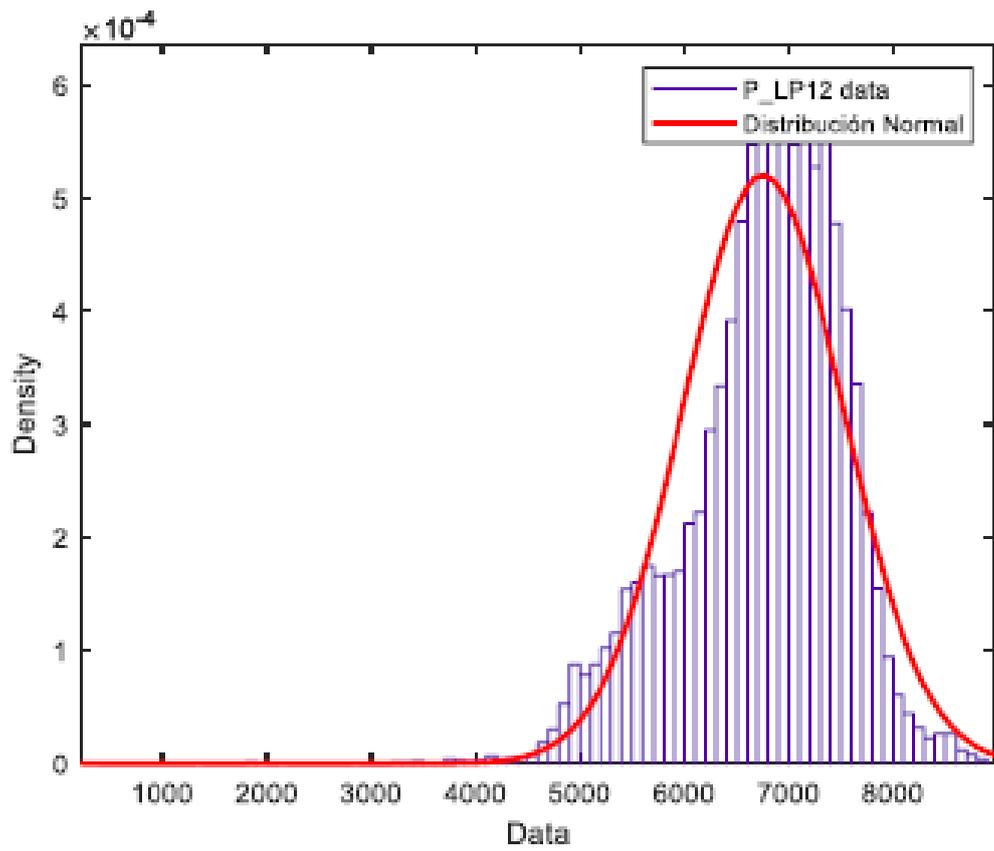
ANEXOS

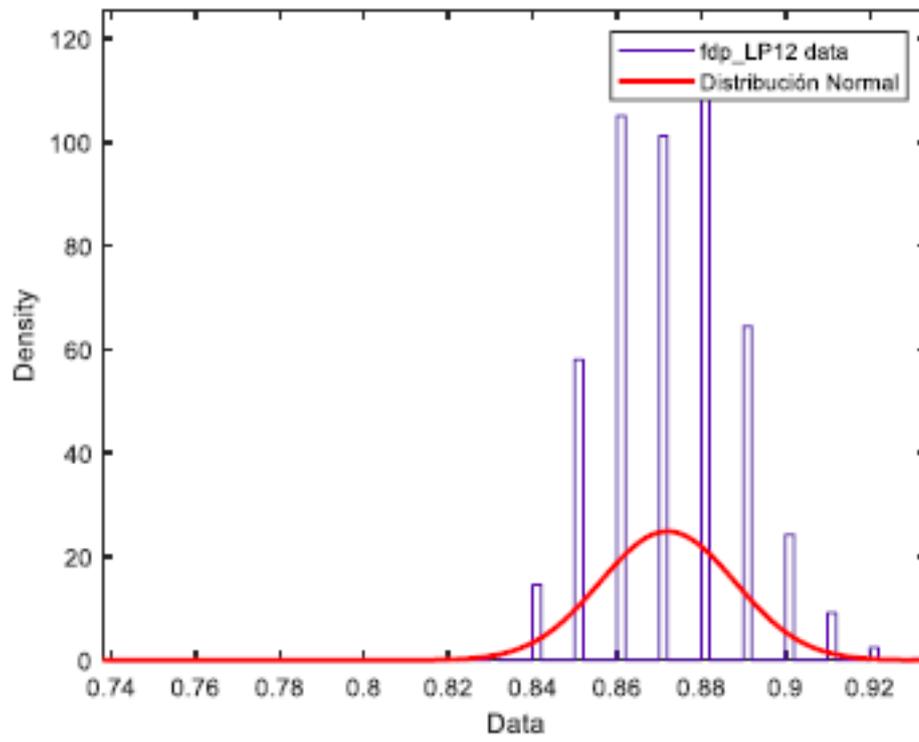
Anexo 1

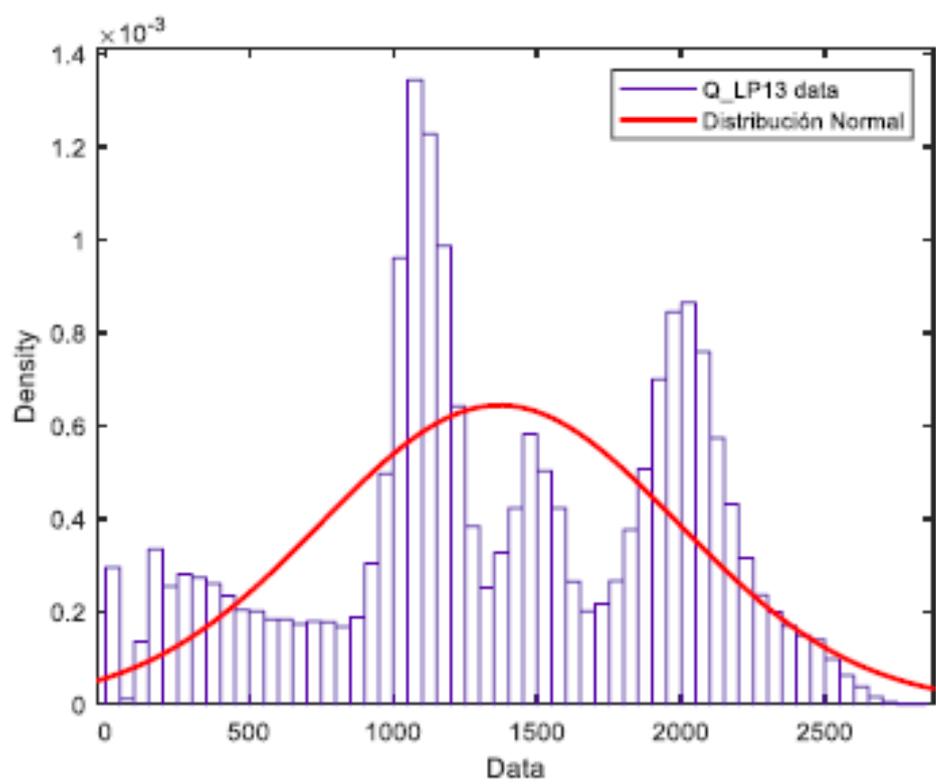
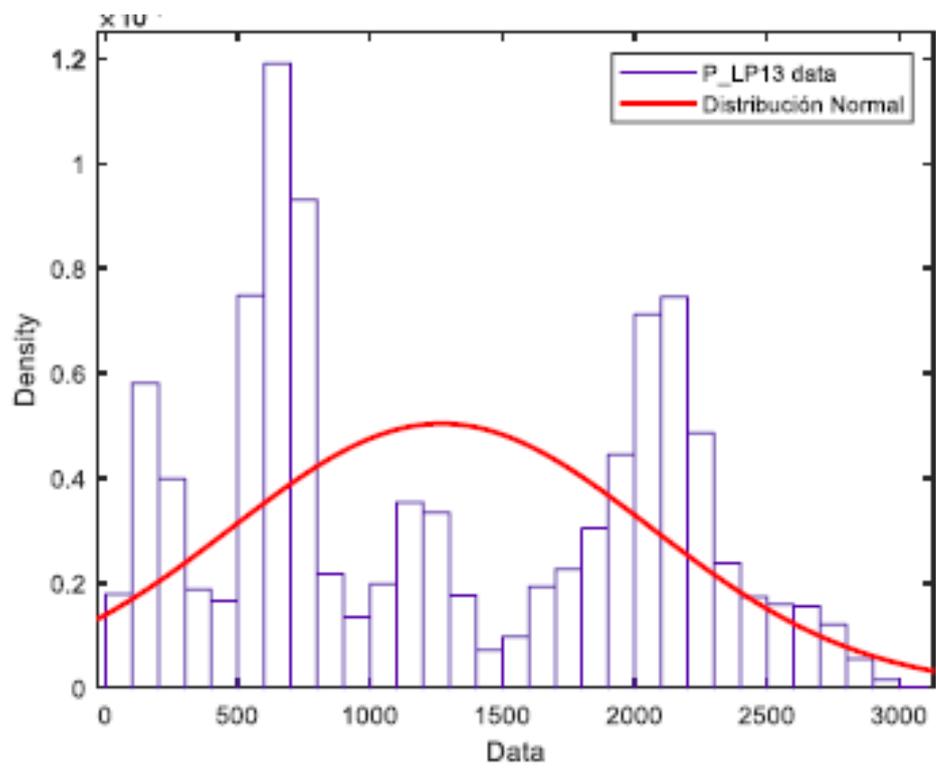
Procesamiento estadístico de la oferta y demanda del sistema eléctrico Chungar

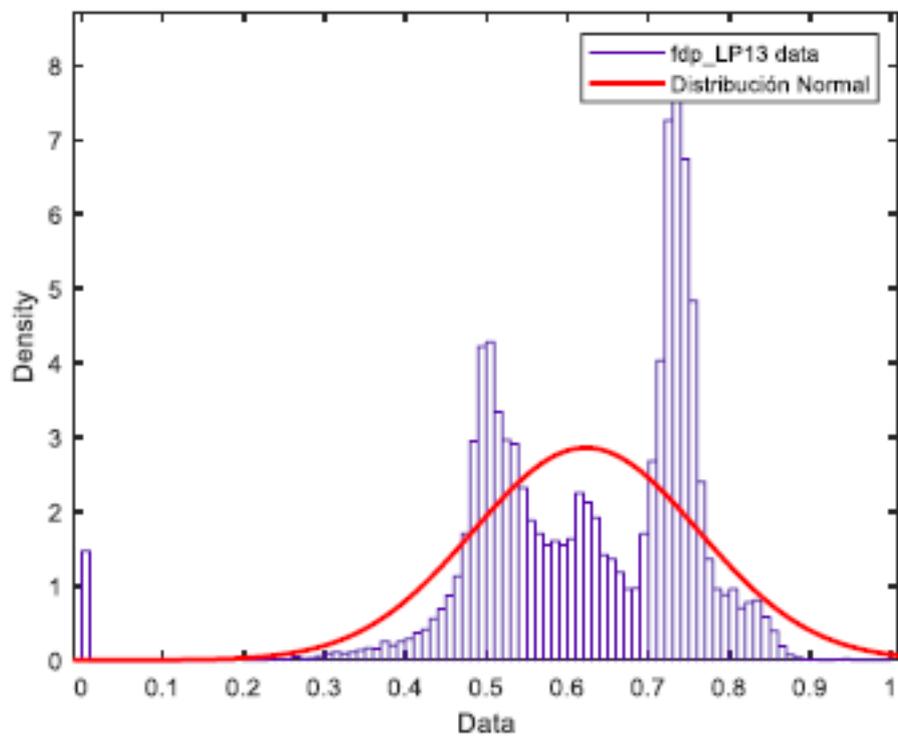


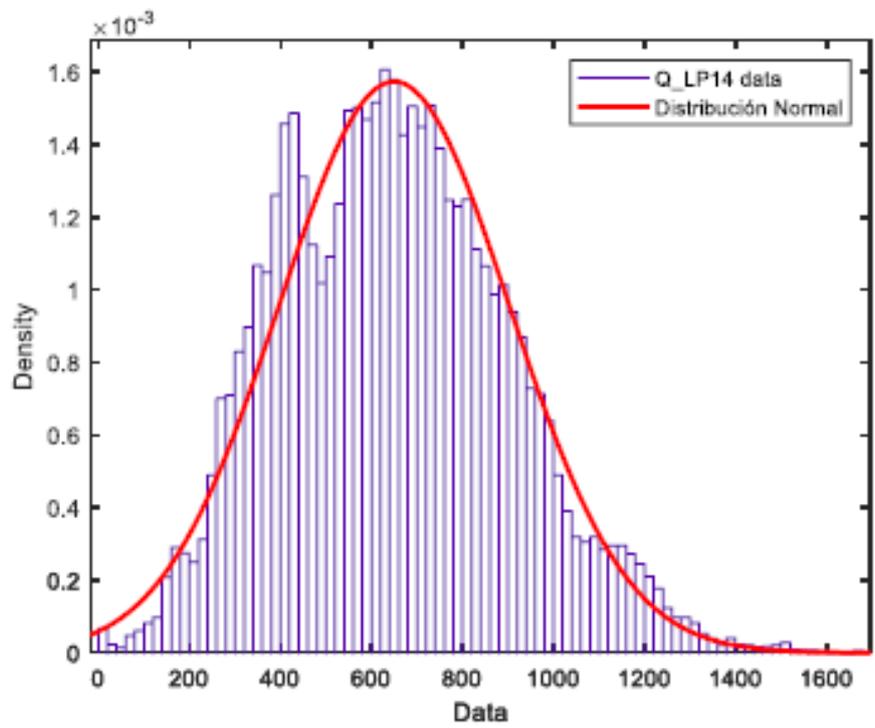
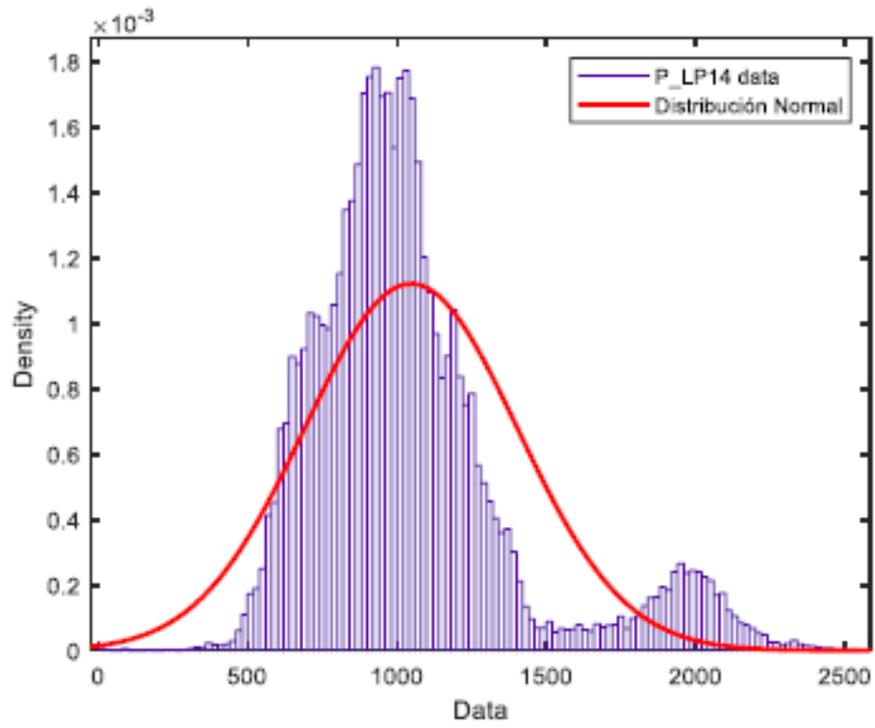


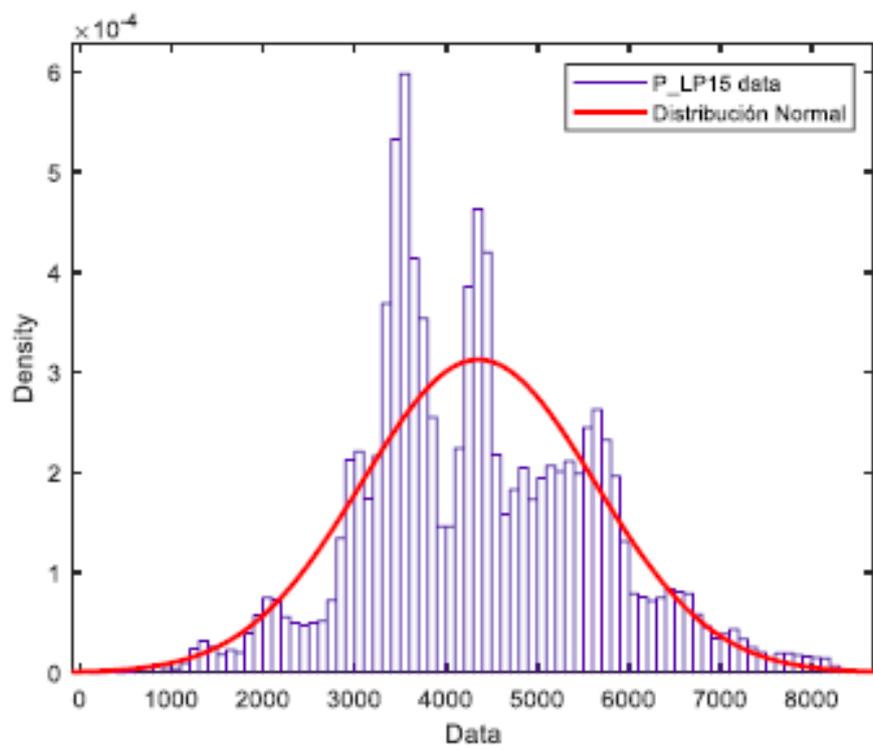
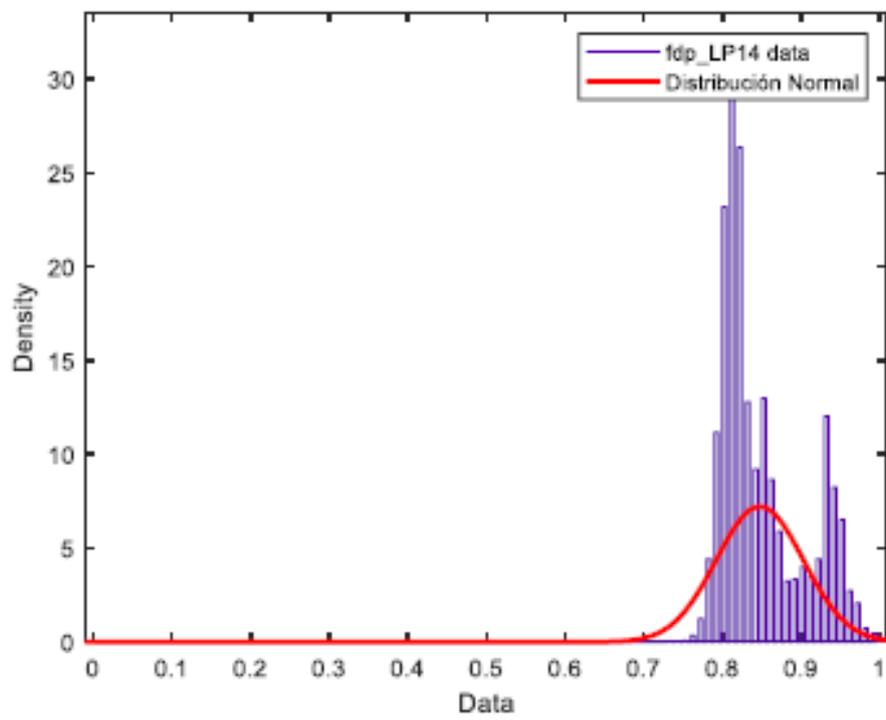


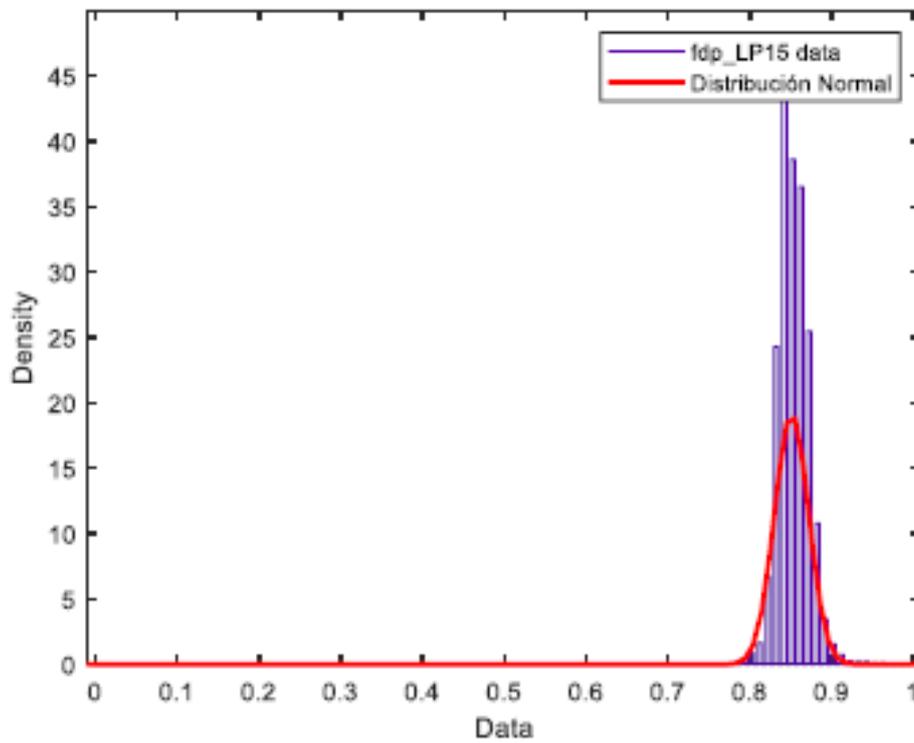
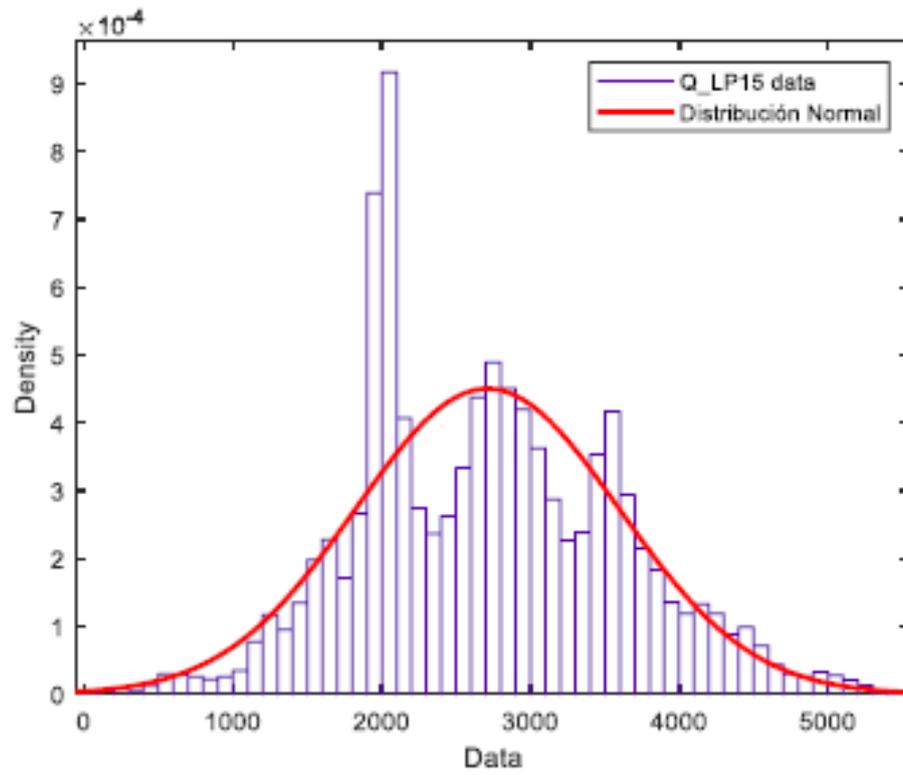


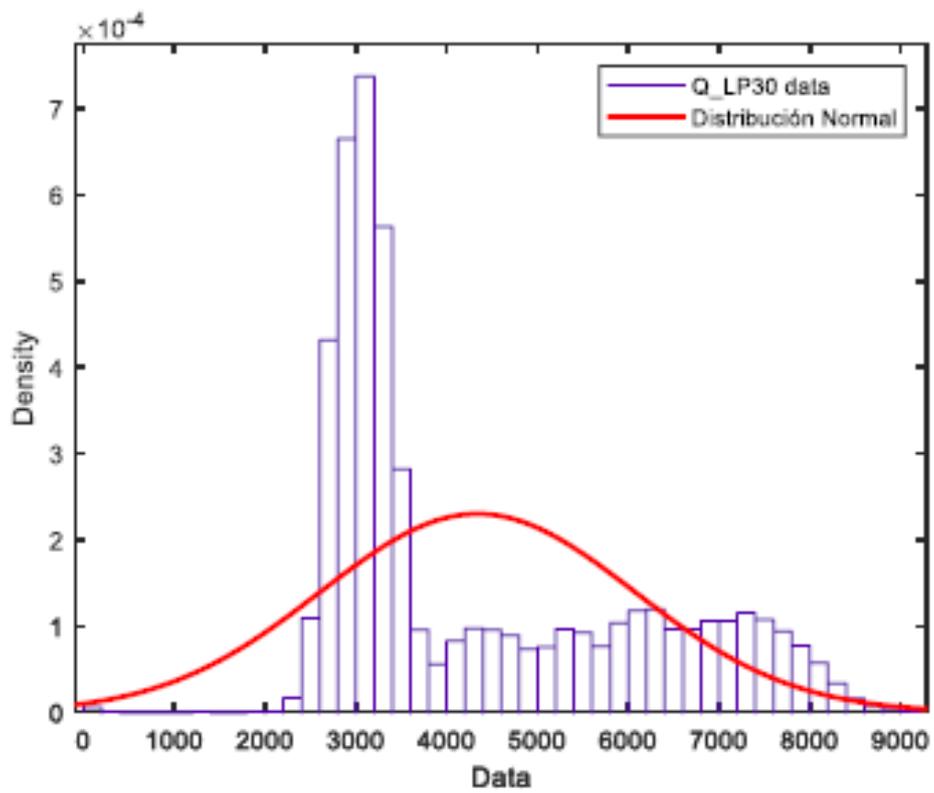
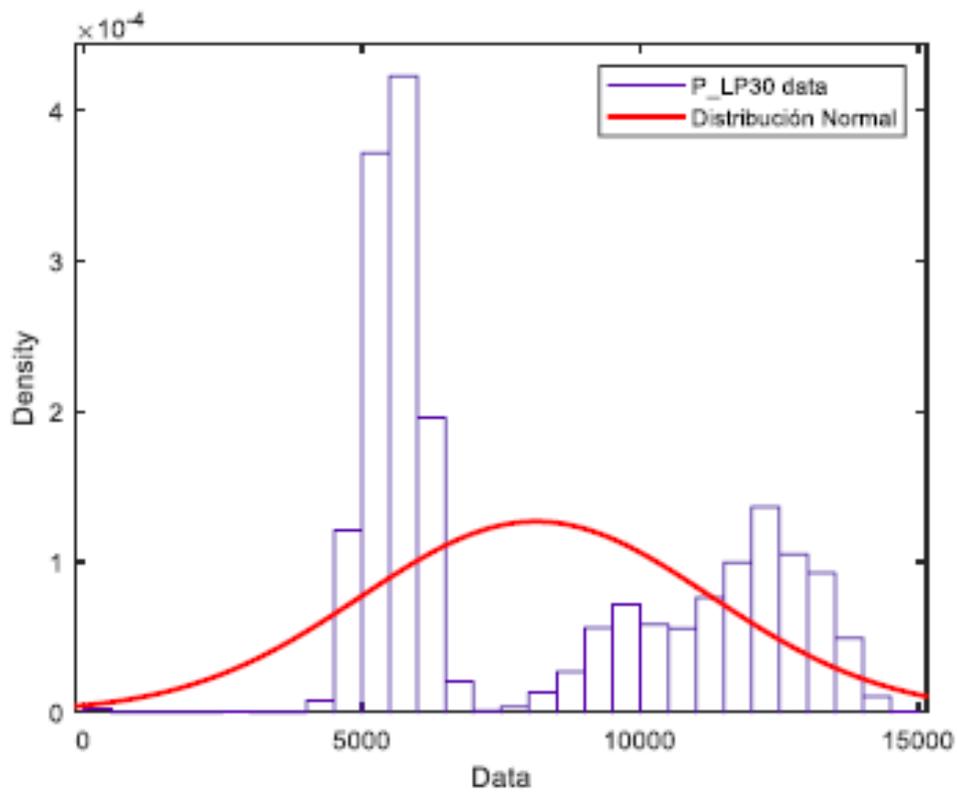


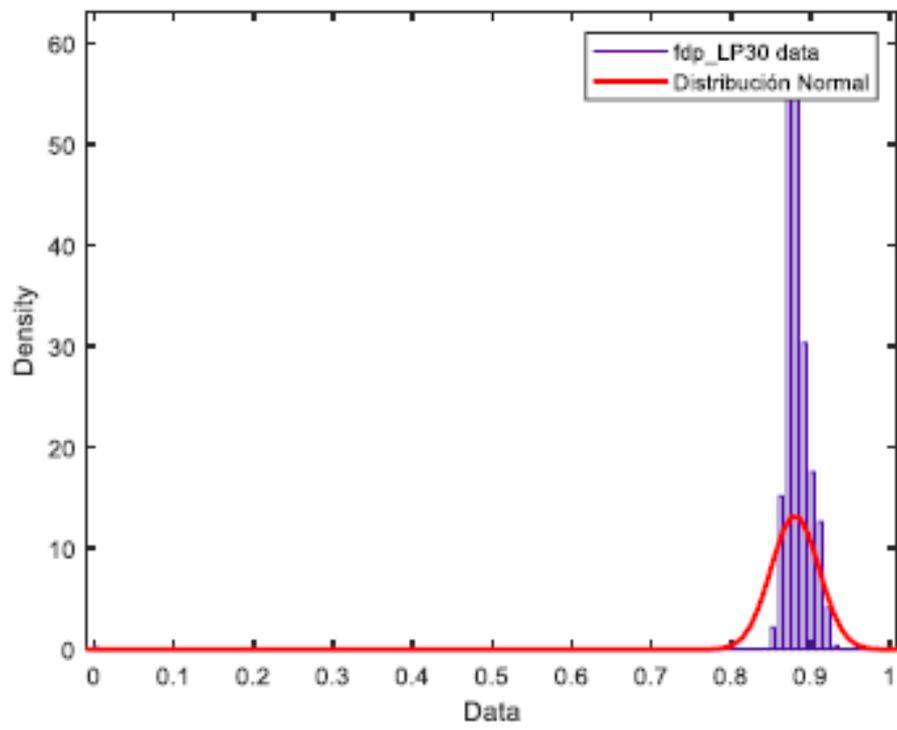












Anexo 2

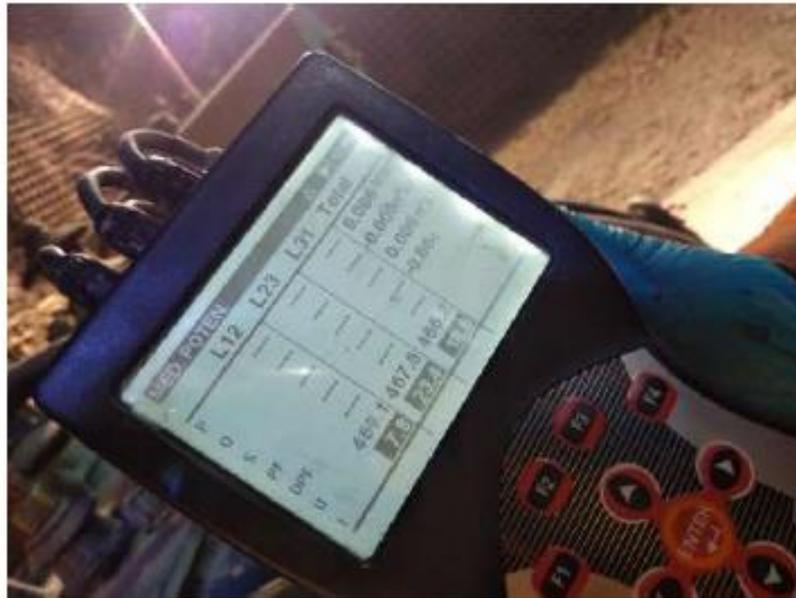
Registro fotográfico para determinación de variables eléctricas en subestaciones adicionales

MINA CHUNGAR

SE 12 / T-66



SE 13 / T-029

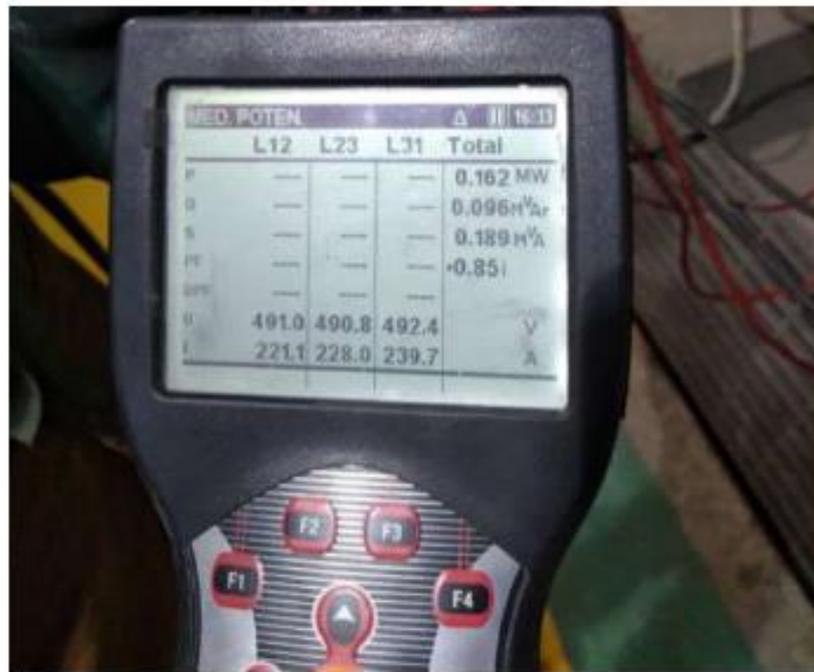


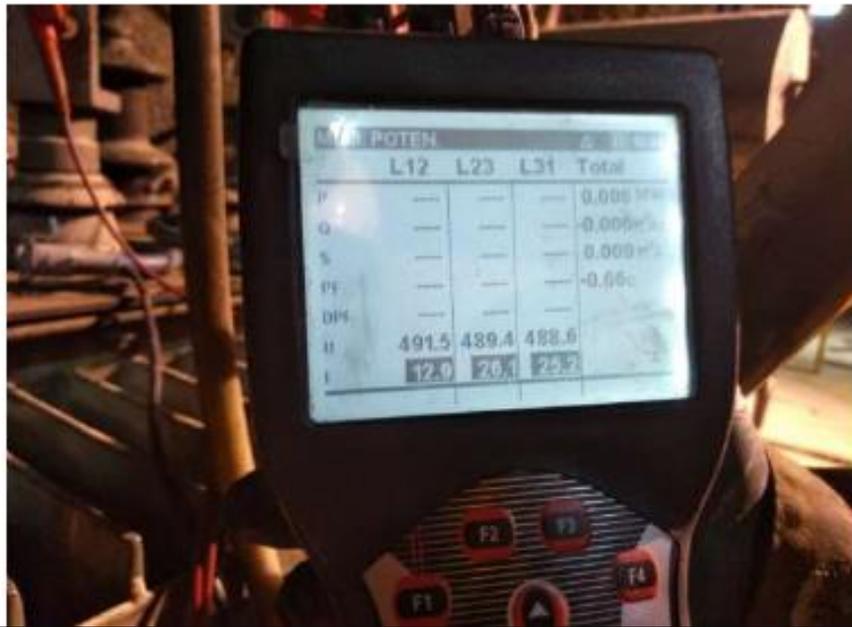
SE 15 / T-039





SE 16 / T-092



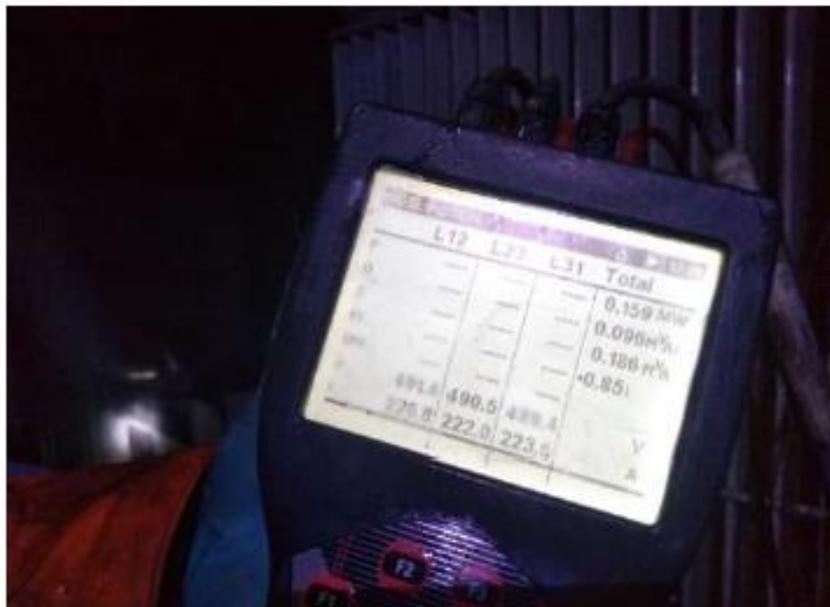


SE 26

T-116



T-0172



SE 29 / T-45



T-114 (INOOPERATIVO)



SE 31 / T-089



T-129



SE 34
T-031



T-037



SE 35
TRA-051-CH



TRA-161-CH



TRA-128-CH



SE 40 / T-01



SE 41

T-099

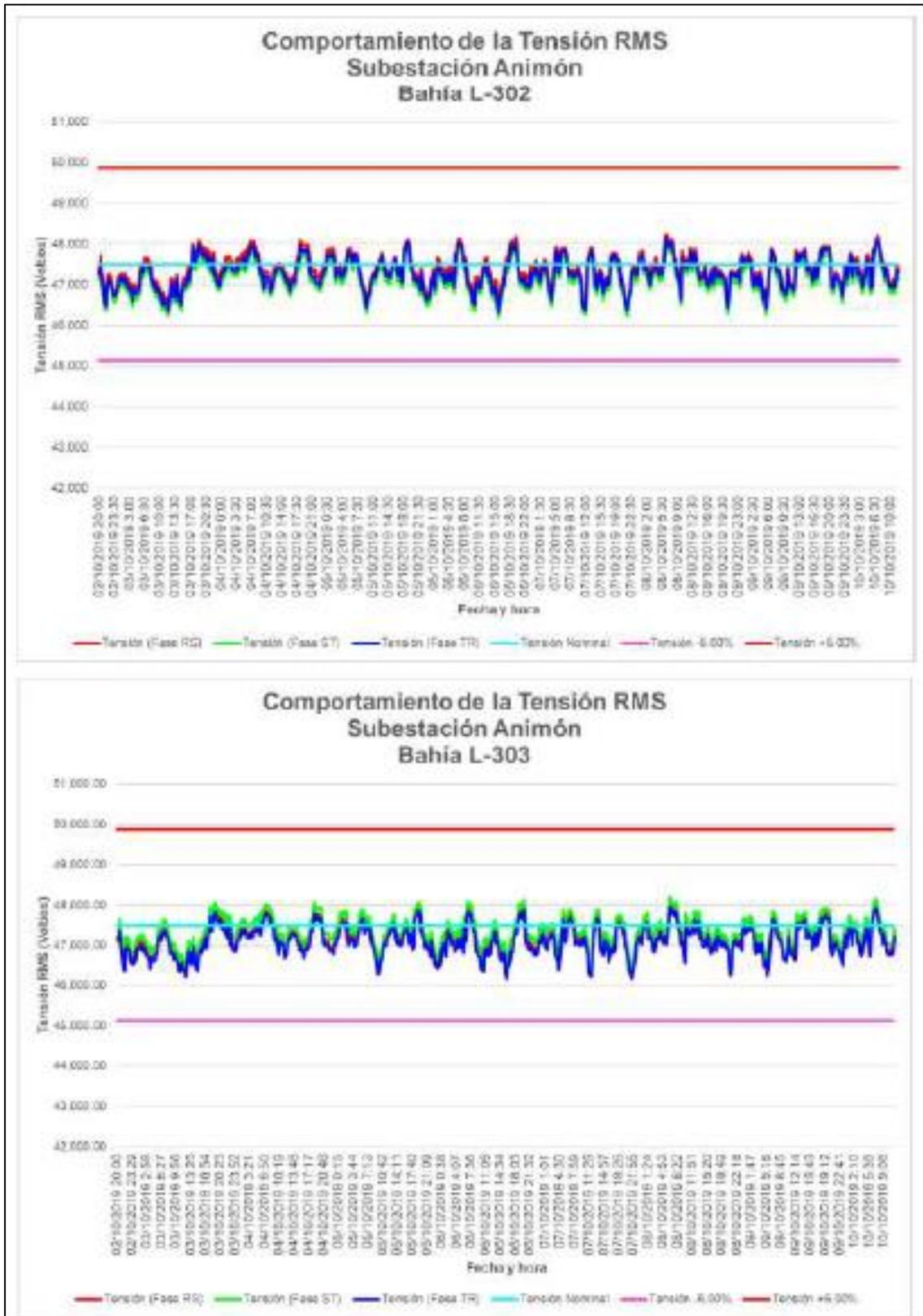


T-NUE



Anexo 3

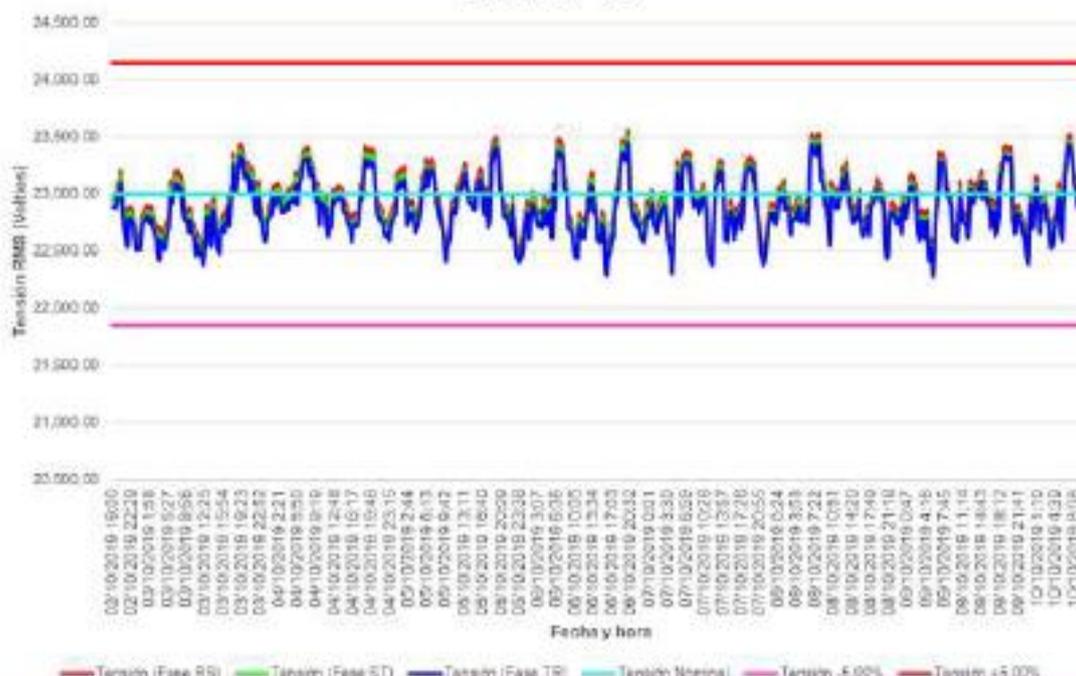
Comportamiento de la tensión para puntos de medición de la subestación Animón



Comportamiento de la Tensión RMS Subestación Animón Bahía L-6542



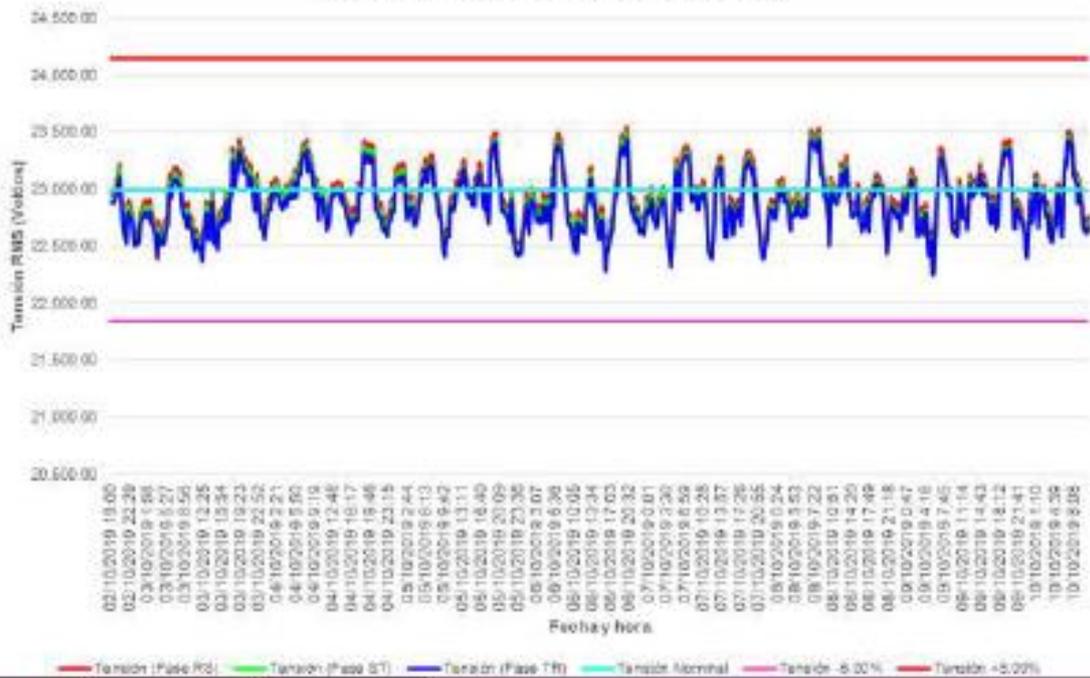
Comportamiento de la Tensión RMS Subestación Animón Bahía LP-13



Comportamiento de la Tensión RMS Subestación Animón Transformador TR-03(Lado 50kV)

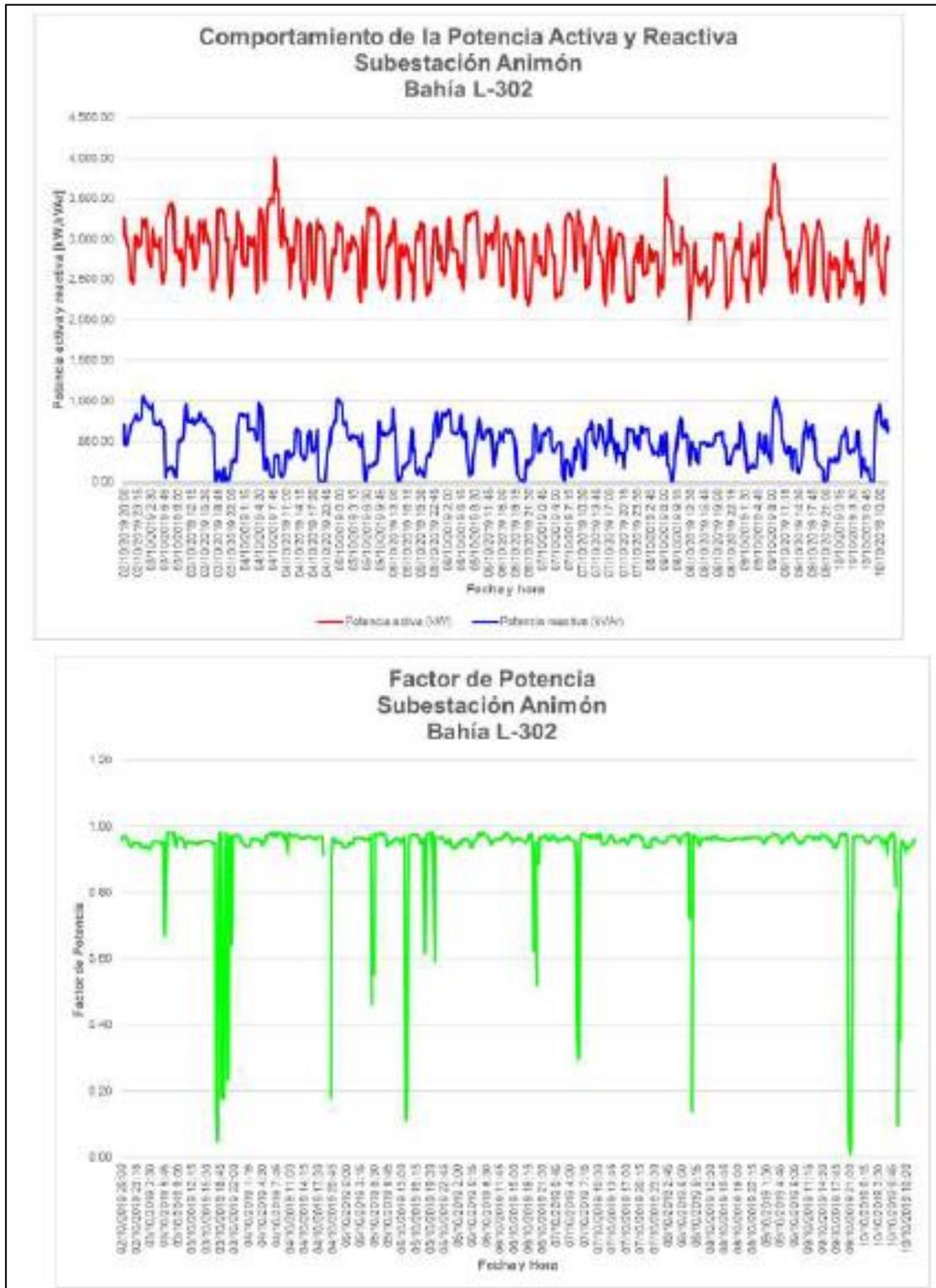


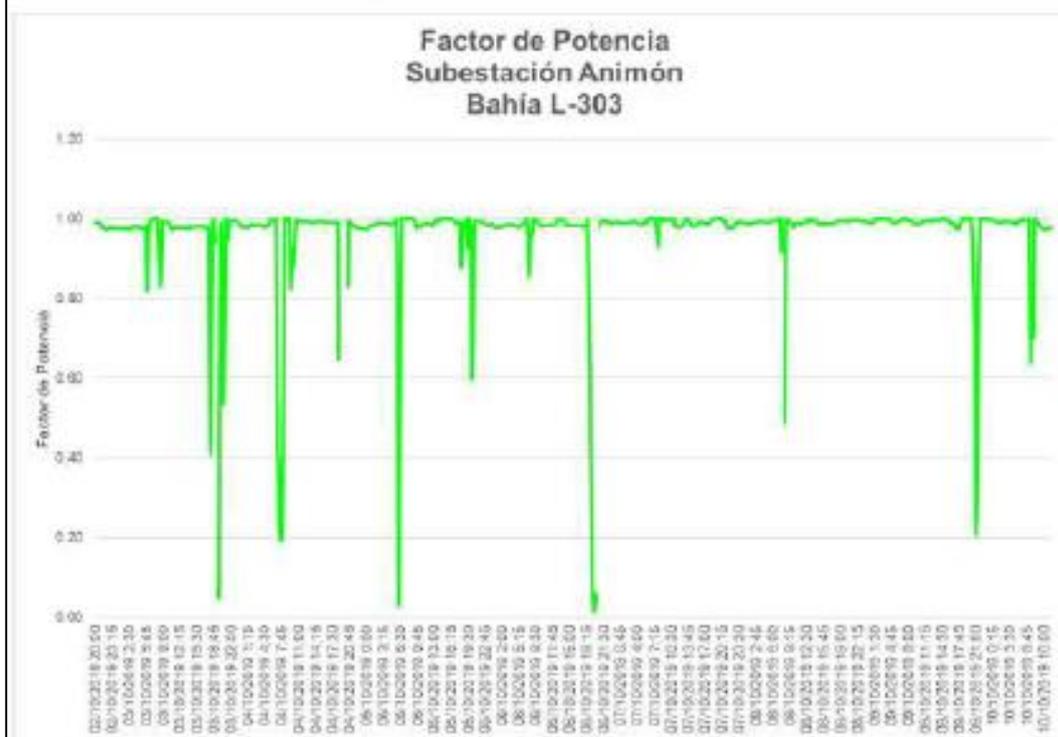
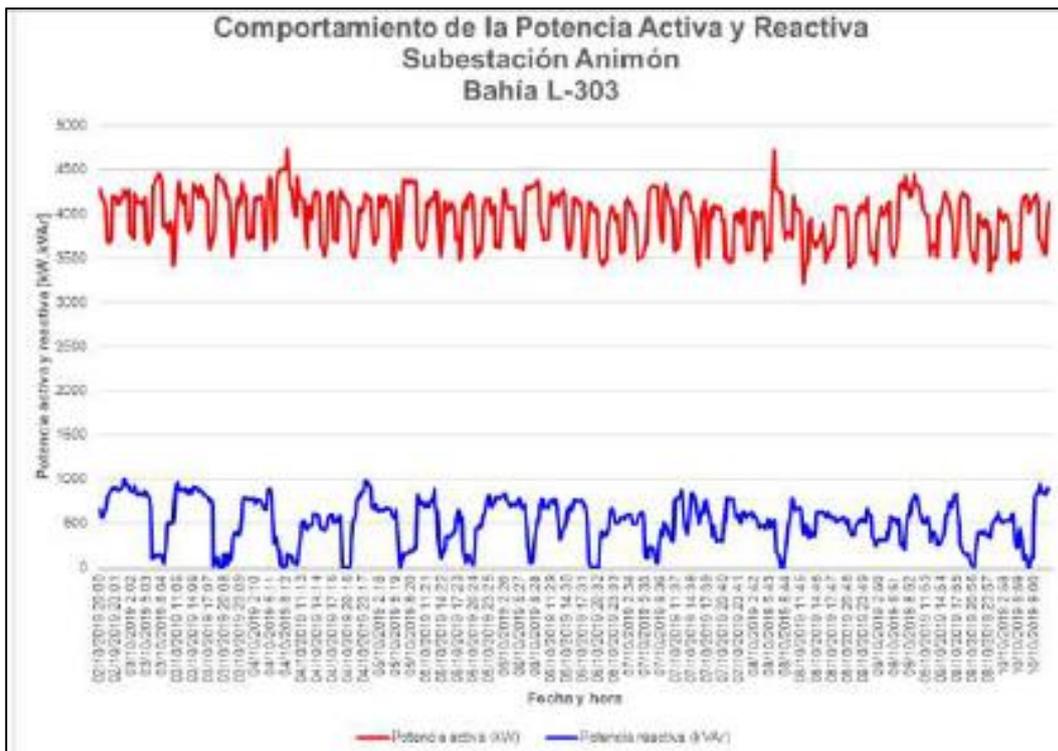
Comportamiento de la Tensión RMS Subestación Animón Transformador TR-03(Lado 23kV)

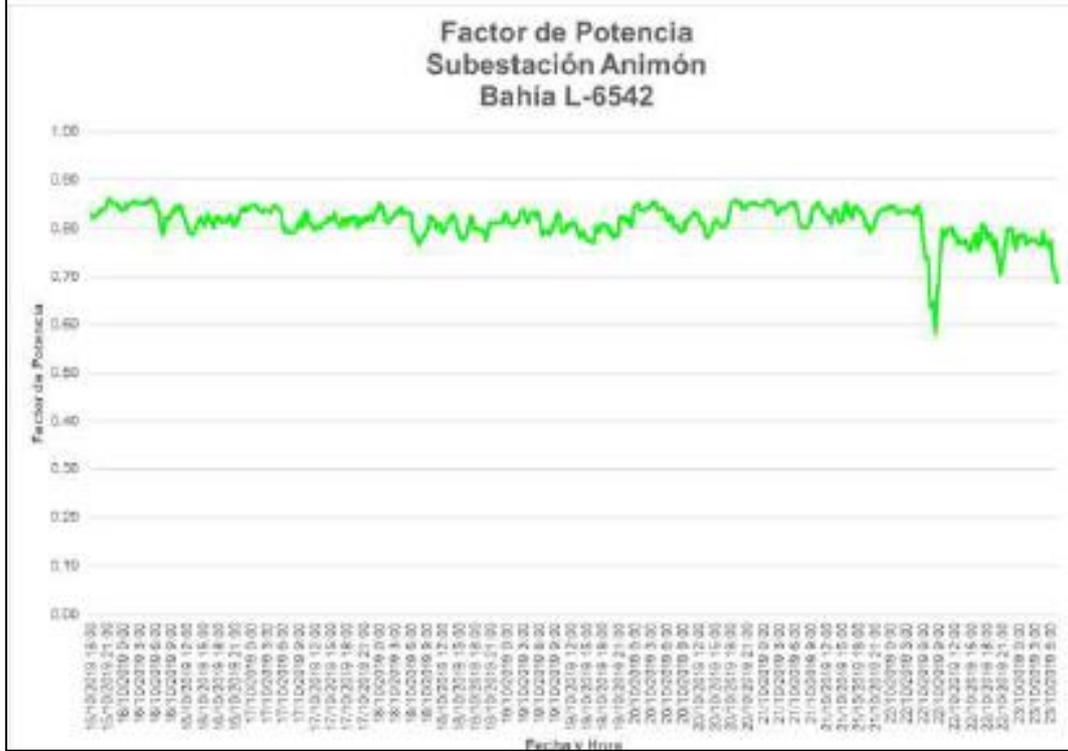
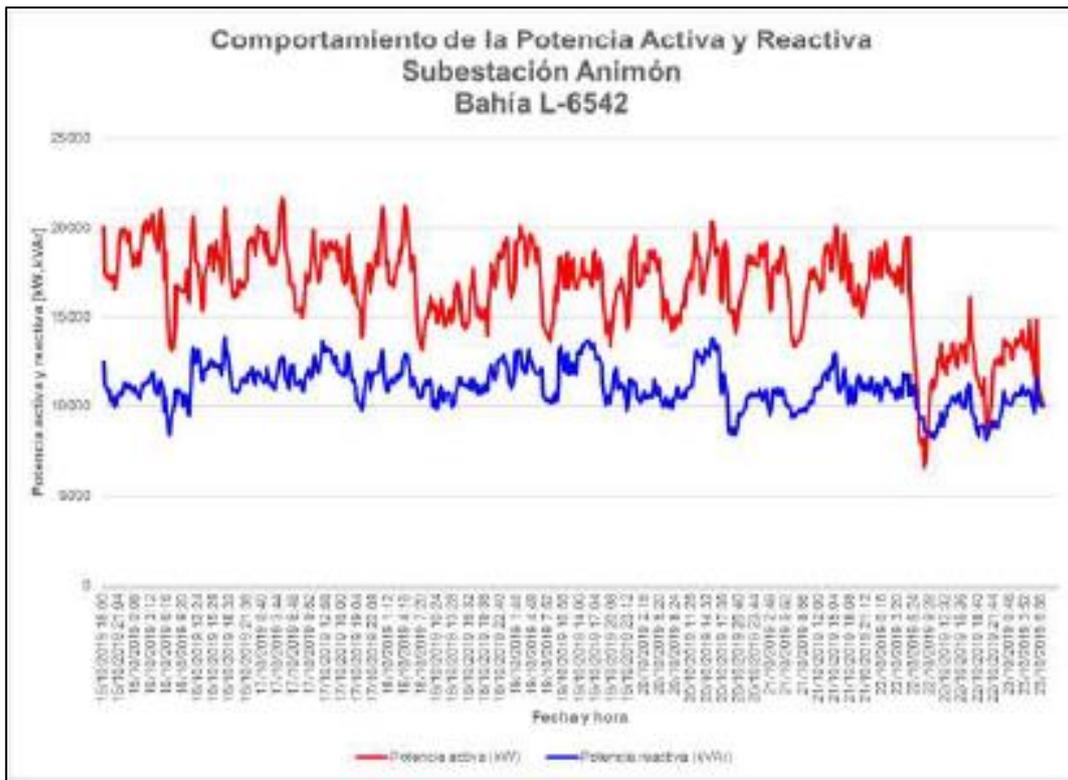


Anexo 4

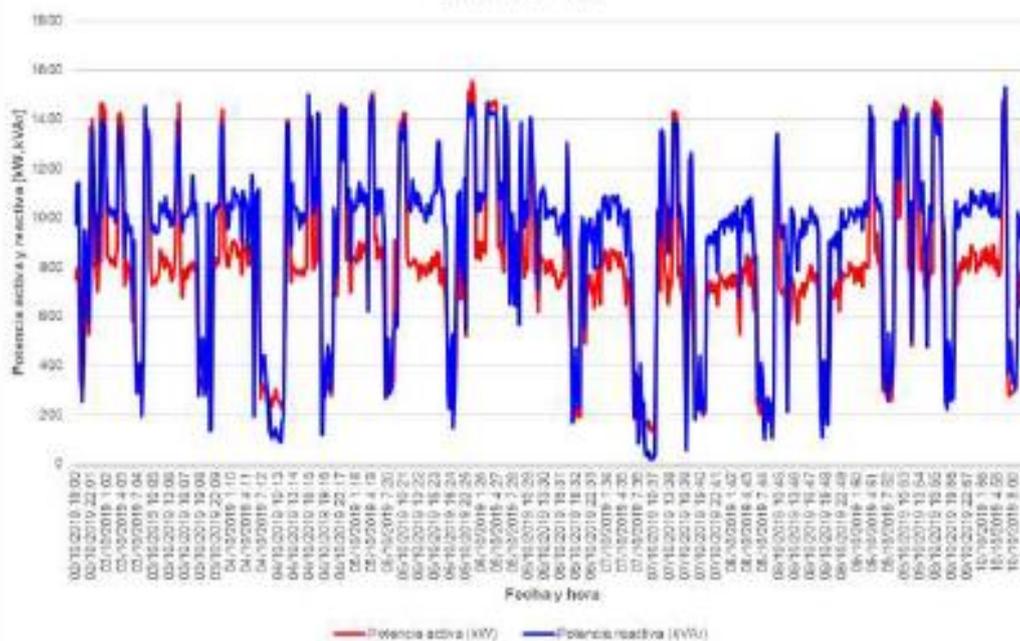
Comportamiento de la potencia activa, reactiva y factor de potencia de los puntos eléctricos de la subestación Animón





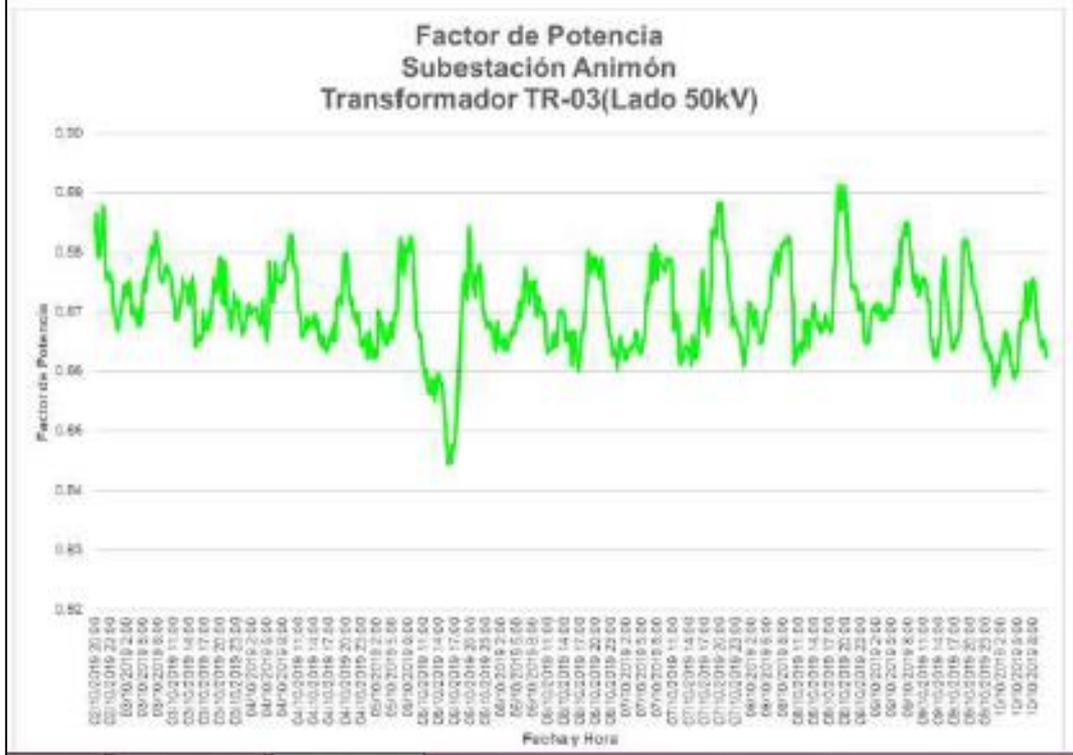
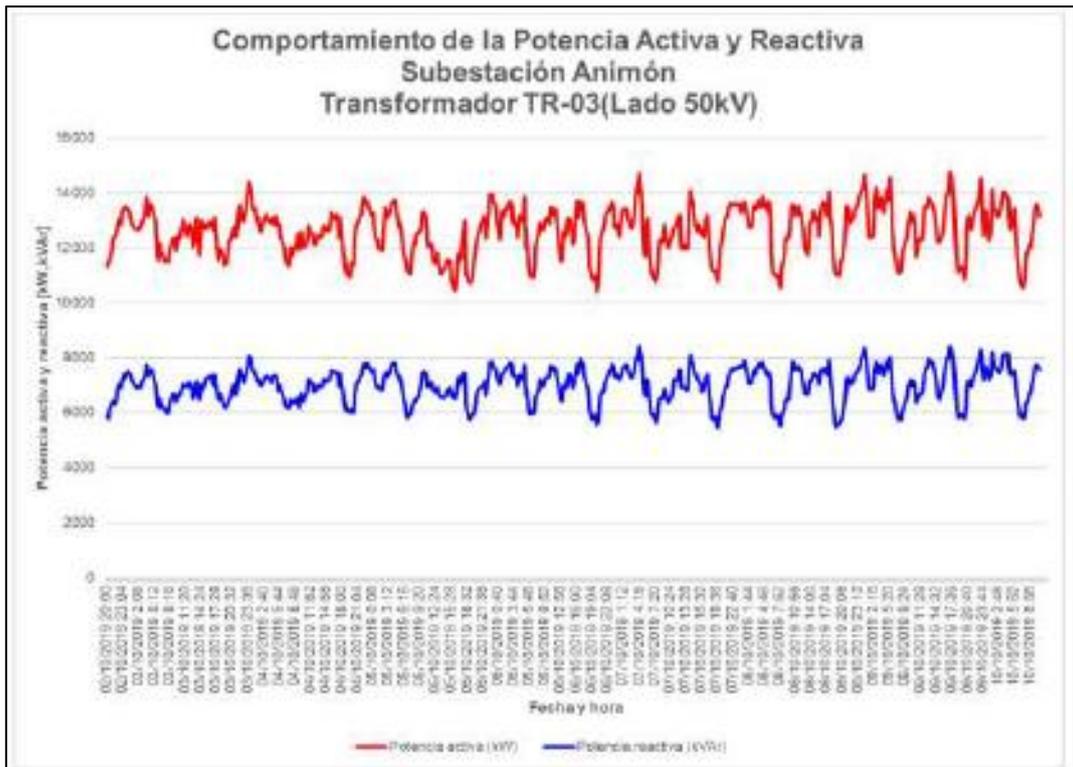


Comportamiento de la Potencia Activa y Reactiva Subestación Animón Bahía LP-13

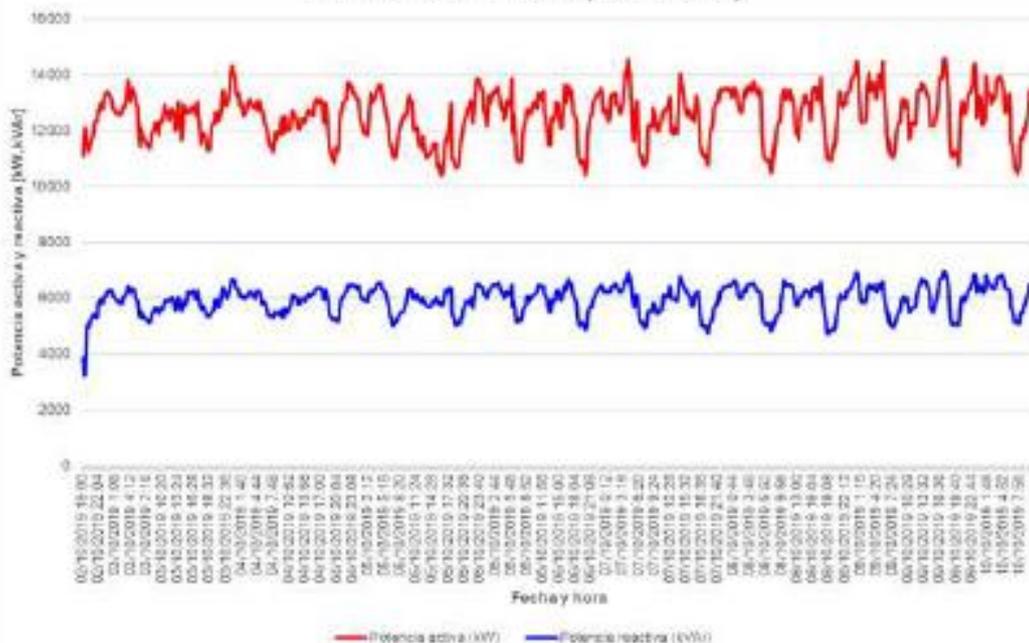


Factor de Potencia Subestación Animón Bahía LP-13





Comportamiento de la Potencia Activa y Reactiva Subestación Animón Transformador TR-03(Lado 23kV)

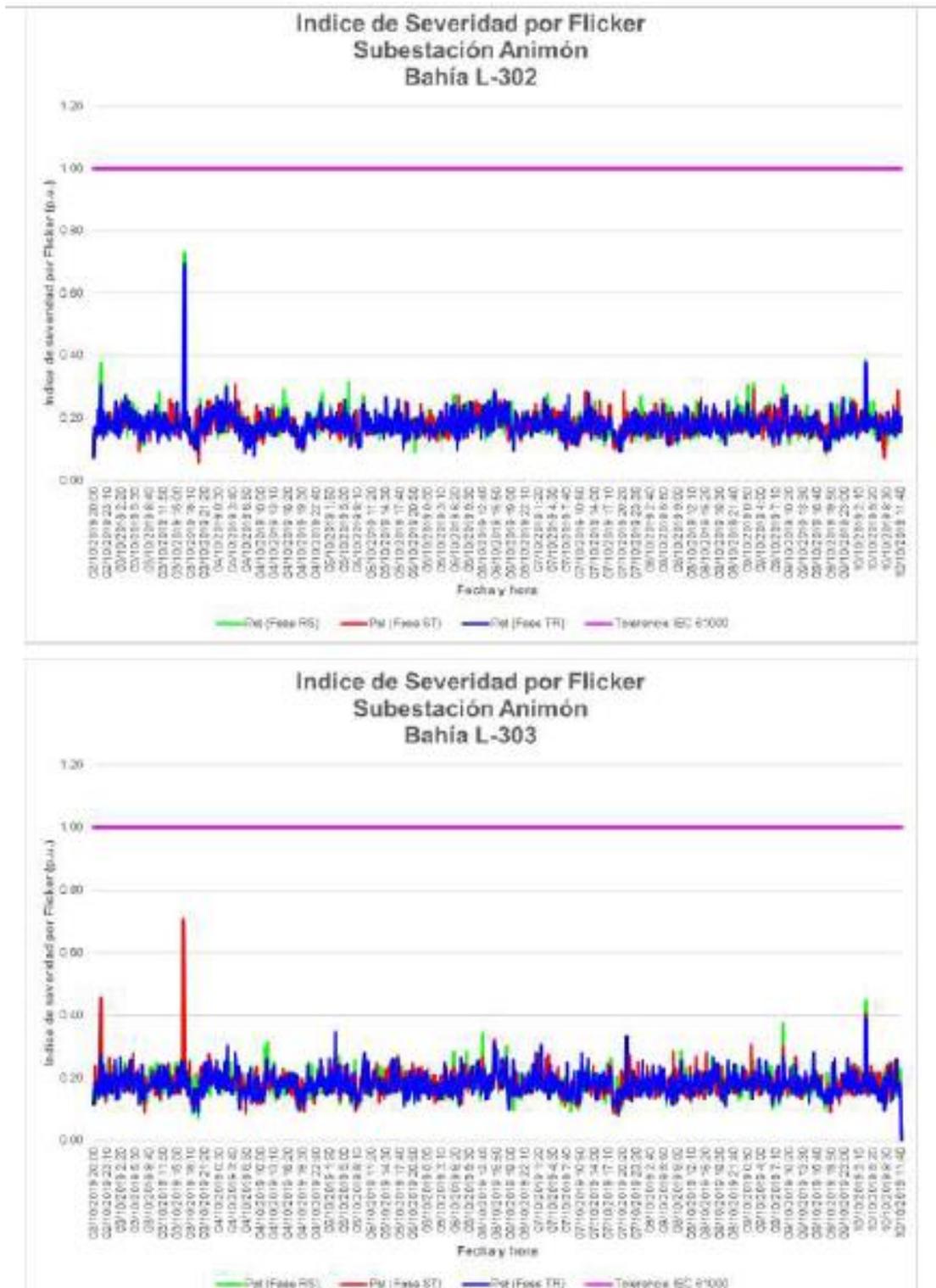


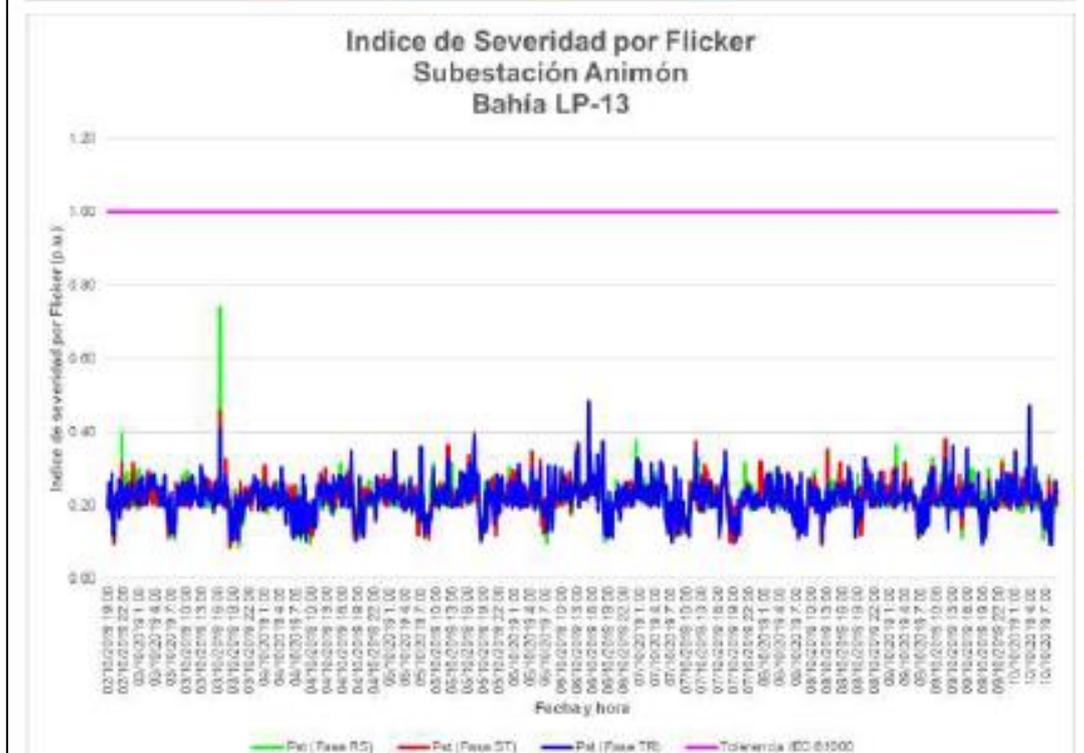
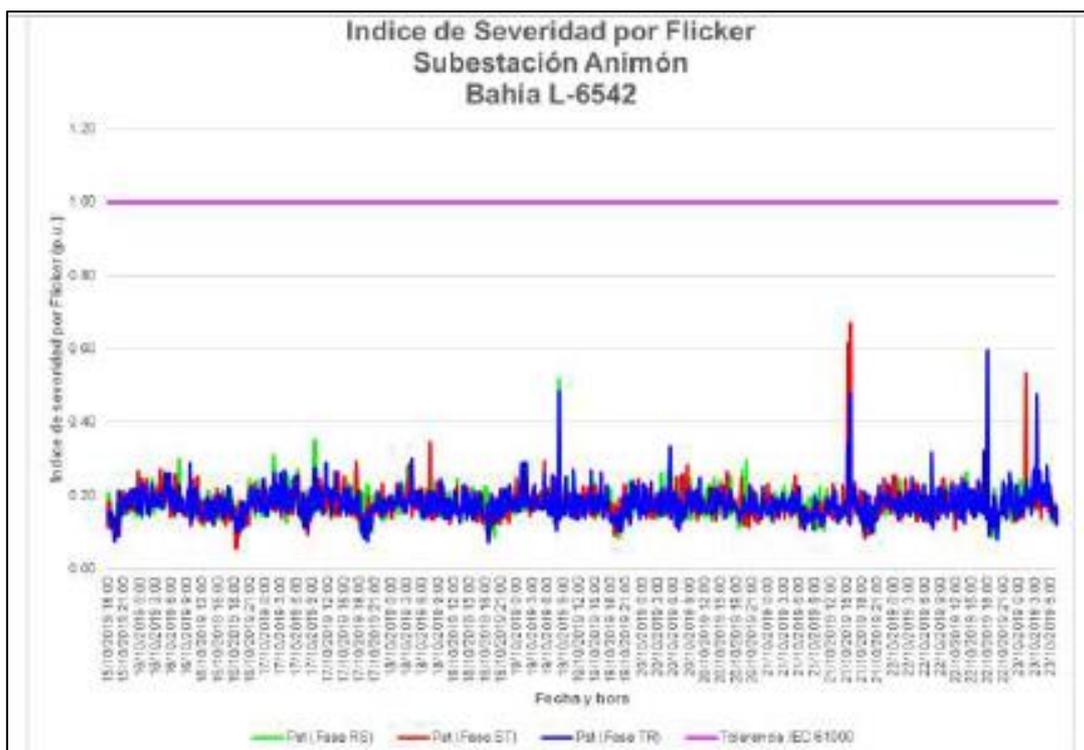
Factor de Potencia Subestación Animón Transformador TR-03(Lado 23kV)

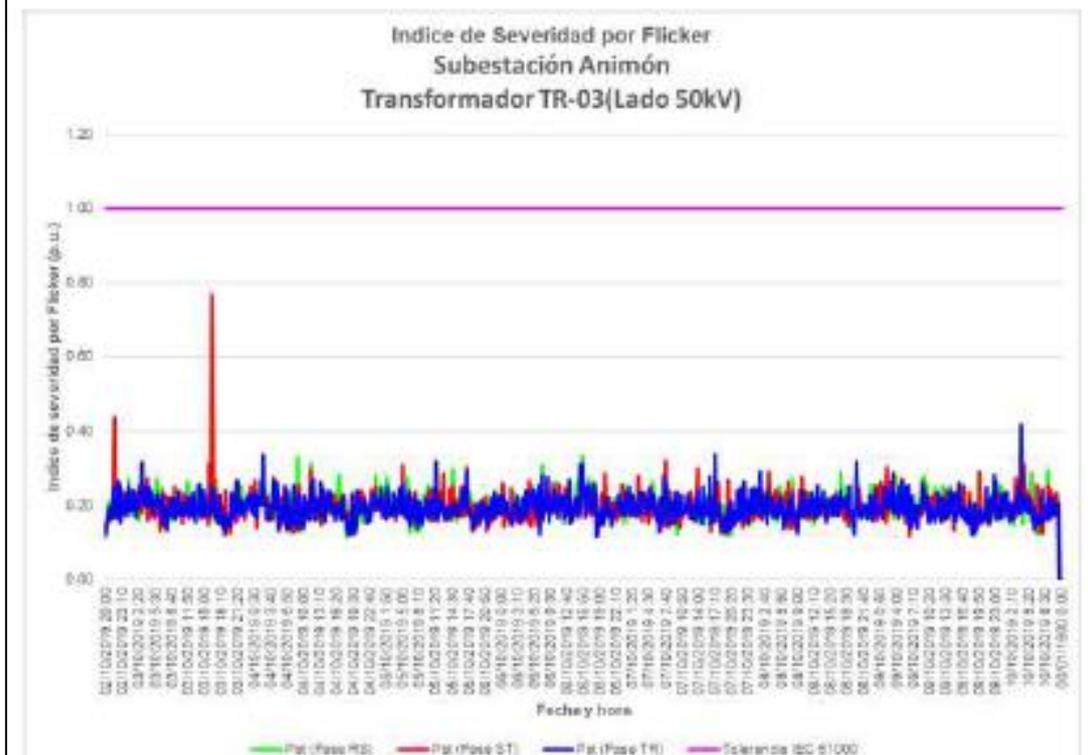
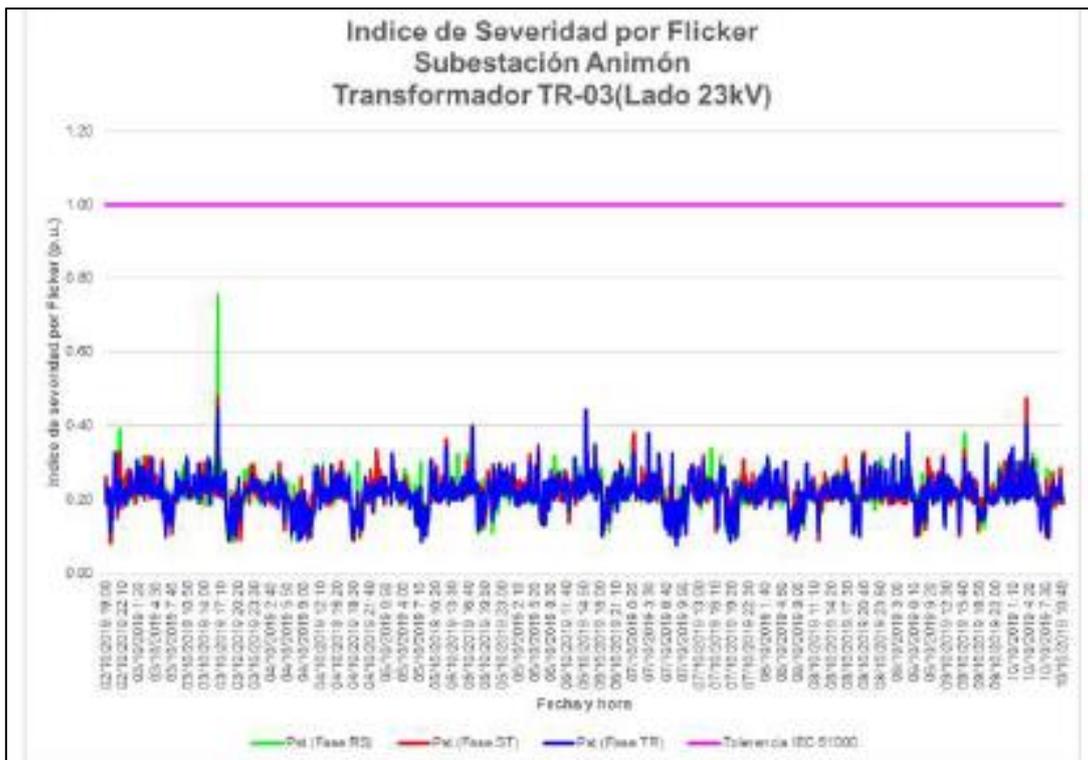


Anexo 5

Índice de severidad por flicker de los puntos eléctricos de la subestación Animón

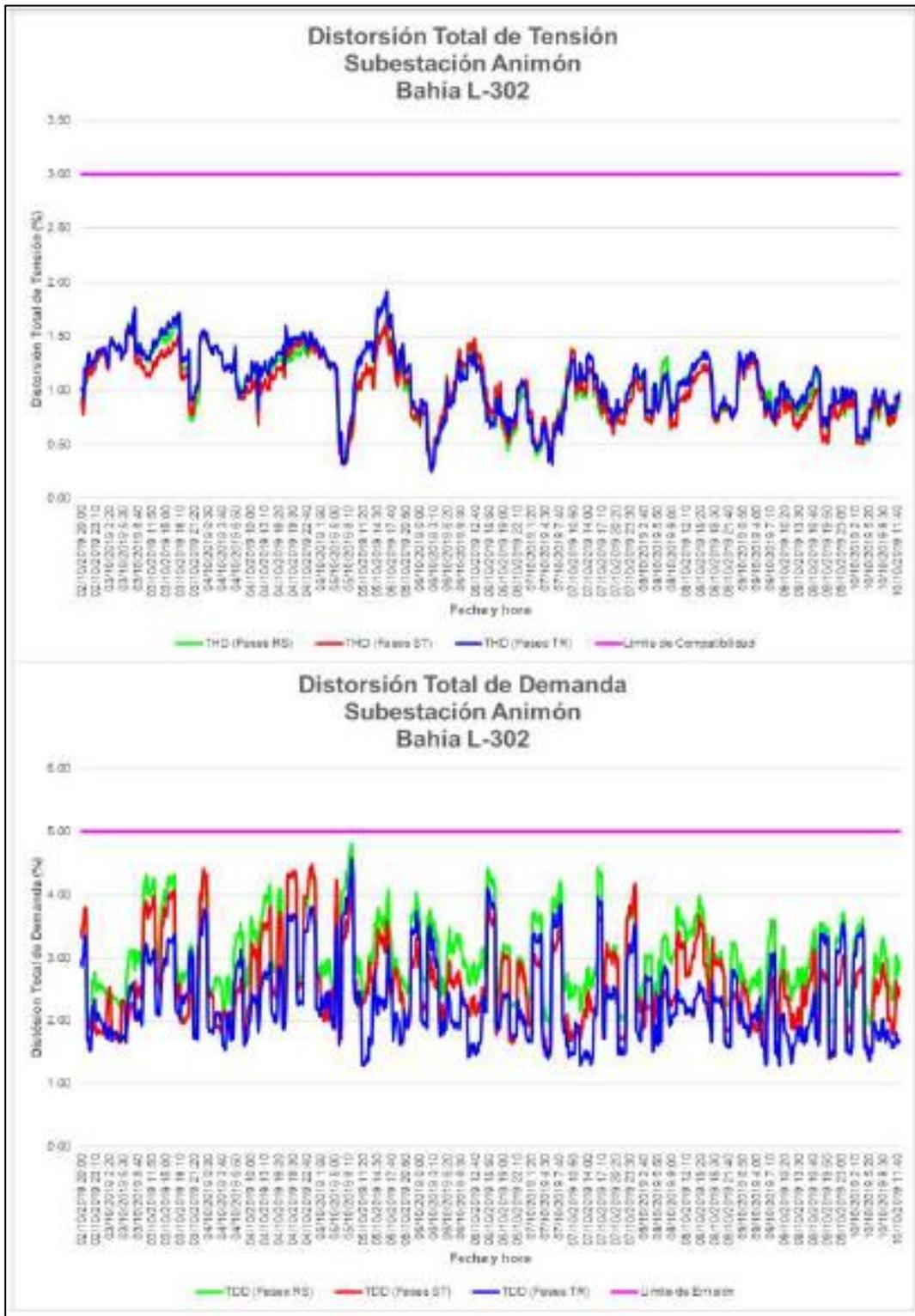


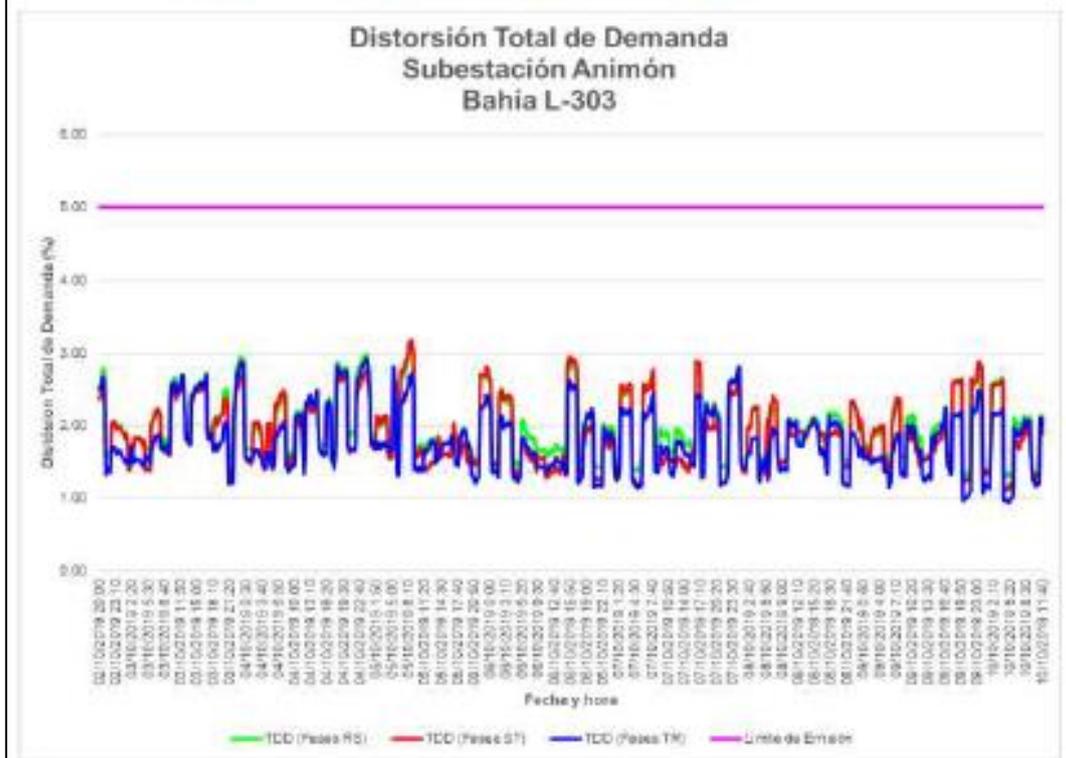
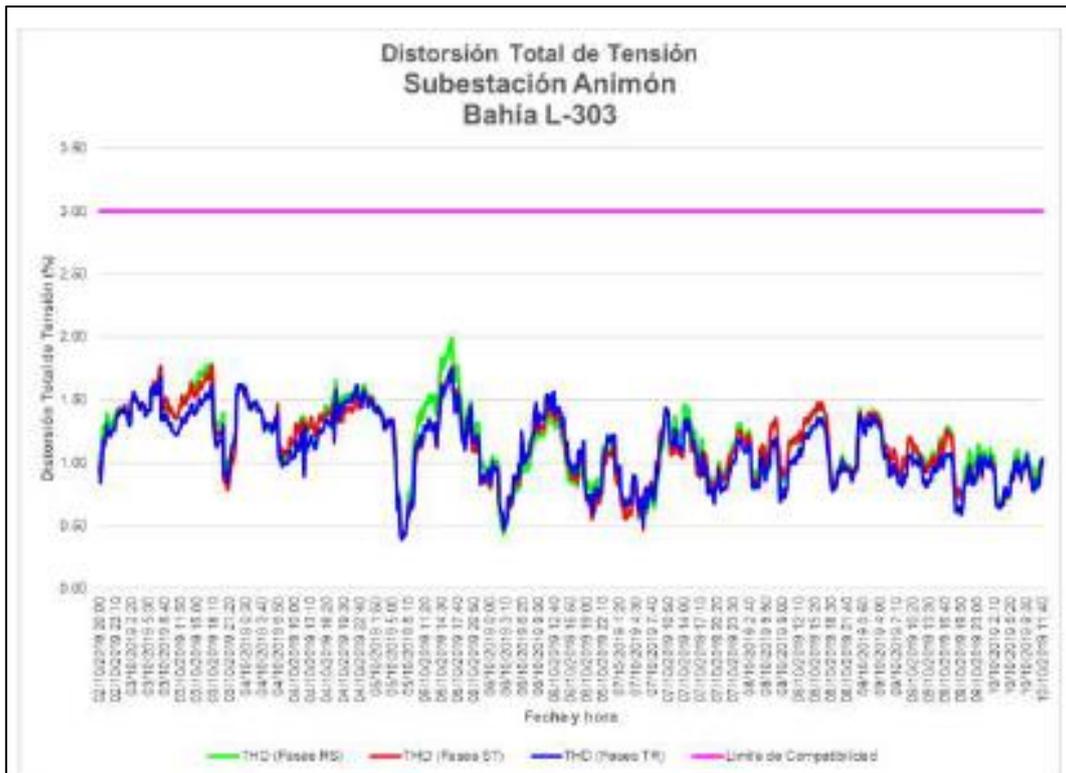




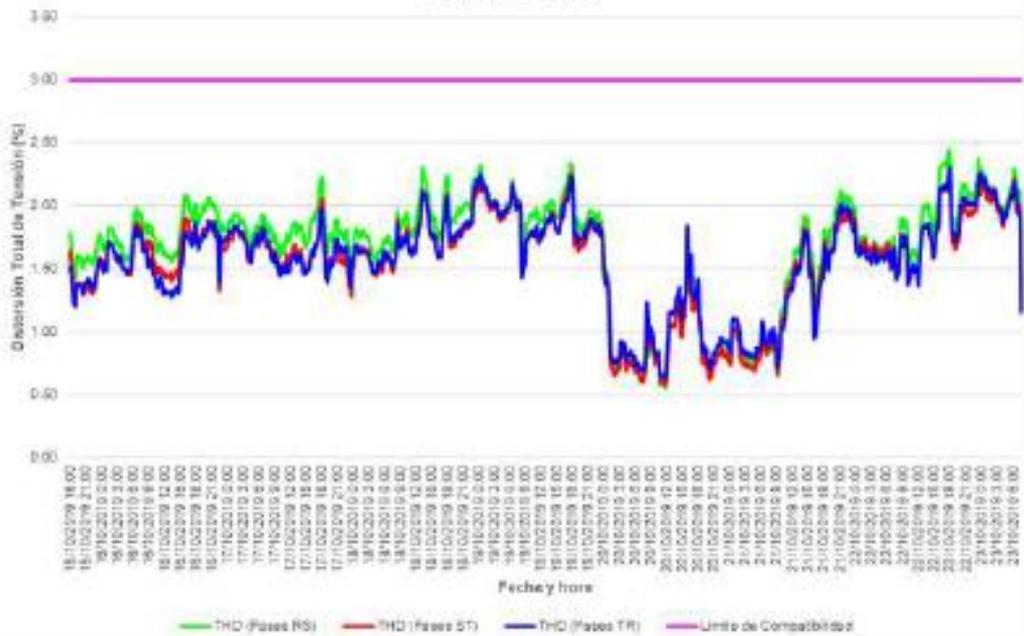
Anexo 6

Distorsión armónica en la subestación Animón



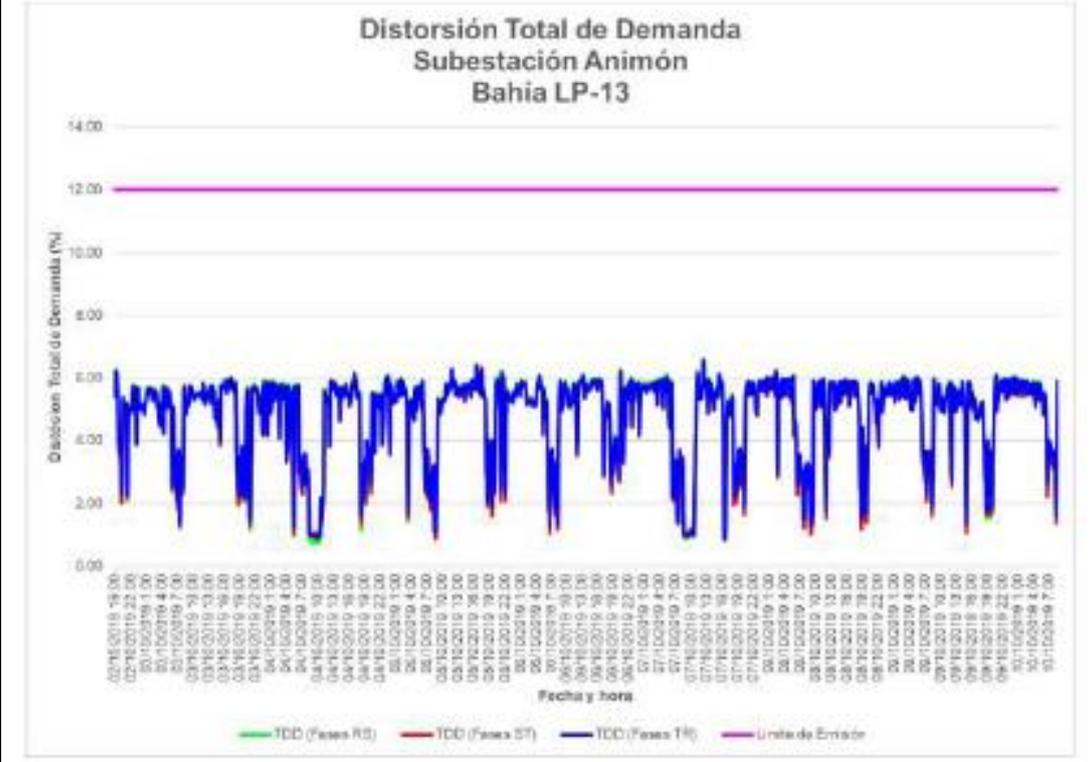
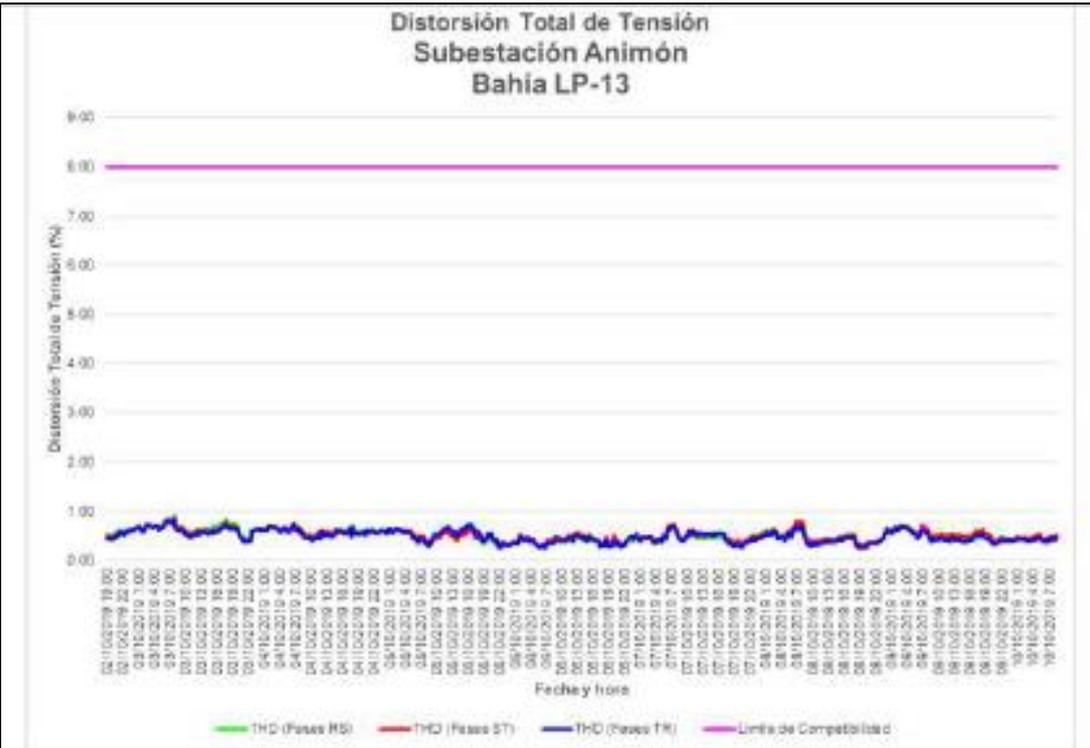


Distorsión Total de Tensión Subestación Animón Bahía L-6542



Distorsión Total de Demanda Subestación Animón Bahía L-6542



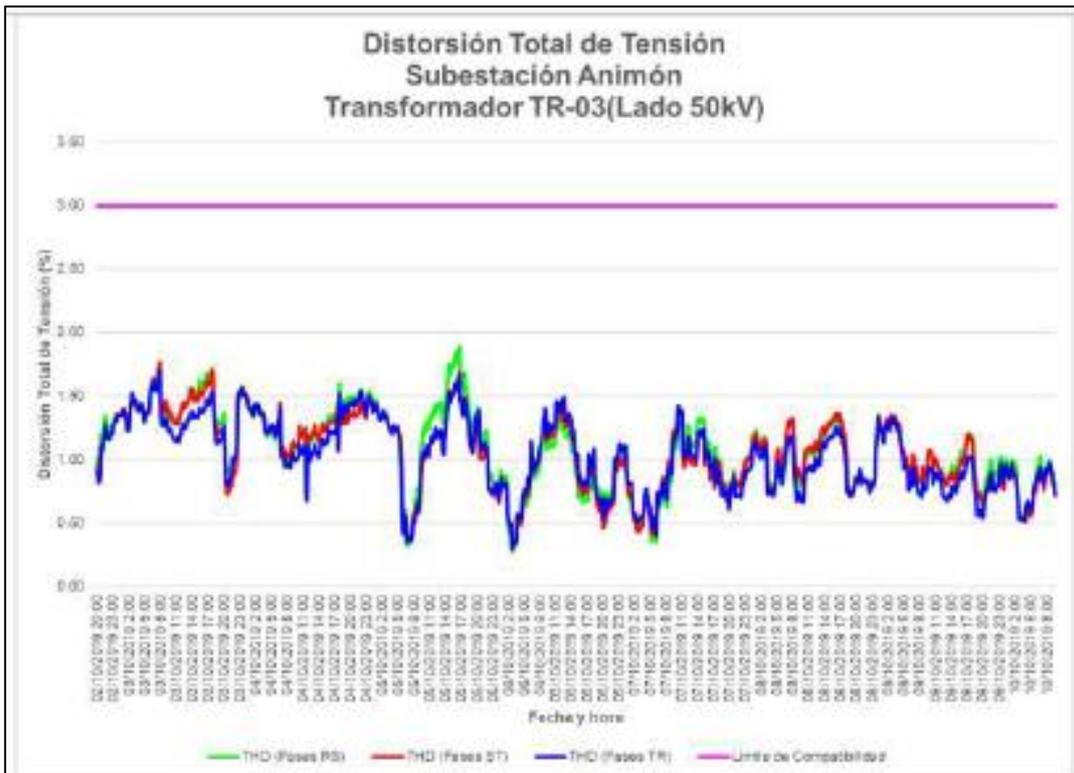


Distorsión Total de Tensión Subestación Animón Transformador TR-03(Lado 23kV)



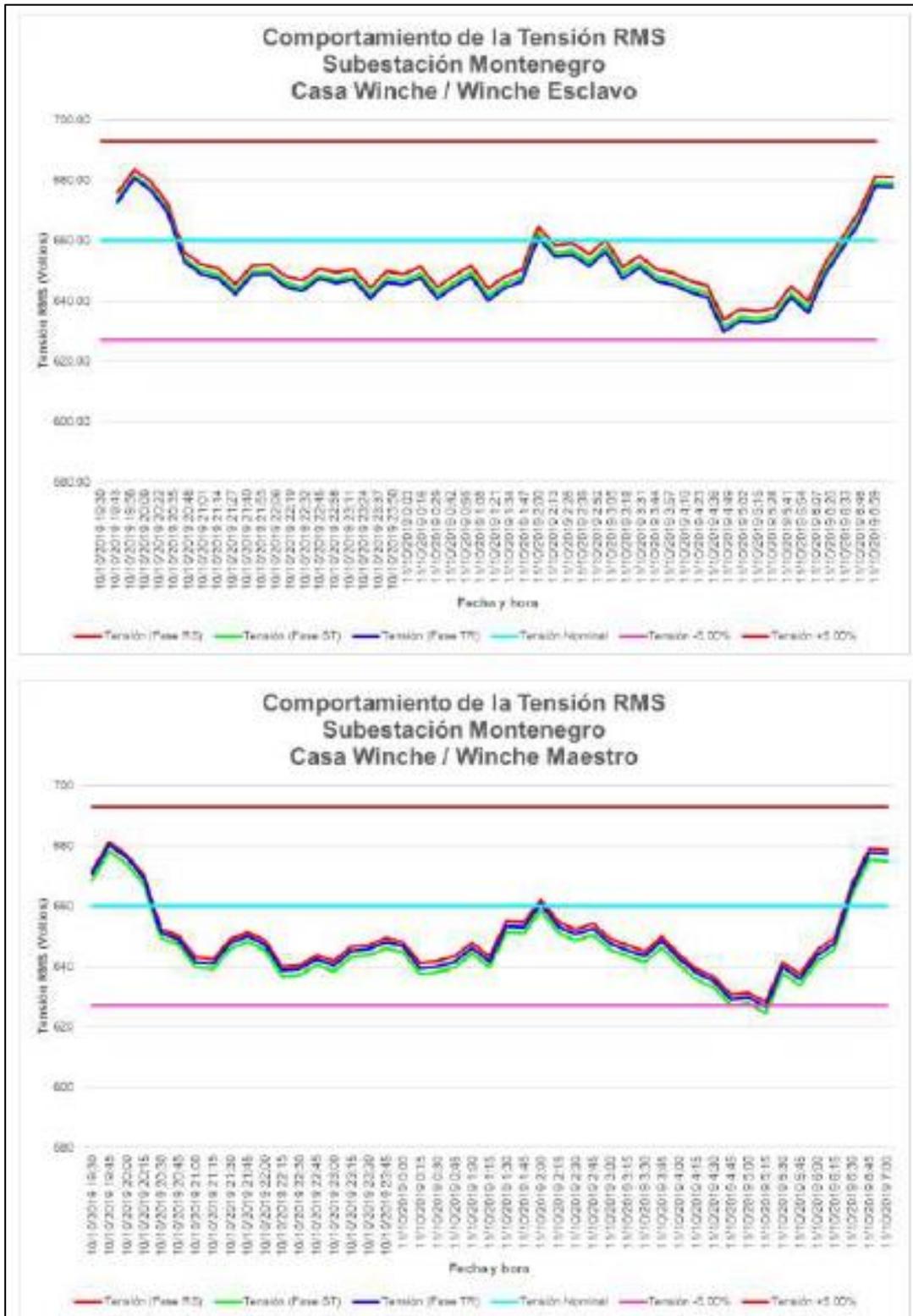
Distorsión Total de Demanda Subestación Animón Transformador TR-03(Lado 23kV)

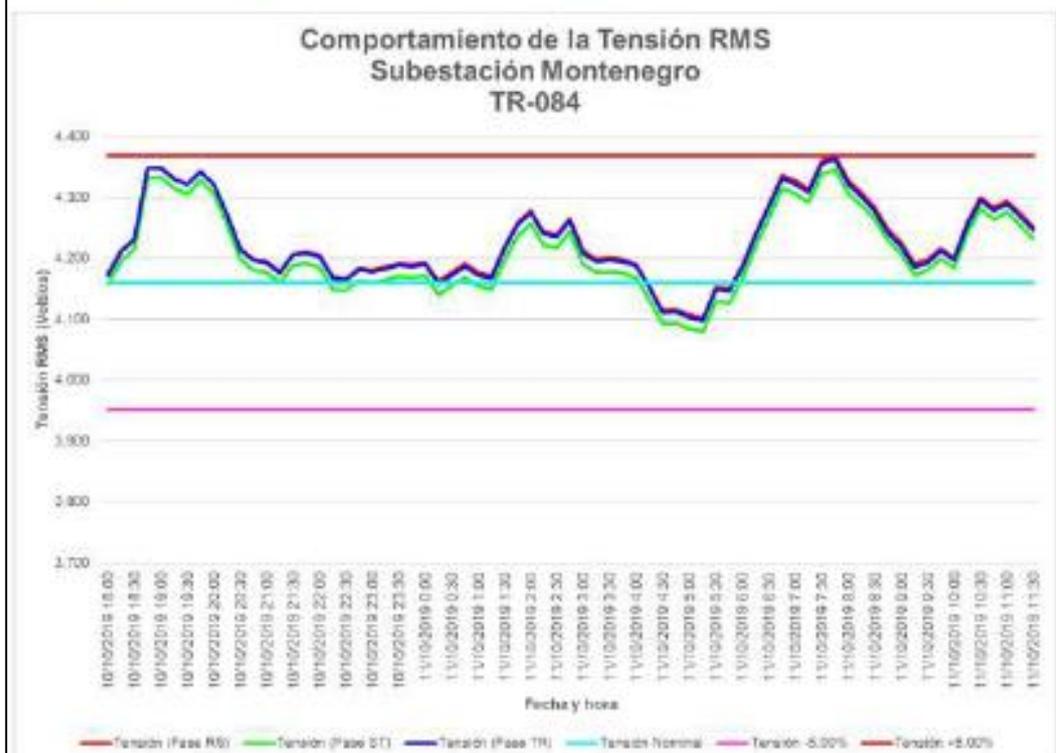
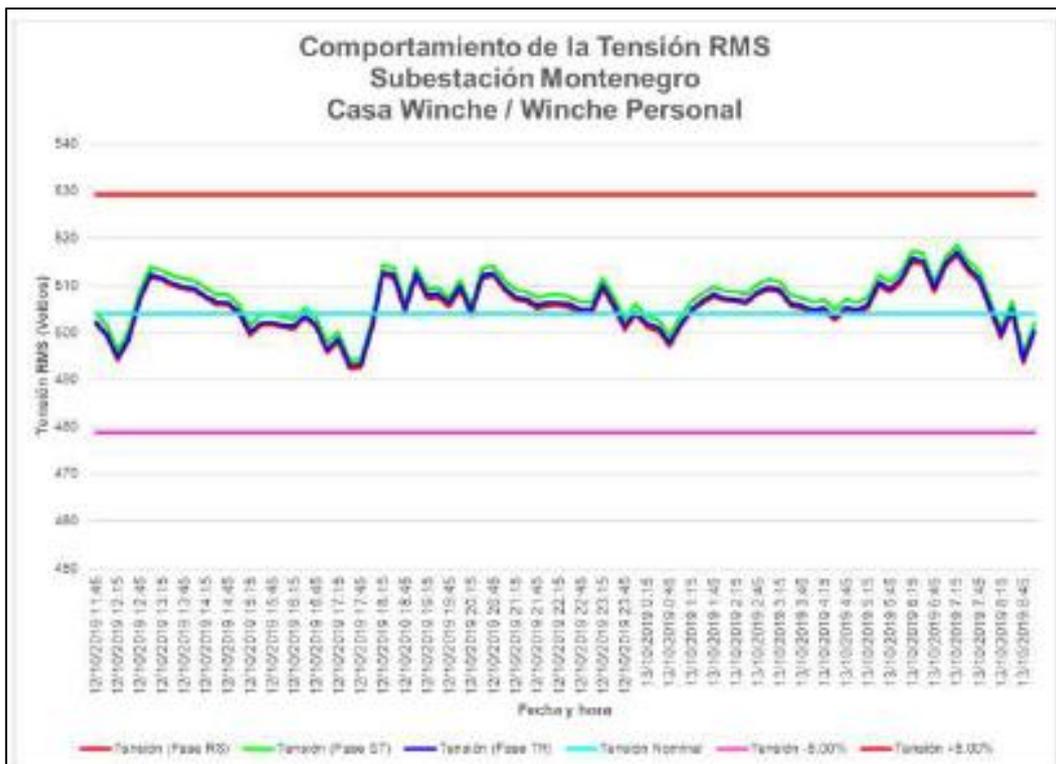


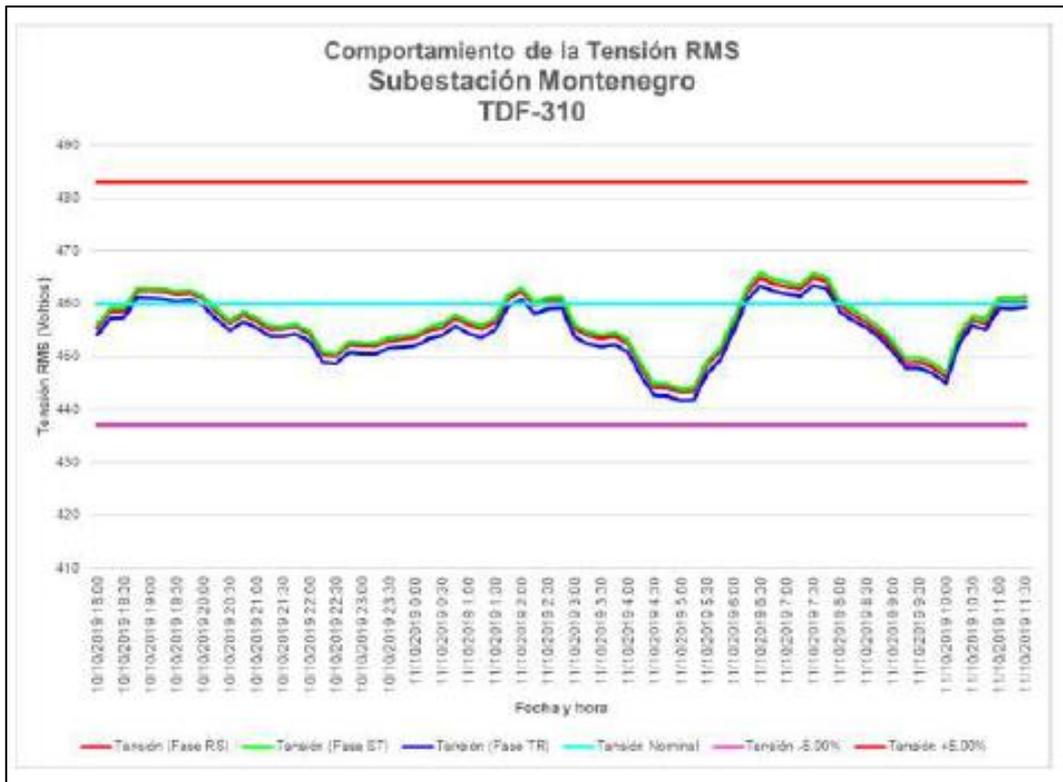


Anexo 7

Comportamiento de la potencia activa, reactiva y factor de potencia de los puntos eléctricos de la subestación Montenegro (casa Winche)



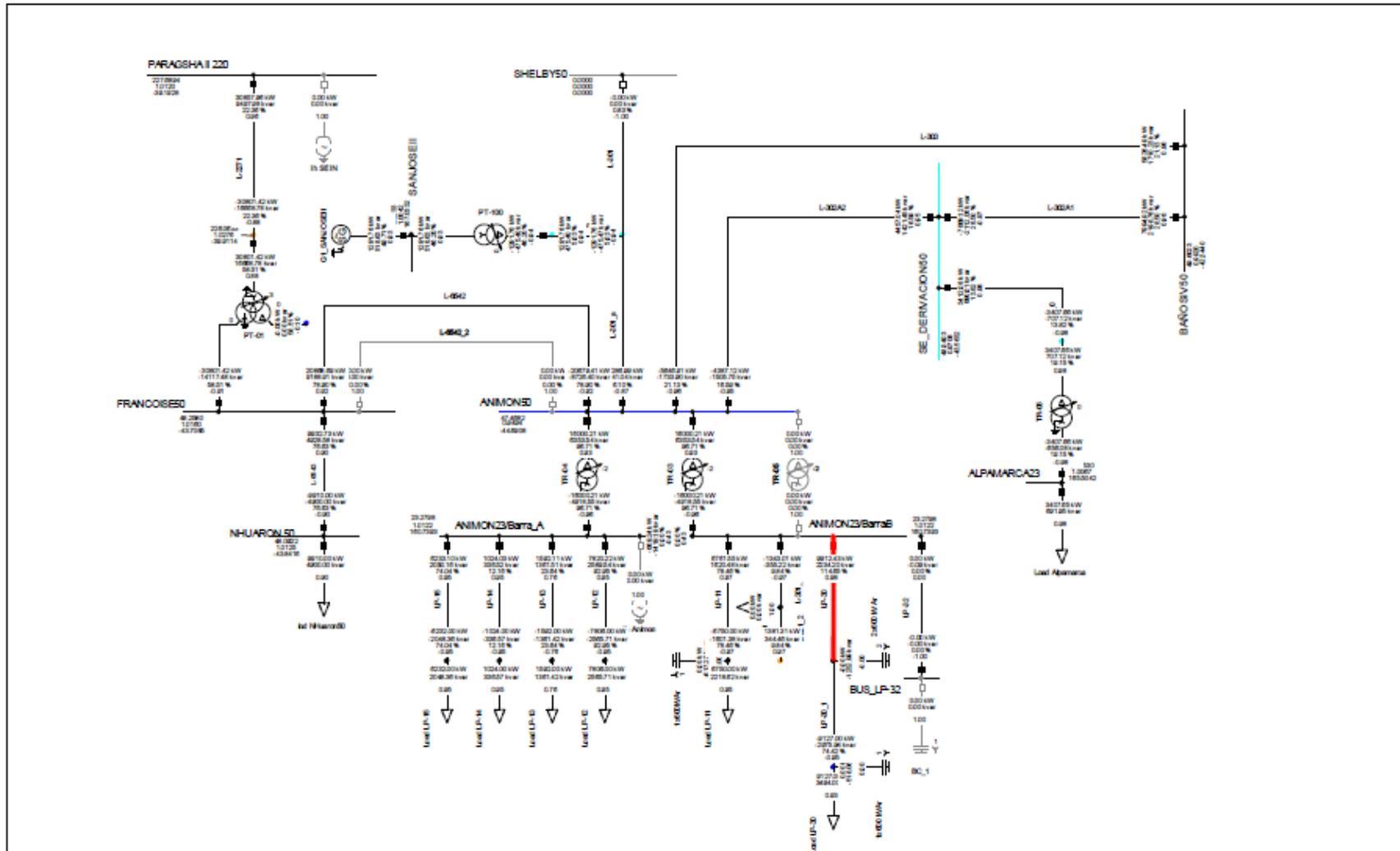




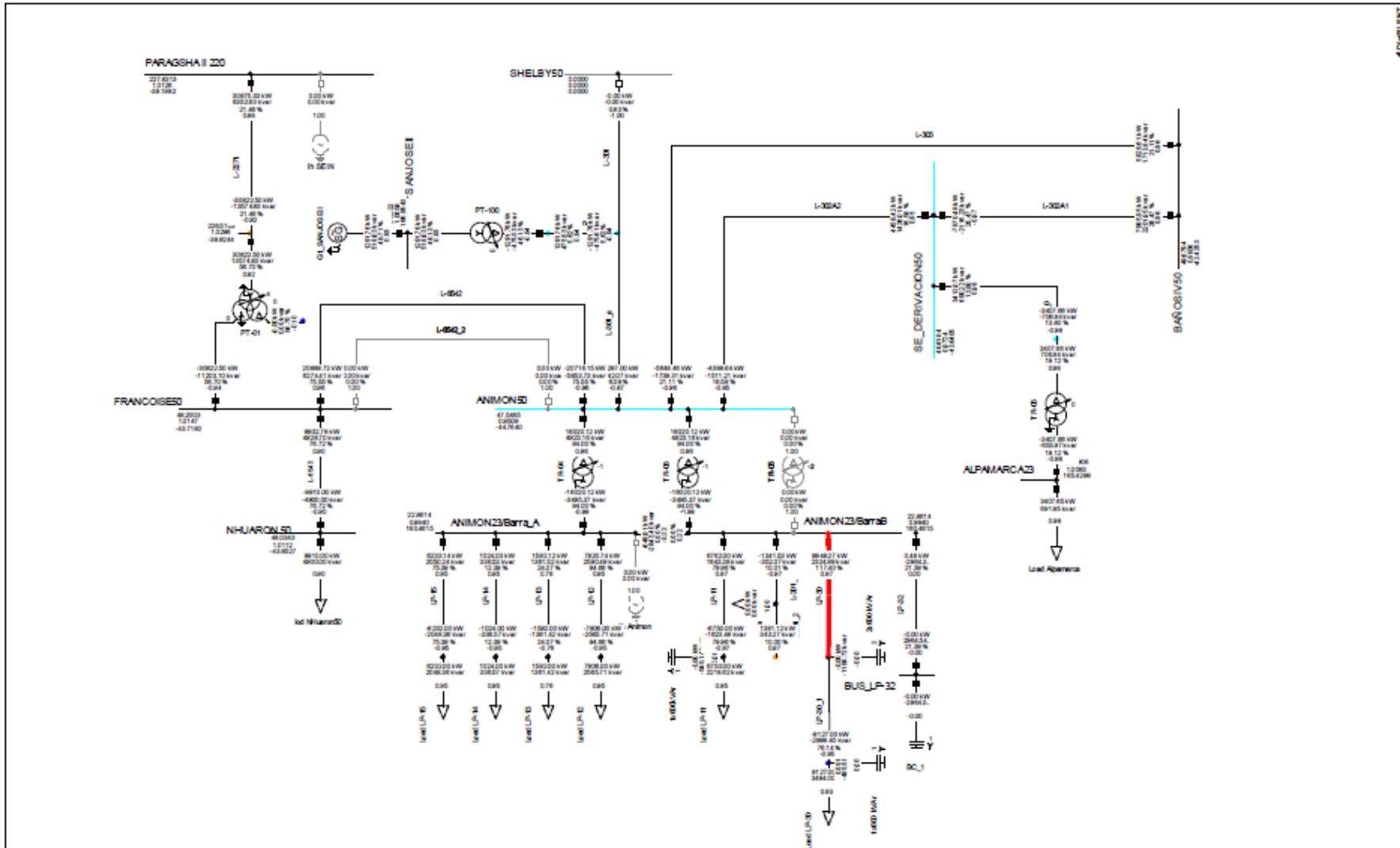
Anexo 8

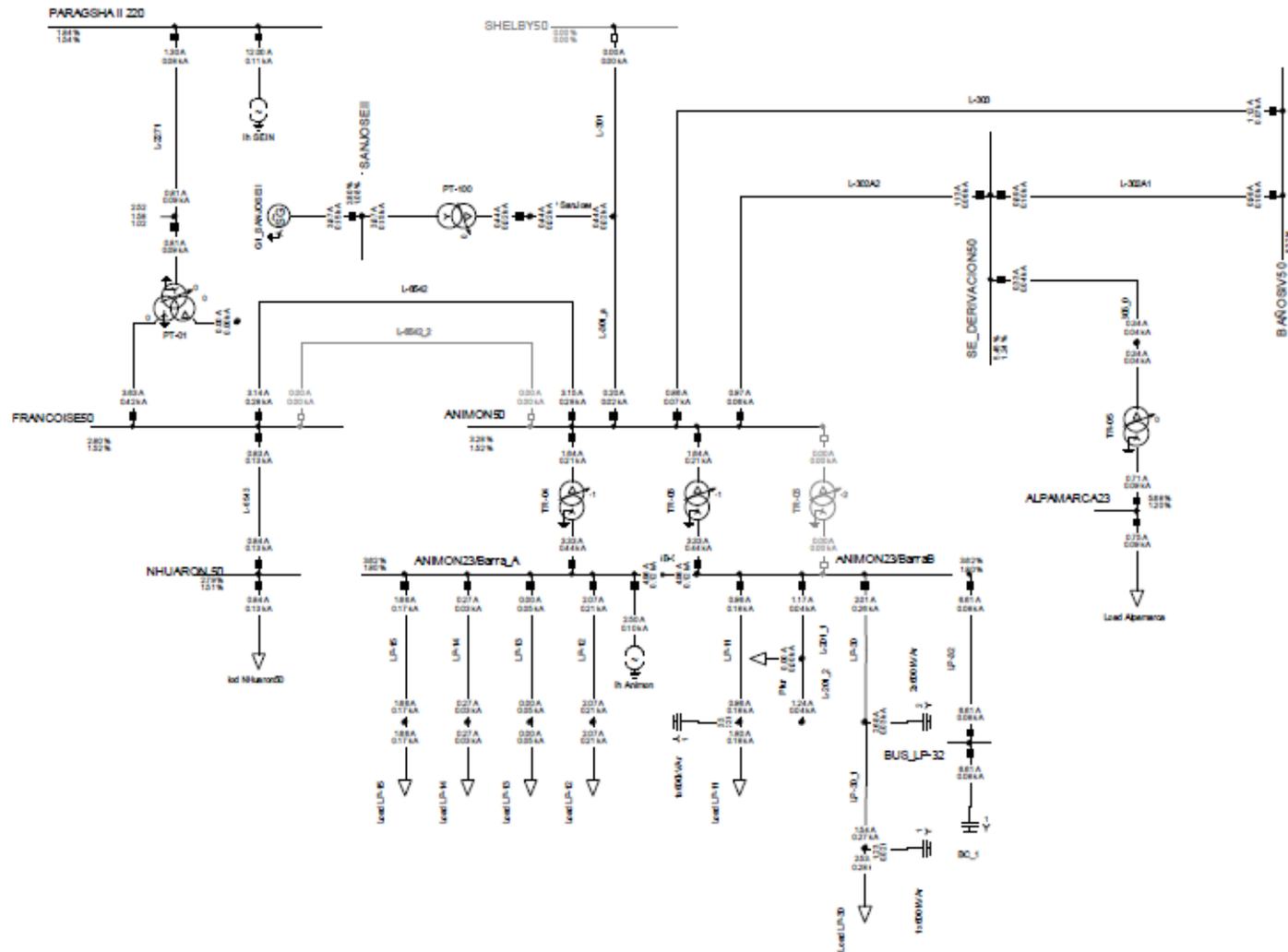
Resultados de simulación de flujo de potencia

Sin compensación reactiva



Con compensación reactiva





Anexo 10

Especificaciones técnicas y presupuesto

Ítem	Ubicación	Subestación	Transformador	Tensión nominal (kV)	Capacidad (kVAr)	Costo de Inversión (USD)
1	Mina Chungar	Animón	TR-03/TR-04	22.9	3,000	390,000
2	Montenegro	Casa Winche	-	0.66	(900 A)	405,000
3	Mina Chungar	SE 9A	T-080	0.48	300	23,000
4			T-124	0.48	300	23,000
5		SE 21	T-069	0.48	300	23,000
6			T-096	0.48	300	23,000
7		SE 22	T-097	0.48	200	16,000
8		SE 25	T-113	0.48	300	23,000
9		SE 28	T-120	0.48	300	23,000
10		SE 35	T-051	0.48	200	16,000
11		SE 37	T-01	0.48	200	16,000
12			T-74	0.48	300	23,000
13		SE 38	355-XFP-001	0.48	300	23,000
14			355-XFP-002	0.48	300	23,000
15		SE 39	100-XFP-001	0.48	600	30,000
16			100-XFP-002	0.48	600	30,000
17	Mina Islay	SE 03	T-132	0.48	300	23,000
18			T-133	0.48	200	16,000
19			TRA-0165	0.48	300	23,000
20		SE 05	TRA-137	0.48	200	16,000
21			TRA-138	0.48	300	23,000
22			TRA-139	0.48	200	16,000
23			TR-035	0.48	200	16,000
Total (USD)						1,243,000

Anexo 11
Mediciones realizadas por el autor





Anexo 12

Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
<p>Problema general ¿Cómo optimizar el sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay?</p>	<p>Objetivo general Optimizar el sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay</p>	<p>Hipótesis general La optimización del sistema de compensación reactiva mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay</p>	<p>Variable independiente Sistema de compensación reactiva.</p>	<p>Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dimensionamiento del banco de capacitores • Localización del banco de capacitores • Cálculo del factor de potencia 	<p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potencia reactiva kVAr • Lugar de instalación • $\cos \phi$ 	<p>Tipo de investigación Aplicada</p> <p>Método de la investigación Cuantitativo</p> <p>Nivel de la investigación Aplicativo</p>
<p>Problema específicos ¿De qué manera dimensionar la capacidad de los bancos de capacitores para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay?</p>	<p>Objetivos específicos Dimensionar bancos de capacitores para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.</p>	<p>Hipótesis específicas El dimensionamiento adecuado de los bancos de capacitores mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades</p>	<p>Variable dependiente Calidad de energía eléctrica</p>	<p>Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Distorsión armónica • Impedancia armónica 	<p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • THD % • Ohmios 	<p>Diseño de la investigación Preexperimental</p> <p>Población y muestra Sistema eléctrico de las unidades mineras Chungar e Islay.</p>

<p>¿De qué manera ubicar los bancos de capacitores para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay?</p>	<p>Localizar bancos de capacitores para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.</p>	<p>mineras Chungar e Islay. La localización de bancos de capacitores mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.</p>	<p>Técnicas de recolección de datos La observación</p>
<p>¿De qué manera corregir el factor de potencia para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay</p>	<p>Corregir el factor de potencia para mejorar la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay.</p>	<p>mineras Chungar e Islay. La corrección del factor de potencia mejora la calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico en las unidades mineras Chungar e Islay</p>	<p>Instrumentos de la recolección de datos Analizador de redes</p>