

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**“MODELO PARA SOLUCIONES AVANZADAS DE SISTEMAS DE
COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA PARA EL PROYECTO
MINERO TAMBOMAYO-AREQUIPA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

AUTORES:

**JHAMES MAYCON JACO TORREJON
JHON EDWARD BLAS AGÜERO**

ASESOR:

Dr. Ing. JUAN HERBER GRADOS GAMARRA

Callao, Diciembre 2016

PERÚ





TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRICISTA

**“MODELO PARA SOLUCIONES AVANZADAS DE SISTEMAS DE
COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA PARA EL PROYECTO
MINERO TAMBOMAYO-AREQUIPA”**

AUTORES:

JHAMES MAYCON JACO TORREJON

JHON EDWARD BLAS AGÜERO

ASESOR:

Dr. Ing. JUAN HERBER GRADOS GAMARRA

DR. ING. MARCELO NEMESIO
DAMAS NIÑO
PRESIDENTE

ING. ERNESTO RAMOS TORRES
SECRETARIO

ING. PEDRO SÁNCHEZ HUAPAYA
VOCAL

Callao, Diciembre 2016

PERÚ

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a nuestros padres, por darnos la vida, porque creyeron en nosotros dándonos ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy podemos ver alcanzada nuestra meta, ya que siempre estuvieron impulsándonos en los momentos más difíciles de nuestra carrera.

A Dios por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado salud para lograr nuestros objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Y a todas aquellas personas que de alguna forma u otra han contribuido a la realización de la tesis.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a nuestras familias por ser los principales promotores de nuestros sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en nosotros y en nuestras expectativas, gracias a nuestras madres por estar dispuestas a acompañar cada larga y agotadora noche de estudio, agotadoras noches en las que su compañía y la llegada de sus cafés era para nosotros como agua en el desierto; gracias a nuestros padres por siempre desear y anhelar lo mejor para nuestras vidas, gracias por sus aportes en varias oportunidades con buenas ideas para superar los obstáculos de nuestra investigación, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que nos guiaron durante nuestra vida.

A nuestro asesor de tesis, Dr. Ing. Juan Herber Grados Gamarra por habernos brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también habernos tenido toda la paciencia del mundo para guiarnos durante todo el desarrollo de la tesis.

A la Universidad Nacional del Callao y a sus catedráticos que nos impartieron en las aulas todos sus conocimientos y nos mostraron también sus valores permitiendo así una formación integral en nosotros y en varios de sus alumnos.

A todos nuestros maestros de la carrera, nuestro eterno agradecimiento y estima especial, por sus conocimientos, orientaciones, exigencias, consejos, confianza y formación en especial al Ing. Edgar Del Águila Vela quien por su sabiduría, paciencia y su buen humor nos motivó al camino de la investigación. Todo ello permitiendo alcanzar nuestra meta.

Al Msc. Ing. Oscar Julián Peña Huaranga sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para nuestra formación como profesionales, gracias también por el apoyo y las facilidades que nos fueron

otorgadas en la empresa. Por la oportunidad brindada para el desarrollo de esta tesis.

A nuestros amigos y colegas, por vuestra perseverancia, voluntad y esfuerzo. Y a todos aquellos que con una palabra motivadora, nos animaron a seguir adelante con el desarrollo de nuestra tesis.

A nuestros compañeros del Área de Power solutions por los conocimientos compartidos y por el apoyo incondicional para el desarrollo de la Tesis.

A nuestras novias por brindar todo su amor, comprensión y su apoyo, por ser pilar fundamental para alcanzar todas nuestras metas, brindando la mejor motivación para terminar nuestra tesis.

INDICE

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
INDICE	iv
INDICE DE FIGURAS	vii
INDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.1 Determinación del problema.....	5
1.2 Formulación del problema.....	5
1.2.1 Problema General	5
1.2.2 Problemas Específicos	5
1.3 Objetivo de la investigación	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Justificación de la investigación	7
1.4.1 Justificación Legal.....	7
1.4.2 Justificación Teórica	8
1.4.3 Justificación Tecnológica.....	8
1.4.4 Justificación Económica	8
1.4.5 Justificación Social.....	9
1.4.6 Justificación Practica	9
1.5 Limitaciones y Facilidades	9
1.6 Importancia	9
II. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Antecedentes del estudio	10
2.2 Calidad de Potencia.....	11
2.4 Perturbaciones Electromagnéticas.....	25
2.4.1 Transitorios.....	25

2.4.2	Variaciones de corta duración	29
2.4.3	Variaciones de larga duración.....	32
2.4.4	Desequilibrio de la tensión	34
2.4.5	Distorsión de las formas de onda	34
2.4.6	Fluctuaciones de la tensión.....	36
2.4.7	Variaciones de la frecuencia	37
2.5	Armónicos en los Sistemas de Potencia	39
2.5.1	Origen de los armónicos	39
2.5.2	Definición.....	41
2.5.3	Clasificación de armónicos.....	42
2.5.4	Análisis de Fourier.....	47
2.5.5	Fuentes principales de armónicas	49
2.5.6	Efectos de los armónicos.....	54
2.6	Resonancia	56
2.7	Corrección de Factor de Potencia	68
2.7.1	Condiciones Sinusoidales	68
2.7.2	Condiciones No Sinusoidales	76
2.7.3	cargas inductivas con bajo factor de potencia	91
2.7.4	Consecuencias del Bajo Factor de Potencia	93
2.8	Definiciones de Términos.....	97
III.	VARIABLES E HIPÓTESIS	102
3.1	Variables de la investigación	102
3.2	Operacionalización de variables.....	102
3.3	Hipótesis de la investigación	103
3.3.1	Hipótesis General	103
3.3.2	Hipótesis Específicas	103
IV.	METODOLOGÍA.....	104
4.1.	Tipo de investigación	104
4.2.	Desarrollo de la investigación	104
4.2.1.	Modelo Para Soluciones Avanzadas De Sistemas De Compensación De Energía Reactiva	104

4.2.2. Dimensionamiento de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva	152
4.3.Población y muestra	208
4.4.Técnica e instrumentos de recolección de datos	208
V. RESULTADOS	209
VI. DISCUSION DE RESULTADOS	214
VII. CONCLUSIONES	216
VIII. RECOMENDACIONES	218
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	220
X. ANEXOS	223
Anexo 1: Matriz de Consistencia	224
Anexo 2: Modelo del sistema eléctrico Tambomayo.....	224

INDICE DE FIGURAS

- Figura N° 2.1. Diagrama de bloques de la calidad de energía.
- Figura N° 2.2. Descarga inducida por un rayo.
- Figura N° 2.3. Transitorio oscilatorio causado por la conmutación de condensadores back to back.
- Figura N° 2.4. Simulación de un sistema industrial convencional.
- Figura N° 2.5. Transitorio en la tensión, debido a la conexión del banco de condensadores.
- Figura N° 2.6. Depresión de tensión del 30% originado por una falla fase a tierra.
- Figura N° 2.7. Sobretensión momentánea originada por una falla fase a tierra.
- Figura N° 2.8. Interrupción momentánea debido a un corto circuito
- Figura N° 2.9. Ejemplo de muescas de tensión causado por el funcionamiento de un convertidor.
- Figura N° 2.10. Onda sinusoidal sin perturbaciones armónicas.
- Figura N° 2.11. Onda sinusoidal a distintas frecuencias armónicas.
- Figura N° 2.12. Formas de ondas armónicas.
- Figura N° 2.13. Caso de un horno de arco alimentado con corriente alterna.
- Figura N° 2.14. Caso de un horno de arco alimentado con corriente continua.
- Figura N° 2.15. Circuito de un convertidor estático trifásico.
- Figura N° 2.16. Efectos de armónicos en máquinas rotativas.
- Figura N° 2.17. Circuito serie.
- Figura N° 2.18. Circuito LC
- Figura N° 2.19. Grafica de resonancia serie.
- Figura N° 2.20. Situaciones típicas en donde la resonancia en serie puede dar un problema.
- Figura N° 2.21. Circuito paralelo.
- Figura N° 2.22. Impedancia de resonancia en paralelo.

- Figura N° 2.23. Posible circuito resonante en paralelo.
- Figura N° 2.24. Forma de onda de la tensión y la corriente para una carga resistiva.
- Figura N° 2.25. Forma de onda de la tensión y la corriente para una carga inductiva.
- Figura N° 2.26. Forma de onda de la tensión y la corriente para una carga capacitiva.
- Figura N° 2.27. Instalación sin compensar la energía reactiva.
- Figura N° 2.28. Instalación con compensación de energía reactiva.
- Figura N° 2.29. Triángulo de potencias eléctricas.
- Figura N° 2.30. Análisis triangulo de potencia.
- Figura N° 2.31. Rectificador trifásico.
- Figura N° 2.32. Alumbrado fluorescente.
- Figura N° 2.33. Forma de onda del transformador.
- Figura N° 2.34. Variador de velocidad.
- Figura N° 2.35. Variador de velocidad espectro armónico
- Figura N° 2.36. Disposición de un variador de frente activo.
- Figura N° 2.37. Triangulo de potencia en tres dimensiones.
- Figura N° 2.38. Relación entre la intensidad de corriente y el factor de potencia.
- Figura N° 4.1 Barra de herramientas de flujo de potencia.
- Figura N° 4.2 Barra de tareas de flujo de potencia.
- Figura N° 4.3 Barra de herramientas de flujo armónico.
- Figura N° 4.4 Barra de tareas de flujo armónico.
- Figura N° 4.5 Barra de herramientas de corto circuito.
- Figura N° 4.6 Barra de tareas de corto circuito según estándar ANSI/IEEE.
- Figura N° 4.7 Esquema unifilar en suministro de 10kv.
- Figura N° 4.8 Switchgear de media tensión SE Merrill Crowe.
- Figura N° 4.9 Esquema unifilar SE Merrill Crowe.
- Figura N° 4.10 Switchgear de media tensión SE Flotación.

- Figura N° 4.11 Centro de control de motores sopladores.
- Figura N° 4.12 Switchboard de baja tensión Flotación.
- Figura N° 4.13 Switchboard de baja tensión filtrado de concentrado.
- Figura N° 4.14 Switchgear de media tensión SE Chancado.
- Figura N° 4.15 Switchgear de media tensión SE Molienda.
- Figura N° 4.16 Centro de control de motores MT SE Molienda.
- Figura N° 4.17 Switchgear de media tensión SE Aguas Ácidas.
- Figura N° 4.18 Switchgear de media tensión SE Filtrado de relaves.
- Figura N° 4.19 Parámetros eléctricos de corto circuito se Talta.
- Figura N° 4.20 Espectro armónico y forma de onda para VDF de 6 pulsos.
- Figura N° 4.21 Espectro armónico y forma de onda para VFD AFE.
- Figura N° 4.22 Impedancia en función del orden armónico 510-MCL-002.
- Figura N° 4.23 Diagrama trifilar de 510-MCL-002.
- Figura N° 4.24 Impedancia en función del orden armónico 510-MCL-001.
- Figura N° 4.25 Diagrama trifilar de 510- MCL-001.
- Figura N° 4.26 Impedancia en función del orden armónico 560-MCL-001.
- Figura N° 4.27 Diagrama trifilar de 560- MCL-001.
- Figura N° 4.28 Impedancia en función del orden armónico 730-MCL-001.
- Figura N° 4.29 Diagrama trifilar de 730- MCL-001.
- Figura N° 4.30 Impedancia en función del orden armónico 550-MCL-001.
- Figura N° 4.31 Diagrama trifilar de 550- MCL-001.
- Figura N° 4.32 Grafica de resonancia con primer escalón en operación
1800kvar.
- Figura N° 4.33 Grafica de resonancia con segundo escalón en operación
3600kvar.
- Figura N° 4.34 Grafica de resonancia con tercer escalón en operación
5400kvar.
- Figura N° 4.35 Diagrama trifilar de 542- MCL-001.
- Figura N° 4.36 Funcionamiento de filtro activo de potencia.

INDICE DE TABLAS

- Tabla N° 2.1. Límites de distorsión de tensión.
- Tabla N° 2.2. Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para tensiones entre 120-69,000v.
- Tabla N° 2.3. Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para tensiones entre 69-61,000 v.
- Tabla N° 2.4. Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para tensiones entre 69 - 161,000 v.
- Tabla N° 2.5. Límites de corta y larga duración según IEEE1159.
- Tabla N° 2.6. Niveles de compatibilidad de armónicos. Componentes armónicas de tensión. Órdenes impares múltiplos de 3.
- Tabla N° 2.7. Niveles de compatibilidad de armónicos. Componentes armónicas de tensión orden par.
- Tabla N° 2.8. Niveles de compatibilidad para las tasas de distorsión armónicas totales.
- Tabla N° 2.9. Norma técnica de calidad de servicios eléctricos (NTCSE)- perturbaciones.
- Tabla N° 2.10. Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos.
- Tabla N° 2.11. Muestra la regla que sigue la secuencia de fases de los diferentes armónicos.
- Tabla N° 2.12. Descomposición armónica de las ondas más comunes.
- Tabla N° 4.1. Factor "c" de corrección para distintos niveles de tensión.
- Tabla N° 4.2. Bases de datos de transformadores.
- Tabla N° 4.3. Tabla de factores aplicados a las cargas N°1.
- Tabla N° 4.4. Tabla de factores aplicados a las cargas N°2.
- Tabla N° 4.5. Tabla de eficiencia de motores eléctricos a 600V.

- Tabla N° 4.6. Tabla de eficiencia de motores eléctricos a 5000V.
- Tabla N° 4.7. Tabla de eficiencia y factor de potencia de motores eléctricos N°1.
- Tabla N° 4.8. Tabla de eficiencia y factor de potencia de motores eléctricos N°2.
- Tabla N° 4.9. Tabla de eficiencia y factor de potencia de motores eléctricos N°3.
- Tabla N° 4.10. Valores normativos del factor de tensión "c".
- Tabla N° 4.11. Cuadro de resumen de corrientes máximas de corto circuito según IEC 60909.
- Tabla N° 4.12. Cuadro de resumen de corrientes mínimas de corto circuito según IEC 60909.
- Tabla N° 4.13. Cuadro de resumen flujo de potencia a demanda máxima del sistema eléctrico.
- Tabla N° 4.14. Cuadro de resumen flujo de potencia a demanda promedio del sistema eléctrico.
- Tabla N° 4.15. Límites de distorsión armónica por área.
- Tabla N° 4.16. Cuadro de resumen de distorsión armónica en corriente a demanda máxima del sistema eléctrico.
- Tabla N° 4.17. Cuadro de resumen de distorsión armónica en tensión a demanda máxima del sistema eléctrico.
- Tabla N° 4.18. Cuadro de resumen de distorsión armónica en corriente a demanda promedio del sistema eléctrico.
- Tabla N° 4.19. Cuadro de resumen de distorsión armónica en tensión a demanda promedio del sistema eléctrico.
- Tabla N° 4.20. Subestaciones con banco de condensadores.
- Tabla N° 4.21. Cuadro de datos del CCM 510-MCL-002.
- Tabla N° 4.22. Detalle de los pasos automáticos del CCM 510-MCL-002.
- Tabla N° 4.23. Especificaciones técnicas del CCM 510-MCL-002.
- Tabla N° 4.24. Cuadro de datos del CCM 510-MCL-001.
- Tabla N° 4.25. Detalle de los pasos automáticos del CCM 510-MCL-001.

- Tabla N° 4.26. Especificaciones técnicas del CCM 510-MCL-001.
- Tabla N° 4.27. Cuadro de datos del CCM 560-MCL-001.
- Tabla N° 4.28. Detalle de los pasos automáticos del CCM 560-MCL-001.
- Tabla N° 4.29. Especificaciones técnicas del CCM 560-MCL-001.
- Tabla N° 4.30. Cuadro de datos del CCM 730-MCL-001.
- Tabla N° 4.31. Detalle de los pasos automáticos del CCM 730-MCL-001.
- Tabla N° 4.32. Especificaciones técnicas del CCM 730-MCL-001.
- Tabla N° 4.33. Cuadro de datos del CCM 550-MCL-001.
- Tabla N° 4.34. Detalle del paso 25kvar CCM 550-MCL-001.
- Tabla N° 4.35. Detalle del paso 47kvar CCM 550-MCL-001.
- Tabla N° 4.36. Especificaciones técnicas del CCM 550-MCL-001.
- Tabla N° 4.37. Niveles de corto circuito en se Tambomayo 10 kv.
- Tabla N° 4.38. Relación de corriente de cortocircuito respecto a la corriente máxima de carga.
- Tabla N° 4.39. Límites de distorsión armónica en tensión.
- Tabla N° 4.40. Límites de distorsión armónica en corriente.
- Tabla N° 4.41. Análisis del factor de potencia se Tambomayo 10kv sin compensación reactiva.
- Tabla N° 4.42. Análisis del factor de potencia se Tambomayo 10kv con compensación reactiva.
- Tabla N° 4.43. Resumen del análisis de resonancia para el primer escalón de 1800 kvar el sistema eléctrico.
- Tabla N° 4.44. Resumen del análisis de resonancia para el primer escalón de 3600 kvar el sistema eléctrico.
- Tabla N° 4.45. Resumen del análisis de resonancia para el primer escalón de 5400 kvar el sistema eléctrico.
- Tabla N° 4.46. Subestaciones con banco de condensadores
- Tabla N° 4.47. Cuadro de datos del CCM 542-MCL-001.
- Tabla N° 4.48. Detalle de los pasos automáticos del CCM 542-MCL-001.
- Tabla N° 4.49. Especificaciones técnicas del CCM 542-MCL-001.
- Tabla N° 4.50. Datos de sistema inicial 717-MCL-001.

- Tabla N° 4.51. Detalle de filtro activo 717-MCL-001.
- Tabla N° 4.52. Datos de sistema inicial 400-MCL-001.
- Tabla N° 4.53. Detalle de filtro activo 400-MCL-001.
- Tabla N° 4.54. Datos de sistema inicial 590-MCL-001.
- Tabla N° 4.55. Datos del filtro activo 590-MCL-001.
- Tabla N° 4.56. Datos de sistema inicial 540-MCL-001.
- Tabla N° 4.57. Datos del filtro activo 540-MCL-001.
- Tabla N° 4.58. Datos de sistema inicial 430-MCL-001
- Tabla N° 4.59. Datos del filtro activo 430-MCL-001.
- Tabla N° 4.60. Datos de sistema inicial 400-MCL-001.
- Tabla N° 4.61. Datos del filtro activo 400-MCL-001.
- Tabla N° 4.62. Datos de sistema inicial 580-MCL-001.
- Tabla N° 4.63. Datos del filtro activo 580-MCL-001.
- Tabla N° 4.64. Datos de sistema inicial 620-SBL-001.
- Tabla N° 4.65. Datos del filtro activo 620-SBL-001.

RESUMEN

En el presente informe de tesis se muestra los diferentes modelos de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva presentándolas como una solución a la problemática de calidad de potencia (mejoramiento del factor de potencia y la polución armónica) en las redes eléctricas.

El proyecto abarcó el nivel de baja y media tensión proponiendo soluciones avanzadas de sistemas de compensación reactiva, banco de condensadores convencionales, banco de condensadores con reactancias anti resonantes y filtros activos. En todos los casos se analizó las consideraciones y criterios para su mejor funcionamiento, presentando las simulaciones en diferentes escenarios de operación basando el análisis en Norma técnica de calidad de servicios eléctricos (NTCSE) , IEC y Recomendaciones IEEE de calidad de potencia, haciendo uso del software ETAP 12.6 para la simulación del sistema eléctrico.

Uno de los objetivos por las cuales se desarrolló las configuraciones de los modelos fue para evaluar criterios y comparar el funcionamiento, desempeño, complejidad del equipamiento real; para dar soluciones eficientes para el Proyecto Minero Tambomayo-Arequipa de los problemas de calidad de potencia.

Los resultados fueron realmente favorables considerando que se redujo la polución en el sistema eléctrico cumpliendo con las normas y recomendaciones prácticas referentes a calidad de potencia y mejorando el factor de potencia deseado de acuerdo al procedimiento N° 20 para clientes libres mayores a 2.5MW.

ABSTRACT

In the present report thesis different models of advanced system solutions reactive power compensation presenting them as a solution to the problem of power quality (power factor improvement and harmonic pollution) in Electricity networks shown.

The project covered the level of low and medium voltage proposing advanced solutions of reactive compensation systems, conventional bank capacitors, capacitor bank with anti-resonant reactance and active filters. In all cases the considerations and criteria for best performance was analyzed, presenting the simulations in different operating scenarios basing the analysis on technical quality standard Electrical services (NTCSE), IEC and Recommendations IEEE power quality, using the 12.6 ETAP software for Electrical system simulation.

One of the objectives for which the configurations of models was to evaluate and compare the performance criteria, performance, complexity of the real equipment was developed; to provide efficient solutions for Tambomayo-Arequipa Mine Project of power quality problems.

The results were really favorable considering that pollution was reduced in the Electrical system complying with the rules and practical recommendations concerning power quality and improving the desired power factor according to the procedure N° 20, for more free customers to 2.5MW.

INTRODUCCIÓN

El concepto Calidad de potencia es un tema esencial el cual ha evolucionado en la última década a escala mundial, en la industria se busca optimizar recursos y ahorro de energía mediante un uso más eficiente y está relacionada con las perturbaciones eléctricas que puedan afectar a las condiciones eléctricas de suministro y ocasionar el mal funcionamiento o daño de equipos y procesos. Por tal razón, se requiere un tratamiento integral del problema de la compensación de energía reactiva y mitigación de armónicos en los sistemas eléctricos.

La mayoría de las cargas y equipos de un sistema eléctrico industrial por ejemplo, líneas y transformadores son de naturaleza inductiva, por lo tanto, operan con un factor de potencia bajo (menor a 0.96), cuando el sistema opera con un factor de potencia bajo requiere un flujo adicional de potencia reactiva, presentándose una reducción de la capacidad, un incremento de pérdidas y caída de tensión en el sistema.

La corrección de factor de potencia en cargas no lineales introduce un problema adicional, amplificando los armónicos existentes, incluso en casos críticos el fenómeno de resonancia, donde la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva del equivalente Thevenin del sistema se igualan produciendo altas tensiones y altas corrientes en la frecuencia de resonancia correspondiente, ocasionando la destrucción del banco de condensadores y equipos cercanos en la instalación industrial.

En la actualidad se hace mucho más frecuente la necesidad de implementar un sistema de compensación de energía reactiva en sistemas industriales debido a la diversidad de cargas existentes. Algunas cargas típicas que requieren compensación son los hornos de arco, los molinos de acero, las fajas transportadoras en minas , en especial bombas de gran capacidad y motores, siendo este último el más representativo consumidor de energía reactiva puesto que al energizar un motor de gran capacidad

este requiere una alta potencia reactiva para poder funcionar, ocasionando un bajo factor de potencia, así como una caída de tensión en las líneas del sistema, lo cual se refleja en pérdidas monetarias considerables para la industria. Por ello se realizó una evaluación del sistema eléctrico para la adecuada elección de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva para el Proyecto Minero Tambomayo-Arequipa propuestos en la presente tesis.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

En la actualidad se ha implementado el proyecto minero, el cual a modo de ingeniería se solicitó que todas las barras de baja y media tensión se encuentren compensadas con un factor de potencia mayor a 0.96, este indicador se mejoró con la implementación de soluciones avanzadas de compensación de energía reactiva de acuerdo al análisis realizado en el sistema. La evaluación constó de una simulación del proyecto minero en el software ETAP 12.6, el cual sirvió de modelo de análisis para poder evaluar sistemas de compensación de potencia reactiva sin que este se afecte por motivos de distorsión armónica o fenómenos de resonancia eléctrica. Habiendo determinado así la correcta solución de sistema de compensación de energía reactiva en el proyecto Tambomayo.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

PG. ¿Cómo la falta de un modelo de simulación afecta la correcta elección de soluciones avanzadas en sistema de compensación de energía reactiva para el proyecto minero Tambomayo-Arequipa?

1.2.2 Problemas Específicos

P1. ¿Cómo la influencia de cargas no lineales afecta en la elección de soluciones en sistemas de compensación de energía reactiva?

P2. ¿Cómo se podría evitar los efectos producidos por la distorsión armónica en soluciones de sistemas de compensación de energía reactiva para mejorar la calidad de potencia?

P3. ¿Cómo el mal criterio en el diseño de soluciones en sistemas de compensación de energía reactiva puede ocasionar efectos de amplificación armónica y fenómeno de resonancia eléctrica?

1.3 Objetivo de la investigación

1.3.1 Objetivo General

- OG.** Efectuar un modelo de simulación del sistema eléctrico del proyecto minero Tambomayo-Arequipa para evaluar la calidad potencia con el fin de diseñar óptimas soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva.

1.3.2 Objetivos Específicos

- O1.** Analizar el comportamiento y la influencia de las cargas no lineales mediante el software ETAP 12.6 para la selección de soluciones Avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva.

- O2.** Definir metodologías y configuraciones de soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva con el fin de evitar los efectos producidos por distorsión armónica para mejorar la calidad de potencia.

- O3.** Analizar, porque el criterio no adecuado en el diseño de soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva puede ocasionar efectos de amplificación armónica y fenómeno de resonancia eléctrica.

1.4 Justificación de la investigación

1.4.1 Justificación Legal

A partir del año 2013 mediante la aprobación del Procedimiento "INGRESO, MODIFICACIÓN Y RETIRO DE INSTALACIONES EN EL SEIN" Aprobado mediante la Resolución Osinergmin N° 035-2013-OS/CD, el cual en el ANEXO 1, Capítulo 6 "REQUISITOS TÉCNICOS DE CONEXIÓN DE GRANDES CARGAS AL SEIN" hace mención a los requisitos técnicos de las instalaciones para la conexión al SEIN de grandes cargas de Usuarios Libres, con potencias iguales o superiores a 2.5 MW. En dicho capítulo se establece:

- a) El factor de potencia de las Grandes Cargas medido en el Punto de Conexión al SEIN no deberá superar los siguientes valores:
 - **0.95** en niveles de alta tensión menores a 220 kV.
 - **0.98** en niveles de tensión de 220 y 500 kV
- b) Para no deteriorar la distorsión armónica existente en el Punto de Conexión, el nivel de armónicos producido por los proyectos asociados a grandes cargas deberá cumplir con las tolerancias establecidas en la NTCSE.

Para tal efecto, en el Estudio de Pre Operatividad del proyecto se deberá incluir un programa de medición de armónicos a fin de determinar la distorsión armónica existente en el Punto de Conexión, provocada por las instalaciones actuales de la zona.

Posteriormente, dentro de los 30 días luego de iniciada la operación de la nueva gran carga en condiciones nominales, con los filtros de armónicos instalados como parte del proyecto, el Titular deberá medir el contenido de armónicos en el Punto de Conexión e informarlo al COES para su evaluación.

1.4.2 Justificación Teórica

De acuerdo a la IEEE Std. 519-2014, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", esta recomendación práctica se usó como guía para el diseño de sistemas de potencia con cargas no lineales. Las limitaciones cubiertas son para operaciones de estado continuo y son recomendadas para condiciones "en el peor de los casos"; se pueden encontrar condiciones transitorias que excedan estos límites.

1.4.3 Justificación Tecnológica

El presente Plan de Tesis tuvo como respaldo aplicar la tecnología de banco de condensadores convencionales, banco de condensadores con reactancia anti resonante y filtros activos, para la compensación de energía reactiva, en el diseño del sistema eléctrico del proyecto minero Tambomayo y cumplir con exigencias demandadas para dicho proyecto.

- Eficiencia energética.
- Factor de potencia adecuado.
- Reducir pérdidas.
- Reducir sobrecalentamiento en transformadores.
- Evitar penalizaciones por exceso de consumo de energía reactiva.
- Evitar caídas de tensión.

1.4.4 Justificación Económica

Las interrupciones de energía eléctrica por no tener una adecuada calidad de potencia significa un costo elevado en muchas mineras por ello es necesario disminuir la frecuencia de fallas, a su vez las penalizaciones también contemplan un costo elevado por exceso de consumo de potencia reactiva, varían según el contrato del suministro de energía del cliente.

1.4.5 Justificación Social

El cliente de la compañía minera buenaventura recibió la mejora de la calidad de servicio eléctrico en sus instalaciones y evitó los contratiempos por frecuencia de fallas y penalizaciones indeseadas.

1.4.6 Justificación Practica

Con el presente Informe de Tesis se determinó las soluciones concretas a la problemática de daños a equipamientos y penalizaciones por exceso de consumo de energía reactiva en el proyecto minero Tambomayo.

1.5 Limitaciones y Facilidades

La presente investigación se centra en desarrollar modelos para soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva para el Proyecto Minero Tambomayo-Arequipa. La limitación dentro del presente trabajo es la inaccesibilidad a la zona de estudio y la altitud de la mina que encuentra a 4800 msnm, lo cual dificulta obtener información.

La facilidad dentro de nuestro trabajo de investigación es obtener información por medio de la empresa Schneider Electric Perú S.A debido a que actualmente nos encontramos laborando en la empresa mencionada.

1.6 Importancia

La importancia de corregir el factor de potencia en instalaciones eléctricas reduce significativamente un corte inesperado de energía por un bajo factor de potencia, a su vez mejora la continuidad del servicio y evita perdidas eléctricas indeseadas, la ventaja principal de tener un sistema eléctrico con factor de potencia por encima del 0.96 es evitar las penalizaciones por exceso de consumo de potencia reactiva.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio

La Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. (CMBSAA) ha solicitado a la Empresa Schneider Electric (Perú) realizar la implementación en equipamiento eléctrico para el proyecto Minero "Tambomayo".

La Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. viene desarrollando el proyecto Minero Tambomayo, ubicado en el Distrito de Tapay, Provincia de Caylloma, Región Arequipa, para lo cual requiere energía y potencia para la explotación de dicho proyecto y sus futuras ampliaciones. La evaluación de alternativas han determinado que el suministro eléctrico para el Proyecto Tambomayo será mediante la Derivación de la Línea de Transmisión 138 kV Callalli – Ares entre las estructuras T-116 y T-117, donde se tiene proyectado la construcción de la nueva subestación Talta 138 kV, desde dicho punto de alimentación mediante una Línea de Transmisión 138 kV de 32.2 km de longitud se transportara la energía y potencia hasta el Proyecto Minero Tambomayo, donde se construirá la subestación Tambomayo 138/10 kV y desde allí se alimentara a las diferentes cargas mineras mediante circuitos en 10 kV, tal como se muestra en la figura N°1 "Esquema Unifilar del Sistema Eléctrico Tambomayo 10 kV".

A su vez la Compañía de Minas Buenaventura solicito a Schneider Electric Perú que se cuente con sistemas de compensación de energía reactiva en todas las barras de media y baja tensión para que conservar un factor de potencia mayor a 0.96 en barra de 10 kV, de esa manera descongestionar las líneas, y evitar penalidades por facturación de energía reactiva inductiva en exceso.

Schneider Electric Perú realizó un análisis de flujo armónico y compensación reactiva para poder dimensionar la mejor solución en sistemas de compensación de energía reactiva sin que este se afecte por

motivos de disturbios eléctricos que puedan ocurrir en la red eléctrica del proyecto minero Tambomayo.

2.2 Calidad de Potencia

El concepto "Calidad de Energía Eléctrica" o "calidad de potencia" es un tema esencial el cual ha evolucionado en la última década a escala mundial, está relacionada con las perturbaciones eléctricas que pueden afectar a las condiciones eléctricas de suministro y ocasionar el mal funcionamiento o daño de equipos y procesos. Por tal razón, se requiere un tratamiento integral del problema desde diversos frentes. Estos comprenden, entre otros, investigación básica y aplicada, diseño, selección, operación y mantenimiento de equipos, normalización, regulación, programas de medición y evaluación, capacitación de personal. etc.

Cuando se habla de Calidad de la Energía Eléctrica, se está haciendo referencia tanto a la calidad de las señales de tensión y corriente, como a la continuidad o confiabilidad del servicio de energía eléctrica.

FIGURA N° 2.1
DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA CALIDAD DE ENERGÍA



Fuente: Elaboración propia

La calidad de energía requiere de dos características importantes:

1. Confiabilidad y disponibilidad

Es proporcionar el servicio donde y cuando se necesite sin fallas o cortes de servicio.

2. Calidad de Potencia eléctrica

Tener el suministro de energía eléctrica que se necesita, tensión. Frecuencia y forma de onda adecuada.

La calidad de energía puede ser vista bajo diferentes perspectivas:

- **La del consumidor** viendo la afectación de las variaciones de la tensión eléctrica en sus equipos
- **La del fabricante de equipos** determinando una tolerancia en sus equipos para evitar daños permanentes.
- **La del suministrador** viendo las características de las Corrientes consumidas por sus clientes y las posibles afectaciones a la red derivado de la calidad de consumo.

La norma IEC (61000-2-2/4) define a la Calidad de la Energía Eléctrica como: "Una característica física del suministro de Electricidad, la cual debe llegar al cliente en condiciones normales, sin producir perturbaciones ni interrupciones en los procesos del mismo" [6].

Para la norma IEEE 1159 de 2009: "El término se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctricas, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia" [12].

2.3 Normas Referenciales

2.3.1. Normas Internacionales

Las normas internacionales como la IEEE 519–2014 o las normas de la serie IEC 61000, recomiendan los límites permisibles de distorsión en las redes eléctricas para reducir los efectos nocivos de la circulación de armónicos por dichas redes y sus componentes. A continuación se dan unas reseñas de esta familia de normas.

1. Estándar IEEE 519-2014

El estándar IEEE 519-2014; Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia, hace referencia al contexto general sobre la distorsión armónica en donde se establecen límites de distorsión de tensión y corriente según las características del sistema que se quiera evaluar [16].

Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución la cual tienen una capacidad limitada para absorber corrientes armónicas. La IEEE 519-2014 hace referencia no solo al nivel absoluto de armónicos producido por una fuente individual sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento.

Donde existan problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión de tensión, es obligatorio para el suministrador y el consumidor, resolver estos problemas. Por tal motivo el propósito de esta norma es el de recomendar límites en la distorsión armónica de acuerdo básicamente a dos criterios:

- 1) Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica [14].
- 2) Se establece una limitación en el nivel de tensión armónico que una compañía de distribución de Electricidad puede suministrar al consumidor [14].

A. Distorsión Armónica de Tensión

La forma de onda de tensión nunca es exactamente una onda sinusoidal de única frecuencia, este fenómeno es llamado "distorsión armónica de tensión" o simplemente "distorsión de tensión" y es cuando se asume una forma de onda periódica, que puede ser descrita como la suma de ondas sinusoidal con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental. Las componentes no fundamentales son llamadas "distorsión armónica".

La distorsión armónica de tensión se puede expresar a partir del factor llamado (THD_v), el cual es usado para definir el efecto armónico sobre la tensión en un sistema de potencia de baja, media y alta tensión [16].

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} v_h^2}}{v_1} \times 100 \quad (2.1)$$

- Límites en la distorsión armónica de tensión.

Los límites armónicos de tensión recomendados se basan en niveles lo suficientemente pequeños como para garantizar que el equipo de los suscriptores opere satisfactoriamente.

Como es común, los límites se imponen sobre componentes individuales y sobre la distorsión total para la combinación de todas las tensiones armónicas (distorsión armónica). Lo diferente en esta tabla, sin embargo, es que se muestran tres límites diferentes. Ellos representan tres niveles de tensión; hasta 69 KV, de 69 a 161 KV, y por encima de 161 KV. Al aumentar la tensión disminuyen los límites de distorsiones, al igual que para los límites de corrientes [16] (Véase la TABLA N° 2.1, en la página 15).

TABLA N° 2.1

LÍMITES DE DISTORSIÓN DE TENSIÓN

$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

^a Sistemas de alta tensión pueden tener hasta 2.0% THD, donde la causa es un terminal HVDC cuyos efectos se atenuarán en puntos de la red donde se conectarán futuros usuarios.

Fuente: Estándar IEEE 519-2014

B. Distorsión Armónica de Corriente

El fenómeno complementario de la distorsión armónica de tensión, es la distorsión armónica de corriente. Como la distorsión armónica de tensión es principalmente debida a la corriente de cargas no sinusoidales, la distorsión armónica de tensión y corriente, están fuertemente relacionadas. La distorsión armónica de corriente requiere sobredimensionar una serie de componentes como transformadores y cables. Cuando las impedancias en serie aumentan con la frecuencia, una corriente distorsionada puede causar más pérdidas que una corriente sinusoidal del mismo valor eficaz (RMS) [16].

El espectro armónico de corriente contiene principalmente 5°, 7°, 11° y 13° componente armónico. Las ondas de alta frecuencia son debidas al cambio de frecuencia en los inversores DC/AC [16].

La distorsión armónica de corriente se puede expresar a partir del factor llamado (THD_i), el cual es usado para definir el efecto armónico sobre la corriente en un sistema de potencia [16].

$$\text{THD}_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.2)$$

- **Límites en la distorsión armónica de corriente.**

El límite primario para los clientes individuales es la cantidad de corriente armónica que ellos pueden inyectar en la red de distribución. Los límites de corriente se basan en el tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución. Los clientes más grandes se restringen más que los clientes pequeños [16].

El tamaño relativo de la carga con el respecto a la fuente se define como la relación de cortocircuito (SCR), al punto de acople común (PCC); que es donde la carga del consumidor se conecta con otras cargas en el sistema de potencia. El tamaño del consumidor es definido por la corriente total de frecuencia fundamental en la carga, I_L , que incluye todas las cargas lineales y no lineales. El tamaño del sistema de abastecimiento es definido por el nivel de la corriente de cortocircuito, I_{sc} al PCC. Estas dos corrientes definen el SCR [16]:

$$SCR = \frac{\text{Potencia de cortocircuito MVA}}{\text{Carga MVA}} = \frac{I_{sc}}{I_L} \quad (2.3)$$

Una relación alta significa que la carga es relativamente pequeña y que los límites aplicables no serán tan estrictos como los que corresponden cuando la relación es más baja. Se recomiendan los niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de SCR y el orden de la armónica [14] (véase en la TABLA 2.2, TABLA 2.3, en la página 17 y la TABLA 2.4 en la página 18).

TABLA N° 2.2

LÍMITES DE CORRIENTE ARMÓNICA PARA CARGA NO LINEAL EN EL PUNTO COMÚN DE ACOPLAMIENTO CON OTRAS CARGAS, PARA TENSIONES ENTRE 120 - 69,000 V.

<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
Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de Isc/Il que presente						
Donde:						
<ul style="list-style-type: none"> • ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común • IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común. • TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima. 						

Fuente: Estándar IEEE 519-2014

TABLA N° 2.3

LÍMITES DE CORRIENTE ARMÓNICA PARA CARGA NO LINEAL EN EL PUNTO COMÚN DE ACOPLAMIENTO CON OTRAS CARGAS, PARA TENSIONES ENTRE 69 - 161,000 V.

<20	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
20<50	3.50	1.75	1.25	0.50	0.25	4.00
50<100	5.00	2.25	2.00	0.75	0.35	6.00
100<1000	6.00	2.75	2.50	1.00	0.50	7.50
>1000	7.50	3.50	3.00	1.25	0.70	10.00
Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de Isc/Il que presente						
Donde:						
<ul style="list-style-type: none"> • ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común • IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común. • TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima. 						

Fuente: Estándar IEEE 519-2014

TABLA N° 2.4

LÍMITES DE CORRIENTE ARMÓNICA PARA CARGA NO LINEAL EN EL PUNTO COMÚN DE ACOPLAMIENTO CON OTRAS CARGAS, PARA TENSIONES MAYORES A 161,000 V.

<25 c	1.00	0.50	0.38	0.15	0.10	1.50
25<50	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
>=50	3.00	1.50	1.15	0.45	0.22	3.75
Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de I_{sc}/I_L que presente						
Donde:						
<ul style="list-style-type: none"> • ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común • IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común. • TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima. 						

Fuente: Estándar IEEE 519-2014

2. Estándar IEEE 1159.

Define siete categorías distintas de fenómenos electromagnéticos en las redes eléctricas: transitorios, variaciones corta duración, variaciones de larga duración, desequilibrio de tensión, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de la frecuencia (véase en la TABLA N°2.5, en la página 19).

Las variaciones de corta duración comprenden los Sags, las interrupciones y los "swell". Cada tipo de clasifica en instantáneo momentáneo o temporal dependiendo de su duración.

Las variaciones de corta duración (Swell, Sags e interrupciones sostenidas) se producen casi siempre por condiciones de fallo, por la conexión de cargas que requieren grandes corrientes de arranque.

Dependiendo de la ubicación de la falla se pueden producir sobretensiones, subtensiones o interrupciones temporales. Sin importar el lugar en el cual

se localice la falla (lejos o cerca del punto de estudio), su efecto sobre la tensión va a ser una variación de corta duración [19].

TABLA N° 2.5
LÍMITES DE CORTA Y LARGA DURACIÓN SEGÚN IEEE1159

1.0 Variaciones corta duración		
1.1 Instantánea		
1.1.1 Hueco	0.5 - 30 ciclos	0.1 – 0.9 p.u
1.1.2 Swell	0.5 - 30 ciclos	1.1 – 1.8 p.u
1.2 Momentánea		
1.2.1 Interrupción	0.5 ciclos - 3s	< 0.1 p.u
1.2.2 Hueco	30 ciclos - 3s	0.1 – 0.9 p.u
1.2.3 Swell	30 ciclos - 3s	1.1 – 1.4 p.u
1.3 Temporal		
1.3.1 Interrupción	3s - 1min	< 0.1 p.u
1.3.2 Hueco	3s - 1min	0.1 – 0.9 p.u
1.3.3 Swell	3s - 1min	1.1 – 1.2 p.u
2.0 Variación y larga duración		
2.1 Interrupción	> 1min	0.0 p.u
2.2 Subtensión	> 1min	0.8 – 0.9 p.u
2.3 Sobretensión	> 1min	1.1 – 1.2 p.u

Fuente: Estándar IEEE 1159

3. IEC 61000 -Normas de Compatibilidad para Redes de Distribución

3.1. IEC 61000-2-2:2003

Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión [17].

Esta norma se refiere a las perturbaciones conducidas en el rango de frecuencias de 0 kHz a 9 kHz, con una extensión hasta 148,5 kHz para los sistemas de transmisión de señales en la red. Se dan los valores numéricos de los niveles de compatibilidad para las redes de distribución pública de corriente alterna en baja tensión, con una tensión nominal máxima de 420 V monofásica, o 690 V trifásica, y una frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz.

3.2. IEC 61000-2-4:2004

Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-4: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales (véase en la TABLA N° 2.6, TABLA N° 2.7, TABLA N° 2.8, en la página 22).

Esta parte de la norma se refiere a las perturbaciones conducidas en el rango de frecuencias de 0kHz a 9kHz. Fija valores numéricos de los niveles de compatibilidad para las redes de distribución de energías industriales y no públicas a tensiones nominales de hasta 35kV y frecuencias de 50 o 60 Hz [17].

Clases de entornos electromagnéticos definidos en esta norma:

- Clase 1: redes protegidas con niveles de compatibilidad inferiores a los de la redes de distribución pública. Ciertos equipos de automatización, instrumentación eléctrica en los laboratorios tecnológicos, algunos ordenadores, etc. Generalmente de baja tensión.
- Clase 2: PCC y PCI (Punto de Conexión Interno) de redes industriales en general públicas y no públicas.

- Clase 3: sólo PCI en entornos industriales. Mayores niveles de compatibilidad que los de la clase 2 para algunos tipos de perturbaciones. Entra en esta clase cuando: la mayor parte de la carga se alimenta con convertidores, hay máquinas de soldar, los grandes motores se arrancan asiduamente, cargas que varían rápidamente.

Los hornos de arco y grandes convertidores, cargas altamente perturbadoras, que son alimentadas generalmente por barras separadas, presentan casi siempre niveles de perturbación mayores que los de la clase 3. Por lo que deberían ser motivo de acuerdo los correspondientes niveles de compatibilidad con los responsables de la distribución eléctrica [17].

TABLA N° 2.6

NIVELES DE COMPATIBILIDAD DE ARMÓNICOS. COMPONENTES ARMÓNICAS DE TENSIÓN. ÓRDENES IMPARES MÚLTIPLOS DE 3.

3	3	5	6
9	1.5	1.5	2.5
15	0.3	0.4	2
21	0.2	0.3	1.75
21<h<45	0.2	0.2	1
NOTA 1 -Estos niveles se aplican a los armónicos homopolares NOTA 2 -En algunos casos en que una parte de la red industrial está dedicada a las cargas no lineales importantes, los niveles de compatibilidad de la clase 3 para esa parte de la red pueden valer 1.2 veces los valores arriba indicados. Entonces se deberían tomar las precauciones necesarias en lo que contiene a la inmunidad de los equipos que están conectados, sin embargo, en el PCC (red pública), prevalecen los valores de los niveles de compatibilidad dados en la norma IEC 61000-2-2 y en la norma IEC 61000-2-12.			

Fuente: IEC 61000-2-4, 2004

TABLA N° 2.7
NIVELES DE COMPATIBILIDAD DE ARMÓNICOS. COMPONENTES
ARMÓNICAS DE TENSIÓN ORDEN PAR.

2	2	2	3
4	1	1	1.5
6	0.5	0.5	1
8	0.5	0.5	1
10	0.5	0.5	1
10<h<50	$0.25x(10/h)+0.25$	$0.25x(10/h)+0.25$	1

NOTA - En algunos casos en que una parte de la red industrial está dedicada a las cargas no lineales importantes, los niveles de compatibilidad de la clase 3 para esa parte de la red pueden valer 1.2 veces los valores arriba indicados. Entonces se deberían tomar las precauciones necesarias en lo que contiene a la inmunidad de los equipos que están conectados, sin embargo, en el PCC (red pública), prevalecen los valores de los niveles de compatibilidad dados en la norma IEC 61000-2-2 y en la norma IEC 61000-2-12.

Fuente: IEC 61000-2-4, 2004.

TABLA N° 2.8
NIVELES DE COMPATIBILIDAD PARA LAS TASAS DE DISTORSIÓN
ARMÓNICAS TOTALES.

Tasa de distorsión armónica total (THD)	5%	8%	10%
NOTA - En algunos casos en que una parte de la red industrial está dedicada a las cargas no lineales importantes, los niveles de compatibilidad de la clase 3 para esa parte de la red pueden valer 1.2 veces los valores arriba indicados. Entonces se deberían tomar las precauciones necesarias en lo que contiene a la inmunidad de los equipos que están conectados, sin embargo, en el PCC (red pública), prevalecen los valores de los niveles de compatibilidad dados en la norma IEC 61000-2-2 y en la norma IEC 61000-2-12.			

Fuente: IEC 61000-2-4, 2004

4. IEC 5552.

La norma establece las exigencias sobre armónicas que deben cumplir todos aquellos equipos que consumen menos de 16 Amperios por fase en la red 220 V a 415 V, entre ellos figuran los computadores personales y los televisores. La norma establece los límites en base a valores eficaces (rms) de cada armónica, la relación entre el valor eficaz y el valor máximo eficaz y valor máximo [12].

2.3.2. Normas Nacionales

Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos (NTCSE)

Según NTCSE propicia el control de todo tipo de perturbaciones. Inicialmente, sin embargo, sólo se controla el Flícker y las Tensiones Armónicas.

El Flícker y las Armónicas se miden en la tensión de Puntos de Acoplamiento Común (PAC) del sistema, de puntos indicados explícitamente en la Norma o de otros que especifique la Autoridad en su oportunidad [20].

Tolerancias:

- a) **Flícker.**- El Índice de Severidad por Flícker (Pst) no debe superar la unidad ($Pst < 1$) en Muy Alta, Alta, Media ni Baja Tensión. Se considera el límite: $Pst'=1$ como el umbral de irritabilidad asociado a la fluctuación máxima de luminancia que puede ser soportada sin molestia por una muestra específica de población [20].
- b) **Tensiones Armónicas.**- Los valores eficaces (RMS) de las Tensiones Armónicas Individuales (V_i) y los THD, expresado como porcentaje de la tensión nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (V_i' y THD') indicados en la siguiente tabla. Para efectos de esta Norma, se consideran las armónicas comprendidas entre la dos (2) y la cuarenta (40), ambas inclusive [20] (Véase la FIGURA N° 2.9, en la página 24).

TABLA N° 2.9
NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DE SERVICIOS ELÉCTRICOS
(NTCSE)-PERTURBACIONES

Armónicas impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	$0.1+2.5/n$	$0.2+12.5/n$
Armónicas impares no múltiplos de 3		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8

Se considera es de mala calidad, si la tensión se encuentra fuera de tolerancia por un período superior al cinco por ciento (5%) del período de medición.

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos (NTCSE).

El Factor de Distorsión Total por Armónicas (THD) está definido como:

$$\text{THD} = \left(\sqrt{\sum_{i=2}^{40} \left(\frac{V_i^2}{V_N^2} \right)} \right) \times 100\% \quad (2.4)$$

Donde:

- V_i .- Es el Valor eficaz (RMS) de la tensión armónica "i" (para $i=2\dots 40$) expresada en Voltios.
- V_N .- Es la tensión nominal del punto de medición expresada en Voltios.

Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad, si los indicadores de las perturbaciones medidas se encuentran fuera del rango de tolerancias establecidas en este numeral, por un tiempo superior al 5% del Período de Medición. Cada tipo de perturbación se considera por separado.

2.4 Perturbaciones Electromagnéticas

2.4.1 Transitorios

Es la interacción instantánea de energías almacenadas en campos eléctricos y magnéticos luego de una perturbación del equilibrio, originándose variaciones instantáneas de corriente y/o tensión. Son variaciones de muy corta duración, estos transitorios pueden ser la causa de pérdidas de datos, falsos disparos y fallas en el equipamiento eléctrico. Muchos de estos transitorios son usualmente generados por el mismo usuario. Otros son el resultado de descargas atmosféricas en la red primaria y por maniobra de bancos de condensadores; pueden ser clasificados en dos categorías:

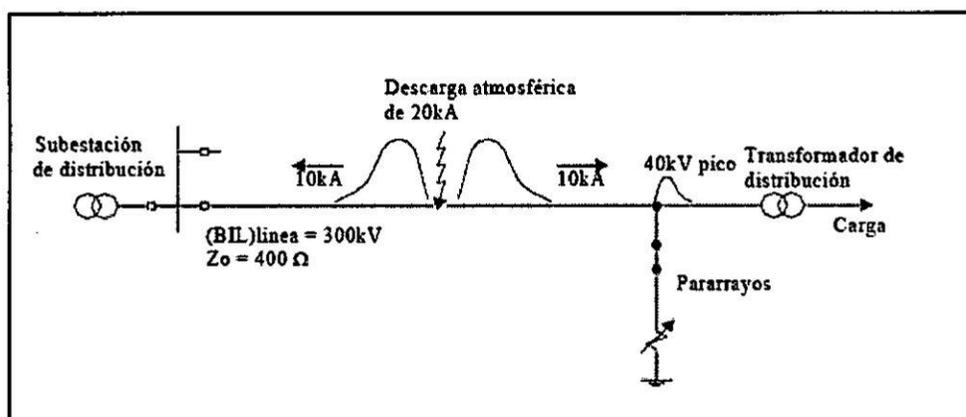
a. Transitorios Impulsionales

Es un cambio súbito y unidireccional (positivo o negativo) en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos y de frecuencia diferente a la frecuencia del sistema de potencia.

Son causados por las condiciones geográficas y meteorológicas locales. Tiene una rápida elevación y cae más suavemente pero contiene alta energía y es unipolar [25]. Son de moderada y elevada magnitud pero de corta duración medida en microsegundos. Normalmente están caracterizados por sus tiempos de ascenso (1 a 10 μsec) y descenso (20 a 150 μsec) y por su contenido espectral [12]. (Véase en la FIGURA N° 2.2).

FIGURA N° 2.2

DESCARGA INDUCIDA POR UN RAYO.



Fuente: Calidad del servicio de energía eléctrica-Samuel castano-2006.

b. Transitorios Oscilatorios

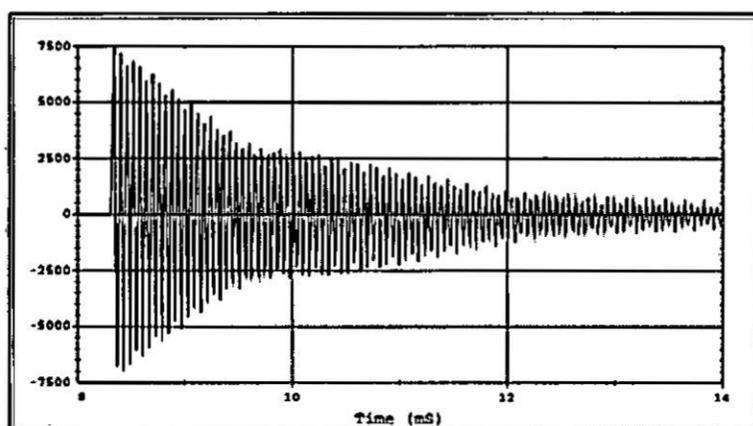
Son un cambio súbito en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos, con polaridades positivas y negativas y de frecuencia diferente a la frecuencia de operación del sistema. Este tipo de transitorio se describe por su contenido espectral, duración y magnitud. Por su frecuencia se clasifican en: transitorios de alta, media y baja frecuencia.

Los transitorios oscilatorios con una frecuencia mayor de 500 kHz y una duración típica medida en microsegundos (o varios ciclos de la frecuencia

fundamental) son considerados transitorios oscilatorios de alta frecuencia. Cuando la frecuencia se encuentra entre 5 y 500 kHz se considera un transitorio de frecuencia media [12] (Véase en la FIGURA N° 2.3).

FIGURA N° 2.3

TRANSITORIO OSCILATORIO CAUSADO POR LA CONMUTACIÓN DE CONDENSADORES BACK TO BACK.

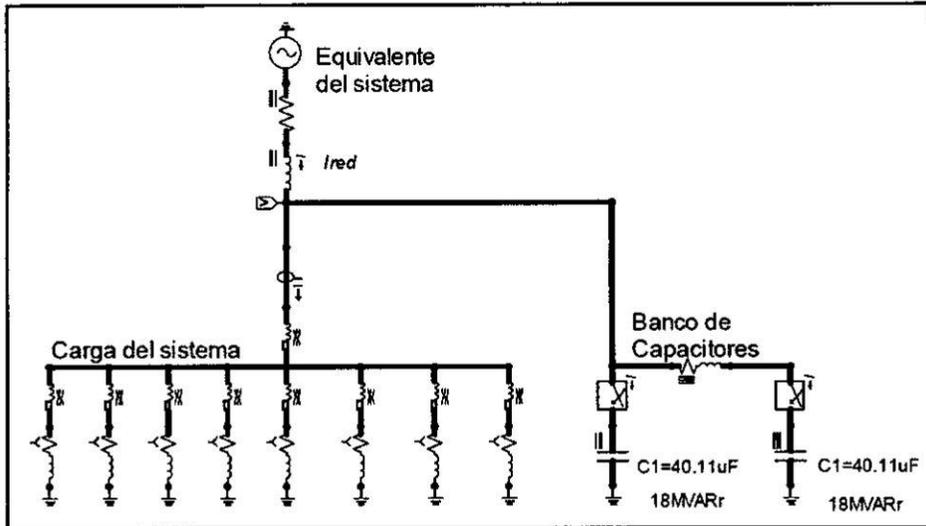


Fuente: IEEE Std 1159-2009-Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality

Un transitorio con una frecuencia inferior a 5 kHz, y una duración de 0,3 ms a 50 ms, se considera un transitorio de baja frecuencia [12]. Sucede en los niveles de subtransmisión y distribución y en los sistemas industriales y es causado por diversos tipos de eventos. (Véase en la FIGURA N° 2.4, en la página 28) simulación de un sistema convencional. El más frecuente es la energización de bancos de condensadores que hacen oscilar la tensión con una frecuencia primaria entre 300 y 900 Hz. La magnitud pico observada normalmente es de 1,3 -1,5 p.u. con una duración entre 0,5 y 3 ciclos dependiendo del amortiguamiento del sistema [12] (véase en la FIGURA N° 2.5, en la página 28).

FIGURA N° 2.4

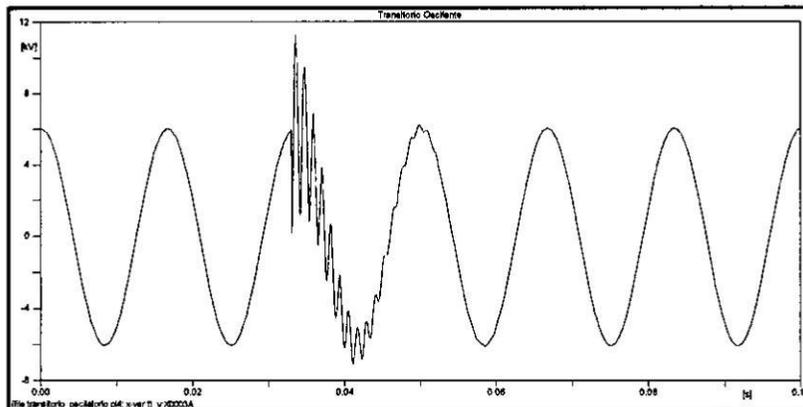
SIMULACIÓN DE UN SISTEMA INDUSTRIAL CONVENCIONAL.



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA N° 2.5

TRANSITORIO EN LA TENSIÓN, DEBIDO A LA CONEXIÓN DEL BANCO DE CONDENSADORES.



Fuente: Elaboración Propia

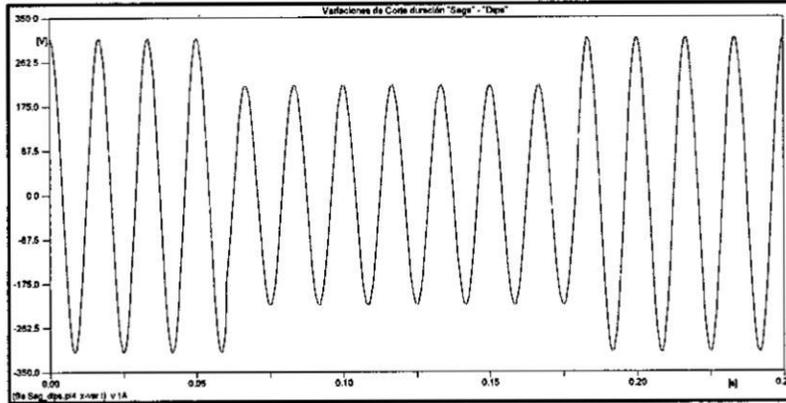
2.4.2 Variaciones de corta duración

Las variaciones de tensión presentan una duración típica de 0,5 a 1 minuto, se subdividen en instantáneas, momentáneas o temporales dependiendo de la duración del fenómeno. Estas variaciones de tensión son generalmente causadas por fallas en el sistema eléctrico, energización de grandes cargas, las cuales requieren altas corrientes de arranque, o por fallas en las conexiones del sistema. Dependiendo del lugar de la falla y de las condiciones del sistema, la falla puede causar tanto una disminución de la tensión, como una elevación de la misma, o tal vez una interrupción completa del sistema eléctrico [21].

a. Depresiones

La IEEE nombra a este tipo de fenómenos como "sags" y la IEC como "dips". Consiste en un descenso de la tensión entre un 90% y un 10% de su valor nominal, con una duración de con 0,5 ciclo a un minuto. Las depresiones de tensión son normalmente asociadas a fallas del sistema (Véase la FIGURA N° 2.6, en la página 30), a la energización de grandes cargas, al arranque de motores de elevada potencia y a la energización de transformadores de potencia. Los efectos nocivos de las depresiones de tensión dependen de su duración y de su profundidad, estando relacionados con la desconexión de equipos de cómputo, PLC, contactores entre otros dispositivos. Existen diferentes maneras para mitigar los efectos de los sags. La primera consiste en estabilizar la señal de tensión a través de acondicionadores de red, los cuales existen con diferentes principios y tecnologías.

FIGURA N° 2.6
DEPRESIÓN DE TENSIÓN DEL 30% ORIGINADO POR UNA FALLA
FASE A TIERRA.



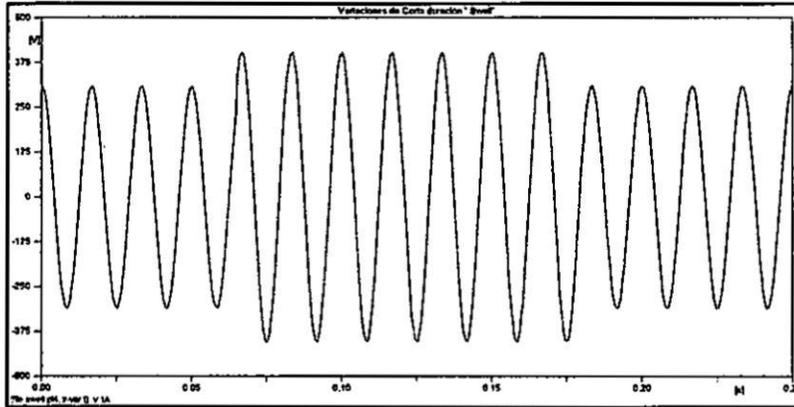
Fuente: Elaboración Propia

b. Sobretensiones momentáneas

Esta elevación de tensión tiene un rango entre un 110% y un 180% de su valor nominal, con una duración de 0,5 ciclo a un minuto, la sobretensión momentánea es conocida como "swell", así como los huecos las elevaciones de tensión están asociadas con las condiciones de falla en el sistema, principalmente los cortocircuitos fase-tierra, puestos que en estas condiciones las fases son defectuosas, tienden a ofrecer una elevación de tensión [14] (Véase la FIGURA N° 2.7, en la página 31). También pueden ser causadas por la desconexión de grandes cargas o la energización de grandes bancos de condensadores.

Una de las consecuencias de estas sobretensiones es el daño que pueden causar a los equipos electrónicos ya que pueden dañar a los componentes internos lo que trae como consecuencia la falla en operación o la inoperatividad del equipo.

FIGURA N° 2.7
SOBRETENSIÓN MOMENTÁNEA ORIGINADA POR UNA FALLA FASE
A TIERRA.



Fuente: Elaboración Propia

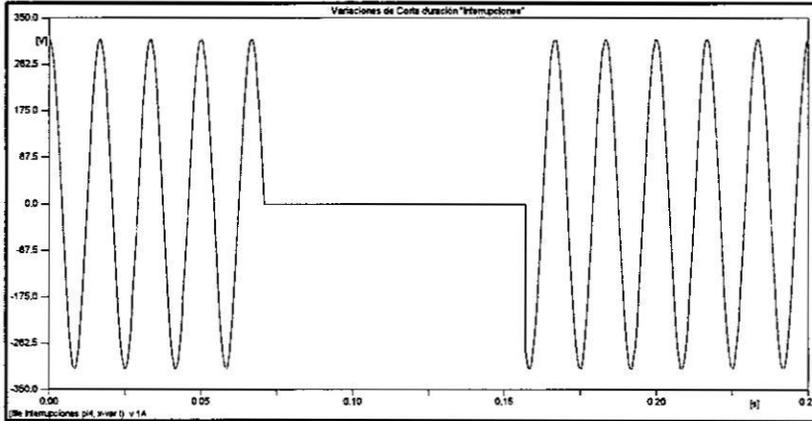
c. Interrupciones

Una interrupción ocurre cuando existe un descenso de tensión por debajo de un 10% de su valor nominal, por un período de tiempo que no excede un minuto.

Las interrupciones pueden ser el resultado de fallas en el sistema eléctrico de potencia, equipos averiados y mal funcionamiento de los sistemas de control. El recierre instantáneo es generalmente quien limita esta interrupción causada por una falla no permanente a menos de 30 ciclos. Generalmente la duración de las interrupciones debidas a fallas en el sistema viene determinada por el tiempo de respuesta y recierre de las protecciones [21]. (Véase la FIGURA N° 2.8, en la página 32).

FIGURA N° 2.8

INTERRUPCIÓN MOMENTÁNEA DEBIDO A UN CORTO CIRCUITO.



Fuente: Elaboración Propia

2.4.3 Variaciones de larga duración

Una variación de tensión se considera de larga duración cuando excede el límite establecido por la norma ANSI C84.1 por más de un minuto. La norma ANSI C84.1 especifica las tolerancias en la tensión de estado estable en un sistema de potencia. Debe prestarse atención a los valores fuera de estos rangos. Generalmente estas variaciones no son originadas por fallas en las líneas, sino que son originados por las variaciones de grandes cargas y por operación de reconexión en el sistema eléctrico.

a. Sobretensiones

Es el incremento de la tensión a un nivel superior al 110% de su valor nominal durante más de un minuto. Las sobretensiones son causadas por la desconexión de grandes cargas o a fallas en la regulación del sistema (La incorrecta selección del TAP en los transformadores ocasiona sobretensión en el sistema.). Algunas veces, especialmente durante condiciones de baja carga, los bancos de condensadores pueden sobrecompensar y crear una sobretensión que dura desde unos pocos segundos hasta muchas horas.

b. Subtensiones

Es una reducción más allá del 90% de la tensión nominal durante más de un minuto. Las subtensiones son ocasionadas por la conexión de grandes cargas, la desconexión de un banco de condensadores (esto genera un exceso en el transporte de reactivos transportado por los circuitos, por ende incrementa la caída de tensión) y se mantienen hasta que el sistema de regulación lleva la tensión a su nivel de referencia. Dentro de los problemas causados por la caída de tensión tenemos:

- Limitación de la potencia reactiva suministrada por los bancos de condensadores al sistema.
- Interrupción de la operación de equipos electrónicos más comunes como computadores y controladores electrónicos.
- Reducción de la iluminación en el sistema eléctrico.

c. Interrupciones mantenidas

Se considera una interrupción mantenida cuando la ausencia de tensión se manifiesta por un período superior a un minuto. Este tipo de interrupciones frecuentemente son permanentes y requieren la intervención especializada para restablecer el sistema.

Las interrupciones mantenidas suelen aparecer de forma inesperada o planeada, los casos más típicos de interrupciones inesperadas son la falla en los interruptores, quema de los fusibles o fallas de los componentes del circuito alimentador. Las interrupciones planeadas tienen por finalidad el mantenimiento en la red eléctrica.

Lo que se espera frente a estas interrupciones es que:

- El número de interrupciones sea mínimo.
- La interrupción dure el menor tiempo posible.
- El número de consumidores que se afecten mediante esta interrupción de energía sea mínimo.

2.4.4 Desequilibrio de la tensión

El desequilibrio de Tensiones en un sistema eléctrico aparecen cuando las tensiones entre las tres líneas no son iguales y puede ser definido como la desviación máxima respecto al valor promedio de las tensiones de línea, dividida entre el promedio de las tensiones de línea, expresado en porcentaje. El desbalance también puede ser definido usando componentes simétricas como la relación de la componente de secuencia cero o la componente de secuencia negativa entre la componente de secuencia positiva, expresada en porcentaje. Las causas más comunes del desequilibrio de tensiones son las cargas monofásicas conectadas en circuitos trifásicos, los transformadores conectados en delta abierto, fallas de aislamiento en conductores no detectadas. Se recomienda que el desequilibrio de tensiones sea menor al 2% [12].

2.4.5 Distorsión de las formas de onda

La distorsión de la forma de onda es una desviación estable del comportamiento idealmente sinusoidal de la tensión o la corriente a la frecuencia fundamental del sistema de potencia. Esto puede ser ocasionado por los armónicos, en general existen seis tipos elementales de distorsión de la forma de onda, y son:

- Armónicos
- Interarmónicos
- Subarmónicos
- Microcortes
- Componente en DC
- Ruido de alta frecuencia.

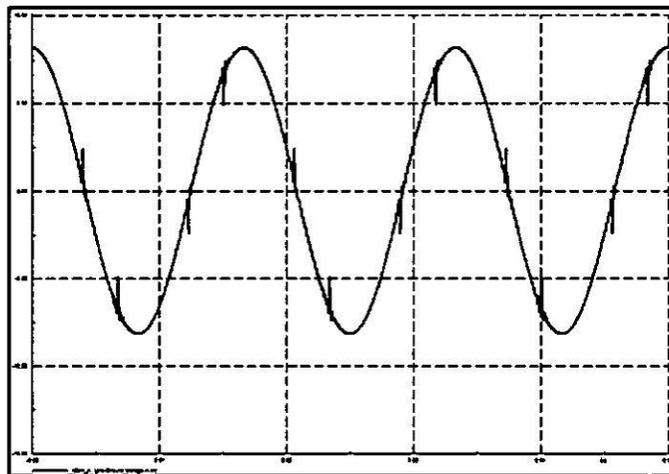
Como los tres primeros se definirán en el siguiente capítulo, entonces definiremos los tres últimos:

a. Microcortes

Conocidas también como hendiduras, las muescas son perturbaciones periódicas en la forma de onda de tensión, causadas por la conmutación de la corriente entre las fases de los convertidores estáticos conectados a la red. También llamado "notch", su duración suele ser de unas centenas de microsegundos. La implementación de reactancias inductivas también puede servir como solución, para mitigar el efecto de las muescas. (Véase la FIGURA N° 2.9).

FIGURA N° 2.9

EJEMPLO DE MUESCAS DE TENSIÓN CAUSADO POR EL FUNCIONAMIENTO DE UN CONVERTIDOR.



Fuente: Elaboración Propia

b. Componentes de continua

La presencia de tensión o corriente DC en un sistema eléctrico de corriente AC es denominado "DC offset". Esto puede ocurrir debido al efecto de la rectificación de media onda. El nivel de continua en redes de corriente alterna produce efectos perjudiciales al polarizar los núcleos de los transformadores de forma que se saturan en operación normal causando el calentamiento y la pérdida de vida útil en estos equipos. A su vez La corriente directa puede ser una causa del aumento de la corrosión en los electrodos de puesta a tierra, en conductores y conectores [12].

c. Ruido de alta frecuencia

Se define como una señal eléctrica indeseable con un espectro cuya frecuencia suele ser inferior a 200KHz superpuestos a la tensión o a la corriente del sistema en los conductores de las fases o en los conductores neutros.

Los ruidos suelen ser causador por dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de arco, rectificadores de estado sólido y fuentes conmutadas.

La amplitud común del ruido es menor que 1% de la tensión fundamental, los mismos que pueden causar problemas en equipos electrónicos tales como, microcomputadores y controladores programables [21].

2.4.6 Fluctuaciones de la tensión

Las fluctuaciones de tensión vienen a ser variaciones sistemáticas de la tensión entre 95 y 105% de su valor nominal, rangos de tensión especificados por la norma ANSI C84.1. Entre las más comunes encontramos:

a. Fluctuaciones Aleatorias

Una de las causas más comunes de las fluctuaciones de tensión en los sistemas de transmisión y distribución son los hornos de arco, estas oscilaciones dependen mucho del funcionamiento y del nivel de corto circuito que tenga la instalación.

b. Fluctuaciones repetitivas

Las principales fuentes que generan estas fluctuaciones son: máquinas de soldar, elevadores de minas y ferrovías.

c. Fluctuaciones esporádicas

La fuente principal generadora de estas oscilaciones es el arranque de grandes motores.

El fenómeno "flicker" es el efecto más común provocado por las oscilaciones de tensión. Se define como "la impresión subjetiva de fluctuación de la luminancia", de acuerdo con la norma IEC 555-3 (1982), la cual establece que una caída brusca de tensión de un 3% es visible para el ojo humano y causará el centelleo de lámparas incandescentes [21]. EL flicker es el resultado de fluctuaciones rápidas de amplitud pequeña en la tensión de alimentación y que pueden ser provocadas principalmente por:

- Las variaciones fluctuantes de potencia que absorben cargas como maquinas soldadoras, hornos de arco eléctrico, motores eléctricos, etc.
- Energización o desertización de motores eléctricos, bancos de condensadores etc.

2.4.7 Variaciones de la frecuencia

Es una desviación de la frecuencia fundamental del sistema de su valor nominal especificado. Estas variaciones en la frecuencia suelen ser debidas a desequilibrios bruscos entre la producción y la carga, y son más importantes en sistemas débiles o aislados.

La frecuencia está directamente relacionada con la velocidad de rotación de los generadores que componen el sistema. Normalmente existen ligeras variaciones de frecuencia debido a la fluctuación del balance entre la generación y la demanda de potencia de un sistema. (Véase la TABLA N° 2.10, en la página 38).

TABLA N° 2.10
CATEGORÍAS Y CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LOS FENÓMENOS
ELECTROMAGNÉTICOS.

1	Transitorios			
1.1	Impulsionales			
1.1.1	Nanosegundos	5ns	< 50ns	
1.1.2	Microsegundos	1us	50ns – 1ms	
1.2.3	Milisegundos	0.1ms	> 1ms	
1.2	Oscilatorios			
1.2.1	Baja frecuencia	<5 kHz	0.3 – 50ms	0 – 4 pu
1.2.2	Media frecuencia	5-500 kHz	20us	0 – 8 pu
1.2.3	Alta frecuencia	0.5 – 5 MHz	5us	0 – 4 pu
2	Variaciones de tensión de corta duración			
2.1	Instantáneos			
2.1.1	Sags		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
2.1.2	Swell		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2	Momentáneas			
2.2.1	Interrupciones		0.5 ciclos – 3s	< 0.1 pu
2.2.2	Sags		30 ciclos – 3s	0.1 – 0.9 pu
2.2.3	Swell		30 ciclos – 3s	1.1 – 1.4 pu
2.3	Temporales			
2.3.1	Interrupciones		>3s – 1min	< 0.1 pu
2.3.2	Sags		>3s – 1min	0.1 – 0.9 pu
2.3.3	Swell		>3s – 1min	1.1 – 1.2 pu
3	Variaciones de tensión de larga duración			
3.1	Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2	Sobretension sostenida		> 1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3	Subtension sostenida		> 1 min	1.1 – 1.2 pu
3.4	Corriente sobrecarga		> 1 min	
4	Desbalance			
4.1	Tensión		Estado estable	0.5 – 2%
4.2	Corriente		Estado estable	1.0 – 30%
5	Distorsión de la forma de onda			
5.1	DC offset		Estado estable	0 – 0.1%
5.2	Armónicos	0 – 9 kHz	Estado estable	0 – 20%
5.3	Interarmónicos	0 – 9kHz	Estado estable	0 – 2%
5.4	Notching		Estado estable	
5.5	Ruido	Ancho de banda	Estado estable	0 – 1 %
6	Desequilibrio de tensión	< 25 Hz	Intermitente	0.1 – 7%
7	Variación de la frecuencia del sistema		< 10 s	+/- 0.10 Hz

Fuente: IEEE Std 1159-2009-Recommended Practice for Monitoring
Electric Power Quality.

2.5 Armónicos en los Sistemas de Potencia

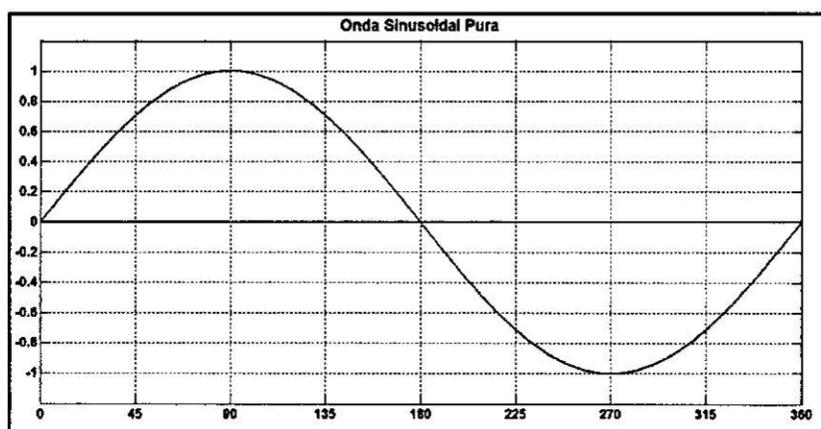
2.5.1 Origen de los armónicos

La tensión como la corriente en un sistema de suministro eléctrico debe presentar formas de ondas sinusoidales. En la práctica no es así ya que estas formas de ondas se encuentran distorsionadas, expresando su desviación con respecto a la forma ideal en términos de distorsión armónica. En sistemas eléctricos de potencia un armónico se define " una forma de onda sinusoidal que tiene una frecuencia que es un múltiplo entero de una frecuencia fundamental". Generalmente se presentan la superposición de varias ondas de diferentes órdenes armónicos a la vez, resultando de este un espectro y dando una onda totalmente distorsionada como resultado.

Para comprender mejor el concepto de armónicos, es necesario distinguir la diferencia entre una carga lineal y no lineal. Las cargas lineales son aquellas que tienen una impedancia constante, por ende si nosotros aplicamos una tensión sinusoidal, la corriente también será sinusoidal, entre las cargas lineales tenemos las inductancias, los condensadores y las resistencias (Véase la FIGURA N° 2.10).

FIGURA N° 2.10

ONDA SINUSOIDAL SIN PERTURBACIONES ARMÓNICAS.

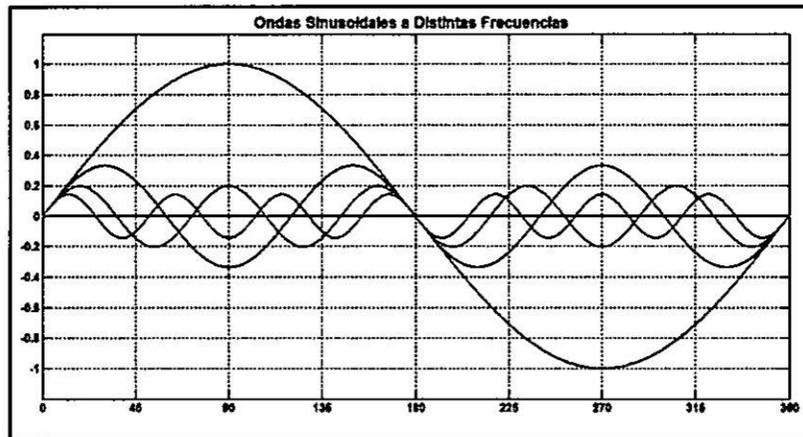


Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado las cargas no lineales son aquellas que tienen una impedancia que no es constante tal que al aplicar una señal de tensión sinusoidal absorben una corriente no sinusoidal, si la carga demandase una corriente no sinusoidal muy fuerte esta es capaz de deformar la onda de tensión sinusoidal, entre las cargas no lineales tenemos las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia como por ejemplo: los variadores de velocidad, rectificadores conversores, etc. También podemos mencionar a los hornos de arco, reactancias saturables, equipos de soldadura, etc (Véase la FIGURA N° 2.11).

FIGURA N° 2.11

ONDA SINUSOIDAL A DISTINTAS FRECUENCIAS ARMÓNICAS.



Fuente: Elaboración Propia.

El crecimiento continuo de los sistemas eléctricos de distribución de potencia y la inclusión dentro de ellos de un mayor número de elementos no lineales, están contribuyendo al incremento de la presencia de formas de ondas no sinusoidales en el suministro de la energía eléctrica, las cuales esencialmente introducen una componente de pérdidas de energía y mal funcionamiento de equipos, por lo que su tratamiento dentro del estudio global del sistema, es de alta importancia.

2.5.2 Definición

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema (en el caso de Perú 60Hz).

El sistema eléctrico en nuestro país así como las cargas conectadas a él, han sido diseñados para funcionar a la frecuencia de 60Hz con tensiones y corrientes sinusoidales, pero por diferentes razones algunas siempre se presentan flujos de potencia a frecuencias distintas de la fundamentales así como se define a 60Hz como la frecuencia fundamental y las otras como componentes armónicas del sistema eléctrico de potencia.

Las formas de onda distorsionadas se descomponen mediante la serie de Fourier, mediante la suma de una componente fundamental más las componentes armónicas.

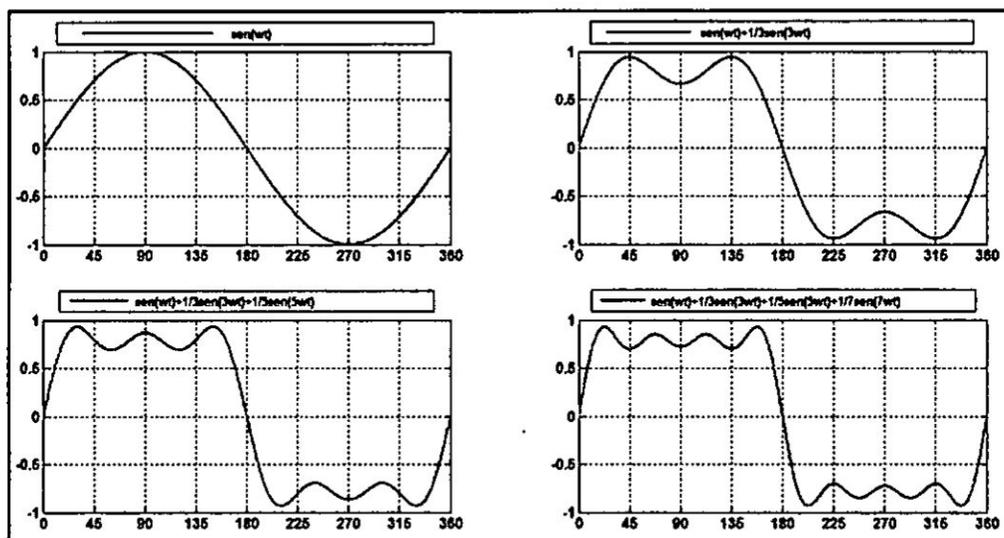
La distorsión armónica se origina por la característica no lineal de las cargas en los sistemas eléctricos de potencia. El nivel de distorsión armónica se determina por el espectro total armónico mediante las magnitudes y el ángulo de fase de cada componente individual.

Es común, además, utilizar un criterio denominado distorsión total armónica (THD) como una medida de la distorsión.

A continuación se podrán observar la distorsión de las formas de onda más comunes en el sistema eléctrico, también podemos notar que mientras mayor sea la presencia de armónicos la forma de onda tiende a ser más cuadrada; las gráficas fueron realizadas con la ayuda del programa Matlab-2014 (véase en la FIGURA N° 2.12, en la página 42).

FIGURA N° 2.12

FORMAS DE ONDAS ARMÓNICAS.



Fuente: Elaboración propia

2.5.3 Clasificación de armónicos

Los armónicos se pueden clasificar según su secuencia, y si son armónicos característicos o no característicos.

A. Según su secuencia

Para los sistemas trifásicos balanceados en condiciones normales, las ondas de corriente o tensión tienen un desfase entre sí de 120° , y su secuencia de fases es positiva (A, B, C). Los armónicos de cada una de las fases, dado que su frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental, presentan unos ángulos de desfase diferentes a las formas de onda fundamentales, por lo cual estos pueden presentar diferentes secuencias de fase [18].

Dado un sistema trifásico en el cual las ondas fundamentales forman un sistema balanceado y las tres fases tienen la misma forma de onda podemos realizar el siguiente análisis.

Si tomamos como referencia la componente fundamental de la fase A, tenemos que las componentes fundamentales las están dadas por:

$$V_A = A\angle 0^\circ \quad V_B = A\angle 0^\circ \quad V_C = A\angle 0^\circ \quad (2.5)$$

Donde:

A: Amplitud de la componente fundamental.

Para el armónico de orden k su desfase φ_k respecto a la fundamental es igual para las tres fases, esto es indispensable para que las formas de onda sean iguales. Por lo tanto las componentes armónicas de orden k están dadas por [18]:

$$V_{Ak} = A_k\angle\varphi_k \quad V_{Bk} = A_k\angle(\varphi_k + \varphi_{AB}) \quad V_{Ck} = A_k\angle(\varphi_k + \varphi_{AC}) \quad (2.6)$$

Donde:

A_k : Amplitud de la componente fundamental.

φ_{AB} : Ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y B expresado en grados del armónico k.

φ_{AC} : Ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y C expresado en grados del armónico k.

Un periodo de la componente fundamental es igual a k periodos del armónico de orden k, lo cual permite expresar en grados del armónico k los desfases dados en grados de la componente fundamental utilizando la ecuación [18]:

$$\varphi_k = k\varnothing \quad (2.7)$$

Donde:

φ_k : Angulo de desfase dado en grados del armónico k

\varnothing : Ángulo de desfase dado en grados de la componente fundamental

De donde se tiene que las componentes armónicas de orden k están dadas por:

$$V_{Ak} = A_k \angle \varphi_k \quad (2.8)$$

$$V_{Bk} = A_k \angle (\varphi_k + k(-120^\circ)) \quad (2.9)$$

$$V_{Ck} = A_k \angle (\varphi_k + k(120^\circ)) \quad (2.10)$$

A.1 Secuencia homopolar

En sistemas trifásicos, los armónicos de orden $3n$ de corriente solo se pueden propagar cuando es posible un retorno por neutro.

Para los armónicos de orden $3n$ (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n)} = A_{(3n)} \angle \varphi_{(3n)} \quad (2.11)$$

$$V_{B(3n)} = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n) * (-120^\circ))$$

$$V_{B(3n)} = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n * (-360^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)}) \quad (2.12)$$

$$V_{C(3n)} = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n) * (120^\circ))$$

$$V_{C(3n)} = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n * (360^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)}) \quad (2.13)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases se encuentran en fase entre sí, y por consiguiente, los armónicos de orden $3n$ son de secuencia cero.

A.2 Secuencia positiva

Los armónicos de orden $(3n + 1)$ en tensión generan en los motores un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental.

Para los armónicos de orden $(3n + 1)$ (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle \varphi_{(3n+1)} \quad (2.14)$$

$$V_{B(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n + 1) * (-120^\circ))$$

$$V_{B(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n * (-360^0) - 120^0)$$

$$V_{B(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} - 120^0) \quad (2.15)$$

$$V_{C(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n + 1) * (120^0))$$

$$V_{C(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n * (360^0) + 120^0)$$

$$V_{C(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + 120^0) \quad (2.16)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de 120° con la misma secuencia seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden (3n + 1) son de secuencia positiva [18].

A.3 Secuencia negativa

Llamados de secuencia inversa o segundas armónicas, son los que hacen de freno al girar a la inversa se oponen al campo de frecuencia fundamental, estos armónicos son los que producen el sobrecalentamiento de los motores aunque se aprovechan estas características para frenar motores inyectando corriente continua [14].

Para los armónicos de orden (3n - 1) (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle \varphi_{(3n-1)} \quad (2.17)$$

$$V_{B(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n - 1) * (-120^0))$$

$$V_{B(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (-360^0) + 120^0)$$

$$V_{B(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + 120^0) \quad (2.18)$$

$$V_{C(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n - 1) * (120^0))$$

$$V_{B(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (360^0) - 120^0)$$

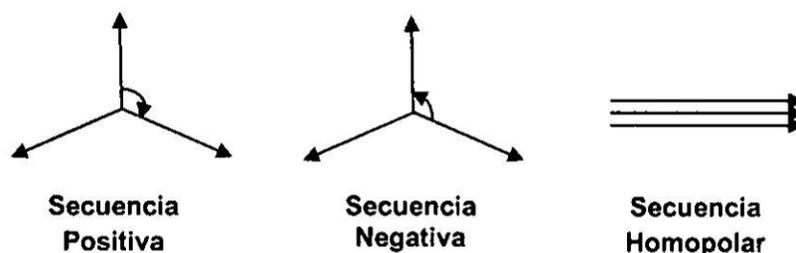
$$V_{B(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} - 120^0) \quad (2.19)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de 120° con una secuencia contraria a la seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden $(3n - 1)$ son de secuencia negativa (Véase la TABLA N° 2.11).

TABLA N° 2.11

MUESTRA LA REGLA QUE SIGUE LA SECUENCIA DE FASES DE LOS DIFERENTES ARMÓNICOS.

ARMONICOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SECUENCIA	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+



Fuente: Elaboración propia.

B. Armónicos característicos

B.1. Armónicos impares

Son los armónicos que tiene mayor presencia (mayor amplitud) en los diferentes espectros de armónicos ya sean de tensión o de corriente.

C. Armónicos no característicos

Se clasifican en armónicos pares, interarmónicos y Subarmónicos.

C.1. Armónicos pares

También llamados armónicos de orden par, por lo general no se presentan a menudo por lo que casi en todo el análisis armónico se analizan los armónicos impares, Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares.

C.2. Interarmónicos

Se llaman interarmónicos a las tensiones o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual trabaja el sistema. Los interarmónicos se pueden encontrar en redes de todas las clases de tensiones. Las principales fuentes de interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, los cicloconvertidores, los motores asíncronos y los dispositivos de arco. Efectos de calentamientos, similares a los producidos por los armónicos, son causados por los interarmónicos. Debido a que los interarmónicos son fuentes de son fuentes de las fluctuaciones de tensión, se presenta alto riesgo de la generación de flicker.

C.3. Subarmónicos

Si la frecuencia de la señal eléctrica es inferior a la fundamental, recibe el nombre de subarmónico, ésta podría ocasionar parpadeos luminosos, perceptibles visualmente, denominados Flícker [21].

Los Subarmónicos de muy baja frecuencia (aunque tengan una amplitud muy pequeña) pueden ocasionar grandes corrientes inductivas.

2.5.4 Análisis de Fourier

Cuando el matemático francés J.B.J. Fourier (1758-1830) estudiaba los problemas del flujo del calor (las aplicaciones eléctricas eran escasas en 1822), por ello demostró que las funciones periódicas arbitrarias se podían representar mediante una serie infinita de frecuencias sinusoidales armónicamente relacionadas. Siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.

- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Existen un gran número de formas de onda de tensión y de corriente, los cuales pueden describirse mediante una sola ecuación:

$$Y = f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.20)$$

La cual podemos desarrollar de la forma:

$$Y = f(t) = a_0 + a_1 \cos (\omega t) + a_2 \cos (2\omega t) + \dots + a_n \cos (n\omega t) + b_1 \sin (\omega t) + b_2 \sin (2\omega t) + \dots + b_n \sin (n\omega t) \quad (2.21)$$

Donde:

- $a_0, a_1, a_2 \dots a_n$ y $b_0, b_1, b_2 \dots b_n$ son constantes conocidas como coeficientes de Fourier.
- $\omega = 2\pi f_0$, es la frecuencia angular fundamental la cual esta expresada en rad/seg.
- f_0 Es la frecuencia fundamental expresada en Hz.
- t Es el tiempo en segundos.
- n Es el orden armónico, $n = 1,2,3,4$, etc.

Con el uso de las ecuaciones expuestas se pueden encontrar los armónicos de las ondas más comunes en los sistemas de potencia, de distribución o industriales (Véase LA TABLA N° 2.12, en la página 49).

TABLA N° 2.12

DESCOMPOSICIÓN ARMÓNICA DE LAS ONDAS MÁS COMUNES.

Onda seno	$Y = a \text{ sen}\theta$
Rectificación de media onda	$Y = \frac{a}{\pi} + 0.5\text{sen}\theta - \left(\frac{2}{1.3}\right)\text{cos}2\theta - \left(\frac{2}{3.5\pi}\right)\text{cos}4\theta \dots$
Rectificación de onda completa	$Y = \frac{2a}{\pi} + \left(\frac{2}{1.3}\right)\text{cos}2\theta - \left(\frac{2}{3.5\pi}\right)\text{cos}4\theta - \left(\frac{2}{5.7}\right)\text{cos}6\theta \dots \dots$
Rectificación de M fases	$Y = \left(\frac{am}{\pi}\right)\text{sen}\frac{\pi\theta}{m} + \left(\frac{2}{m^2-1}\right)\text{cos}m\theta - \left(\frac{2}{4m^2-1}\right)\text{cos}2\theta + \left(\frac{2}{9m^2-1}\right)\text{cos}3m\theta \dots \dots$
Onda triangular	$Y = \left(\frac{8a}{\pi^2}\right)\left[\text{sen}\theta - \left(\frac{1}{9}\right)\text{sen}3\theta + \left(\frac{1}{25}\right)\text{sen}5\theta + \left(\frac{1}{49}\right)\text{sen}7\theta \dots \dots\right]$
Onda rectangular	$Y = \left(\frac{4a}{\pi}\right)\left[\text{sen}\theta - \left(\frac{1}{3}\right)\text{sen}3\theta + \left(\frac{1}{5}\right)\text{sen}5\theta + \left(\frac{1}{7}\right)\text{sen}7\theta \dots \dots\right]$
Onda de tres niveles	$Y = \left(\frac{3.4641a}{\pi}\right)\left[\text{cos}\theta - \left(\frac{1}{5}\right)\text{cos}5\theta + \left(\frac{1}{7}\right)\text{cos}5\theta + \left(\frac{1}{11}\right)\text{sen}11\theta \dots \dots\right]$

Fuente: Elaboración propia.

2.5.5 Fuentes principales de armónicas:

Los armónicos como detallamos anteriormente son el resultado de cargas no lineales, las cuales ante una señal de tipo sinusoidal presentan una respuesta no sinusoidal.

a. Transformadores

Cuando se incluye el efecto de las perdidas por histéresis en un transformador de potencia, esta corriente de magnetización no sinusoidal no llega a ser simétrica respecto a su valor máximo. La distorsión que se observa se debe a las armónicas de tercer orden (3°, 9°, 12°, etc.), la de mayor abundancia es la de tercer orden. Para mantener una alimentación de tensión sinusoidal es necesario proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples, esto se logra gracias a la conexión en delta de los transformadores. A su vez La corriente Inrush de los transformadores produce segundo y cuarto armónico.

b. Motores

Las pequeñas maquinas síncronas son sin embargo generadoras de tensiones armónicas de tercer orden que pueden tener una incidencia sobre el calentamiento permanente de las resistencias de puesta a tierra del neutro de los alternadores [2].

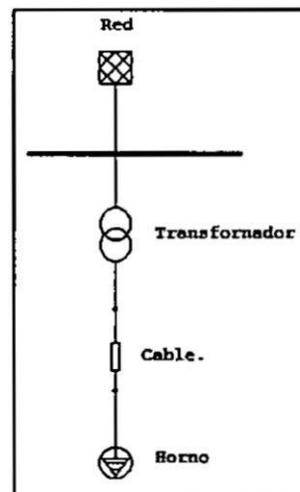
c. Hornos de arco

Los hornos de arco representan una fuente armónica de gran capacidad, inyectando armónicas de corriente de orden 2th, 3th, 4th, 5th y 7th. Los hornos de arco se utilizan comúnmente en siderurgia y pueden ser de corriente alterna o continua.

- **Horno de arco de corriente alterna:** El arco no es lineal, asimétrico e inestable, induce espectros que contienen bandas impares, pares y una componente continua (ruidos de fondo a una frecuencia cualquiera) [2] (Véase la FIGURA N° 2.13).

FIGURA N° 2.13

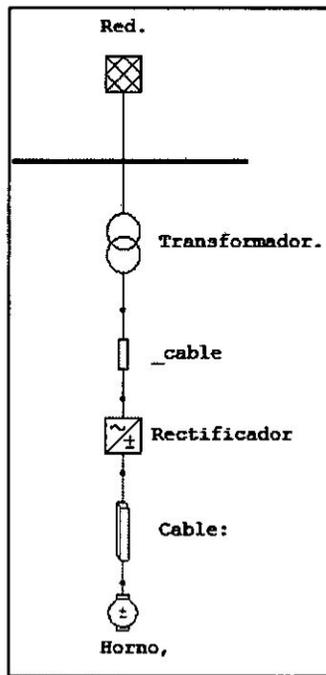
CASO DE UN HORNO DE ARCO ALIMENTADO CON CORRIENTE ALTERNA.



Fuente: Elaboración propia.

- **Horno de arco de corriente continua:** El horno de arco en continua, se alimenta por medio de un rectificador [16] (Véase la FIGURA N° 2.14). El arco es más estable que en corriente alterna y la corriente absorbida se descompone en:
- Un espectro parecido al de un rectificador
 - Un espectro continuo de nivel inferior al de un horno de corriente alterna.

FIGURA N° 2.14
CASO DE UN HORNO DE ARCO ALIMENTADO CON CORRIENTE CONTINUA.



Fuente: Elaboración propia.

d. Alumbrado

El alumbrado con lámparas de descarga y tubos fluorescentes es generador de corrientes armónicas. El índice de distorsión individual del 3th puede sobrepasar el 100% para ciertas lámparas fluocompactas modernas, y por lo tanto hay que prestar una atención especial en el cálculo de la

sección y la protección del neutro que transporta la suma de las corrientes armónicas de 3er rango de las tres fases lo que implica un riesgo de calentamiento [2].

e. Hornos de inducción

Los hornos de inducción son utilizados en la industria manufacturera.

La producción de calor mediante inducción electromagnética es un método eficiente y sin contacto, aplicable a las transformaciones metálicas. Este horno consiste de un rectificador y un inversor, el cual controla la frecuencia de alimentación de una bobina. De esta manera la bobina mediante la inducción hace que se calienten las piezas metálicas las cuales alcanzan temperaturas muy altas y después pasan a ser moldeadas [21].

f. Inductancias saturables

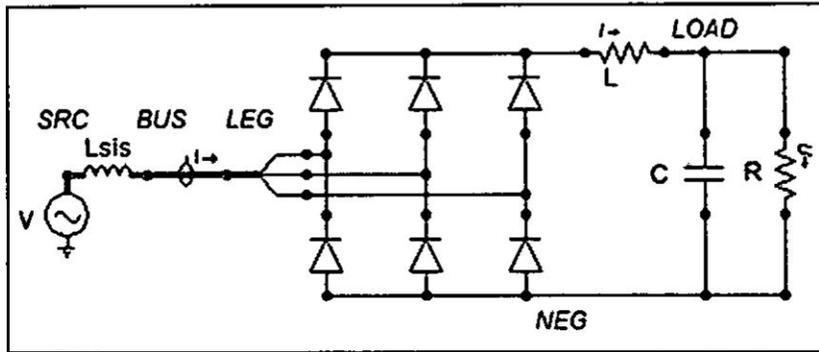
La impedancia de estas inductancias depende de la amplitud de la corriente que las atraviesa y de hecho ellas mismas provocan deformaciones importantes en esta corriente. Este es el caso en cierta medida de los transformadores en vacío sometidos a una sobretensión permanente [2].

g. Convertidores estáticos trifásicos

Los puentes rectificadores y en general los convertidores estáticos (diodos y tiristores) son generadores de corrientes armónicas. Así en un puente de Graetz, la corriente continua consumida hace aparecer una corriente no sinusoidal, que cuando la carga es muy inductiva tiene forma escalonada, o que tiene unos picos cuando al puente de diodo le sigue un condensador (véase FIGURA N° 2.15, en la página 53).

FIGURA N° 2.15

CIRCUITO DE UN CONVERTIDOR ESTÁTICO TRIFÁSICO.



Fuente: Elaboración Propia.

Los componentes de armónicas características de la corriente de alimentación de los rectificadores son de orden n .

Donde:

$$n = (k * p) \pm 1$$

$$k = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$$

p = número de ramas del rectificador, por ejemplo:

- puente de Graetz $p=6$
- puente hexafásico $p=6$
- puente dodecafásico $p=12$

g.1) Controladores de motores de DC: Genera una contaminación armónica igual que un rectificador de 6 pulsos. Este tipo de control se utiliza en los trenes eléctricos.

g.2) Controladores de motores de AC: También son usados en la industria, Los motores de inducción trifásicos son los encontrados más frecuentemente. Los motores de AC, son empleados en aplicaciones de alta velocidad como son, bombas compresores y ventiladores, estos motores típicamente operan a velocidades de 1200, 1800 y 3600 rpm o más. La velocidad de un motor de AC, es usualmente controlada por ajuste en el tensión o en la frecuencia [21]. El controlador consiste de un rectificador y un inversor enlazados en la parte intermedia por un

condensador (véase en la FIGURA N° 2.14, en la página 51), este tipo de convertidor controlado es conocido como convertidor "enlace DC".

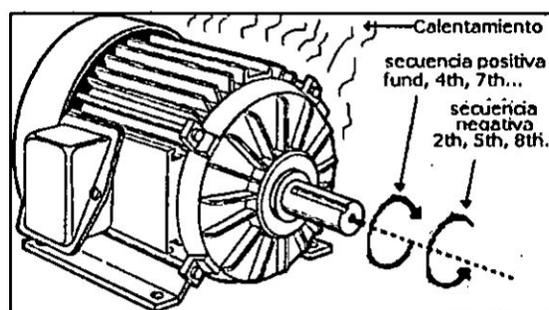
2.5.6 Efectos de los armónicos

a. Efectos sobre las maquinas rotativas

El efecto que produce los armónicos en los motores es similar al de las corrientes de secuencia negativa. Las pérdidas en los conductores del motor son más grandes que las pérdidas asociadas con la resistencia DC generadas por las corrientes de Eddy y el efecto piel. Dichas pérdidas son el efecto más importante de los armónicos sobre los motores ya que disminuye la eficiencia, y aumenta el calentamiento. Estos armónicos inducen una f.e.m. (fuerza electromotriz) en el estator a una frecuencia igual al cociente de la velocidad entre la longitud de onda. La vibración y el ruido son los síntomas típicos de las maquinas rotativas cuando se tienen armónicos inmersos en ellas.

FIGURA N° 2.16

EFFECTOS DE ARMÓNICOS EN MAQUINAS ROTATIVAS



Fuente: Calidad de Energía. Tecsup

b. Efecto sobre los transformadores

Los armónicos incrementan las pérdidas debidas a las corrientes de Eddy, las cuales son inducidas al transformador a través de flujos magnéticos causando pérdidas adicionales que generan el calentamiento del transformador. A su vez las tensiones armónicas también incrementan el

desgaste sobre los aislamientos del transformador. Cuando se incluye el efecto de histéresis, la corriente de magnetización no sinusoidal no es simétrica con respecto a su valor máximo. La distorsión que puede apreciarse en los transformadores son los armónicos (3° , 9° , 12° , etc.), pero principalmente al 3° por lo que para mantener una alimentación de tensión es necesario proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples, lo que generalmente se logra con el uso de devanados conectados en delta [17].

c. Los armónicos y el efecto piel

El efecto piel es el fenómeno donde las corrientes alternas de alta frecuencia tienden a fluir cerca de la superficie más externa de un conductor. Esto se debe al hecho de que las concatenaciones de flujo no son de densidad constante a través del conductor, sino que tienden a decrecer cerca de la superficie más exterior, disminuyendo la inductancia e incrementando el flujo de corriente. El resultado neto del efecto pelicular es que el área transversal efectiva del conductor es reducida a medida que la frecuencia es incrementada. Mientras mayor es la frecuencia, menor es el área transversal y mayor es la resistencia AC [17].

d. Efectos sobre los sistemas de protección

Los armónicos son causantes de numerosos problemas de operación en los sistemas de protección. Entre ellos está la operación incorrecta de fusibles, de interruptores (breakers) y equipos y sistemas digitales de protección.

Para el caso de equipos protegidos contra sobretensión cuyos sistemas de protección también estén diseñados para operar con tensiones sinusoidales, estos consiguen operar incorrectamente ante la aparición de formas de onda no sinusoidales [17]. Esta operación incorrecta puede ir desde la sobreprotección del equipo hasta la desprotección del mismo por

la no operación ante una forma de onda que podría dañarlo de forma severa.

e. Efectos sobre los circuitos de comunicación

Las corrientes armónicas que fluyen por los sistemas de potencia pueden ocasionar interferencia en los circuitos de comunicación. Dichas corrientes se acoplan con los circuitos de comunicación mediante inducción ó conducción directa. Las tensiones inducidas en los conductores paralelos mediante los armónicos, frecuentemente caen dentro del ancho de banda de la comunicación telefónica, lo cual genera un problema perjudicial. Está en función del acoplamiento entre las líneas eléctricas y telefónicas; pero, la mayoría de las veces, es muy poco lo que se logra respecto al arreglo físico de los conductores. Sin embargo, este contenido de alta frecuencia muchas veces identifica blindajes abiertos en los circuitos telefónicos. Una vez que el blindaje se corrige, el ruido normalmente, se reduce en gran medida. Sin embargo, los nuevos sistemas de comunicación emplean conductores especiales y técnicas digitales para disminuir los efectos de los armónicos [17].

2.6 Resonancia

Este fenómeno se presenta en circuitos de corriente alterna que cuentan con componentes inductivos y capacitivos (RLC), y con los medios para transferir energía entre estos componentes. La resonancia armónica ocurre cuando la reactancia inductiva de un circuito es igual a la reactancia capacitiva.

Esta situación es positiva en aplicaciones con señales trabajando únicamente a la frecuencia fundamental de 60 Hz, ya que la corriente y la tensión están en fase y con un factor de potencia unitario. Sin embargo, deja de ser positivo en aplicaciones donde existen señales a frecuencias armónicas. Cuando se da resonancia armónica a frecuencias armónicas, la

corriente armónica alcanza un valor máximo y provoca el sobrecalentamiento de transformadores, condensadores y motores; el disparo de relés; lecturas erróneas de mediciones, etc.

La magnitud de la reactancia inductiva y capacitiva es dependiente de la frecuencia de la corriente y tensión. Esto se debe a que la reactancia inductiva se incrementa proporcionalmente a la frecuencia del sistema de potencia, y que la reactancia capacitiva disminuye proporcionalmente al aumento de la frecuencia del sistema de potencia, como se muestra en las siguientes ecuaciones 2.22 y 2.23:

$$\bar{X}_L = j2\pi fL \quad (2.22)$$

$$\bar{X}_C = \frac{1}{j2\pi fC} \quad (2.23)$$

Donde:

X_L = reactancia inductiva en ohms

X_C = reactancia capacitiva en ohms

f = frecuencia del sistema de potencia en Hz

C = componente capacitivo en faradios

L = componente inductivo en henrios

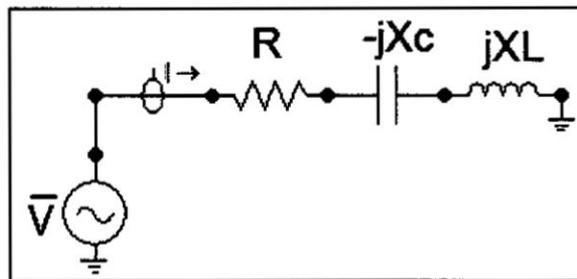
De esta manera, la resonancia puede ocurrir a varias frecuencias armónicas. A 60 Hz, las componentes capacitivas tienen una impedancia mucho mayor que las componentes inductivas.

La resonancia se puede dar tanto en serie como en paralelo. A continuación se analizan ambas situaciones.

A. Resonancia en serie.

Cada elemento del circuito se describe en términos de su impedancia. Las ecuaciones 2.24 y 2.33 expresan la impedancia equivalente y el flujo de corriente del circuito. Esta corriente entra en resonancia cuando la reactancia inductiva X_L es igual a la reactancia capacitiva X_C (véase FIGURA N° 2.17).

FIGURA N° 2.17
CIRCUITO SERIE



Fuente: Elaboración Propia

$$\bar{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad (2.24)$$

Ahora considerando para una armónica h

$$\bar{Z}(h) = R + j\left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right) \quad (2.25)$$

De modo que:

$$|\bar{Z}(h)| = \sqrt{R^2 + \left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right)^2} \quad (2.26)$$

Para la resonancia $h = h_r$ entonces:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.27)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.28)$$

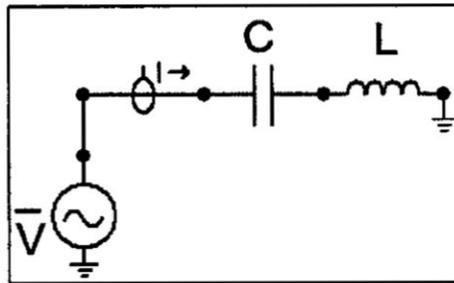
Donde:

f_r : Es la frecuencia de resonancia.

También puede expresarse en función de la potencia de cortocircuito en la red (S_{cc}), la potencia del banco de condensadores (Q_c) y la frecuencia fundamental (véase FIGURA N° 2.18).

FIGURA N° 2.18

CIRCUITO LC



Fuente: Elaboración Propia

La corriente de cortocircuito es:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{2\pi fL} \quad (2.29)$$

$$S_{cc} = V_{cc}I_{cc} = \frac{V_{cc}^2}{2\pi fL} \quad (2.30)$$

La potencia en el banco de condensadores es:

$$S_{cc} = V_{cc}I_{cc} = V_{cc}^2 \times 2\pi fC \quad (2.31)$$

Despejando los valores de L y C de las ecuaciones (2.30) y (2.31) respectivamente, y sustituyéndolos en la ecuación (2.28), se obtiene:

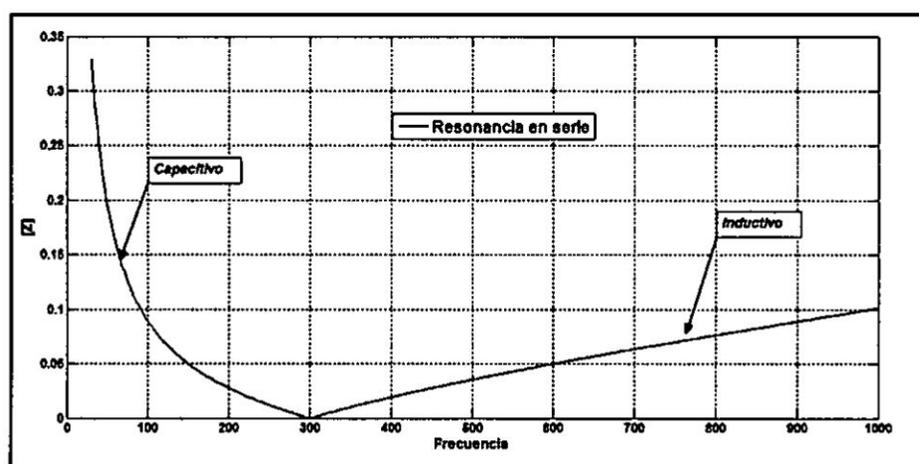
$$f_r = f \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}}, \text{ o } hr = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad (2.32)$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{R + j(X_L - X_C)} \quad (2.33)$$

Debido a que la magnitud de la resistencia en serie encontrada en equipos de potencia es relativamente baja, la magnitud de la corriente de la ecuación (2.33) puede ser grande al haber resonancia.

Se muestra un ejemplo de la gráfica de la impedancia equivalente (véase FIGURA N° 2.19) del circuito serie (véase FIGURA N° 2.18, en la página 59) en función de la frecuencia. De las ecuaciones (2.22) y (2.23) se observa que la impedancia es de carácter capacitiva a bajas frecuencias y toma carácter inductivo conforme aumenta la frecuencia., y que la resonancia ocurre a 420 Hz (a la séptima harmónica de un sistema a 60Hz).

FIGURA N° 2.19
GRAFICA DE RESONANCIA SERIE



Fuente: Elaboración Propia.

Una medida general de la forma de la gráfica de impedancia se da en términos del factor de calidad Q (véase FIGURA N° 2.19). Para un circuito de resonancia en serie, el valor de Q está definido para cualquier frecuencia angular ω por la ecuación (2.34).

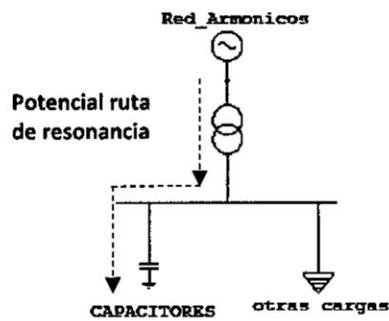
$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (2.34)$$

En general se dice que un valor alto de Q, genera una gráfica de impedancia con una caída más pronunciada, mientras que un valor bajo de Q genera una gráfica con una caída más redondeada. En varios casos, este parámetro juega un papel importante en el diseño de filtros debido a que la mayoría de filtros de armónicos de sintonización única son simples circuitos RLC resonantes en serie.

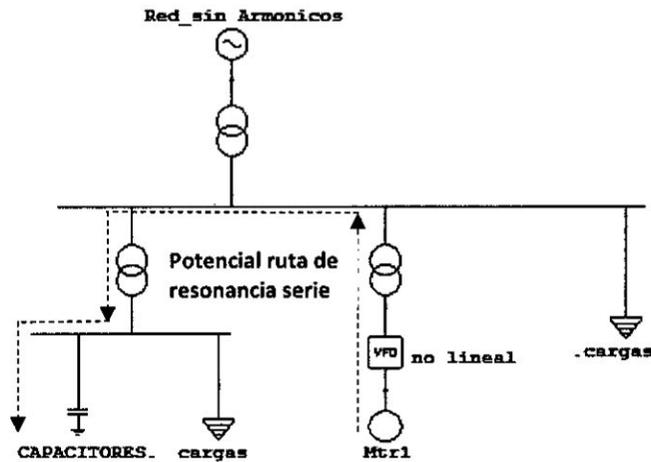
Se muestran situaciones típicas en donde la resonancia en serie puede dar un problema (véase en la FIGURA N° 2.20).

FIGURA N° 2.20

SITUACIONES TÍPICAS EN DONDE LA RESONANCIA EN SERIE PUEDE DAR UN PROBLEMA.



A.- suministro de la red con armónicos



B.-Armónicos en Sistema eléctrico

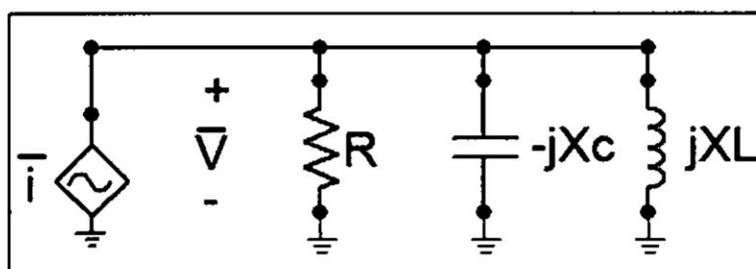
Fuente: Elaboración Propia.

Esta combinación de transformadores y condensadores puede actuar como un filtro de forma inadvertida, permitiendo el flujo de corrientes armónicas hacia el banco de condensadores a la frecuencia resonante o cerca. Si no es tomado en consideración, estas corrientes pueden provocar el disparo de fusibles, operación involuntaria de disyuntores y reducción de la vida útil de los condensadores y transformadores.

B. Resonancia en paralelo.

Existen varias formas de circuitos resonantes en paralelo, de forma general, un inductor debe estar en paralelo con un capacitor para producir resonancia en paralelo. Se muestra un circuito resonante en paralelo típicamente encontrado en sistemas de potencia (véase FIGURA N° 2.21). Cada elemento del circuito se relaciona con su impedancia como en el caso de resonancia en serie, se dice que el circuito entra en resonancia cuando $X_L = X_C$.

FIGURA N° 2.21
CIRCUITO RESONANTE



Fuente: elaboración propia

La ecuación (2.35) da la expresión para la impedancia equivalente del circuito de la FIGURA N° 2.21 vista por la fuente de corriente. La tensión a través de todo circuito está dado por la ecuación (2.38).

$$\bar{Z} = \frac{-jR X_L X_C}{R(h X_L - \frac{X_C}{h}) - j X_L X_C} \quad (2.35)$$

$$|\bar{Z}| = \frac{RX_L X_C}{\sqrt{\left[R\left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right)\right]^2 - [X_L X_C]^2}} \quad (2.36)$$

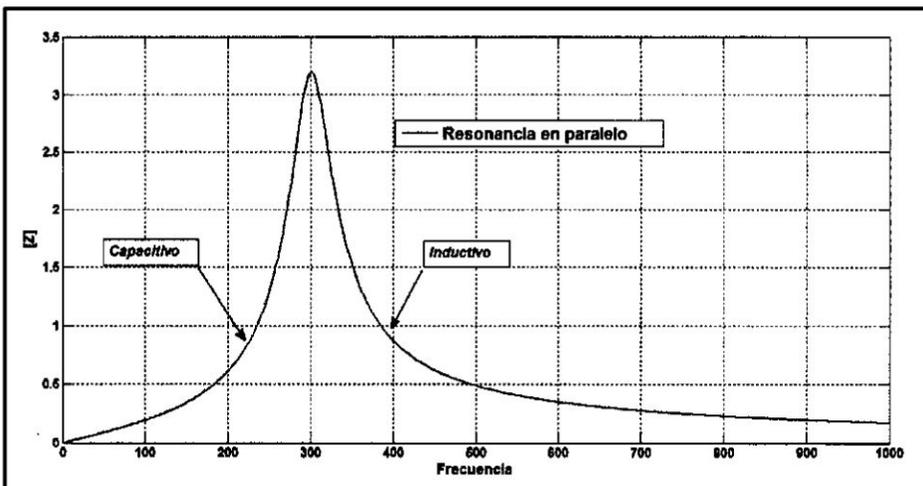
Para la resonancia $h = h_r$ entonces:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.37)$$

$$\bar{V} = \bar{I}Z \quad (2.38)$$

En la mayoría de los casos, la resistencia de los circuitos de potencia es relativamente pequeña. De la ecuación (2.35) se puede observar que las resonancias pueden generar impedancias equivalentes muy grandes a la frecuencia de resonancia o a frecuencias cercanas, debido a que la resistencia es generalmente pequeña. Se muestra un ejemplo de la gráfica de la magnitud de la impedancia (véase FIGURA N° 2.22) del circuito de la figura 2.20 en función de la frecuencia. La forma de la figura 2.22 se puede calcular mediante el “factor de ganancia de corriente (ρ , ρ)” como la razón de la corriente del ramo inductivo o capacitivo por la corriente inyectada.

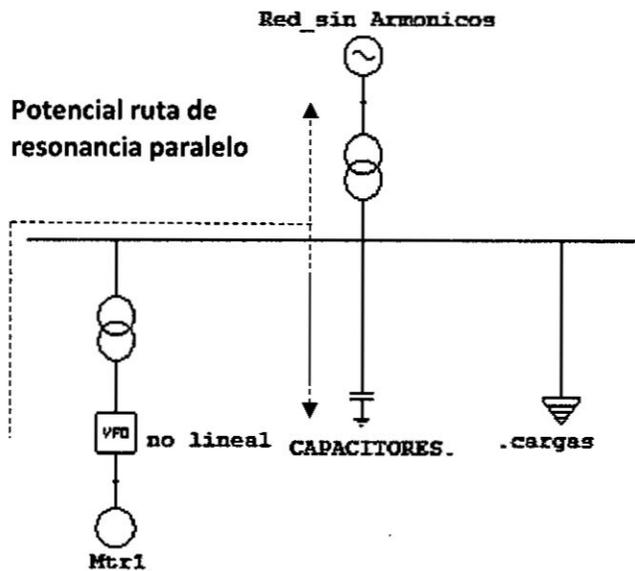
FIGURA N° 2.22
IMPEDANCIA DE RESONANCIA EN PARALELO



Fuente: elaboración propia.

Una característica propia del circuito resonante en paralelo es que al ser excitado por una fuente de corriente a esta frecuencia, una corriente alta circulante fluirá en el lazo del inductor y capacitor, aunque la corriente de la fuente sea pequeña en comparación. La corriente en el lazo del circuito es amplificada a un nivel dependiente del factor de calidad Q del circuito. La resonancia en paralelo puede producir sobretensiones indeseadas. La resonancia en paralelo típicamente involucra a la inductancia de fuga de grandes transformadores y/o la inductancia equivalente de la instalación, y los condensadores de corrección de factor de potencia, ya que generalmente estos últimos se colocan en paralelo con la inductancia del sistema de potencia. Se muestra un posible circuito resonante en paralelo (véase FIGURA N° 2.23).

FIGURA N° 2.23
 POSIBLE CIRCUITO RESONANTE EN PARALELO



Fuente: elaboración propia.

C. Cálculo de la frecuencia de resonancia.

La frecuencia de resonancia resultante, se puede calcular mediante la ecuación (2.39).

$$f_R = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_C}} \quad (2.39)$$

Donde:

f_R : es el orden de la frecuencia armónica resonante (Ej., 5ta, 7ma, etc.).

S_{cc} : es la impedancia de la fuente en el bus de interés, en MVA.

Q_C : es la potencia trifásica del banco de condensadores en MVAR.

Esta expresión se obtiene de las siguientes consideraciones.

En circuitos monofásicos:

$$I = \frac{kVA}{kV_L} \quad (2.40)$$

$$Z = \frac{kV_L}{I} \times 1000 = \frac{kV_L}{\frac{kVA}{kV_L}} \times 1000 = \frac{kV_L^2}{kVA} \times 1000 = \frac{kV_L^2}{MVA} \quad (2.41)$$

Donde:

kVA y kV_L son de fase.

En circuitos trifásicos:

$$I = \frac{kVA}{\sqrt{3} kV_L} \quad (2.42)$$

$$Z = \frac{kV_L}{\frac{\sqrt{3} kVA}{\sqrt{3} I}} \times 1000 = \frac{\frac{kV_L}{\sqrt{3}}}{\frac{kVA}{\sqrt{3} kV_L}} \times 1000 = \frac{kV_L^2}{kVA_{3\phi}} \times 1000 = \frac{kV_L^2}{MVA_{3\phi}} \quad (2.43)$$

Donde:

$kVA_{3\phi}$: son los del sistema trifásico.

kV_L : son los de línea.

Estas expresiones son válidas en todos los casos, aún en condiciones de corto circuito donde los kVA y los $kVA_{3\phi}$ son los kVA_{cc} en ambas condiciones, de tal forma que:

$$Z = Z_{cc} = \frac{kV_L^2}{MVA_{cc}} \quad (2.44)$$

La impedancia está compuesta por una resistencia R y una reactancia X . Generalmente no se poseen los valores suficientes de los elementos para determinar la parte resistiva y por consiguiente se asume que la impedancia es puramente reactiva. Esta suposición es suficientemente válida para sistemas industriales, sobretodo en barras cercanas a la acometida.

Como primera aproximación, la reactancia del sistema de distribución se determina con la expresión mostrada en la ecuación (2.45), teniendo los valores de MVA_{cc} en la acometida provista por un estudio de corto circuito:

$$X_{sist\ distribución} = X_{cc} = \frac{kV_L^2}{MVA_{cc}} \quad (2.45)$$

Para tensiones medios y bajos, como en el caso de los sistemas eléctricos comerciales e industriales, la reactancia del transformador es predominante sobre la reactancia del sistema de distribución, por lo que se puede considerar que:

$$X_{sist\ distribución} = X_{cc} = X_{tr} \quad (2.46)$$

La reactancia en ohmios del transformador se determina de su valor porcentual de placa, mediante la relación:

$$X_{tr} = Z_b \times \frac{\%Z_{tr}}{100} = \frac{kV_L^2}{MVA_{nom\ trafa}} \times \frac{\%Z_{tr}}{100} \quad (2.47)$$

La capacitancia de los condensadores de potencia generalmente no está disponible, éstos más bien vienen dimensionados en KVAR o MVAR a una

determinada tensión. Entonces la reactancia equivalente para un banco de condensadores se determina por la ecuación (2.48).

$$X_c = \frac{V_b}{I_b} = \frac{kV_L}{\frac{kVAr}{kV_L}} \times 1000 = \frac{kV_L^2}{kVAr} \times 1000 = \frac{kV_L^2}{MVA_r} \quad (2.48)$$

Finalmente, el orden de resonancia f_R se obtiene haciendo uso de las ecuaciones descritas en este capítulo, obteniendo la ecuación (2.49) que originalmente se tenía.

$$f_R = \frac{1}{2\pi f \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{1}{\omega^2 LC}} = \sqrt{\frac{1/\omega C}{\omega L}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sist\ distribución}}} = \sqrt{\frac{\frac{kV_L^2}{MVA_r}}{\frac{kV_L^2}{MVA_{cc}}}}$$

$$f_R = \sqrt{\frac{MVA_{cc}}{MVA_r}} = \sqrt{\frac{kVA_{tr} \times 100}{kVA_r \times \%Z_{tr}}} \quad (2.49)$$

2.7 Corrección de Factor de Potencia

2.7.1 Condiciones Sinusoidales

1.-Conceptos de Potencia

La potencia es la capacidad de producir o demandar energía de una máquina eléctrica, equipo o instalación por unidad de tiempo.

En todo circuito eléctrico, para el funcionamiento de los diferentes equipos y máquinas se encuentran presentes las siguientes potencias:

- Potencia Aparente
- Potencia Activa
- Potencia Reactiva

A.1 Potencia Aparente (S)

La potencia total o aparente es la suma geométrica de las potencias activa y reactiva, o bien, el producto de la corriente y la tensión. Se la representa con la letra **S** y su unidad de medida se expresa en voltamperios (VA).

$$S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \quad (2.50)$$

A.2 Potencia Activa (P)

Llamada también potencia efectiva y potencia real, se la representa con la letra **P** y es expresada en vatios (W). Solamente esta potencia se puede transformar en potencia mecánica o en potencia calorífica.

La potencia efectiva o real es la que en el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo, es decir, en energía utilizable [10].

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad (2.51)$$

A.3 Potencia Reactiva (Q)

Llamada también potencia magnetizante, se simboliza con la letra **Q** expresada en voltamperios reactivos (var), resulta necesaria para el funcionamiento de ciertas máquinas y dispositivos eléctricos (motores,

transformadores, bobinas, relés, etc.) pero no puede transformarse en potencia mecánica o calorífica útil, y causa pérdidas adicionales en los equipos que transportan la energía.

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi \quad (2.52)$$

2.-Carga lineales

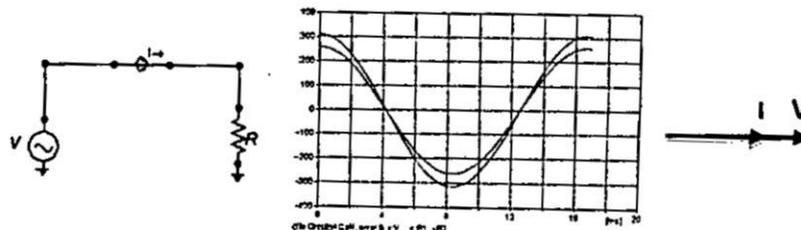
En una red o circuito eléctrico a los elementos pasivos se los conoce como cargas lineales, ya que por medio de ellos la energía eléctrica se consume dependiendo de la intensidad de corriente que circule en los mismos, por lo que a dicha corriente se la conoce como corriente de carga de característica resistiva, inductiva o capacitiva dependiendo del tipo de carga que sea.

A. Cargas Resistivas

En este caso, se tiene un factor de potencia unitario.

La característica de estas cargas es que el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente es cero, es decir, se encuentran en fase (véase FIGURA N° 2.24).

FIGURA N° 2.24
FORMA DE ONDA DEL TENSIÓN Y LA CORRIENTE PARA UNA CARGA RESISTIVA.



Fuente: Elaboración Propia

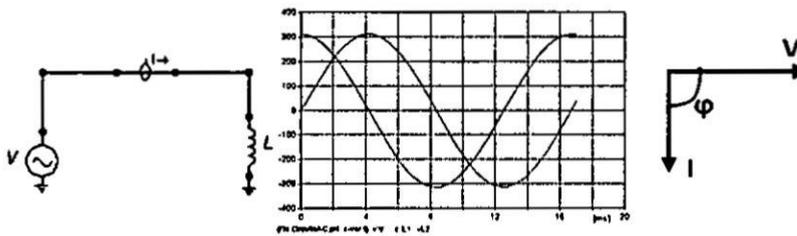
B. Cargas Inductivas

En las cargas inductivas o bobinas como los motores y transformadores la característica principal de estos elementos es la de almacenar y consumir la energía eléctrica convirtiéndola en energía magnética por medio del campo magnético que genera al circular corriente eléctrica por estos elementos, la corriente se encuentra retrasada respecto a la tensión, es decir, existe un desfase negativo (-90°). En este caso se tiene un factor de potencia retrasado.

La corriente está en atraso de -90° con respecto de la tensión (véase FIGURA N° 2.25).

FIGURA N° 2.25

FORMA DE ONDA DEL TENSIÓN Y LA CORRIENTE PARA UNA CARGA INDUCTIVA.



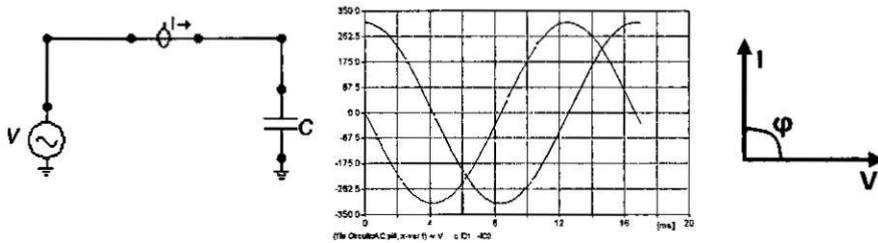
Fuente: Elaboración Propia.

C. Cargas Capacitivas

En las cargas capacitivas como los condensadores el mismo que es capaz de almacenar energía en forma de campo eléctrico, la corriente se encuentra adelantada respecto del tensión por esta razón hay un desfase positivo (véase FIGURA N° 2.26, en la página 71). En este caso se tiene un factor de potencia adelantado de 90° .

FIGURA N° 2.26

FORMA DE ONDA DEL TENSIÓN Y LA CORRIENTE PARA UNA CARGA CAPACITIVA.



Fuente: Elaboración Propia.

3.-Análisis Corrección de Factor de Potencia

A. Factor de Potencia

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa (en vatios, W), y la potencia aparente (en voltamperios, VA) y describe como la relación entre la potencia de trabajo o real y la potencia total consumida.

El Factor de Potencia (FP) está definido por la ecuación (2.53) o (2.54):

$$FP = \frac{P(\text{kW})}{S(\text{kVA})} \quad (2.53)$$

$$FP = \frac{P(\text{kW})}{V \cdot I(\text{kVA})} \quad (2.54)$$

El factor de potencia expresa en términos generales, el desfaseamiento o no de la corriente con relación a la tensión y es utilizado como indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica, el cual puede tomar valores entre 0 y 1.0 siendo la unidad (1.0) el valor máximo de Factor de Potencia y por tanto indica el mejor aprovechamiento de energía. Por ejemplo, si el factor de Potencia es igual a 0.80, indica que del total de la energía suministrada (100%) sólo el 80% de esa energía es aprovechada en trabajo útil [14].

B. Factor de Potencia Medio

Algunas instalaciones cuentan a la entrada con dos contadores, uno de energía reactiva (kVAh) y otro de energía activa (kWh). Con la lectura de ambos contadores se puede obtener el factor de potencia medio de la instalación, aplicando la ecuación (2.55):

$$FP = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{Q(\text{kVAh})}{P(\text{kWh})} \right) \right) \quad (2.55)$$

C. Principio de Corrección de Factor de Potencia

Las cargas industriales por su naturaleza eléctrica son reactivas a causa de la presencia principalmente de motores, transformadores, lámparas fluorescentes, etc. Al consumo de potencia activa (kW) se suma el consumo de una potencia reactiva (kVAr), las cuales en conjunto determinan el comportamiento operacional de dichos equipos.

Cuando la cantidad de estos equipos es apreciable los requerimientos de potencia reactiva también se hacen significativos, lo cual produce una disminución significativa del factor de potencia.

Por las razones anteriores para corregir y mejorar el factor de potencia resulta práctico y económico, la corrección del factor de potencia por medio de la instalación de banco de condensadores, o utilizando motores sincrónicos disponibles en la industria.

Uno de los objetivos de compensar la potencia reactiva es corregir el factor de potencia, esto a través de bancos de condensadores hasta donde sea posible económicamente [19].

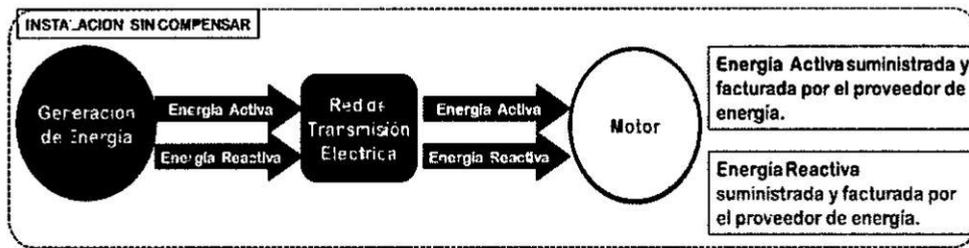
Existen algunas otras estrategias para corregir el factor de potencia como son:

- ✓ Minimizar la operación de motores en vacío o con poca carga.
- ✓ Evitar la operación de equipo por debajo de su tensión de diseño.

Análisis para la corrección de un sistema eléctrico inicial y determinación de la potencia reactiva requerida para un banco de condensadores (véase FIGURA N° 2.27 y FIGURA N° 2.28).

FIGURA N° 2.27

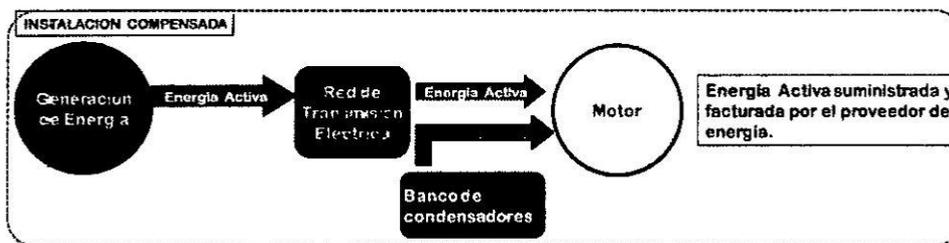
INSTALACIÓN SIN COMPENSAR LA ENERGÍA REACTIVA.



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA N° 2.28

INSTALACIÓN CON COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA.

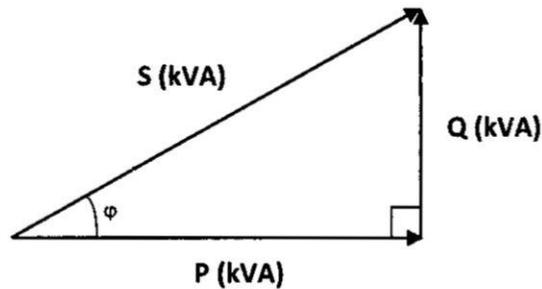


Fuente: Elaboración Propia

D Triángulo de Potencias

El triángulo de potencias es la representación fasorial de la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la potencia aparente (S) (véase la FIGURA N° 2.29).

FIGURA N° 2.29
TRIÁNGULO DE POTENCIAS ELÉCTRICAS.



Fuente: Elaboración Propia

Donde:

- P (kW) = Potencia activa.
- Q (kVAr) = Potencia reactiva
- S (kVA) = Potencia aparente
- φ = El ángulo φ indica si las señales de tensión y corriente se encuentran en fase. Dependiendo del tipo de carga, el factor de potencia ($F.P = \cos \varphi$ en condiciones sinusoidales) puede ser:
 - ✓ Igual a 1 (carga resistiva)
 - ✓ Retrasado (carga inductiva)
 - ✓ Adelantado (carga capacitiva)

Por lo que se puede conocer la potencia aparente a partir del teorema de Pitágoras aplicado en el triángulo de potencias.

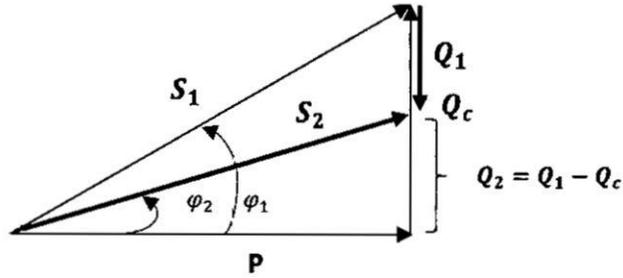
De la FIGURA N° 2.29 se obtiene la ecuación (2.56):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.56)$$

E. Desarrollo del Método de Cálculo para Banco de Condensadores

FIGURA N° 2.30

ANÁLISIS TRIANGULO DE POTENCIA



Fuente: Elaboración Propia

Donde:

φ_1, Q_1, S_1 : Sistema inicial (sin Q_c)

φ_2, Q_2, S_2 : Sistema final (con Q_c)

Q_c : Banco de condensadores

P : Potencia de la carga

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q_1}{P} \quad (2.57)$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{Q_1 - Q_c}{P} \quad (2.58)$$

Despejando Q_1 en ambas ecuaciones:

$$Q_1 = P \times \tan \varphi_1 \quad (2.59)$$

$$Q_1 = P \times \tan \varphi_2 + Q_c \quad (2.60)$$

Igualando las ecuaciones:

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (2.61)$$

Donde:

φ_1 : Ángulo de factor de potencia inicial del sistema

φ_2 : Ángulo de factor de potencia objetivo

Q_c : Banco de condensadores

P : Potencia de la carga

2.7.2 Condiciones No Sinusoidales

1.- Conceptos de Potencia

A. Valor eficaz

Se define como el valor de una corriente (o tensión) continua que produce los mismos efectos calóricos que su equivalente de alterna. Es decir que para determinada corriente alterna, su valor eficaz (I_{ef}) será la corriente continua que produzca la misma disipación de potencia (P) en una resistencia (R). Matemáticamente, el valor eficaz de una magnitud variable con el tiempo, se define como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos alcanzados durante un período:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt} \quad (2.62)$$

Dónde:

T es el periodo de la señal.

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} \quad (2.63)$$

En la literatura inglesa este valor se conoce como R.M.S. (root mean square, valor cuadrático medio), y de hecho en matemáticas a veces es llamado valor cuadrático medio de una función. De ahí que por rapidez y claridad se represente con la letra mayúscula de la magnitud que se trate (I , V , P , etc.). Matemáticamente se demuestra que para una corriente alterna sinusoidal el valor eficaz viene dado por la expresión (2.64):

$$A = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \quad (2.64)$$

Al alimentar un circuito no lineal con una fuente sinusoidal que proporciona una tensión v (2.65) y una corriente i (2.66), se tiene una respuesta no sinusoidal:

$$V_{(t)} = V_m \text{sen}(w_0 t) \quad (2.65)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^n I_m \text{sen}(nw_0t + \phi_n) \quad (2.66)$$

$$p(t) = V(t) \cdot i(t) = V_m \text{sen}(w_0t) \sum_{n=1}^n I_m \text{sen}(nw_0t + \phi_n)$$

$$p(t) = \sum_{n=1}^n V_m I_m \text{sen}(w_0t) \text{sen}(nw_0t + \phi_n)$$

$$p(t) = \sum_{n=1}^n \frac{V_m I_m}{2} \{ \cos[(1-n)w_0t - \phi_n] - \cos[(1+n)w_0t + \phi_n] \} \quad (2.67)$$

Donde:

v_m : Tensión máxima o pico.

I_m : Corriente máxima o pico.

B. Potencia activa

Se puede calcular la potencia activa como la integral de la potencia instantánea en un período de tiempo.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^n \frac{V_m I_m}{2} \cos[(1-n)w_0t - \phi_n] dt - \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^n \frac{V_m I_m}{2} \cos[(1+n)w_0t + \phi_n] dt \quad (2.68)$$

La expresión (2.68) es diferente de cero solo para cuando $n=1$, por lo que se simplifica a la siguiente ecuación (2.69).

$$P = \frac{V_m I_1}{2} \cos(\phi_1) \quad (2.69)$$

C. Potencia Reactiva

La potencia reactiva queda definida como:

$$Q = \frac{V_m I_1}{2} \text{sen}(\phi_1) \quad (2.70)$$

D. Potencia Aparente

Utilizando las expresiones de tensión y la corriente en valores eficaces o valores rms, se tiene que:

$$V_{(rms)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.71)$$

$$I_{rms} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^n I_n^2}}{\sqrt{2}}$$

$$S = \frac{V_m \sqrt{\sum_{n=1}^n I_n^2}}{2} \quad (2.73)$$

E. Potencia de Distorsión

Esta potencia resulta de la multiplicación de las magnitudes de tensión y corriente de diferentes frecuencias. Se representa con la letra **D**.

$$D = \frac{V_m \sqrt{\sum_{n=2}^n I_n^2}}{2} \quad (2.74)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.75)$$

Donde:

D: Potencia distorsionante

S: Potencia aparente

Q: Potencia reactiva

P: Potencia activa

2.- Cargas no lineales

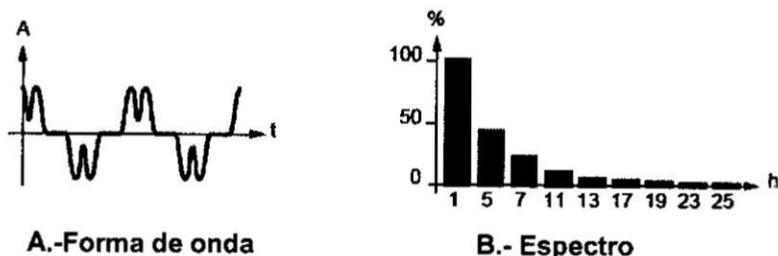
Los circuitos de las cargas no lineales están formadas por elementos semiconductores como diodos, transistores, tiristores, amplificadores operacionales, entre otros. En la actualidad hay muchos artefactos eléctricos que utilizan corriente continua y la obtienen mediante una fuente que transforma la corriente alterna a continua mediante la utilización de algunos semiconductores.

Cualquier carga no lineal produce ondas de corriente distorsionadas con contenido de componentes armónicas, al aplicarle una onda de tensión, aunque ésta sea de forma sinusoidal pura.

Las cargas no lineales se pueden clasificar en:

- Dispositivos controlados electrónicamente o equipos electrónicos de potencia (véase FIGURA N° 2.31).

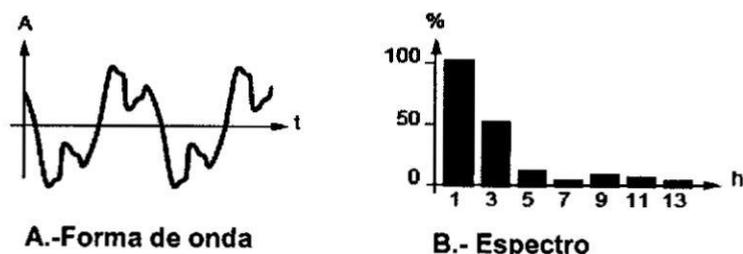
FIGURA N° 2.31
RECTIFICADOR TRIFÁSICO



Fuente: Cuaderno técnico N° 199 Schneider Electric, 2004

- Dispositivos productores de arcos eléctricos (hornos de arco, luz fluorescente, máquinas soldadoras, etc.) (véase FIGURA N° 2.32).

FIGURA N° 2.32
ALUMBRADO FLUORESCENTE

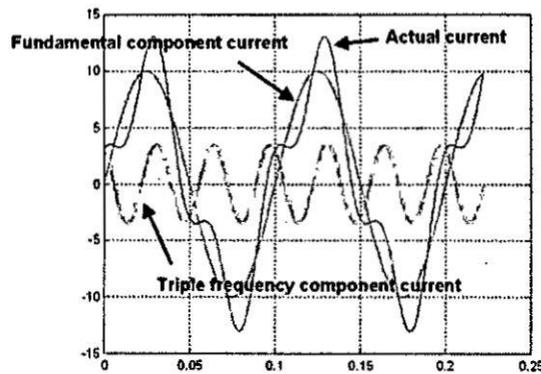


Fuente: Cuaderno técnico N° 199 Schneider Electric, 2004

- Dispositivos ferromagnéticos (transformadores, etc.). (véase FIGURA N° 2.33).

FIGURA N° 2.33

Forma de onda del Transformador



Fuente: Elaboración propia

- Motores eléctricos que mueven cargas de par torsor bruscamente variable (molinos de laminación, trituradores, etc.). (véase FIGURA N° 2.34).

Para la presente tesis se tiene que tener en cuenta lo siguiente:

Variadores de Velocidad

Un variador de c.a. es un dispositivo utilizado para controlar la velocidad de rotación de un motor de c.a. o de inducción. Este tipo de motores también se conocen como motores asíncronos o en jaula de ardilla (véase en la FIGURA N° 2.34 y FIGURA N° 2.35 en la página 81).

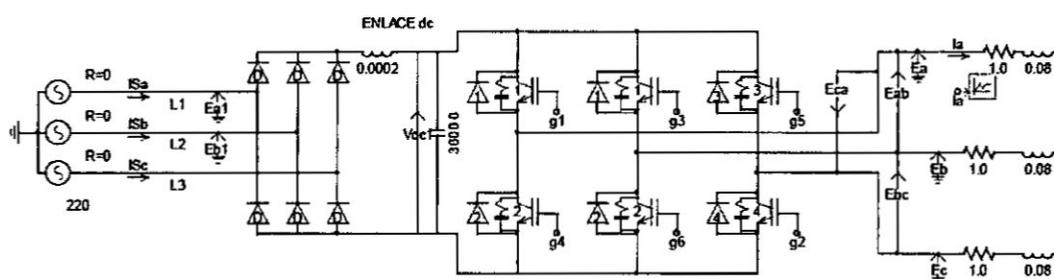
El variador de velocidad se coloca entre la red y el motor. El variador recibe la tensión de red a la frecuencia de red (60Hz) y tras convertirla y después ondularla produce una tensión con frecuencia variable. La velocidad de un motor va prácticamente proporcional a la frecuencia.

Además de cambiar la frecuencia, el variador también varía el voltaje aplicado al motor para asegurar que existe el par necesario en el eje del motor sin que surjan problemas de sobrecalentamiento.

En el Funcionamiento de los variadores los puntos más importantes son:

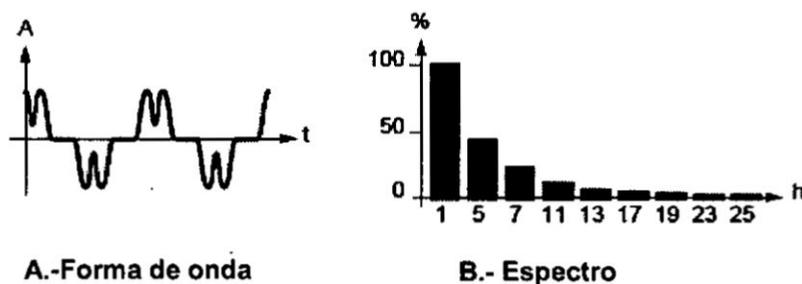
- El factor de potencia esta entre 0.94-0.96.
- La distorsión armónica del equipo está en función del número de pulsos (a menor número de pulsos mayor distorsión armónica).

FIGURA N° 2.34
VARIADOR DE VELOCIDAD



Fuente: Estudio y simulación de los filtros de potencia. Tesis de titulación.2006 [21]

FIGURA N° 2.35
VARIADOR DE VELOCIDAD ESPECTRO ARMONICO



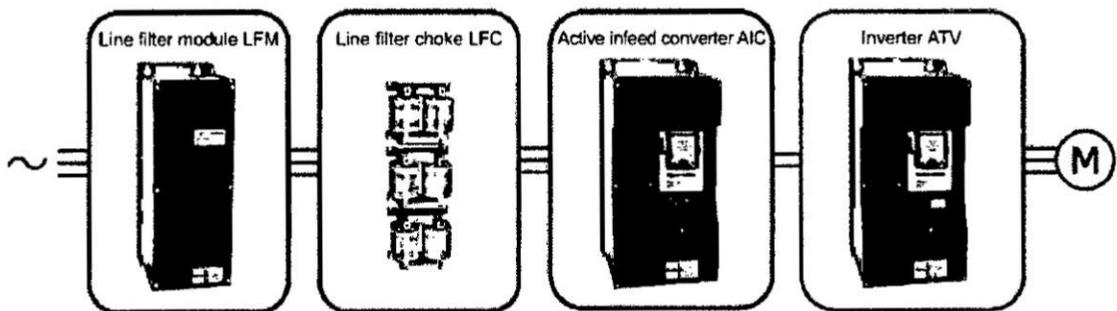
Fuente: Cuaderno técnico N° 199 Schneider Electric, 2004

Variador de velocidad regenerativo de frente activo

Es un variador en configuración de seis pulsos, pero a diferencia de los VFDs estándar, su puente rectificador no está compuesto por diodos o electrónica de potencia sencilla, sino por IGBTs (igual que en el puente inversor). Su particularidad es que el control del equipo determina de manera activa la distorsión armónica y de esta forma adelanta o atrasa los disparos en el puente rectificador para producir una onda igual a la distorsión pero inversa. El resultado final es la anulación casi total de los armónicos (véase FIGURA N° 2.36).

FIGURA N° 2.36

DISPOSICIÓN DE UN VARIADOR DE FRENTE ACTIVO.



Fuente: Catalogo Schneider Electric

3.- Análisis Corrección de Factor de Potencia.

A. Factor de potencia de desplazamiento (FPD)

La relación entre la potencia activa total consumida por una carga alimentada por un generador de tensión sinusoidal y la potencia aparente suministrada por las componentes fundamentales de tensión y corriente (2.76).

$$FPD = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_e(t) * I_e(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{e-1}(t) dt * \int_0^{2\pi} I_{e-1}(t)^2 dt}} \quad (2.76)$$

Para un sistema trifásico, donde la tensión y corriente mantenga su carácter sinusoidal (2.77)

$$FPD = FP_{real} = \frac{P_1}{V_{1\ rms} I_{1\ rms}} \quad (2.77)$$

Por lo tanto, en las situaciones sinusoidales, hay solamente un factor de potencia porque factor de potencia verdadero y factor de potencia de desplazamiento son iguales (2.78).

$$FPD = \frac{P_1}{S_1} = \cos \varphi_1 \quad (2.78)$$

$$FPD = \cos \phi = FP$$

B. Factor de potencia real (FP_{real})

En un sistema con distorsión armónica tendremos que el factor de potencia real o verdadera está dado por (2.80):

$$FP_{real} = \frac{P_{1prom} + P_{2prom} + P_{3prom} + \dots}{V_{1\ rms} \times I_{1\ rms} \times \sqrt{1 + THD_i^2} \sqrt{1 + THD_v^2}} \quad (2.79)$$

$$FP_{real} = \frac{P_1}{V_{1\ rms} I_{1\ rms}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2} \sqrt{1 + THD_v^2}} \quad (2.80)$$

Para razones prácticas de cálculo se puede asumir los siguientes puntos:

- En sistemas industriales las contribuciones de corrientes armónicas a la potencia activa promedio son pequeñas, por lo tanto $P = P_1$.
- El THD_v es usualmente menor a 10%, por lo tanto $V_{rms} = V_{1rms}$

Obteniendo:

$$FP_{real} \approx \frac{P_1}{V_{1rms} I_{1rms}} \times \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} = FPD \times \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} = FPD \times FP_{dist} \quad (2.81)$$

Donde:

FP_{dist} , es el factor de potencia de distorsion

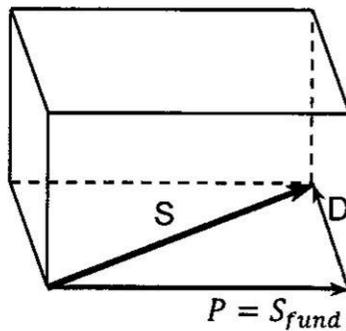
Con lo considerado, el factor de potencia real en situaciones no sinusoidales se puede relacionar con el factor de potencia de desplazamiento, obteniendo un límite superior (2.82):

$$FP_{real} \leq FPD \times \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (2.82)$$

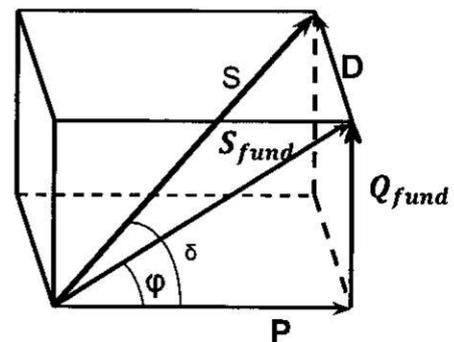
C. Triangulo de potencia en tres dimensiones.

FIGURA N° 2.37

TRIÁNGULO DE POTENCIA EN TRES DIMENSIONES



A.-Sin Desplazamiento



B.- Con Desplazamiento

Fuente: Elaboración Propia

D. Demostración de la Potencia Distorsionante

Para cuando la tensión no tiene armónicos

$$V = \sqrt{2} V_{ef} \text{sen}(wt)$$

$$I = \sqrt{2} I_1 \text{sen}(wt + \phi) + \sqrt{2} I_2 \text{sen}(2wt + \phi) + \dots + \sqrt{2} I_n \text{sen}(nwt + \phi_2).$$

$$V_{rms} = V_1 \quad (2.83)$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.84)$$

$$S_T = V * I = V_{rms} * I_{rms} \quad (2.85)$$

$$S_T = V_1 * \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

$$S_T^2 = V_1^2 * (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)$$

$$S_T^2 = V_1^2 * I_1^2 + V_1^2 * (I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)$$

$$S_T^2 = S_1^2 + V_1^2 * (I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)$$

Donde:

$$V_1^2 * (I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2) = D_1^2$$

D = Potencia de distorsión

$$S_T^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D^2$$

$$D = \sqrt{S_T^2 - P_1^2 - Q_1^2} \quad (2.86)$$

$$P_T = P_1$$

$$Q_T = Q_1$$

$$FP_{real} = \frac{P_T}{S_T} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}} \quad (2.87)$$

E. Desarrollo del Método De Cálculo

E.1. Para Banco de condensadores desintonizado

Es importante el diseño óptimo del banco de condensadores que involucra la variación de la impedancia serie R-C-L con el objetivo de proteger a los condensadores frente a un sistema contaminado de armónicas y evitar los fenómenos descritos. Para ello el factor de sintonía juega un papel de importancia refleja la relación entre la reactancia del reactor y la reactancia del capacitor a la frecuencia fundamental [16].

Definido con la siguiente ecuación (2.88):

$$\rho = \left(\frac{f}{f_R}\right)^2 \quad (2.88)$$

La tensión de soporte de los condensadores se ve reflejada en la siguiente ecuación (2.89):

$$V_{sc} = \frac{V_{red}}{1-\rho} \quad (2.89)$$

Esta es la razón por la cual los condensadores de bancos existentes no pueden ser usados para construir filtros desintonizados y tienen que ser reemplazados por otros con mayor tensión nominal de servicio [16].

$$V_{red} < V_{sc} \leq V_n$$

Para el cálculo de la potencia efectiva entregada por el capacitor y la capacitancia en las ecuaciones (2.90) y (2.91):

$$Q_{ef} = \left(\frac{V_{red}}{V_n}\right)^2 \frac{Q_n}{(1-\rho)} \quad (2.90)$$

$$C = \frac{Q_{ef}(1-\rho)}{2\pi f V_{red}^2} \quad (\mu F) \quad (2.91)$$

Cálculo de la inductancia del reactor en la ecuación (2.92)

$$L = \frac{\rho}{(2\pi f)^2 C} \quad (\text{mH}) \quad (2.92)$$

Cálculo de la corriente fundamental y armónica [16].

$$I_1 = \left| \frac{1.06 \times Q_{\text{efect}}}{\sqrt{3} \times V_{\text{SC}} \times \left(\frac{1 \times \rho}{100} - \frac{1}{1} \right)} \right| \quad (2.93)$$

$$I_3 = \left| \frac{0.005 \times Q_{\text{efect}}}{\sqrt{3} \times V_{\text{SC}} \times \left(\frac{3 \times \rho}{100} - \frac{1}{3} \right)} \right| \quad (2.94)$$

$$I_5 = \left| \frac{0.05 \times Q_{\text{efect}}}{\sqrt{3} \times V_{\text{SC}} \times \left(\frac{5 \times \rho}{100} - \frac{1}{5} \right)} \right| \quad (2.95)$$

$$I_7 = \left| \frac{0.05 \times Q_{\text{efect}}}{\sqrt{3} \times V_{\text{SC}} \times \left(\frac{7 \times \rho}{100} - \frac{1}{7} \right)} \right| \quad (2.96)$$

$$I_{\text{efect}} = \sqrt{(I_1)^2 + \sum (I_h)^2} \quad (2.97)$$

E.2. Para Filtros activos

Los filtros activos son equipos cada vez más frecuentes y necesarios en las instalaciones de hoy en día, debido a la creciente polución en las redes eléctricas y necesidad de compensación reactiva dinámica por efecto de carga variable.

Para saber qué filtro activo elegir es necesario calcular la corriente nominal del mismo. Para ello es necesario calcular la corriente armónica y la corriente reactiva del filtro.

1. Métodos de Cálculo de la Corriente Armónica:

La corriente armónica es la diferencia entre la corriente total y la fundamental. El objetivo del filtro activo es eliminar o reducir al máximo esa corriente armónica, para que sólo quede la corriente sinusoidal pura.

a) Cuando se tiene la corriente de cada orden armónico

$$I_H = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.98)$$

Donde:

I_H = corriente armonica

b) Cuando se tiene la corriente total rms

$$I_H = \frac{I_{RMS}}{\sqrt{\frac{1}{THD_1^2} + 1}} \quad (2.99)$$

Donde:

I_H = Corriente armonica

THD_1 = Total current harmonic distortion

c) Conociendo las corrientes total rms y fundamental

$$I_H = \sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2} \quad (2.100)$$

Donde:

I_H = Corriente armonica

I_{RMS} = Corriente total del sistema

I_1 = Corriente fundamental

d) Conociendo la corriente fundamental y la distorsión armónica en corriente %

$$I_H = I_1 * \frac{THD_1\%}{100} \quad (2.101)$$

Donde:

I_H = Corriente armonica

THD_1 = Total current harmonic distortion

I_1 = Corriente fundamental

e) Conociendo la corriente eficaz total y la distorsión armónica en corriente %

$$I_H = I_{RMS}^2 * \sqrt{\frac{THD_1\%^2}{100^2+THD_1\%^2}} \quad (2.102)$$

Donde:

I_H = Corriente armonica

THD_1 = Total current harmonic distortion

I_{RMS} = Corriente total del sistema

2. Calculo de Compensación Reactiva

El filtro activo compensa los reactivos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_R = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_1} \quad (2.103)$$

Donde:

I_R = Corriente Reactiva del Filtro

Q_R = Potencia reactiva necesaria

V_1 = Tension de Diseño

3. Calculo de la Corriente de Filtro

El filtro activo compensa simultáneamente los armónicos y los reactivos mediante inyección dinámica de corriente. La capacidad total de inyección del filtro está dada por la siguiente relación:

$$I_{\text{FILTRO}} = \sqrt{I_{\text{H}}^2 + I_{\text{R}}^2} \quad (2.104)$$

Donde:

I_{H} = Corriente Reactiva del Filtro

I_{R} = Corriente reactiva del Filtro

4. Derrateo por Altura

El filtro activo debe tener un derrateo por altitud pasado los 1000 m.s.n.m, los cuales son configurados en campo.

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = I_{\text{F}(1000\text{m})} / \left[1 - (\text{Altura} - 1000\text{m}) * \frac{1\%}{100\text{m}} \right] \quad (2.105)$$

Donde:

$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}}$ = Corriente del filtro a esa altitud

I_{F} = Corriente de diseño del Filtro

2.7.3 cargas inductivas con bajo factor de potencia

El bajo factor de potencia se debe parcialmente a la carga de los motores de inducción, ya que frecuentemente se trabaja con exceso de estos, también debido a balastos, transformadores y en general a cualquier tipo de inductancia, etc., son el origen del bajo factor de potencia ya que son cargas no lineales que contaminan la red eléctrica, en este tipo de equipos el consumo de corriente se desfasa con relación a la tensión lo que provoca un bajo factor de potencia.

A continuación se enunciarán algunas causas por la cual se produce un bajo factor de potencia:

a.- Iluminación de descarga o de arco (lámparas de vapor de mercurio, lámparas fluorescentes, etc.)

Estas lámparas para su funcionamiento requieren en algunos casos de una inductancia o de un transformador, como se mencionó anteriormente estos elementos son los que consumen energía reactiva y al tener la presencia de varias de estas lámparas se tendrá una mayor demanda de energía reactiva por ende producen un factor de potencia bajo.

b.- Motores de inducción de pequeña y gran capacidad

Estos motores son generalmente la causa principal de los factores de potencia bajos, primeramente por ser numerosos en los establecimientos industriales, y segundo por naturaleza propia de la máquina ya que necesitan de una potencia magnetizante y lo más importante es que están formados por inductores o bobinas que permiten el funcionamiento y movimiento del rotor del motor.

c.- Motores operando en vacío

Los motores eléctricos consumen prácticamente la misma cantidad de energía reactiva necesaria para mantener su campo magnético, cuando opera en vacío o a plena carga. Entretanto, no sucede lo mismo con la energía activa, ésta es directamente proporcional a la carga mecánica solicitada al motor. Así, cuanto menor sea la carga mecánica solicitada, menor será la energía activa consumida, consecuentemente menor el factor de potencia.

d.- Motores sobredimensionados

Este es un caso particular de lo anterior, cuyas consecuencias son análogas. Generalmente los motores que son sobredimensionados, presentan una gran conservación de energía.

Es muy común la sustitución de un motor por otro de mayor potencia, principalmente en los casos de mantenimiento y reparación que, por comodidad, la sustitución transitoria pasa a ser permanente, sin saber que un sobredimensionamiento provocará un bajo factor de potencia.

e.- Transformadores operando en vacío o con pequeñas cargas

Análogamente a los motores, los transformadores, operando en vacío o con pequeñas cargas, consumen una cantidad de energía reactiva relativamente grande, comparada con la energía activa, provocando un bajo factor de potencia.

f.- Transformadores sobredimensionados

Es un caso particular de lo anterior, donde transformadores de gran potencia son utilizados para alimentar, durante largos períodos, pequeñas cargas.

g.- Nivel de tensión por encima del nominal

Con una tensión superior al nominal, se aplica a motores de inducción, se da el aumento de consumo de energía reactiva y, por tanto, disminuye el factor de potencia.

h.- Hornos eléctricos de arco voltaico

Su factor de potencia varía en un amplio margen al calentarse el horno, oscila entre 0.5 y 0.85, luego de un cierto tiempo de trabajo se aproxima a un valor constante.

El factor de potencia de los hornos es bajo por dos razones: Primero el arco al comienzo del ciclo tiene menor conductibilidad, de manera que la corriente está en atraso con relación a la tensión. Segundo cuando el arco está en cortocircuito, en donde es necesario disponer de una reactancia para limitar la intensidad de corriente a un valor fuera de peligro, siendo esta reactancia la causa de un bajo factor de potencia.

i.- Soldadoras eléctricas de corriente alterna

Son máquinas que se caracterizan por tener o producir un bajo factor de potencia, debido a que son construidas con una reactancia interna, para limitar las corrientes de cortocircuito en el momento que se produce el arco, esta reactancia es la que produce un bajo factor de potencia

2.7.4 Consecuencias del Bajo Factor de Potencia

En una instalación eléctrica mientras mayor la cantidad de energía reactiva el factor de potencia se deteriora y como la potencia activa o real es constante, se necesita una mayor intensidad de corriente para satisfacer esta demanda, además este aumento de la corriente incrementa las pérdidas por calentamiento o efecto Joule que está dada por la expresión donde I es la corriente total y R es la resistencia eléctrica de los equipos

(bobinados de generadores y transformadores, conductores de los circuitos de distribución, etc.). Las pérdidas por efecto Joule se manifiestan en:

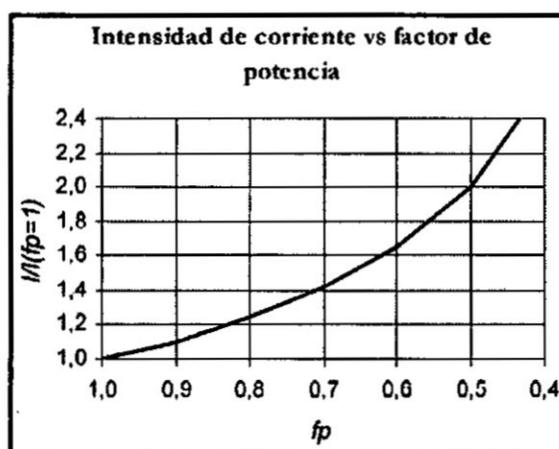
- Calentamiento de cables.
- Calentamiento de embobinados de los transformadores de distribución.
- Disparo sin causa aparente de los dispositivos de protección.

Uno de los mayores problemas que causa el sobrecalentamiento es el deterioro irreversible del aislamiento de los conductores que, además de reducir la vida útil de los equipos, puede provocar cortos circuitos.

Se muestra la relación que existe entre la corriente y el factor de potencia (véase FIGURA N° 2.38), en el eje vertical (Y) se tiene la variación de corriente con respecto a la corriente con factor de potencia igual a 1; y en el eje horizontal (X) se encuentra el factor de potencia. Se puede visualizar que a medida que el factor de potencia es menor se tiene un incremento cada vez más pronunciado de la intensidad de corriente.

FIGURA N° 2.38

RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE Y EL FACTOR DE POTENCIA



FUENTE: Tesis-Estudio para la ubicación estratégica de condensadores en las subestaciones de la Empresa EMELNORTE.2007

Por ende el factor de potencia es el que limita la demanda de corriente del sistema eléctrico. Las consecuencias que se le presentan al usuario industrial tendrán repercusiones financieras, estas consecuencias son las siguientes:

a.- Aumento de la intensidad de corriente e incremento de pérdidas por efecto Joule

Por este motivo al usuario industrial se le presentan las siguientes desventajas:

- Los conductores, entre el medidor y el usuario, deberán ser de mayor calibre.
- Los embobinados de los transformadores de distribución, se recalentaran.
- Los dispositivos de operación y protección deberán ser de mayor tamaño y por lo tanto de mayor precio.
- La temperatura de los conductores aumenta y esto disminuye la vida de su aislamiento.

b.- Pérdidas en los conductores y fuertes caídas de tensión

Esto resulta un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.) estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida. Estas caídas de tensión se afectan también a:

- Los embobinados de los transformadores de distribución.
- Los cables de alimentación.
- Sistemas de protección y control.

c.- Sobrecarga de los generadores, transformadores

El exceso de corriente debido a un bajo factor de potencia, ocasiona que los generadores, transformadores y líneas de distribución, trabajen con cierta sobrecarga y reduzcan su vida útil, debido a que estos equipos, son diseñados para un cierto valor de corriente y para no dañarlos, se debe operar sin que rebase los límites permitidos.

d.- Aumentos en la factura por consumo de energía eléctrica

Debido a un bajo factor de potencia implica pérdidas de energía en la red eléctrica, el productor y distribuidor de energía eléctrica se ve en la necesidad de penalizar al usuario que no hace uso correcto de su energía, haciendo que pague más por su consumo de energía eléctrica o que el mismo usuario corrija el factor de potencia.

2.8 Definiciones de Términos

- **Armónicos:** En sistemas eléctricos de corriente alterna los armónicos son frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.
- **Calidad de tensión:** Está relacionada con las desviaciones de la calidad de tensión respecto a la ideal. La tensión ideal en un sistema trifásico consiste en tres sinusoides equilibradas de secuencia positiva con magnitud y frecuencia constante. La calidad de tensión puede ser interpretada como la calidad del producto ofrecido por la compañía suministradora a los consumidores.
- **Calidad de corriente:** Es complementaria a la definición anterior, y está relacionada con las desviaciones de la corriente con respecto a la ideal. Nuevamente la corriente ideal de un sistema trifásico sería aquella constituida por tres sinusoides equilibradas de secuencia positiva con magnitud y frecuencia constante, existiendo el requisito adicional de que dichas sinusoides deberían estar en fase con las tensiones de red. Por lo tanto la calidad de corriente tiene que ver con la forma en que el consumidor adquiere el producto suministrado por la compañía.
- **Calidad de potencia:** Es la combinación de las dos anteriores. Por lo tanto la calidad de potencia está relacionado con las desviaciones de la tensión y/o corriente con respecto a las de la situación ideal. Hay que resaltar que la calidad de potencia no tiene nada que ver con la desviación de la potencia instantánea suministrada o consumida respecto a una hipotética potencia ideal.
- **Calidad de suministro:** Está relacionada tanto con aspectos técnicos, ligados principalmente a la fiabilidad del suministro (duración y número de cortes, interrupciones y paradas), como los aspectos no técnicos, relacionadas con la calidad de servicio al cliente. La calidad de suministro delimita perfectamente las responsabilidades de la compañía suministradora.

- **Calidad de consumo** Es complementaria a la definición anterior, y también presenta aspectos técnicos, ligados principalmente con la variación e interrupción del consumo, y no técnicos, relacionados con la relación contractual suministrador –cliente. La calidad de consumo cualifica a los clientes a la hora de analizar la rentabilidad de las inversiones y de la actividad económica desempeñada por la compañía suministradora.

- **Carga no lineal:** carga que dibuja una onda de corriente no sinusoidal cuando es proporcionada por una fuente de tensión sinusoidal.

- **Compatibilidad electromagnética (CEM):** capacidad de un equipo o de un sistema para funcionar en su entorno electromagnético de forma satisfactoria y sin introducir él mismo perturbaciones electromagnéticas intolerables para lo que se encuentre en su entorno.

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519.

- **Distorsión armónica:** Cuando la tensión o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda sinusoidal, se dice que la señal está distorsionada.
- **Energía eléctrica:** Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico.
- **Espectro:** Es el histograma que da la amplitud de cada armónico en función del rango.
- **Factor de potencia** Relación entre la potencia activa y la potencia aparente. Nos indica el grado de eficiencia de un circuito eléctrico.

transformar la energía eléctrica en trabajo útil. Representa la capacidad de una instalación eléctrica para transformar la energía eléctrica en trabajo útil.

- **Potencia aparente:** suma vectorial de las potencias activa y reactiva. Se representa por S y se mide en volt amperes (VA). Para una tensión dada la potencia aparente es proporcional a la intensidad que circula por la instalación eléctrica.
- **Potencia reactiva:** no es una potencia (energía) realmente consumida en la instalación, ya que no produce trabajo útil debido a que su valor medio es nulo. Aparece en una instalación eléctrica en la que existen bobinas o condensadores, y es necesaria para crear campos magnéticos y eléctricos en dichos componentes. Se representa por Q y se mide en volt amperes reactivos (VAr). La compañía eléctrica mide la energía reactiva con el contador (kVArh) y si se superan ciertos valores, incluye un término de penalización por reactiva en la factura eléctrica.
- **Punto de conexión interno (PCI):** el punto en una red dentro de un sistema o instalación, eléctricamente más próximo a una carga particular, y a la cual están conectadas o se podrían conectar otras cargas.
- **Resonancia:** fenómeno que se produce en un circuito en el que existen elementos reactivos (bobinas y condensadores) cuando es recorrido por una corriente alterna de una frecuencia tal que hace que la reactancia se anule, en caso de estar ambos en serie, o se haga infinita si están en paralelo.
- **Secuencia de los armónicos:** secuencia positiva, estos armónicos “giran” en el mismo sentido que la onda fundamental, puede producir calentamiento de conductores; el segundo tipo son los armónicos de secuencia negativa, “giran” al contrario de la onda fundamental, por lo que tienden a frenar los motores, recalentándolos; secuencia cero, no tienen sentido de rotación, son los múltiplos del tercer armónico.

- **Serie de Fourier** Modelo matemático por medio del cual puede describirse cualquier función periódica no sinusoidal como una serie infinita de términos sinusoidal de frecuencias armónicamente relacionadas.
- También descrito como equipo constituido generalmente por reactancias, condensadores y resistencias si es necesario, sintonizado de tal forma que presenta una impedancia conocida sobre un rango de frecuencias dado.
- **TDD (Distorsión de demanda total):** Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga (componente fundamental de la corriente de carga máxima del periodo de medición).
- **Tensión armónica:** tensión sinusoidal cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación.
- **Tensión interarmónica:** tensión sinusoidal cuya frecuencia se sitúa entre las frecuencias de los armónicos, es decir no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.
- **Tensión nominal:** tensión que designa o identifica una red de alimentación y a la cual se hace referencia para ciertas características de funcionamiento.
- **THD (Distorsión armónica total):** Es la relación entre el contenido armónico de la señal y el primer armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito. THD (Distorsión armónica total): Es la relación entre el contenido armónico de la señal y el primer armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito.
- **THDi:** distorsión armónica total de corriente.
- **THDv:** distorsión armónica total de tensión.
- **Valor eficaz** Para una onda que varía respecto al tiempo es equivalente al valor de una corriente continua que entregaría la misma potencia a una resistencia si reemplazara a la forma de onda variante con el tiempo.

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1 Variables de la investigación

- **Variable Independiente:**

Modelo de Simulación

- **Variable Dependiente:**

Calidad de potencia.

- **Variable Interviniente:**

Reconocimiento de las tasas de distorsión armónica en tensión y corriente y de las frecuencias resonantes que pueden formar un circuito de amplificación armónica y resonante.

3.2 Operacionalización de variables

Para demostrar y comprobar la Hipótesis formulada, la operacionalizamos, determinando las variables y los indicadores de cada variable que a continuación se menciona:

- Variable X=Modelo de simulación.

- Variable Y = calidad de potencia.

Indicadores:

Y1= Tasas de distorsión armónica de tensión y corriente.

Y2= Frecuencia de resonancia.

Y2= Factor de potencia.

- Variable Z = Reconocimiento de las tasas de distorsión armónica en tensión y corriente y de las frecuencias resonantes que pueden formar un circuito de amplificación armónica y resonante.

Indicadores:

Z1 =Porcentaje de cargas no lineales.

Z2 =Armónico predominante en el sistema eléctrico.

Z3 =Flujo de potencia reactiva.

3.3 Hipótesis de la investigación

3.3.1 Hipótesis General

HG. Desarrollando un modelo de simulación del sistema eléctrico del proyecto minero Tambomayo-Arequipa, se mejorará la calidad potencia diseñando óptimas soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva.

3.3.2 Hipótesis Específicas

H1. Analizando el comportamiento y la influencia de las cargas no lineales mediante el software ETAP 12.6 se seleccionará soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva.

H2. Definiendo metodologías y configuraciones de soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva se evitará los efectos producidos por distorsión armónica para mejorar la calidad de potencia.

H3. Analizando, porque el criterio no adecuado en el diseño de soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva ocasionaría efectos de amplificación armónica y fenómeno de resonancia eléctrica.

IV. METODOLOGÍA

4.1. Tipo de investigación

El tipo de Investigación que se realizó fue Descriptiva y aplicada, de tal forma que tengamos una descripción, análisis e interpretación de la realidad actual en el proyecto minero Tambomayo-Arequipa.

4.2. Desarrollo de la investigación

4.2.1. Modelo Para Soluciones Avanzadas De Sistemas De Compensación De Energía Reactiva

1.- Software de Simulación ETAP 12.6

Es una herramienta de análisis y control para el diseño, simulación y operación de sistemas eléctricos de potencia de generación, distribución e industriales. Es una herramienta integrada que ha sido diseñada y desarrollada por ingenieros para ingenieros que se desempeñen en las diversas disciplinas de los sistemas de potencia.

Es una herramienta de análisis totalmente integrada utilizada por miles de ingenieros de diferentes compañías en todo el mundo para diseñar, mantener y operar sistemas eléctricos.

Dentro de las empresas e industrias, los operadores y gerentes utilizan el ETAP para supervisar, controlar y optimizar, los sistemas de potencia propios de la actividad en la cual se desempeñan [8].

ETAP está equipado con un completo sistema de análisis para diferentes y variados módulos tales como:

- Redes AC – DC.
- Redes de tierra.
- Análisis y coordinación de protecciones.

- Análisis de cortocircuito.
- Análisis de flujo de potencia.
- Análisis de riesgo de arco eléctrico (Arc Flash).
- Análisis de armónicos.
- Análisis de aceleración de motores, entre otros.

Pasaremos a describir 3 módulos con los cuales se evaluaron los distintos escenarios para seleccionar soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva.

A. Módulo de Análisis de Flujo de Potencia

El objetivo principal de un Sistema Eléctrico de Potencia es satisfacer una demanda. Como consecuencia surge el problema, de por dónde debe hacerse la alimentación e incluso prever caídas de tensión, regulación de transformadores, e inyección de potencia reactiva.

Los estudios de flujo de potencia, más normalmente llamados estudios de flujo de carga, son sumamente importantes para evaluar el funcionamiento de los sistemas de potencia, su control y planificación para futuras expansiones. Un estudio de flujo de potencia define principalmente las potencias activa y reactiva y el vector de tensión en cada barra en el sistema.

Los principios del estudio del flujo de potencia son relativamente fáciles, pero un estudio a un sistema de potencia real sólo se puede llevar a cabo con la ayuda de algún programa especializado [8].

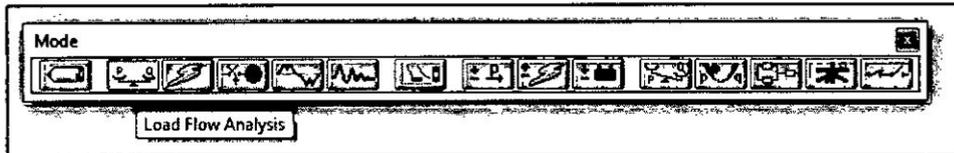
A.1. Barra de Herramientas para el Análisis de Flujo de Potencia

Con la opción "Load Flow Analysis" (Análisis de Flujo de Potencia), incluida en el programa es posible calcular la tensión a la cual está sometida una barra, además de corroborar la regulación de tensión y finalmente observar la dirección del flujo de potencia a través del sistema en estudio, el cual

podiese presentarse con una estructura radial o como un lazo abierto (véase la FIGURA N° 4.1) [8].

FIGURA N° 4.1

BARRA DE HERRAMIENTAS DE FLUJO DE POTENCIA



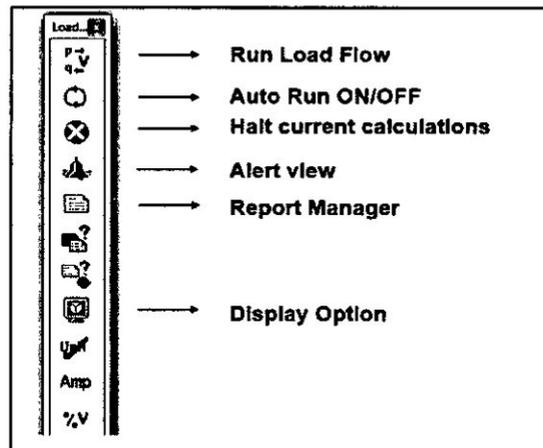
Fuente: Guía del usuario ETAP 12.6, Marzo 2014

A.2. Barra de tareas de flujo de potencia

La Barra de tareas de Flujo de Carga aparecerá sobre la pantalla cuando se seleccione en el modo de Estudio de Flujo de Carga (véase la FIGURA N° 4.2) [8].

FIGURA N° 4.2

BARRA DE TAREAS DE FLUJO DE POTENCIA



Fuente: Guía del usuario ETAP 12.6, Marzo 2014

A.3. Métodos de Cálculo de Flujo de Potencia

ETAP proporciona tres métodos de cálculo de flujo de carga: Newton-Raphson, Newton-Raphson desacoplado-rápido, y Gauss-Seidel Acelerado. Estos poseen diferentes características de convergencia, y a veces un método es más favorable en términos de alcanzar el mejor resultado. Solo hay que seleccionar cualquiera de ellos dependiendo de la configuración del sistema, generación, condición de carga, y los voltajes iniciales de barra [8].

a) Método de Newton-Raphson

Este método formula y soluciona iterativamente la siguiente ecuación de Flujo de Carga:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j1 & j2 \\ j3 & j4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Donde:

P: Vector de potencia real consumida por la barra.

Q: Vector de potencia reactiva consumida por la barra.

V: Vector de magnitud del voltaje de la barra.

δ : Ángulo de la tensión de barra.

J1 a J4: matriz jacobiana de admitancias.

Este Método de Newton-Raphson posee una característica de convergencia cuadrática única. Además posee una velocidad de convergencia muy rápida comparada con otros métodos de cálculo de flujo de carga. También tiene la ventaja que los criterios de convergencia especificados aseguran la convergencia para encontrar potencia real de barra y desajustes por potencia reactiva asegurando la exactitud del resultado. Los criterios de convergencia para el Método de Newton-Raphson típicamente son de 0.001 MW y MVar.

b) Método Newton-Raphson Fast-Decoupled (Desacoplado-Rápido)

Este es sacado del Método de Newton-Raphson, solo que se toma en cuenta la característica inherente de cualquier sistema eléctrico de potencia, donde la reactancia de la línea es mucho mayor que la resistencia, ósea:

- Un cambio en la potencia activa en una barra cualquiera, tiene una directa relación con la variación en la fase de la tensión y tiene poco efecto sobre la magnitud de la tensión.
- Un cambio en la potencia reactiva en una barra cualquiera, tiene una directa relación con la variación de la magnitud de la tensión y tiene poco efecto sobre la fase de la tensión.

Así la ecuación de flujo de carga del Método de Newton-Raphson puede ser simplificada en dos juegos desacoplados separados de las ecuaciones de flujo de carga, que pueden ser solucionadas iterativamente:

$$[\Delta P] = [j1] [\Delta\delta]$$

$$[\Delta Q] = [j4] [\Delta V]$$

El método desacoplado-rápido reduce la información a almacenar en la memoria del computador aproximadamente a la mitad. Y debido a que la matriz Jacobiana es constante el tiempo requerido para su solución se reduce a la mitad. Los criterios de convergencia para este método típicamente son de 0.001 MW y Mvar.

Aunque para el número de iteraciones no sea tan exacto como el Método de Newton-Raphson, el ahorro en el tiempo de ordenador y los favorables criterios de convergencia hace de este método bastante conveniente a la hora de requerir una rápida aproximación.

Se recomienda utilizarlo si el método de Newton-Raphson ha fallado con sistemas radiales o sistemas que tienen larga líneas de transmisión o cables.

c) Método de Gauss-Seidel Accelerated (Acelerado)

Sistema de ecuación de voltaje nodal:

$$[I] = [Y_{BUS}][V]$$

El Método de Gauss-Seidel Acelerado encuentra la solución iterando la siguiente ecuación de flujo de carga:

$$[P + jQ] = [V^T][Y_{BUS}^*][V^*]$$

Donde:

P: Vector de potencia real consumida por la barra.

Q: Vector de potencia reactiva consumida por la barra.

V: Vector del voltaje de la barra.

Y_{bus} : Matriz de entrada del sistema.

Y^* : Matriz de entrada del sistema conjugada.

V^* : Vector del voltaje de la barra conjugada.

V^T : Matriz del voltaje transpuesta.

El Método de Gauss-Seidel Acelerado tiene exigencias relativamente inferiores de los valores de voltaje iniciales de barra comparadas al Método de Newton-Raphson y el Método desacoplado-rápido. En vez de usar la potencia real de barra y el desajuste de potencia reactiva como criterios de convergencia, el Método de Gauss-Seidel Acelerado comprueba la tolerancia de la magnitud del voltaje de barra entre dos iteraciones consecutivas para controlar la precisión de solución. El valor típico para la precisión de la magnitud de voltaje de barra es puesto a 0.000001 pu.

Todo depende de los valores iniciales que sean utilizados. La gama para el factor de aceleración está entre 1.2 y 1.7, y típicamente es puesta a 1.45.

B. Módulo de Análisis de Flujo Armónico

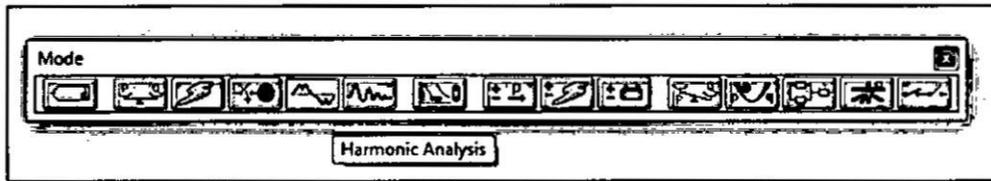
El módulo de Análisis Armónico ETAP le ofrece la mejor herramienta para modelar con precisión diversos componentes y dispositivos del sistema de alimentación para incluir su dependencia de frecuencia, no linealidad, y otras características en virtud de la presencia de fuentes de armónicos. Este módulo cuenta con dos métodos de análisis, el método de flujo de carga armónico y el método de escaneado de frecuencia armónica. Ambos métodos son los métodos más populares y poderosas para el análisis armónico sistema de energía. Mediante el uso de estos dos métodos en combinación, diferentes índices de armónicos se calculan y se comparan con las limitaciones industriales estándar, y los problemas de calidad de energía existentes y potenciales, además de los problemas de seguridad asociados con los armónicos se pueden revelar fácilmente. Las causas de estos problemas pueden ser identificados y diferentes esquemas de mitigación y correctivas pueden ser probados y verificados por último

El módulo de Análisis Armónicos de ETAP permite identificar problemas de origen armónico, minimizar disparos por contaminación por estos, diseñar y verificar filtros, y reportar violaciones a los límites de distorsión. Los cálculos integrales de flujo de carga y muestreo de frecuencias se llevan a cabo aplicando modelos armónicos detallados y filtros de componente no-entera [8].

B.1. Barra de Herramientas para el Análisis de Armónicos

Con la opción "Harmonic Analysis" (Análisis de Flujo de Potencia), incluida en el programa es posible calcular la tensión a la cual está sometida una barra, además de corroborar la regulación de tensión y finalmente observar la dirección del flujo de potencia a través del sistema en estudio, el cual pudiese presentarse con una estructura radial o como un lazo abierto (véase la FIGURA N° 4.3, en la página 111) [8].

FIGURA N° 4.3
BARRA DE HERRAMIENTAS DE FLUJO ARMONICO

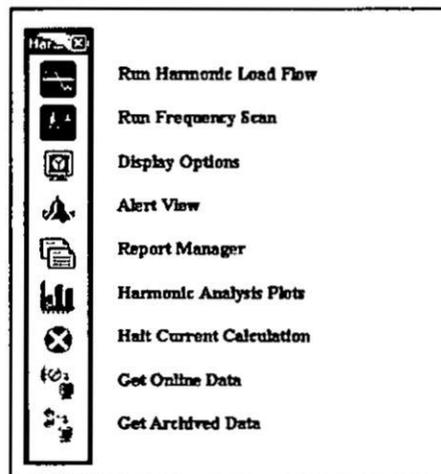


Fuente: Guía del usuario ETAP 12.6, Marzo 2014

B.2. Barra de Tareas de Análisis de Armónicos

La barra de herramientas de armónicos estudio de análisis aparecerá en la pantalla cuando se está en el modo armónico estudio de análisis (véase la FIGURA N° 4.4) [8].

FIGURA N° 4.4
BARRA DE TAREAS DE FLUJO ARMONICO



Fuente: Guía del usuario ETAP 12.6, Marzo 2014

C. Módulo de análisis de corto circuito

Cuando se habla de un análisis de cortocircuito, se debe señalar que éste análisis tiene como principales objetivos dos aspectos básicos, que son: la determinación de esfuerzos mecánicos para la calibración de interruptores y protecciones, por medio de las corrientes de falla, y establecer los ajustes y dimensiones de los elementos de protección que deberán ser capaces de soportar y aislar los elementos del sistema, cuando éste se encuentre en condición anormal de funcionamiento.

Tales corrientes de falla producen esfuerzos térmicos y mecánicos en los elementos del sistema que pueden inhabilitarlo completamente, por tal efecto es imprescindible que los resultados de un análisis de cortocircuito determinen la mejor selectividad y sensibilidad de las protecciones, con el fin de aislar la parte del sistema que se encuentra en condición de falla.

Desde el punto de vista eléctrico, un cortocircuito es la conexión accidental o intencionada, mediante una resistencia o impedancia relativamente baja, de dos o más puntos de un circuito que está operando en condiciones normales a voltajes diferentes. Un cortocircuito origina aumentos bruscos en las corrientes que circulan por el sistema, ocasionando daños al equipamiento existente. Algunos de los incidentes más graves por cortocircuitos en la red eléctrica son debidos a la caída de un rayo en una línea de transmisión, el incendio de un transformador o la inundación de una subestación.

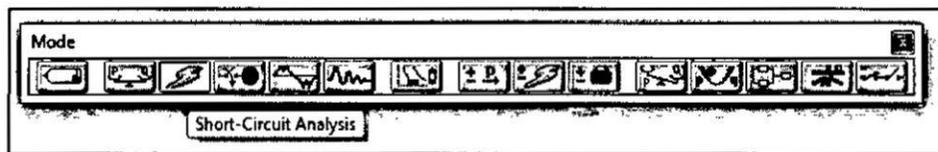
ETAP incorpora la posibilidad de efectuar estudios de cortocircuito "trifásico", "monofásico a tierra", "bibásico" y "bibásico a tierra", basando su procedimiento de cálculo en los estándares internacionales actualizados ANSI/IEEE y IEC. Posee posibilidad de ejecutar cálculos de corrientes totales de cortocircuito, así como, los aportes individuales de motores y generadores que contribuyen a la falla [8].

C.1. Barra de herramientas para el análisis de corto circuito

Con la opción "Short-Circuit Analysis" (Análisis de Corto Circuito), incluida en el programa es posible la corrientes de falla del sistema eléctrico de potencia (véase la FIGURA N° 4.5) [8].

FIGURA N° 4.5

BARRA DE HERRAMIENTAS DE CORTO CIRCUITO



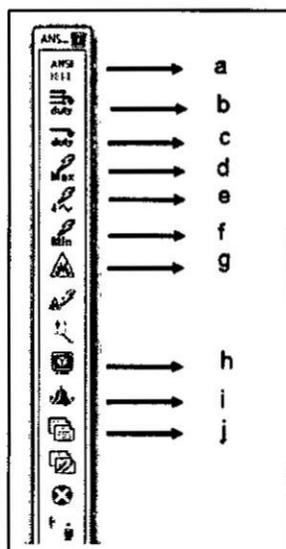
Fuente: Guía del usuario ETAP 12.6, Marzo 2014

C.2. Barra de tareas de flujo de potencia

La Barra de tareas de Flujo de Carga aparecerá sobre la pantalla cuando se seleccione en el modo de Estudio de Flujo de Carga. (Véase la FIGURA N° 4.6) [8].

FIGURA N° 4.6

BARRA DE TAREAS DE CORTO CIRCUITO SEGÚN ESTANDAR ANSI/IEEE.



Fuente: Guía del usuario ETAP 12.6, Marzo 2014

C.3. Métodos de cálculo de cortocircuito

Como se señaló previamente, ETAP ofrece dos métodos de cálculo de cortocircuito, que son: según la Normativa ANSI/IEEE y según la Normativa IEC [8].

a) Metodología de cálculo según Normativa ANSI/IEEE.

ETAP utiliza tres diferentes impedancias para calcular las corrientes de cortocircuito momentáneo, de interrupción y de régimen permanente, estas son: red de ½ ciclo (sub transitorio), red de 1.5 – 4 ciclos (transitorio) y de 30 ciclos (régimen permanente).

El cortocircuito momentáneo de ½ ciclo corresponde al punto más alto de la corriente de cortocircuito antes de que decaiga a sus valores estado permanente o estacionario.

ETAP utiliza la siguiente fórmula (2.106) para calcular las corrientes de cortocircuito simétricas momentáneas:

$$I_{\text{nom,rms,sim}} = \frac{V_{\text{prefalla}}}{\sqrt{3} \times Z_{\text{eq}}} \quad (2.106)$$

Donde:

Z_{eq} : Es la impedancia de falla vista desde el punto de falla.

ETAP utiliza la siguiente fórmula (2.107) para calcular las corrientes de cortocircuito asimétricas momentáneas:

$$I_{\text{nom,rms,asim}} = MF_m I_{\text{nom,rms,sim}} \quad (2.107)$$

Donde:

MF_m : Es el factor multiplicador momentáneo que se calcula de la siguiente manera.

$$MF_m = \sqrt{1 + 2e^{-\frac{2\pi}{X/R}}} \quad (2.108)$$

Donde:

X/R : Relación X/R obtenida en el punto de falla.

b) Metodología de cálculo según Normativa IEC.

La siguiente tabla muestra los “factores de corrección c” para distintos niveles de tensión (véase la TABLA N° 4.1) [8].

TABLA N° 4.1
FACTOR “C” DE CORRECCIÓN PARA DISTINTOS NIVELES DE TENSIÓN.

Otros: < 1001 V	1.1	0.95
Voltaje Medio: > 1 kV a 35 kV	1.10	1.00
Alto Voltaje: > 35kV a 230kV	1.10	1.00

Fuente: IEC 60909-0

La corriente inicial de cortocircuito simétrico (I''_k) se calcula utilizando la siguiente fórmula (2.109):

$$I''_k = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (2.109)$$

Donde:

U_n : Tensión nominal del sistema.

Z_k : Impedancia equivalente desde el punto de falla.

C: “Factor c” de corrección de tensión.

La corriente de cortocircuito “Peak” (I_p) se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$I_p = \sqrt{2} K I''_k \quad (2.110)$$

Donde:

K: Es una función de la relación R/X en el punto de falla.

El estándar IEC proporciona tres métodos diferentes para el cálculo del “factor K”.

- **Método A:** Relación uniforme R/X. El valor del “factor K” se determina a partir de tomar la relación más pequeña de R / X entre todas las ramas de la red.
- **Método B:** Relación R/X en el punto de cortocircuito. El valor del “factor K” se determina multiplicando el “factor K” por un factor de seguridad de 1,15, que cubre los errores causados después de la obtención de la relación R/X de una reducción de la red con impedancias complejas.
- **Método C:** Frecuencia equivalente. El valor del “factor K” se calcula utilizando una frecuencia alterada R/X. R/X se calcula a una frecuencia más baja y luego multiplicado por una frecuencia dependiente de un Factor multiplicador.

Por último la componente de DC de la corriente de cortocircuito para el tiempo de retardo mínimo de un dispositivo de protección se calcula en base al circuito simétrico de cortocircuito y la relación de sistema X/R según la siguiente fórmula:

$$I_{DC} = I_K'' \sqrt{2e^{\left(-\frac{2\pi f t_{min}}{X/R}\right)}} \quad (2.111)$$

Donde:

f: Frecuencia del sistema.

Tmin: Es el tiempo mínimo del dispositivo protector bajo funcionamiento.

X/R: Es el valor del sistema en la barra en condición de falla.

2.- Modelo del sistema eléctrico

A. Descripción del sistema eléctrico

a) Suministro

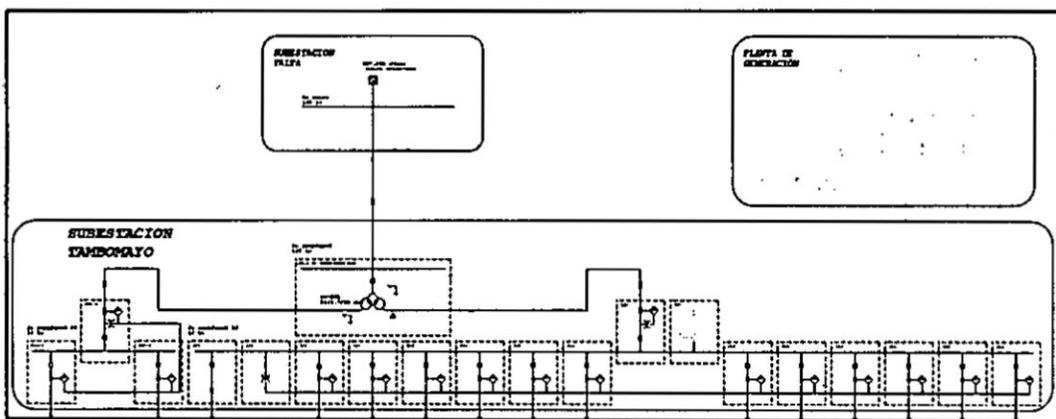
El suministro de energía hacia todas las instalaciones de la planta se obtendrá desde el SEIN, a partir de la Nueva Subestación Talta 138kV ubicada en la Derivación de la Línea LT 138kV Callalli – Ares (L-1040).

Mediante una línea de transmisión de 138kV de 32.198km con conductor AAAC y cables de guarda del tipo EHS y OPGW, se conectará a la barra en 138kV de la Nueva S.E Tambomayo.

b) Subestación eléctrica principal Tambomayo

La subestación principal cuenta con un Transformador de Potencia (TP-001) de 3 devanados, 138/22/10kV, 18/6/18 MVA-ONAN, 22/8/22 MVA-ONAF, con 13 circuitos de salida (véase la FIGURA N° 4.7).

FIGURA N° 4.7
ESQUEMA UNIFILAR EN SUMINISTRO DE 10KV.



Fuente: Elaboración Propia

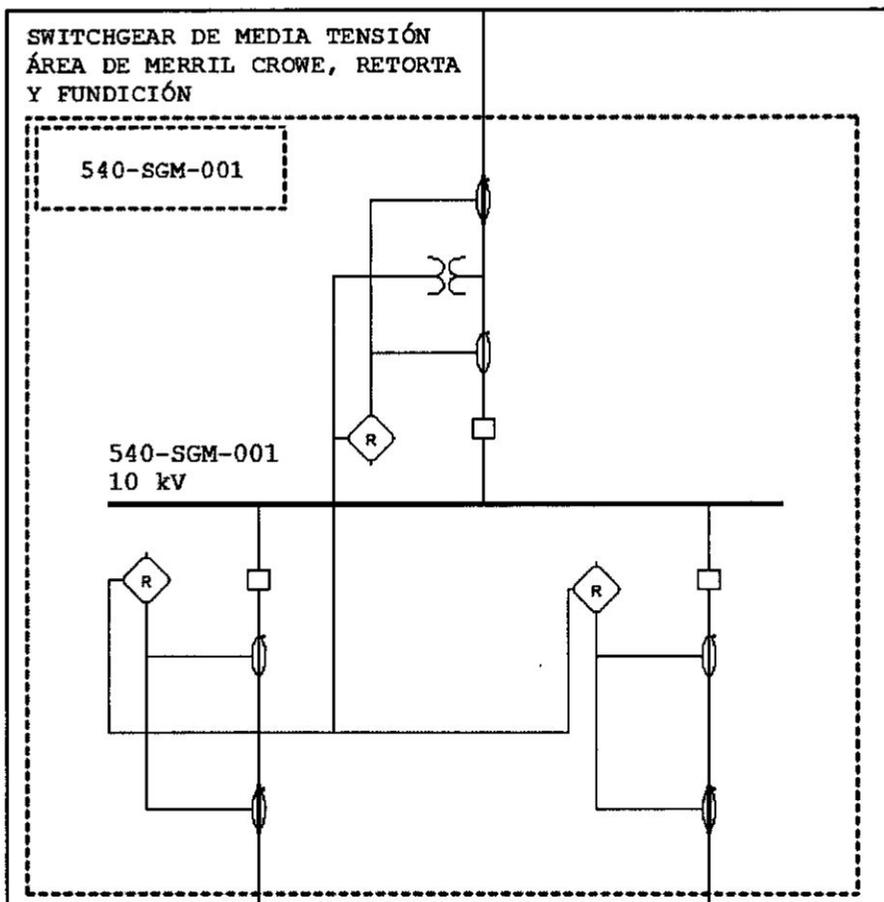
c) Subestación eléctrica - área 540 "Merrill Crowe"

El área "Merrill Crowe", la cual es alimentada por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo mediante la línea aérea C06 en 10KV (véase la FIGURA N° 4.8). Consta de una barra principal en 10kV (Switchgear De Media Tensión 540-SGM-001) del cual derivan dos transformadores de potencia 10 a 0.48kV:

- 540-XFD-001 Alimenta al CCM 540-MCL-001 en 0.48kV.
- 590-XDF-001 Alimenta al CCM 590-MCL-001 en 0.48kV.

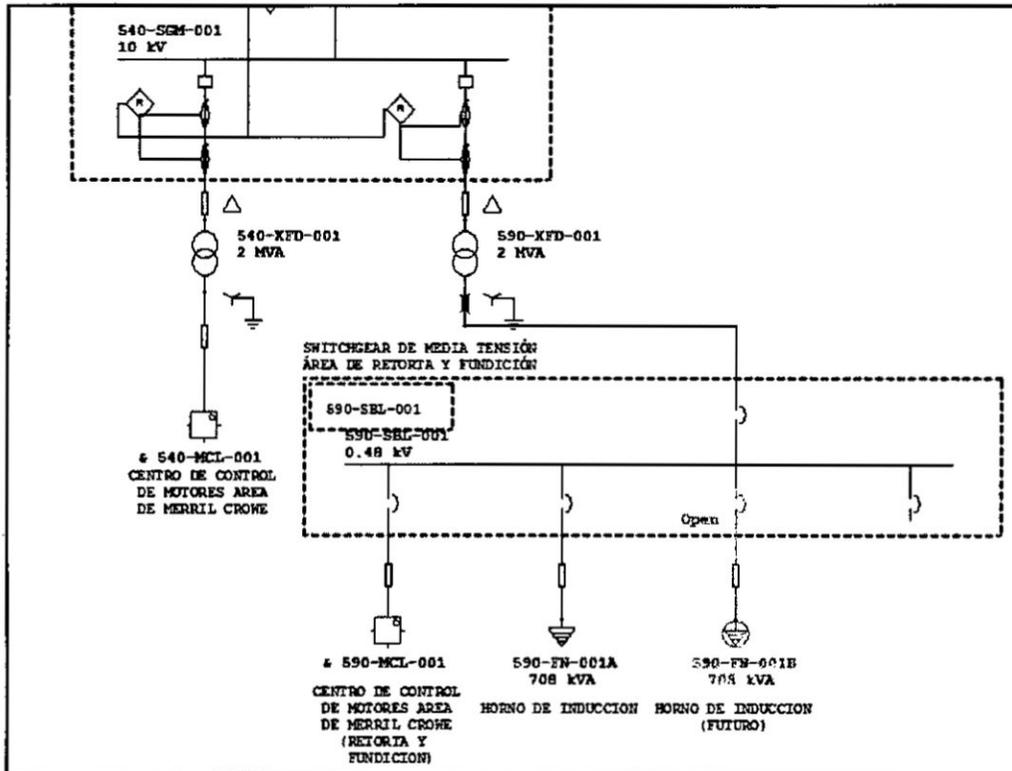
FIGURA N° 4.8

SWITCHGEAR DE MEDIA TENSIÓN SE MERRILL CROWE.



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA N° 4.9
ESQUEMA UNIFILAR SE MERRILL CROWE.



Fuente: Elaboración Propia

d) Subestación eléctrica – Área Flotación 510

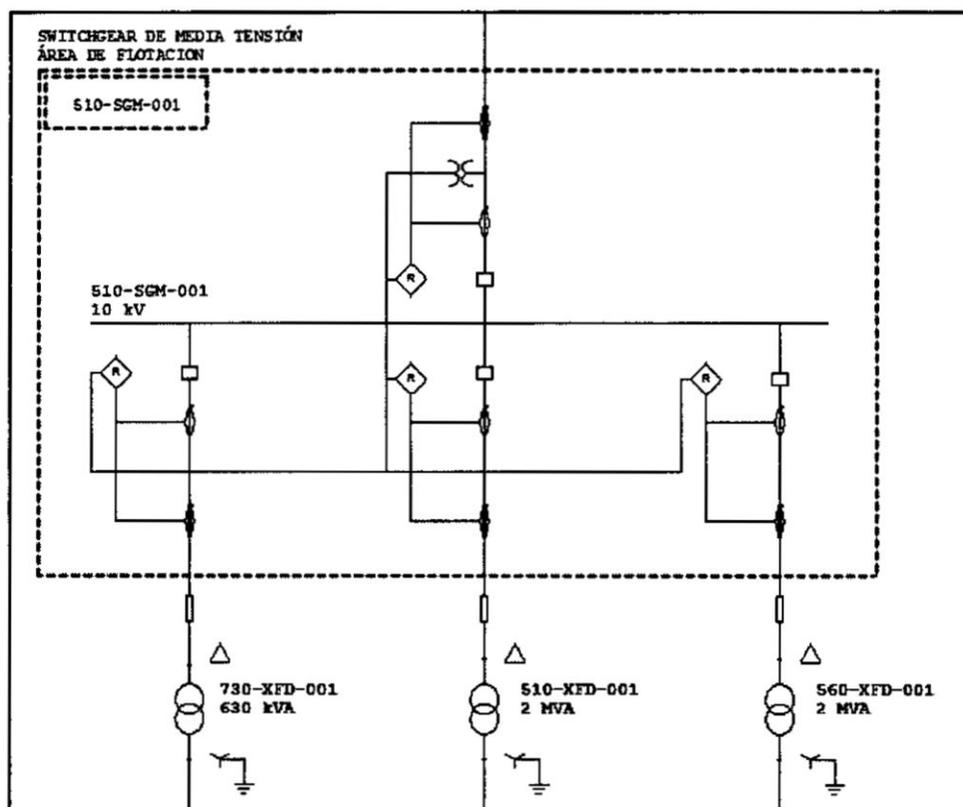
El área “Flotación”, la cual es alimentada por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo mediante la línea aérea C01 en 10 KV. Consta de una barra principal en 10kV (Switchgear De Media Tensión 510-SGM-001) del cual derivan dos transformadores de potencia 10 a 0.48kV y uno de 10 a 4,16KV:

- El transformador 730-XFD-001 que alimenta en 4.16 kV al centro de control de motores de media tensión 730-MCM-001.

- El transformador 510-XFD-001 que alimenta en 0.48kV al tablero de distribución de baja tensión 510-SBL-001, que a su vez alimenta a los centros de control de motores 510-MCL-001 y 510-MCL-002.
- El transformador 560-XFD-001 que alimenta en 0.48kV al tablero de distribución de baja tensión 560-SBL-001, que a su vez alimenta a los centros de control de motores 542-MCL-001, 550-MCL-001, 560-MCL-001 y 730-MCL-001.
- 730-XDF-001 Alimenta al CCM 730-MCM-001 en 4.16kV.

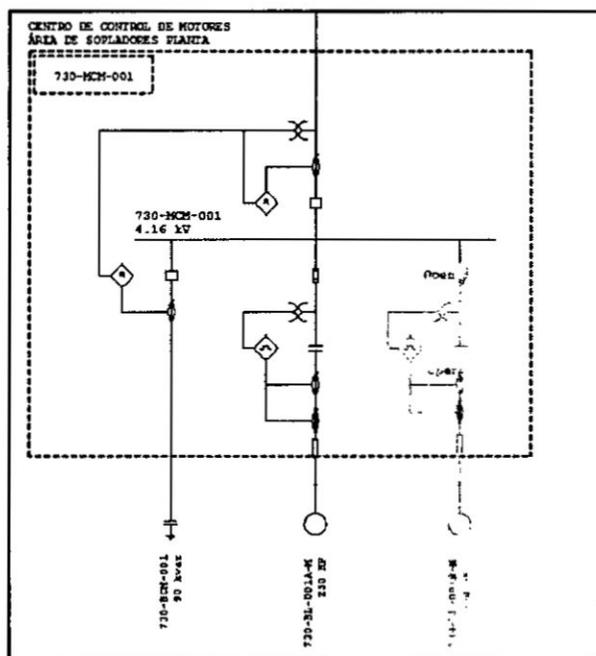
(Véase en la FIGURA N° 4.10, FIGURA N° 4.11, FIGURA N° 4.12, FIGURA N° 4.13, en las páginas 120, 121).

FIGURA N° 4.10
SWITCHGEAR DE MEDIA TENSIÓN SE FLOTACIÓN



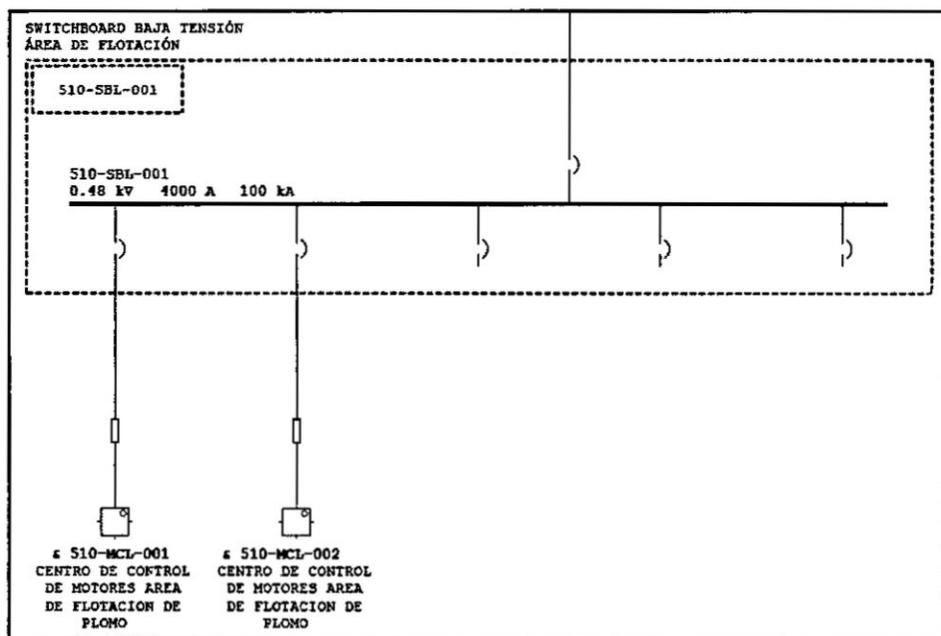
Fuente: Elaboración Propia

FIGURA N° 4.11
CENTRO DE CONTROL DE MOTORES SOPLADORES



Fuente: Elaboración Propia

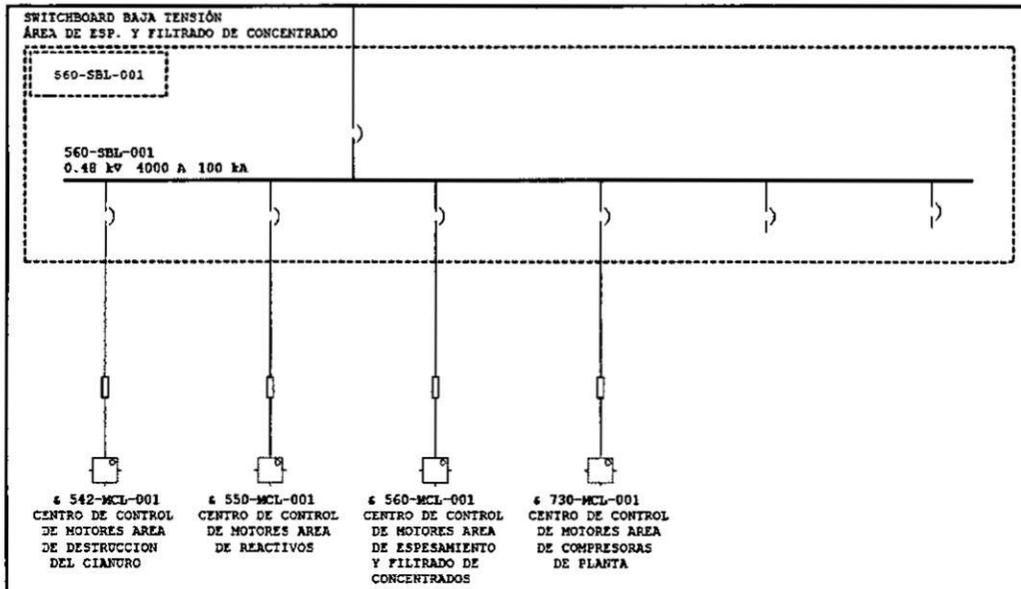
FIGURA N° 4.12
SWITCHBOARD DE BAJA TENSIÓN FLOTACIÓN



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA N° 4.13

SWITCHBOARD DE BAJA TENSIÓN FILTRADO DE CONCENTRADO



Fuente: Elaboración Propia

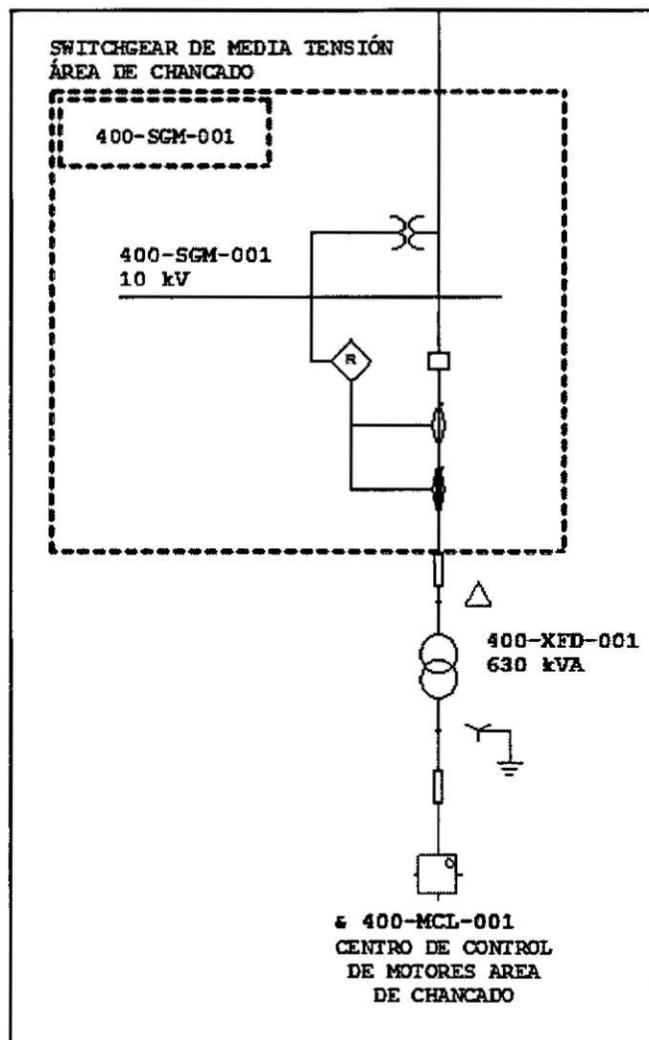
e) Subestación eléctrica – Área Chancado 400

El área "Chancado", la cual es alimentada por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo mediante la línea aérea C06 en 10 KV. Consta de una barra principal en 10kV (Switchgear De Media Tensión 400-SGM-001) del cual deriva un transformador de potencia 10 a 0.48kV:

- 400-XFD-001 Alimenta al CCM 400-MCL-001 en 0.48kV.

(Véase en la FIGURA N° 4.14, en la página 123).

FIGURA N° 4.14
SWITCHGEAR DE MEDIA TENSIÓN SE CHANCADO



Fuente: Elaboración Propia

f) Subestación eléctrica – Área Molienda 430

El área "Molienda", la cual es alimentada por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo mediante las líneas aéreas C02 y C03 en 10 KV. Consta de una barra principal en 10kV (Véase en la FIGURA N° 4.15, en la página 124 y FIGURA N° 4.16, en la página 125):

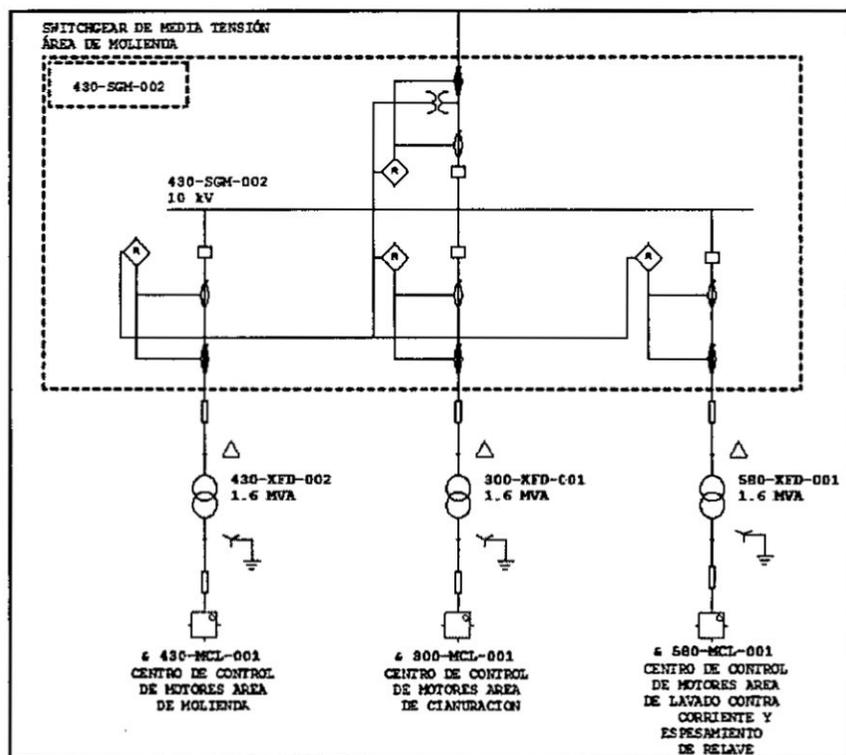
Switchgear De Media Tensión 430-SGM-002 del cual derivan tres transformadores de potencia 10 a 0.48kV:

- 430-XFD-002 Alimenta al CCM 430-MCL-001-002 en 0.48kV.
- 300-XDF-001 Alimenta al CCM 300-MCL-001 en 0.48kV.
- 580-XDF-001 Alimenta al CCM 580-MCL-001. & 610-MCL-001 en 0.48kV.

Switchgear De Media Tensión 430-SGM-001 del cual deriva un transformador de potencia 10 a 4.16kV:

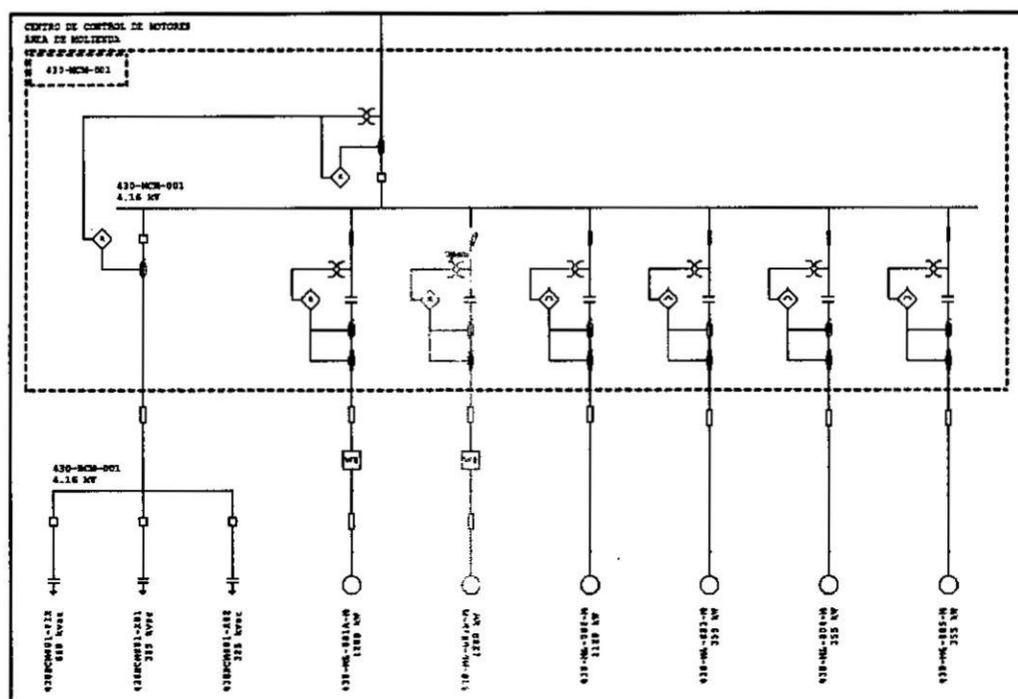
- 430-XFD-001 Alimenta al CCM 430-MCM-001 en 4.16kV.

FIGURA N° 4.15
SWITCHGEAR DE MEDIA TENSIÓN SE MOLIENDA.



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA N° 4.16
CENTRO DE CONTROL DE MOTORES MT SE MOLIENDA



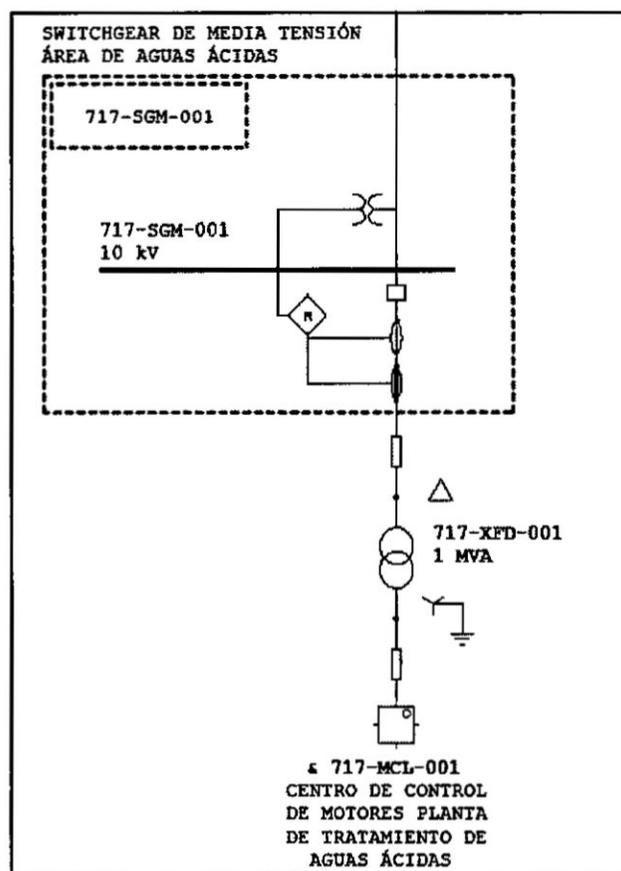
Fuente: Elaboración Propia

g) Subestación eléctrica – Aguas ácidas 717

El área “Aguas ácidas”, la cual es alimentada por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo mediante la línea aérea C05 en 10 KV. Consta de una barra principal en 10kV (Switchgear De Media Tensión 717-SGM-001) del cual deriva un transformador de potencia 10 a 0.48kV (Véase en la FIGURA N° 4.17, en la página 126):

- 717-XFD-001 Alimenta al CCM 717-MCL-001 en 0.48kV.

FIGURA N° 4.17
SWITCHGEAR DE MEDIA TENSIÓN SE AGUAS ÁCIDAS.



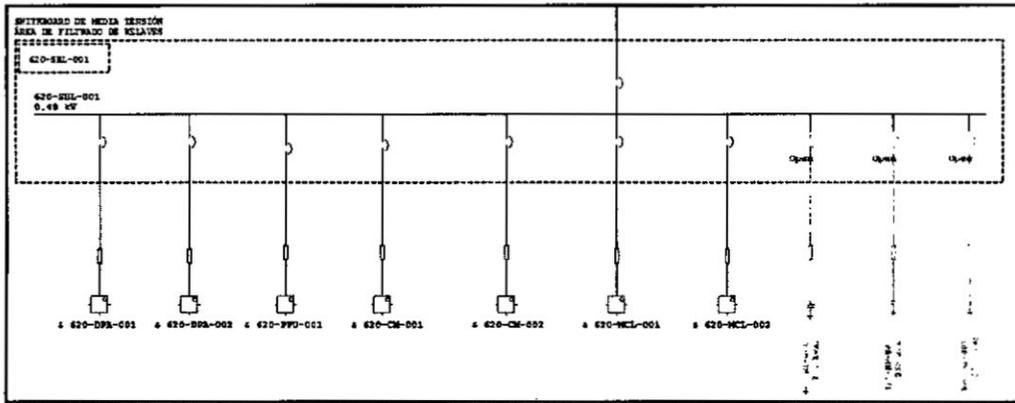
Fuente: Elaboración Propia

h) Subestación eléctrica – Filtrado de relaves 620

El área “Filtrado de Relaves”, la cual es alimentada por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo mediante la línea aérea C08 en 10 KV. Consta de una barra principal en 10kV (Switchgear De Media Tensión 620-SGM-001) del cual deriva un transformador de potencia 10 a 0.48kV (Véase en la FIGURA N° 4.18, en la página 127):

- 620-XFD-001 Alimenta al Switchboard 620-SBL-001 en 0.48kV.

FIGURA N° 4.18
SWITCHGEAR DE MEDIA TENSIÓN SE FILTRADO DE RELAVES.



Fuente: Elaboración Propia

i) Subestaciones eléctricas 22 kV

Son alimentadas por el devanado secundario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 22kV, Consta de 3 cargas principales.

- Subestación Eléctrica Campamento Definitivo 750
- Subestación Eléctrica Garita 771
- Subestación Eléctrica Relaves Planta De Relaves 620

j) Subestación eléctrica taller de planta

Desde la celda de salida C08, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

k) Subestación eléctrica embalse de agua

Desde la celda de salida C02, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

l) Subestación eléctrica compresoras mina

El área "Compresoras mina", la cual es alimentada por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo mediante la línea aérea C04 en 10 KV. Consta de una barra principal en 10kV (Switchgear De Media Tensión 730-ES-001) del cual deriva un transformador de potencia 10kV a 4.16kV

m) Subestaciones eléctricas PTAP Y SCI

Desde la celda de salida C06, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

n) Subestaciones eléctricas laboratorio químico

Desde la celda de salida C06, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

o) Subestación eléctrica grifo y sala de logeo

Desde la celda de salida C05, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

p) Subestación eléctrica taller de mantenimiento

Desde la celda de salida C05, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

q) Subestación eléctrica oficinas administrativas

Desde la celda de salida C05, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

r) Subestación eléctrica campamentos

Desde la celda de salida C05, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

s) Subestación eléctrica almacén general

Desde la celda de salida C10, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

t) Subestación eléctrica almacén reactivos

Desde la celda de salida C10, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

u) Subestación eléctrica taller camiones planta

Desde la celda de salida C10, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

v) Subestación eléctrica área bocamina 4840

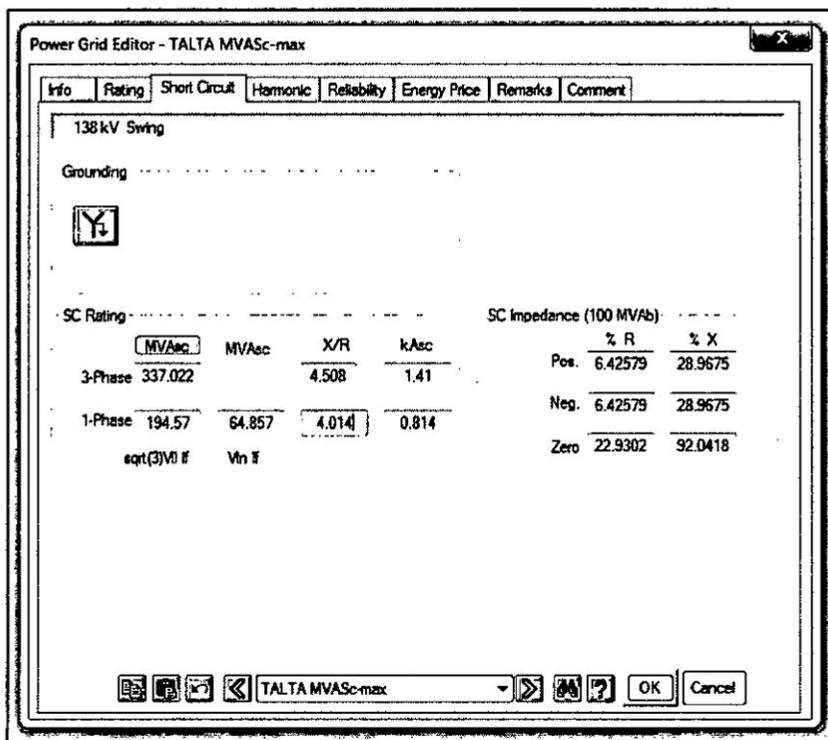
Desde la celda de salida C11, son alimentadas por el devanado terciario del transformador de potencia de tres devanados 138/22,9/10 KV desde la subestación eléctrica Tambomayo en 10kV.

B. Parámetros del sistema eléctrico

a) Potencia de corto circuito

La potencia de cortocircuito en barra que proviene de la red de Talta, subestación principal que alimenta al sistema eléctrico tambomayo es de 337 MVA_{sc} en 138kV este valor fue tomados de la base de datos del COES en la línea de transmisión SE TALTA – SE TAMBOMAYO (Véase en la FIGURA N° 4.19).

FIGURA N° 4.19
PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE CORTO CIRCUITO SE TALTA.



Fuente: Elaboración Propia

b) Base de datos de transformadores

La base de datos de los transformadores de potencia del sistema eléctrico Tambomayo se realizó según la información brindada por buenaventura, a continuación se puede apreciar en una tabla de resumen con los parámetros principales de cada transformador (véase en la TABLA N°4.2).

TABLA N° 4.2
BASES DE DATOS DE TRANSFORMADORES

Código	Descripción	Modelo	Up	Us	Sn	Zcc	X/R	Ip	Is	Grupos	Regulación	Dinámico	S	I	E		
			kV	kV	KVA	%	%	A	A								
C01	Chencado Primario	400-XFD-001	10	0.48	500	4.00	1.50	28.9	601.4	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C01	Morri Crown	540-XFD-001	10	0.48	2000	8.00	6.00	115.5	2405.6	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C01	Retorta y Fundición	590-XFD-001	10	0.48	2000	8.00	6.00	115.5	2405.6	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C01	Flotación Pb-Zn	510-XFD-001	10	0.48	2000	8.00	6.00	115.5	2405.6	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C01	Esposamiento y Filtrado	560-XFD-001	10	0.48	2000	8.00	6.00	115.5	2405.6	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C01	Área de Compresores	730-XFD-001	10	4.16	630	4.00	1.50	36.4	87.4	ONAN	+/- 5%	Dyn5	400	10	6.00		
C02	Lixiviación	300-XFD-001	10	0.48	1800	6.00	6.00	92.4	1924.5	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C02	Molanda	430-XFD-002	10	0.48	1800	6.00	6.00	92.4	1924.5	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C02	CCD	580-XFD-001	10	0.48	1800	6.00	6.00	92.4	1924.5	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C03	Molinos	430-XFD-001	10	4.16	6300 / 7500	6.50	6.50	433.0	1040.9	ONAN/ ONAF	+/- 5%	Dyn5	400	10	6.00		
C05	Taller de Mantenimiento	726-XFD-001	10	0.48	750	5.75	3.50	43.3	902.1	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C05	Grifo	725-XFD-001	10	0.48	180	4.00	1.50	9.2	102.5	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C05	Agua Acidas	717-XFD-001	10	0.48	1000	5.00	3.50	57.7	1202.8	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C05	Oficinas Administrativas	740-XFD-001	10	0.48	315	4.00	1.50	18.2	378.9	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C05	Almacén General	721-XFD-001	10	0.48	112.5	4.00	1.50	6.5	135.3	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C06	Sala de Capacitación & Vestuarios	741-XFD-001	10	0.48	225	4.00	1.50	13.0	270.6	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C06	Laboratorio Químico	745-XFD-001	10	0.48	1000	5.00	3.50	57.7	1202.8	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C06	Tratamiento de Agua	711-XFD-001	10	0.48	250	4.00	1.50	14.4	300.7	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C07	Compensitos	750-XFD-001	10	0.40/ 0.23	500	4.00	1.50	28.9	721.7	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C07	Compensitos	750-XFD-002	10	0.40/ 0.23	500	4.00	1.50	28.9	721.7	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C07	Compensitos	750-XFD-003	10	0.40/ 0.23	315	4.00	1.50	18.2	454.7	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C07	Compensitos	750-XFD-004	10	0.40/ 0.23	630	4.00	1.50	36.4	909.3	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C07	Compensitos	750-XFD-005	10	0.40/ 0.23	100	4.00	1.50	5.8	144.3	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C07	Compensitos	750-XFD-006	10	0.40/ 0.23	400	4.00	1.50	23.1	577.4	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C07	Compensitos	750-XFD-007	10	0.40/ 0.23	400	4.00	1.50	23.1	577.4	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C08	Captación y Conducción de Agua Fresca	710-XFD-001	10	0.48	50	4.00	1.50	2.9	60.1	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C08	Garita de Control Prin.	771-XFD-001	10	0.40/ 0.23	25	4.00	1.50	1.4	36.1	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C08	Garita de Control Aux.	771-XFD-002	10	0.40/ 0.23	25	4.00	1.50	1.4	36.1	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
C08	Planta de Osamos	620-XFD-001	10	0.48	500	4.00	1.50	28.9	601.4	ONAN	+/- 5%	Dyn5					
L01	Subestación Principal Tamborayo	TP-001	138	3 DEVANADOS	18000 / 6000	4.60	H-M	75.31	BASE 18MVA	ONAN	+2/-14*1.25%	YN					
			22.9		6000 / 18000	2.29	M-L	151.3									
			10		18000 / 18000	7.50	L-H	1039.2									
			138	3 DEVANADOS	22000 / 6000	5.67	H-M	92.04	BASE 22MVA	ONAF	+2/-14*1.25%	YN					
			22.9		6000 / 22000	2.78	M-L	201.7									
			10		22000 / 22000	9.17	L-H	1270.0									

Fuente: Ingeniería de detalle Buenaventura.

c) Factores aplicados a las cargas

La base de datos de las cargas del sistema eléctrico Tambomayo, se realizó según la información brindada por buenaventura, las cuales contemplan una tabla de factores de carga según operación de cada equipamiento, motor y feeder de alimentación (Véase en la TABLA N° 4.3 y TABLA N° 4.4 en la página 133).

TABLA N° 4.3
TABLA DE FACTORES APLICADOS A LAS CARGAS N°1

AC	Equipamiento de Aire Acondicionado (HVAC)	0.25	0.50	0.50	0.50	Feeder
AG	Agitadores y Mezcladores	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
AP	Planta de Adido	0.90	0.90	1.00	0.90	Motor
AZ	Analizador	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
BA	Balanza	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
BAC	Cargado de Bateria	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
BL	Sopladores de Gas / Aire	0.90	0.90	1.00	0.90	Motor
CB	Faja Transportadora	0.60	0.85	0.80	0.75	Motor
CG	Concentrador Gravimétrico	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
CL	Clasificador	0.38	0.85	0.50	0.75	Motor
CM	Compresor	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
CN	Grúas	0.07	0.30	0.10	0.67	Feeder
CQ	Equipo de Fundición	0.90	0.90	1.00	0.90	Motor
CR	Chemadoras	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
DC	Colector de Polvo	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
DO	Puerta Automática	0.07	0.30	0.10	0.70	Feeder
DPA	Tablero de Distribución Auxiliar	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
DPP	Tablero de Distribución de Fuerza de Baja Tensión	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
EF	Horno Eléctrico	0.90	0.90	1.00	0.90	Feeder
EL	Elevadores o Ascensores	0.07	0.30	0.10	0.70	Motor
ET	Trocendo Eléctrico (Electric heat trading)	0.07	0.30	0.10	0.70	Feeder
EW	Equipo Electrowinning	0.90	0.90	1.00	0.90	Feeder
FA	Ventiladores	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
FD/DR	Secadores Flash / Calcinadores	0.90	0.90	1.00	0.90	Feeder
FE	Alimentador (Apron Feeder)	0.90	0.90	1.00	0.90	Feeder
FL	Filtro de Prensa	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
FACP	Tablero de Protección Contra Incendios	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
FU/FN	Horno	0.23	0.90	0.30	0.75	Feeder
FC	Celda de Flotación	0.90	0.90	1.00	0.90	Motor
GA	Válvulas y Derivadores	0.07	0.30	0.10	0.70	Motor
GU	Unidad de Engrase	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
GR	Grizzly Vibratorio	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
GW	Sistema de Lavado de Gases	0.80	0.90	1.00	0.90	Feeder
HE	Calentadores (Heaters)	0.23	1.00	0.30	0.75	Feeder
HPP/HP	Tablero de Fuerza del Sistema Hidráulico	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
HS	Polipastos y Cerros	0.07	0.30	0.10	0.70	Motor
HT	Toda Monoriel	0.07	0.15	0.10	0.67	Feeder
HUP	Tablero de Fuerza de la Unidad Hidráulica	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
ID	Inching Drive	0.07	0.30	0.10	0.70	Motor

Fuente: Ingeniería de detalle Buenaventura.

TABLA N° 4.4
TABLA DE FACTORES APLICADOS A LAS CARGAS N°2

LPA	Tablero de Iluminación	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
MCL	Centro de Control de Motores de Baja Tensión	0.00	0.00	0.00	0.00	Feeder
MCM	Centro de Control de Motores de Media Tensión	0.00	0.00	0.00	0.00	Feeder
ML	Molino de Bola, Molinonda	0.85	1.00	1.00	0.85	Motor
MD	Detector de Metales	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
MG	Electrolmán	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
MX	Generador de Acido Cero	0.80	0.90	1.00	0.90	Feeder
OP	Planta de Oxígeno	0.90	0.90	1.00	0.90	Feeder
PCI	Bomba Contra Incendio	0.07	0.30	0.10	0.70	Motor
PJ	Bomba Jockey	0.07	0.30	0.10	0.70	Motor
PN	Transportador Neumático	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
PTAP/PTW	Planta de Tratamiento de Agua Potable	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
PU	Bombas	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
PU	Bombas Sumidero	0.30	0.85	1.00	0.75	Motor
RB	Rompe Rocas (Rock Breakers)	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
RF	Rectificadores	0.90	0.95	1.00	0.90	Feeder
RM	Molino de Rodillos	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
RP	Tablero de Relés	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
SA	Muestreador	0.07	0.30	0.10	0.70	Motor
SC	Zaranda Vibratoria	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
SGL	Switchgear de Baja Tensión	0.00	0.00	0.00	0.00	Feeder
SGM	Switchgear de Media Tensión	0.00	0.00	0.00	0.00	Feeder
SK	Apladores (Stackers)	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
TH	Espandor	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
TR	Tablero Rectificador	0.00	0.00	1.00	0.90	Motor
UPS	Sistema de Alimentación Ininterrumpida	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
VB	Vibrador	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor
WI	Winches	0.07	0.30	0.10	0.70	Motor
WR	Salida de Fuerza para Máquina de Soldar	0.07	0.15	0.10	0.70	Feeder
WTP	Planta de Osmosis Inversa	0.75	0.85	1.00	0.75	Feeder
XFD	Transformador de Distribución	0.00	0.00	0.00	0.00	Feeder
XFL	Transformador de Iluminación	0.90	0.90	1.00	0.90	Feeder
XFU	Subestación Unifilar	0.00	0.00	0.00	0.00	Feeder
XFP	Transformador de Potencia	0.00	0.00	0.00	0.00	Feeder
XFZ	Transformador de Instrumentación	0.90	0.90	1.00	0.90	Feeder
XV/ZM	Válvulas	0.75	0.85	1.00	0.75	Motor

Fuente: Ingeniería de detalle Buenaventura.

d) Eficiencias para motores eléctricos

Eficiencias a plena carga para motores eléctricos nema Premium, 60hz, 600v o menos (Véase en la TABLA N° 4.5).

TABLA N° 4.5

TABLA DE EFICIENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS A 600V.

1	77	74	85.5	82.5	82.5	80
1.5	84	81.5	86.5	84	986.5	84
2	85.5	82.5	86.5	84	87.5	85.5
3	85.5	82.5	89.5	87.5	88.5	86.5
5	86.5	84	89.5	87.5	89.5	87.5
7.5	88.5	86.5	91	89.5	90.2	88.5
10	89.5	87.5	91.7	90.2	91.7	90.2
15	90.2	88.5	93	91.7	91.7	90.2
20	91	89.5	93	91.7	92.4	91
25	91.7	90.2	93.6	92.4	93	91.7
30	91.7	90.2	94.1	93	93.6	92.4
40	92.4	91	94.1	93	94.1	93
50	93	91.7	94.5	93.6	94.1	93
60	93.6	92.4	95	94.1	94.5	93.6
75	93.6	92.4	95	94.1	94.5	93.6
100	93.6	92.4	95.4	94.5	95	94.1
125	94.1	93	95.4	94.5	95	94.1
150	94.1	93	95.8	95	95.4	94.5
200	95	94.1	95.8	95	95.4	94.5
250	95	94.1	95.8	95	95.4	94.5
300	95.4	94.5	95.8	95	95.4	94.5
350	95.4	94.5	95.8	95	95.4	94.5
400	95.8	95	95.8	95	95.8	95
450	95.8	95	96.2	95.4	96.2	95.4
500	95.8	95	96.2	95.4	96.2	95.4

Fuente: Catálogos de motores WEG.

Eficiencias a plena carga para motores eléctricos nema Premium, 60hz, 5000v o menos (Véase en la TABLA N° 4.6).

TABLA N° 4.6

TABLA DE EFICIENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS A 5000V.

250	94.5	93.6	95	94.1	95	94.1
300	94.5	93.6	95	94.1	95	94.1
350	94.5	93.6	95	94.1	95	94.1
400	94.5	93.6	95	94.1	95	94.1
450	94.5	93.6	95	94.1	95	94.1
500	94.5	93.6	95	94.1	95	94.1

Fuente: Catálogos de motores WEG.

e) Factor de potencia de motores

Motores Trifásicos, 460V, Alta eficiencia, totalmente cerrados, 60 Hz, diseño NEMA B, 40°C ambiente (Véase en la TABLA N° 4.7, 4.8 y 4.9).

TABLA N° 4.7

TABLA DE EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS N°1

1	3600	0.8	1.4	12	73.7	78.3	80	77	86	90	K
	1800	1.2	1.6	12	78.7	81.8	82.5	52	66	76	K
	1200	1.4	1.9	9	76.4	78.8	80	42	56	62	J
	900	1.3	2	8	76.6	78.9	78.5	42	54	63	H
1.5	3600	0.9	2.1	17	78	82	82.5	69	79	85	K
	1800	1.5	2.3	18	80.7	83.5	84	54	67	76	K
	1200	1.6	2.4	17	81.6	84.2	85.5	50	63	71	K
	900	1.9	2.7	14	78	80.4	80	45	58	68	H
2	3600	1.2	2.6	23	79.9	83.2	84	73	83	89	K
	1800	2	3	22	80.7	83.6	84	52	67	77	K
	1200	2	3.1	23	84.5	86	86.5	50	63	72	K
	900	2.3	3.5	18	80	82	82.5	46	60	69	H
3	3600	1.8	3.8	33	83.8	86.2	86.5	75	84	90	K
	1800	1.9	4.1	31	87.5	88	87.5	65	76	82	K
	1200	2.4	4.2	33	85.8	87.6	87.5	58	73	80	K
	900	3.2	4.9	27	82.5	84.2	84	48	62	71	H
5	3600	1.9	6.1	48	86.5	87.8	87.5	82	89	92	J
	1800	3.3	6.8	48	87.5	88.2	87.5	63	75	82	J
	1200	3.5	7.1	48	89	89.7	88.5	59	71	78	J
	900	4.3	7.8	42	86	87	86.5	53	66	72	H
7.5	3600	3.6	9.2	67	87	88	88.5	77	86	90	H
	1800	4.4	9.9	67	89	90	89.5	66	77	93	H
	1200	4.7	10	63	90.6	90.9	90.2	59	72	78	H
	900	6.9	13	67	87	88	87.5	49	61	69	H
10	3600	4.2	13	85	89	89.8	89.5	80	89	87	H
	1800	5.6	14	85	89.5	90	89.5	68	79	84	H
	1200	5.2	14	78	91.7	91.5	90.2	65	75	80	G
	900	9.5	16	85	89.4	90.9	91	50	61	69	H
15	3600	5.2	18	121	88.5	90	90.2	84	98	92	G
	1800	7.6	20	121	91.7	92.1	91.7	68	78	82	G
	1200	10	21	121	91	91.7	91	57	71	77	G
	900	15	24	121	90.1	91.4	91	50	60	67	G
20	3600	7.7	24	152	88.3	89.9	90.2	82	86	90	G
	1800	9.5	27	152	92.1	92.4	91.7	67	76	80	G
	1200	13	27	152	92.1	92.4	91.7	62	73	79	G
	900	19	32	152	90	91.2	91	50	61	67	G
25	3600	8.4	30	191	92	92.2	91.7	80	85	88	G
	1800	14	30	191	93.3	93.6	93	72	82	87	G
	1200	26	35	191	92.2	92.7	92.4	57	69	77	G
	900	23	40	191	89.2	90.5	90.2	50	61	68	G

Fuente: Catálogos de motores WEG.

TABLA N° 4.8
TABLA DE EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA DE MOTORES
ELÉCTRICOS N°2

30	3600	9.9	36	228	92	92.2	91.7	84	89	90	G
	1800	16	37	228	93.2	93.6	93	71	82	86	G
	1200	20	41	228	92.6	92.9	92.4	58	70	78	G
	900	27	49	228	89.9	91.3	91	50	62	66	G
40	3600	13	47	303	94	94.1	93.6	80	87	89	G
	1800	16	49	303	94	94.2	93.6	77	82	76	G
	1200	25	54	303	93.6	93.9	93.6	59	71	62	G
	900	38	66	303	90.7	92	91.7	49	60	65	G
50	3600	16	58	380	94.1	94.2	93.6	82	89	91	G
	1800	19	61	380	94.1	94.2	93.6	77	84	86	G
	1200	31	69	380	94	94.2	93.6	60	71	76	G
	900	29	70	380	92.3	92.4	91.7	64	73	76	G
60	3600	20	71	455	93.8	94.1	93.6	80	86	88	G
	1800	22	74	455	93.9	94.1	93.6	74	82	85	G
	1200	27	77	455	94.1	94.5	94.1	70	78	81	G
	900	31	82	455	92.3	92.4	91.7	67	76	79	G
75	3600	23	89	568	94.3	94.5	94.1	81	86	88	G
	1800	28	91	568	94.4	94.6	94.1	74	83	85	G
	1200	36	97	568	85.8	94.9	94.5	68	77	80	G
	900	39	98	568	82.5	93.3	93	67	76	80	G
100	3600	20	113	758	94.6	94.7	94.1	90	92	92	G
	1800	31	118	758	95	95.2	94.5	80	85	87	G
	1200	40	122	758	94.6	94.9	94.5	75	82	85	G
	900	50	129	758	94.2	94.5	94.1	70	78	81	G
125	3600	33	144	949	94	94.6	94.5	85	89	90	G
	1800	44	150	949	95.1	95.3	95	78	84	86	G
	1200	46	151	949	94.7	94.9	94.5	77	84	86	G
	900	56	159	949	94.1	94.2	93.6	70	79	82	G
150	3600	39	171	1134	94.8	95.2	95	84	89	90	G
	1800	47	178	1134	95.7	96	95.8	80	85	86	G
	1200	47	178	1134	95.4	95.6	95	81	86	87	G
	900	75	194	1134	94.1	94.5	94.1	67	76	80	G
200	3600	42	226	1516	94.9	95.2	95	88	90	91	G
	1800	63	235	1516	96	96.1	95.8	81	86	87	G
	1200	58	236	1516	95.4	95.5	95	82	86	87	G
	900	106	252	1516	94.8	94.9	94.5	71	79	82	G
250	3600	47	279	1908	95.3	95.6	95.4	90	92	92	G
	1800	82	294	1908	95.8	96	95.8	80	85	87	G
	1200	78	293	1908	95.5	95.5	95	82	87	88	G
	900	116	317	1908	94.5	94.8	94.5	70	78	82	G

Fuente: Catálogos de motores WEG.

TABLA N° 4.9
 TABLA DE EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA DE MOTORES
 ELÉCTRICOS N°3

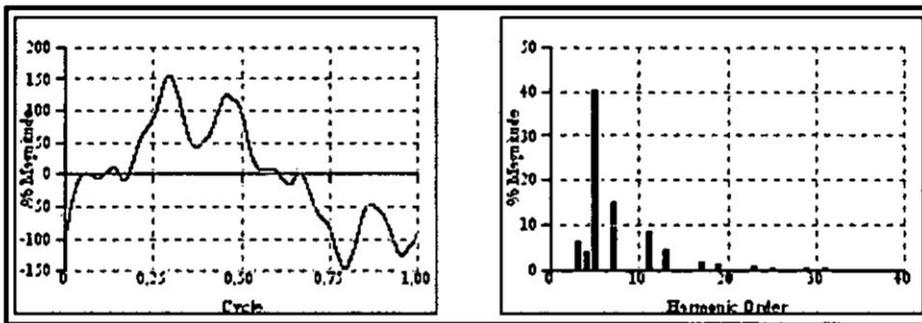
300	3600	71	338	2300	95.2	95.8	95.8	86	90	91	G
	1800	115	362	2300	95	95.5	95.4	76	83	85	G
	1200	94	351	2300	95.5	95.5	95	82	87	88	G
350	3600	70	386	2666	95.4	95.7	95.4	90	92	93	G
	1800	120	408	2666	95.5	95.9	95.8	79	86	88	G
	1200	139	413	2666	95.2	95.3	95	77	84	87	G
400	3600	84	437	3032	94.2	95.6	95.4	90	93	94	G
	1800	144	469	3232	95.7	96	95.8	79	85	87	G

Fuente: Catálogos de motores WEG.

f) Variadores de velocidad

El espectro armónico de los variadores de velocidad de 6 pulsos se modeló según el catálogo Typical current harmonics Schneider Electric (véase en la FIGURA N° 4.20). Tener presente que el TDDi indicado es a plena carga, estos mismos se asumen con un $\cos\Phi$ de 0.96 en la alimentación del variador.

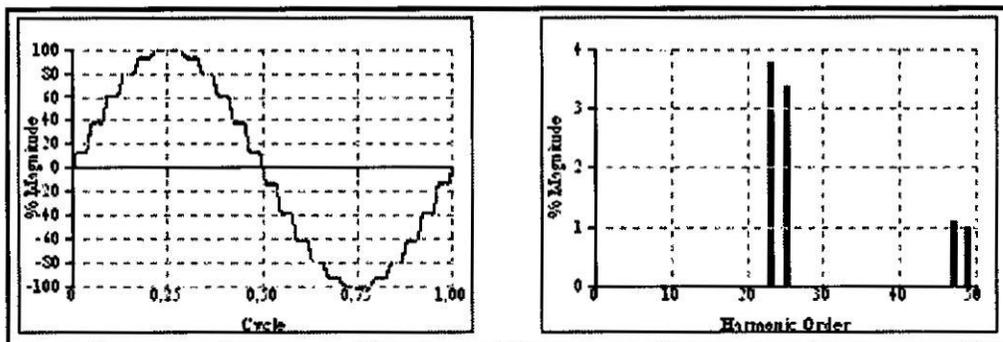
FIGURA N° 4.20
 ESPECTRO ARMÓNICO Y FORMA DE ONDA PARA VDF DE 6 PULSOS.



Fuente: Elaboración Propia.

Los Variadores AFE (variadores de frente activo) presentan un $\cos\Phi$ de 0.98 en la salida para su operación a plena carga, y el espectro armónico empleado para representar su distorsión armónica en corriente el cual es menor al 4 % (véase en la FIGURA N° 4.21). Tener presente que el TDDi indicado es a plena carga.

FIGURA N° 4.21
ESPECTRO ARMÓNICO Y FORMA DE ONDA PARA VFD AFE.



Fuente: Elaboración Propia.

3.- Análisis de corto circuito

Las simulaciones de cortocircuito nos permiten observar el comportamiento de la corriente de falla en el sistema eléctrico en un estado transitorio. Esto también será utilizado en el análisis de soluciones avanzadas de sistema de compensación de energía reactiva ya que gracias a ello podremos evaluar los límites de distorsión armónica según los estándares vistos anteriormente.

3.1 Metodología para el análisis de corto circuito

Para obtener las máximas y mínimas corrientes de falla en operación normal se han simulado fallas en las barras más representativas de la red eléctrica en estudio.

Los tipos de fallas simuladas son los siguientes:

- Falla trifásica.
- Falla monofásica
- Falla bifásica
- Falla bifásica a tierra.

Se aplica la Norma IEC 60909 (corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos).

La Norma IEC 60909 establece las consideraciones necesarias para el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas:

- Corrientes de Cortocircuito Máximas, permiten determinar la capacidad de cortocircuito de diseño de los equipos eléctricos y representa la condición más severa.
- Corriente de Cortocircuito Mínimas, son necesarias para realizar los ajustes de los sistemas de protección de sobre intensidad.

La norma IEC 60909 caracteriza estos dos escenarios reflejándolos en una tensión pre-falla igual a “c” veces la tensión nominal, donde “c” es un factor de tensión que depende de la tensión nominal (línea-línea / Un) (véase en la TABLA N° 4.10)

TABLA N° 4.10
VALORES NORMATIVOS DEL FACTOR DE TENSIÓN “C”

<1001 V	1.1	0.95
1001 a 35000 V	1.1	1
>35000 V	1.1	1

Fuente: IEC 60909-0

3.2 Calculo de Corto Circuito

Los resultados de los cálculos de cortocircuito fueron realizados considerando la operación máxima del sistema en avenida.

Se evaluarán las corrientes de Cortocircuito Máximas y mínimas, que permiten determinar la capacidad de cortocircuito de diseño de los equipos eléctricos y también las corrientes de Cortocircuito Mínimas, las cuales son necesarias para realizar los ajustes de los sistemas de protección.

Se han calculado para las barras, fallas trifásicas bifásicas, bifásicas a tierra y monofásicas, el resumen de los resultados se muestra en las tablas siguientes:

3.3 Resultados obtenidos según caso de estudio

a) Caso de estudio 1: Corriente de corto circuito máxima

Se resume en un cuadro los valores más significativos de la operación del sistema con la corriente de falla máxima según la norma IEC 60909.

TABLA N° 4.11
CUADRO DE RESUMEN DE CORRIENTES MÁXIMAS DE CORTO
CIRCUITO SEGÚN IEC 60909.

SE TALTA	138.000	1.626	3.476	1.393	1.627	1.577	1.599	1.563	1.351	0.708
SE TAMBOMAYO 22	22.000	6.286	13.560	5.285	9.190	5.320	8.528	2.505	0.550	0.139
400-SGM-001	10.000	8.869	18.228	7.474	7.474	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000
430-SGM-001	10.000	6.809	13.042	5.711	5.711	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000
430-SGM-002	10.000	6.379	11.992	5.378	5.378	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000
510-SGM-001	10.000	8.393	16.756	7.054	7.054	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000
540-SGM-001	10.000	8.113	16.275	6.851	6.851	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000
620-SGM-001	10.000	7.985	15.771	6.753	6.753	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000
717-SGM-001	10.000	5.404	9.959	4.606	4.606	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000
SE TAMBOMAYO 10	10.000	11.299	24.915	9.461	9.461	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000
430-MCM-001	4.160	10.952	22.398	9.035	12.360	9.042	12.034	0.523	0.105	0.026
730-MCM-001	4.160	2.365	3.984	2.010	2.384	2.016	2.323	0.465	0.103	0.026
300-MCL-001	0.480	35.254	72.260	29.153	34.093	29.154	32.029	0.058	0.012	0.003
400-MCL-001	0.480	19.412	32.464	16.496	19.268	16.497	18.759	0.058	0.012	0.003
430-MCL-001	0.480	29.672	62.237	25.047	29.994	25.048	29.475	0.058	0.012	0.003
510-MCL-001	0.480	41.645	86.105	34.746	40.520	34.746	38.399	0.058	0.012	0.003
510-MCL-002	0.480	41.368	85.303	34.494	40.121	34.495	37.893	0.058	0.012	0.003
510-SBL-001	0.480	44.822	94.754	37.375	44.777	37.376	43.365	0.058	0.012	0.003
540-MCL-001	0.480	34.268	72.401	29.129	34.060	29.130	33.500	0.058	0.012	0.003
542-MCL-001	0.480	36.417	71.835	30.619	35.260	30.619	33.883	0.058	0.012	0.003
550-MCL-001	0.480	38.120	78.730	32.004	37.387	32.005	36.020	0.058	0.012	0.003
560-MCL-001	0.480	38.149	78.801	32.029	37.409	32.030	36.039	0.058	0.012	0.003
560-SBL-001	0.480	42.237	90.286	35.347	42.569	35.348	41.752	0.058	0.012	0.003
580-MCL-001	0.480	28.351	59.655	24.157	28.708	24.158	28.308	0.058	0.012	0.003
590-MCL-001	0.480	31.690	65.357	27.143	31.526	27.144	31.303	0.058	0.012	0.003
590-SBL-001	0.480	35.658	78.209	30.548	37.209	30.549	37.704	0.058	0.012	0.003
610-MCL-001	0.480	25.431	51.603	21.665	24.953	21.666	23.939	0.058	0.012	0.003
620-SBL-001	0.480	37.439	59.380	31.604	35.670	31.605	30.639	0.058	0.012	0.003
717-MCL-001	0.480	20.384	39.157	17.356	20.235	17.356	19.804	0.058	0.012	0.003
730-MCL-001	0.480	39.114	81.017	32.712	38.087	32.713	36.532	0.058	0.012	0.003

Fuente: Elaboración Propia.

b) Caso de estudio 2: Corriente de corto circuito mínima

Se resume en un cuadro los valores más significativos de la operación del sistema con la corriente de falla mínima según la norma IEC 60909.

TABLA N° 4.12
CUADRO DE RESUMEN DE CORRIENTES MÍNIMAS DE CORTO
CIRCUITO SEGÚN IEC 60909.

SE TALTA	138.000	1.607	3.437	1.377	1.600	1.546	1.568	1.529	1.302	0.656
SE TAMBOMAYO 22	22.000	5.921	12.810	4.983	8.620	5.015	8.024	2.290	0.501	0.127
400-SGM-001	10.000	8.219	16.913	6.933	6.933	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000
430-SGM-001	10.000	6.266	11.993	5.259	5.259	0.099	0.000	0.000	0.000	0.000
430-SGM-002	10.000	5.872	11.034	4.954	4.954	0.099	0.000	0.000	0.000	0.000
510-SGM-001	10.000	7.763	15.505	6.530	6.530	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000
540-SGM-001	10.000	7.506	15.066	6.344	6.344	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000
620-SGM-001	10.000	7.385	14.591	6.250	6.250	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000
717-SGM-001	10.000	4.971	9.155	4.239	4.239	0.099	0.000	0.000	0.000	0.000
SE TAMBOMAYO 10	10.000	10.529	23.304	8.824	8.824	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000
430-MCM-001	4.160	10.015	20.493	8.267	11.288	8.273	10.994	0.475	0.096	0.024
730-MCM-001	4.160	2.154	3.627	1.831	2.170	1.836	2.114	0.423	0.094	0.024
300-MCL-001	0.480	31.961	65.530	26.437	30.900	26.438	29.020	0.053	0.011	0.003
400-MCL-001	0.480	17.593	29.416	14.952	17.455	14.953	16.993	0.053	0.011	0.003
430-MCL-001	0.480	26.910	56.460	22.721	27.190	22.722	26.715	0.053	0.011	0.003
510-MCL-001	0.480	37.780	78.148	31.530	36.744	31.531	34.808	0.053	0.011	0.003
510-MCL-002	0.480	37.527	77.417	31.301	36.382	31.301	34.348	0.053	0.011	0.003
510-SBL-001	0.480	40.672	86.032	33.926	40.610	33.927	39.321	0.053	0.011	0.003
540-MCL-001	0.480	31.101	65.736	26.444	30.896	26.445	30.377	0.053	0.011	0.003
542-MCL-001	0.480	33.036	65.180	27.784	31.976	27.785	30.714	0.053	0.011	0.003
550-MCL-001	0.480	34.585	71.457	29.045	33.906	29.046	32.655	0.053	0.011	0.003
560-MCL-001	0.480	34.611	71.521	29.068	33.926	29.069	32.672	0.053	0.011	0.003
560-SBL-001	0.480	38.332	81.984	32.089	38.611	32.090	37.862	0.053	0.011	0.003
580-MCL-001	0.480	25.712	54.116	21.913	26.025	21.914	25.657	0.053	0.011	0.003
590-MCL-001	0.480	28.763	59.335	24.642	28.599	24.642	28.386	0.053	0.011	0.003
590-SBL-001	0.480	32.377	71.054	27.745	33.761	27.746	34.206	0.053	0.011	0.003
610-MCL-001	0.480	23.058	46.794	19.647	22.618	19.648	21.691	0.053	0.011	0.003
620-SBL-001	0.480	33.964	53.842	28.676	32.337	28.677	27.764	0.053	0.011	0.003
717-MCL-001	0.480	18.478	35.497	15.735	18.338	15.736	17.942	0.053	0.011	0.003
730-MCL-001	0.480	35.486	73.532	29.688	34.541	29.688	33.118	0.053	0.011	0.003

Fuente: Elaboración Propia

4.- Análisis de flujo de potencia

La simulación de flujo de potencia nos permite evaluar las tensiones, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia en barras principales del sistema eléctrico, para así poder realizar un análisis y seleccionar la mejor solución en sistemas de compensación de energía reactiva con lo cual podremos corregir el factor de potencia, evitar penalizaciones y pérdidas innecesarias.

4.1 Metodología para el análisis de flujo de potencia

Para realizar el análisis de flujo de potencia se tomaron dos casos en los cuales el sistema eléctrico operara según la producción minera (demanda máxima y demanda promedio), con los cuales se tomaron como referencia los siguientes datos:

4.2 Calculo de Flujo de potencia

Los resultados de los cálculos de flujo de potencia fueron realizados para las condiciones de demanda máxima y demanda promedio del sistema, para así tener una mejor cobertura y realizar un correcto análisis para dimensionar las soluciones avanzadas en compensación de energía reactiva.

Se han calculado para las barras principales del proyecto minero, el resumen de los resultados se muestra en las tablas siguientes:

4.3 Resultados obtenidos según caso de estudio

a) Caso de estudio 1: Demanda Máxima

Se resume en un cuadro los valores más significativos de la operación del flujo de potencia con la máxima demanda.

TABLA N° 4.13
CUADRO DE RESUMEN FLUJO DE POTENCIA A DEMANDA MÁXIMA
DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	0.48	1006	423	1345.1	0.922
	590-MCL-001	0.48	369	172	448.4	0.906
FLOTACION	510-MCL-001	0.48	661	417	947.7	0.846
	510-MCL-002	0.48	558	368	810.6	0.834
	542-MCL-001	0.48	123	66	173.2	0.883
	550-MCL-001	0.48	270	158	388.6	0.864
	560-MCL-001	0.48	336	194	481.3	0.866
	730-MCL-001	0.48	555	246	753.5	0.914
PLANTA SOPLADORAS	730-MCM-001	4.16	174	116	29.5	0.832
CHANCADO	400-MCL-001	0.48	302	183	423.2	0.856
MOLIENDA	430-MCL-001	0.48	1014	507	1383	0.894
	300-MCL-001	0.48	911	535	1290.4	0.862
	580-MCL-001	0.48	651	294	861.7	0.911
	430-MCM-001	4.16	3606	2051	584.1	0.869
AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	0.48	732	363	998.5	0.896
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	0.48	992	604	1429.4	0.854
SUBESTACION TAMBOMAYO	SUBESTACION TAMBOMAYO	10	20095	11861	1341.1	86.1

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

Se aprecia que el factor de potencia en promedio no es el óptimo para ningún CCM evaluado, ya que oscila entre 0.832 como mínimo en el CCM 730-MCM-001 perteneciente a Planta Sopladoras y 0.922 como máximo en el CCM 540-MCL-001 perteneciente a Merrill Crowe.

b) Caso de estudio 2: Demanda Promedio

Se resume en un cuadro los valores más significativos de la operación del flujo de potencia con la demanda promedio.

TABLA N° 4.14
CUADRO DE RESUMEN FLUJO DE POTENCIA A DEMANDA
PROMEDIO DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	0.48	860	364	1145.6	0.921
	590-MCL-001	0.48	218	101	283.8	0.906
FLOTACION	510-MCL-001	0.48	561	367	807.3	0.837
	510-MCL-002	0.48	331	278	521.1	0.766
	542-MCL-001	0.48	101	57	143.2	0.872
	550-MCL-001	0.48	223	135	322.4	0.856
	560-MCL-001	0.48	245	149	354.2	0.854
	730-MCL-001	0.48	489	218	661.1	0.914
PLANTA SOPLADORAS	730-MCM-001	4.16	174	116	29.5	0.832
CHANCADO	400-MCL-001	0.48	245	152	343.2	0.85
MOLIENDA	430-MCL-001	0.48	793	402	1076.2	0.892
	300-MCL-001	0.48	620	427	910.1	0.824
	580-MCL-001	0.48	566	259	747.6	0.909
	430-MCM-001	4.16	3068	1931	508.8	0.846
AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	0.48	623	312	847	0.894
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	0.48	719	462	1038.1	0.841
SUBESTACION TAMBOMAYO	SUBESTACION TAMBOMAYO	10	16554	10054	1114.6	0.855

Fuente: Elaboración Propia

Nota:

Se aprecia que el factor de potencia en promedio no es el óptimo para ningún CCM evaluado, ya que oscila entre 0.832 como mínimo en el CCM 730-MCM-001 perteneciente a Planta Sopladoras y 0.921 como máximo en el CCM 540-MCL-001 perteneciente a Merrill Crowe.

5.- Análisis de flujo armónico

Las simulaciones de Flujo armónico permiten identificar la polución armónica y reportar violaciones a los límites establecidos por las normas mencionadas anteriormente. Según esta evaluación se podrá dimensionar soluciones avanzadas en sistemas de compensación reactiva para corregir la distorsión armónica y mejorar el factor de potencia sin necesidad de afectar a los equipos eléctricos.

5.1 Metodología para el análisis de flujo armónico

Para realizar el análisis de flujo armónico se tomaron dos casos en los cuales el sistema eléctrico operara según la producción minera (demanda máxima y demanda promedio), con los cuales se tomaron como referencia los siguientes datos:

- Distorsión armónica en tensión
- Distorsión armónica en corriente

5.2 Cálculo de Flujo armónico

Los resultados de los cálculos de Flujo armónico fueron realizados considerando la operación máxima y promedio del sistema eléctrico Tambomayo.

Se determina los límites de distorsión armónica en cada CCM de baja tensión evaluando la relación entre la corriente de corto circuito y la corriente de carga según el estándar IEEE 519.

TABLA N° 4.15
LIMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA POR ÁREA.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	0.48	34.268	1269.1	27.002	8
	590-MCL-001	0.48	31.690	453.9	69.817	12
FLOTACION	510-MCL-001	0.48	41.645	813.6	51.186	12
	510-MCL-002	0.48	41.368	683	60.568	12
	542-MCL-001	0.48	36.417	154.5	235.709	15
	550-MCL-001	0.48	38.120	340.9	111.822	15
	560-MCL-001	0.48	38.149	424.9	89.783	12
	730-MCL-001	0.48	39.114	707.1	55.316	12
PLANTA SOPLADORAS	730-MCM-001	4.16	2.365	24.9	94.980	12
CHANCADO	400-MCL-001	0.48	19.412	373.5	51.973	8
MOLIENDA	430-MCL-001	0.48	29.672	1272.9	23.311	8
	300-MCL-001	0.48	35.254	1141.8	30.876	8
	580-MCL-001	0.48	28.351	808.1	35.084	8
	430-MCM-001	4.16	10.952	514.3	21.295	8
AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	0.48	20.384	920.6	22.142	8
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	0.48	37.439	1429.4	26.192	8
SE TAMBOMAYO 10	SE TAMBOMAYO 10	10	7.59	1341.1	5.66	5

Fuente: Elaboración Propia

Según los límites de distorsión armónica establecidos, se determinara la mejor solución en sistemas de compensación de energía reactiva, ya que Uno de los índices más utilizados es la denominada distorsión armónica total según ese valor se podrá dimensionar una adecuada solución estableciendo como limite la contaminación armónica total del sistema en el punto de acoplamiento común evaluado.

Se han calculado para las barras principales del proyecto minero, el resumen de los resultados se muestra en las tablas siguientes:

5.3 Resultados obtenidos según caso de estudio

a) Caso de estudio 1: Demanda Máxima

Se resumen en un cuadro los valores más significativos de la distorsión armónica en corriente con la máxima demanda.

TABLA N° 4.16
CUADRO DE RESUMEN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN CORRIENTE
A DEMANDA MÁXIMA DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	0.48	0.59	8
	590-MCL-001	0.48	0.58	12
FLOTACION	510-MCL-001	0.48	0.73	12
	510-MCL-002	0.48	0.63	12
	542-MCL-001	0.48	7.23	15
	550-MCL-001	0.48	3.23	15
	560-MCL-001	0.48	2.56	12
	730-MCL-001	0.48	1.38	12
PLANTA SOPLADORAS	730-MCM-001	4.16	1.11	12
CHANCADO	400-MCL-001	0.48	1.02	8
MOLIENDA	430-MCL-001	0.48	0.29	8
	300-MCL-001	0.48	0.6	8
	580-MCL-001	0.48	12.41	8
	430-MCM-001	4.16	1.53	8
AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	0.48	1.15	8
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	0.48	14.69	8
SE TAMBOMAYO 10	SE TAMBOMAYO 10	10	0.93	5

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

Se aprecia que la mayor distorsión de corriente – THD_i presente en la red es de 14.69% en el CCM 620-SBL-001 perteneciente a Filtrado de relaves y 12.41% en el CCM 580-MCL-001 perteneciente a Molienda, estos exceden los límites permitidos por el estándar IEEE519 debido al volumen de variadores convencionales en estas barras.

Se resumen en un cuadro los valores más significativos de la distorsión armónica en tensión con la máxima demanda.

TABLA N° 4.17
CUADRO DE RESUMEN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN TENSION A DEMANDA MÁXIMA DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	0.48	1.26	8
	590-MCL-001	0.48	1.05	8
FLOTACION	510-MCL-001	0.48	0.99	8
	510-MCL-002	0.48	0.99	8
	542-MCL-001	0.48	1.46	8
	550-MCL-001	0.48	1.46	8
	560-MCL-001	0.48	1.46	8
	730-MCL-001	0.48	1.43	8
	PLANTA SOPLADORAS	730-MCM-001	4.16	1.11
CHANCADO	400-MCL-001	0.48	1.25	8
MOLIENDA	430-MCL-001	0.48	1.29	8
	300-MCL-001	0.48	1.39	8
	580-MCL-001	0.48	3.41	8
	430-MCM-001	4.16	2.54	8
AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	0.48	1.42	8
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	0.48	3.84	8
SE TAMBOMAYO 10	SE TAMBOMAYO 10	10	1.17	8

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

Se aprecia que la mayor distorsión de tensión – THD_v presente en la red es de 3.84% en el CCM 620-SBL-001 perteneciente a Filtrado de relaves, sin embargo, para sus condiciones de operación no supera el límite recomendado por el estándar IEEE 519.

b) Caso de estudio 2: Demanda Promedio

Se resumen en un cuadro los valores más significativos de la distorsión armónica en corriente con la demanda promedio.

TABLA N° 4.18
CUADRO DE RESUMEN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN CORRIENTE
A DEMANDA PROMEDIO DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	0.48	0.61	8
	590-MCL-001	0.48	0.42	12
FLOTACION	510-MCL-001	0.48	0.68	12
	510-MCL-002	0.48	0.78	12
	542-MCL-001	0.48	7.68	15
	550-MCL-001	0.48	3.53	15
	560-MCL-001	0.48	2.84	12
	730-MCL-001	0.48	1.31	12
	PLANTA SOPLADORAS	730-MCM-001	4.16	0.95
CHANCADO	400-MCL-001	0.48	1.20	8
MOLIENDA	430-MCL-001	0.48	0.36	8
	300-MCL-001	0.48	0.75	8
	580-MCL-001	0.48	12.60	8
	430-MCM-001	4.16	1.54	8
	AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	0.48	1.29
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	0.48	14.48	8
SE TAMBOMAYO 10	SE TAMBOMAYO 10	10	0.91	5

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

Se aprecia que la mayor distorsión de corriente – THDi presente en la red es de 14.48% en el CCM 620-SBL-001 perteneciente a Filtrado de relaves y 12.60% en el CCM 580-MCL-001 perteneciente a Molienda, estos exceden los límites permitidos por el estándar IEEE519 debido al volumen de variadores convencionales en estas barras.

Se resumen en un cuadro los valores más significativos de la distorsión armónica en tensión con la demanda promedio.

TABLA N° 4.19
CUADRO DE RESUMEN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN TENSIÓN A
DEMANDA PROMEDIO DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	0.48	1.09	8
	590-MCL-001	0.48	0.93	8
FLOTACION	510-MCL-001	0.48	0.84	8
	510-MCL-002	0.48	0.84	8
	542-MCL-001	0.48	1.22	8
	550-MCL-001	0.48	1.23	8
	560-MCL-001	0.48	1.22	8
	730-MCL-001	0.48	1.20	8
PLANTA SOPLADORAS	730-MCM-001	4.16	0.93	8
CHANCADO	400-MCL-001	0.48	0.99	8
MOLIENDA	430-MCL-001	0.48	1.12	8
	300-MCL-001	0.48	1.17	8
	580-MCL-001	0.48	2.96	8
	430-MCM-001	4.16	2.34	8
AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	0.48	1.22	8
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	0.48	2.84	8
SE TAMBOMAYO 10	SE TAMBOMAYO 10	10	0.99	8

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

Se aprecia que la mayor distorsión de tensión – THD_v presente en la red es de 3.96% en el CCM 580-MCL-001 perteneciente a Molienda, sin embargo, para sus condiciones de operación no supera el límite recomendado por el estándar IEEE 519.

4.2.2. Dimensionamiento de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva

1. Banco de condensadores

Este tipo de solución proporciona el diseño convencional de banco de condensadores en la actualidad.

La incorporación de banco de condensadores en sistemas industriales y mineros tiene límites respecto a la funcionalidad en sistemas eléctricos con polución armónica.

Es por ello que en la presente investigación se tiene los criterios y recomendaciones para incorporar banco de condensadores.

1.1. Funciones

- Mejorar el factor de potencia por exceso de cargas que absorben energía reactiva inductiva.
- La fuente de energía reactiva estará más cercana a las cargas inductivas que requieren para su funcionamiento, logrando que los cables de distribución no se sobrecargan.
- Ayuda a la estabilidad en el sistema eléctrico.
- Mejoramiento de la estabilidad de los procesos productivos.
- el banco de condensadores modifica el contenido armónico del sistema, amplificando los armónicos existentes, incluso en casos críticos el fenómeno de resonancia, donde la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva del equivalente Thevenin del sistema se igualan produciendo altas tensiones y altas corrientes en la frecuencia de resonancia correspondiente, ocasionando la destrucción del banco de condensadores y equipos cercanos en la instalación industrial, generando pérdidas tanto técnicas como económicas.

1.2. Funcionamiento

Un banco de condensadores es un conjunto de condensadores que mediante un regulador electrónico que censa la señal de tensión y corriente mide el coseno fi, agrega condensadores a medida que aumenta la carga inductiva y los desconecta si baja la carga inductiva.

1.3. Subestaciones con banco de condensadores.

Se presenta en la siguiente tabla el área con este tipo de solución y la capacidad calculada con el modelo de solución:

TABLA N° 4.20
SUBESTACIONES CON BANCO DE CONDENSADORES

FLOTACION	510-MCL-001	Banco de condensadores BT 250kVar
	510-MCL-002	Banco de condensadores BT 300kVar
	550-MCL-001	Banco de condensadores BT 100kVar
	560-MCL-001	Banco de condensadores BT 200kVar
	730-MCL-001	Banco de condensadores BT 200kVar
PLANTA SOPLADORA	730-MCM-001	Banco de condensadores MT 80kVar
MOLIENDA	430-MCM-001	Banco de condensadores MT (300+300+600)kVar

Fuente: Elaboración Propia.

A. En baja tensión (BT)

Con los parámetros eléctricos que se adquirieron con la simulación del sistema eléctrico en Software ETAP 12.6 (véase en LA TABLA 4.13, en la página 144), los valores de potencia activa, reactiva, factor de potencia; se dimensionó en demanda máxima de la operación de la Mina la capacidad el banco de condensadores.

Esta solución se aplica para los siguientes límites de distorsión armónica:

$$THD_v < 3\%$$

$$THD_i < 8\%$$

A.1. Dimensionamiento de banco de condensadores Automático del CCM 510-MCL-002.

TABLA N° 4.21
CUADRO DE RESUMEN DEL CCM 510-MCL-002

Tension (Vrms)	480
THDv (%)	0.99%
THDi (%)	0.73%
Potencia activa (kw)	558
FPD	0.834

Fuente: Elaboración Propia.

• **Cálculo e ingeniería de Banco de condensadores**

De la ecuación (2.61):

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Se reemplaza valores de la simulación

$$Q_c = 558 \times (\tan(\cos^{-1}(0.834)) - \tan(\cos^{-1}(0.97)))$$

Capacidad de banco de condensadores

$$Q_c = 229.32\text{kvar}$$

Factor de altitud a 4800m.s.n.m igual a 0.88

$$Q_c = 260.6\text{kvar}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.2

$$Q_c = 312.7.9\text{kvar}$$

- **Composición del banco de compensación reactiva**

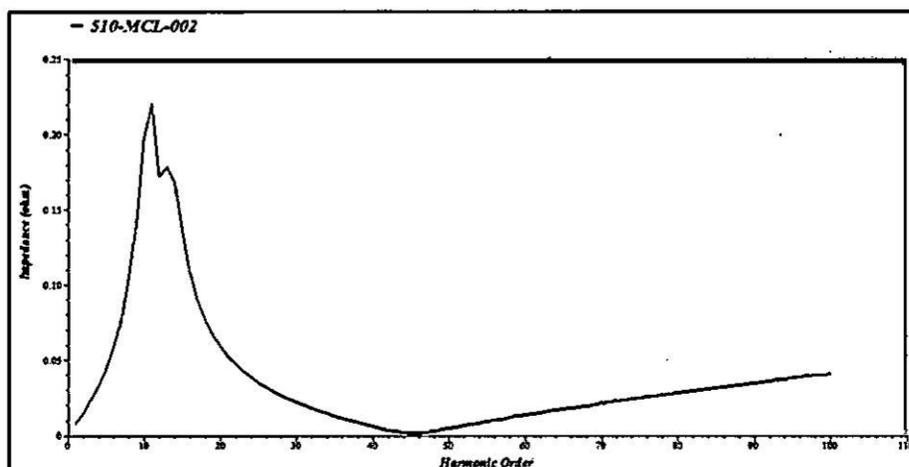
07 Pasos de regulación: **51kVAr**
Potencia total efectiva: 357kVAr
Regulación: 1, 1, 1, 1

TABLA N° 4.22
DETALLE DE LOS PASOS AUTOMÁTICOS CCM 510-MCL-002.

DETALLE PASO DE 51kVAr			
CAPACITOR	Pot. (kVar) según las tensiones de operación		
	480 V	525 V	Cantidad
	KVAR	KVAR	UNIDAD
	17.3	20.6	3

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.22
IMPEDANCIA EN FUNCION DEL ORDEN ARMONICO 510-MCL-002.



Fuente: Elaboración Propia.

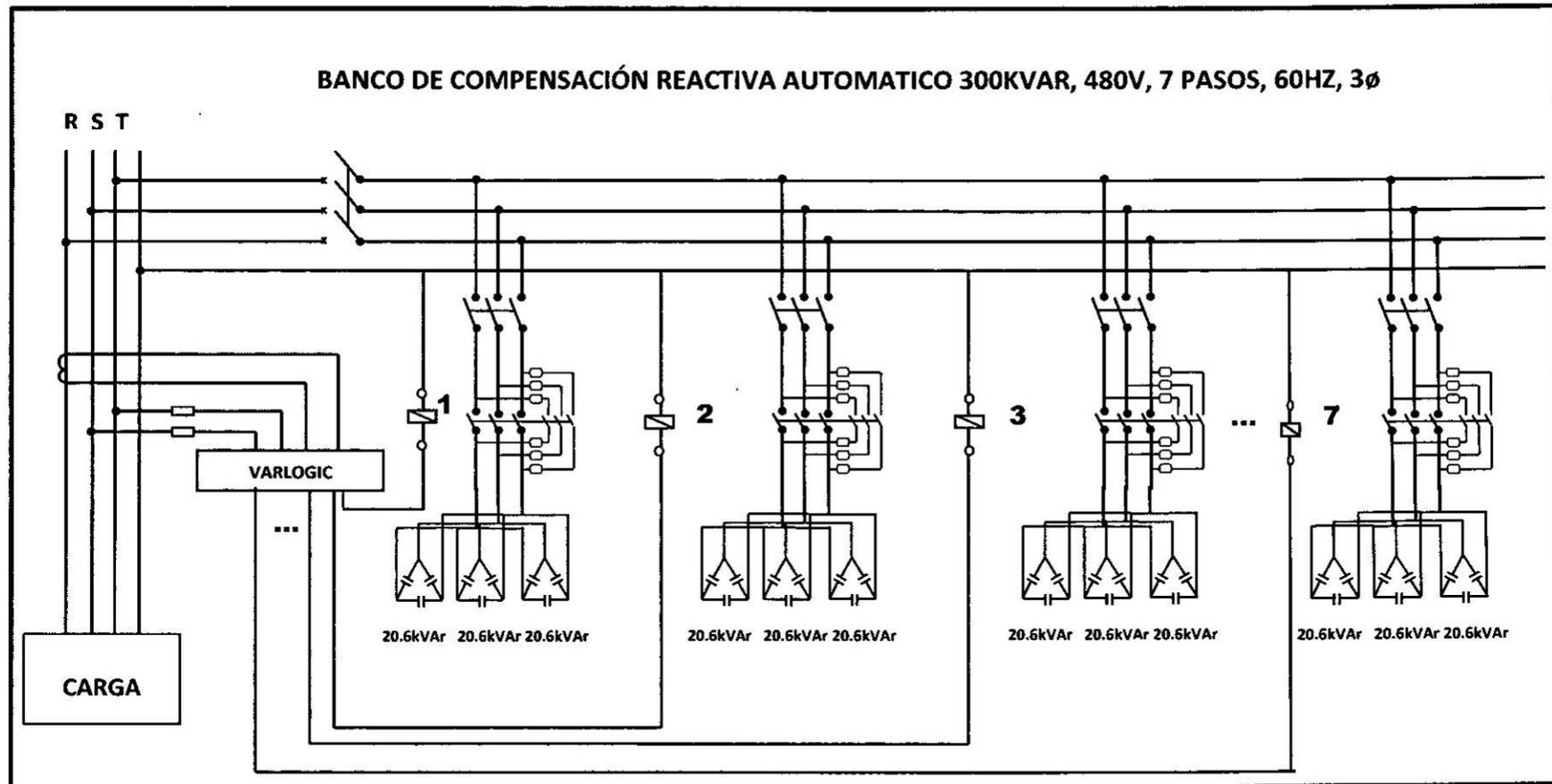
Nota:

El sistema eléctrico del área 510-MCL-002 tiene la probabilidad de resonancia eléctrica para cargas no lineales que generan armónicos de orden 11th (véase la FIGURA N° 4.22)

TABLA N° 4.23
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CCM 510-MCL-002

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL BANCO DE COMPENSACIÓN DE ENERGIA REACTIVA 300KVAR, 480V, 7 PASOS, 60HZ, 3ø	
Características Eléctricas	
Potencia:	300kVAr
Tensión:	480V, trifásico
Frecuencia:	60Hz
Tipo	Banco de condensadores automático
Capacitores	Trifásicos, Tipo modular, dieléctricos secos, cuentan con resistencias de descarga. Tecnología auto regenerable, desconectado por sobre presión.
Instalación	Gabinete Auto soportado
Tolerancia de capacidad	-5% / 10%
Temperatura máxima	55°C
Maniobras	hasta 5000 anuales
Sobrecargas máximas admisibles en tensión de servicio	Intensidad 30% permanentemente Tensión 10% (8 horas de 24)
Número de Pasos	7
Distribución de pasos	7x51kVAr
Regulación	1, 1, 1, 1
Equipos	
Protección principal	Interruptor 630 A, 65kA a 440V, regulable
Controlador de factor de potencia	Si, electrónico, con capacidad de soportar los 12 pasos de regulación.
Accionamiento	Contactores especiales para capacitores con resistencias de pre-inserción limitadoras de corriente
Protección de paso 51kVAr	Interruptor 100 A, 35 kA a 440V
Transformadores de corriente	
Condiciones ambientales	
Temperatura de operación	-25...55 °C
Humedad relativa	95%
Instalación	Interior
Altitud	4800 msnm
Características constructivas del gabinete	
Grado de protección	IP55
Color	RAL 2004
Dimensiones Aproximadas	2100 x 800 x 600 mm (altura x ancho x profundidad)
Sistema de cierre	llave y cerradura
Ventilación	Forzada, control termostato
Fijación	Sobre el suelo (Autosoportado)
Cumplimiento de normas	
IEC 60831 1/2, CSA 22-2 N 190, UNE 20827	

FIGURA N° 4.23
DIAGRAMA TRIFILAR 510-MCL-002



Fuente: Elaboración Propia.

A.2. Dimensionamiento de banco de condensadores Automático del CCM 510-MCL-001.

TABLA N° 4.24
CUADRO DE DATOS DEL CCM 510-MCL-001

Tension (Vrms)	480
THDv (%)	0.34%
THDi (%)	0.78%
Potencia activa (kw)	660
FPD	0.846

Fuente: Elaboración Propia.

- **Cálculo e ingeniería de Banco de condensadores**

De la ecuación (2.61)

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Se reemplaza valores de la simulación

$$Q_c = 660 \times (\tan(\cos^{-1}(0.846)) - \tan(\cos^{-1}(0.97)))$$

Capacidad de banco de condensadores

$$Q_c = 250.55 \text{ kvar}$$

Factor de altitud a 4800m.s.n.m igual a 0.88

$$Q_c = 284.71 \text{ kvar}$$

Debido a que en la sala eléctrica 510-MCL-001 no tiene proyección de ampliación a futuro de cargas no se considera factor de reserva.

- **Composición del banco de compensación reactiva**

06 Pasos de regulación: **47kVAr**

Potencia total efectiva: 282.4kVAr

Regulación: 1, 1, 1, 1

TABLA N° 4.25

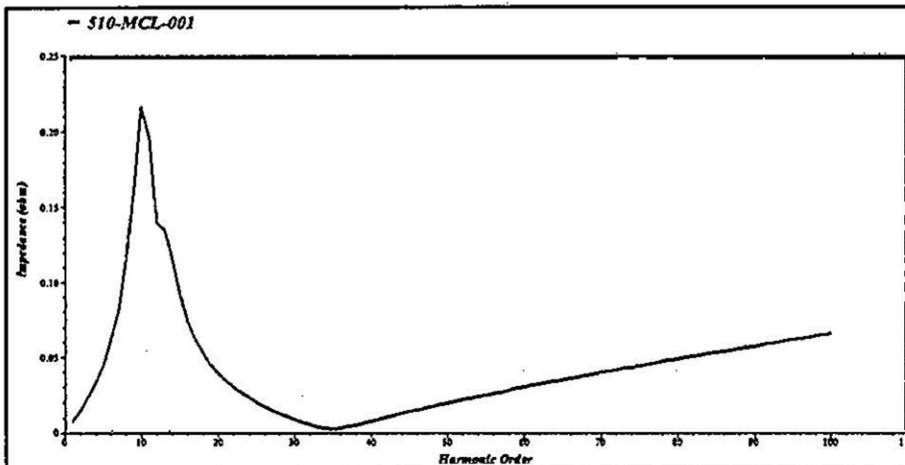
DETALLE DE LOS PASOS AUTOMÁTICOS CCM 510-MCL-001.

DETALLE PASO DE 47kVAr			
CAPACITOR	Pot. (kVar) según las tensiones de operación		
	480 V	525 V	Cantidad
	KVAR	KVAR	UNIDAD
	34.6	41.3	1
	12.5	15	1

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.24

IMPEDANCIA EN FUNCION DEL ORDEN ARMONICO 510-MCL-001.



Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

El sistema eléctrico del área 510-MCL-001 tiene la probabilidad de resonancia eléctrica para cargas no lineales que generan armónicos de orden 11th (véase la FIGURA N° 4.24).

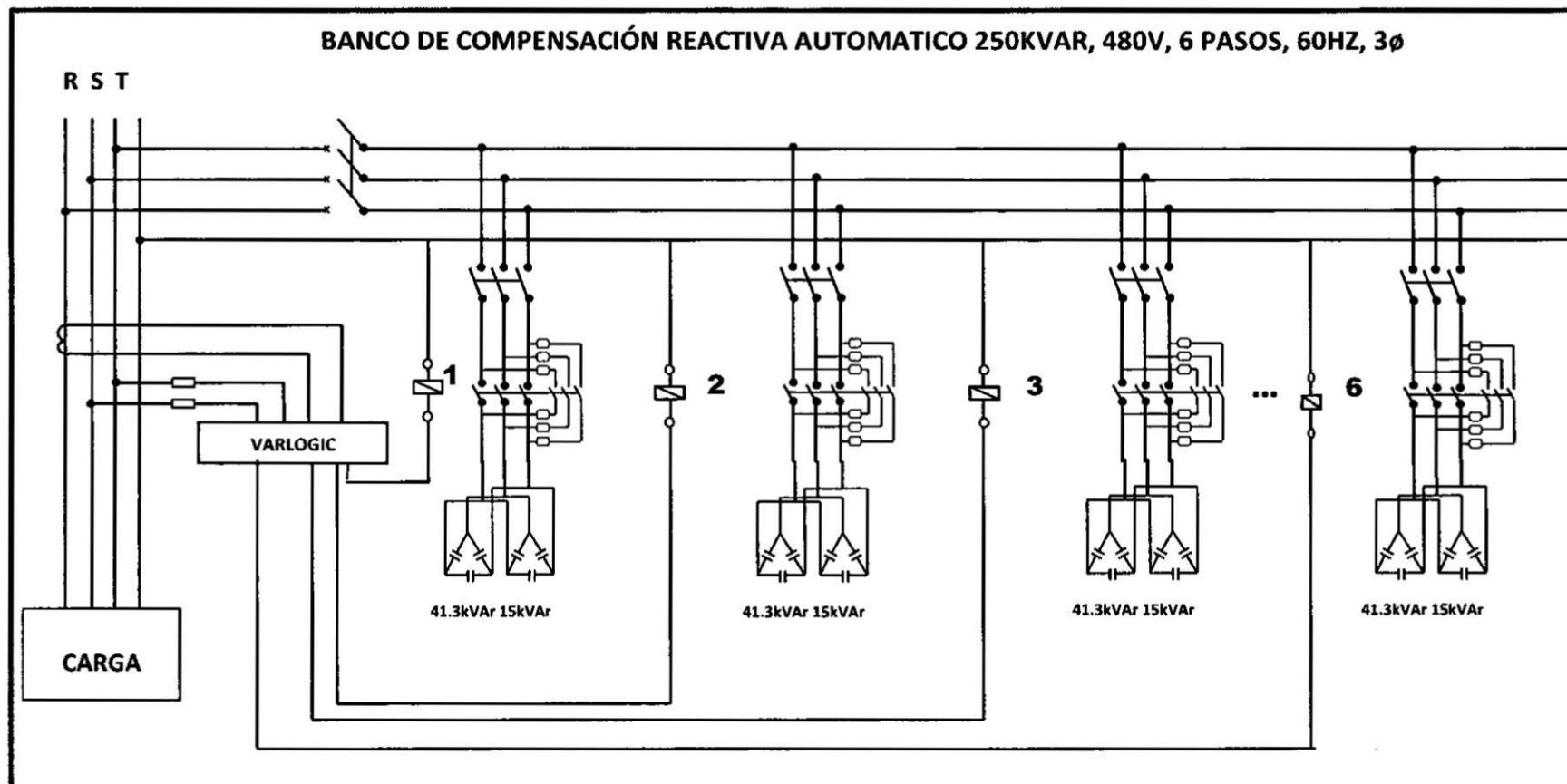
TABLA N° 4.26

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL CCM 510-MCL-001

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL BANCO DE COMPENSACIÓN DE ENERGIA REACTIVA 250KVAR, 480V, 6 PASOS, 60HZ, 3ø	
Características Eléctricas	
Potencia:	250kVAr
Tensión:	480V, trifásico
Frecuencia:	60Hz
Tipo	Banco de condensadores automático
Capacitores	Trifásicos, Tipo modular, dieléctricos secos, cuentan con resistencias de descarga. Tecnología auto regenerable, desconectado por sobre presión.
Instalación	Gabinete Auto soportado
Tolerancia de capacidad	-5% / 10%
Temperatura máxima	55°C
Maniobras	hasta 5000 anuales
Sobrecargas máximas admisibles en tensión de servicio	Intensidad 30% permanentemente Tensión 10% (8 horas de 24)
Número de Pasos	6
Distribución de pasos	6x47.06kVAr
Regulación	1, 1, 1, 1
Equipos	
Protección principal	Interruptor 400 A, 65kA a 440V, regulable
Controlador de factor de potencia	Si, electrónico, con capacidad de soportar los 12 pasos de regulación.
Accionamiento	Contactores especiales para capacitores con resistencias de pre-inserción limitadoras de corriente
Protección de paso 50kVAr	Interruptor 100 A, 35 kA a 440V
Transformadores de corriente	
Condiciones ambientales	
Temperatura de operación	-25...55 °C
Humedad relativa	95%
Instalación	Interior
Altitud	4800 msnm
Características constructivas del gabinete	
Grado de protección	IP55
Color	RAL 2004
Dimensiones Aproximadas	2100 x 800 x 600 mm (altura x ancho x profundidad)
Sistema de cierre	llave y cerradura
Ventilación	Forzada, control termostato
Fijación	Sobre el suelo (Autosoportado)
Cumplimiento de normas	
IEC 60831 1/2, CSA 22-2 N 190, UNE 20827	

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.25
DIAGRAMA TRIFILAR DE 510-MCL-001



Fuente: Elaboración Propia.

A.3. Dimensionamiento de banco de condensadores Automático del CCM 560-MCL-001.

TABLA N° 4.27

CUADRO DE DATOS DEL CCM 560-MCL-001

Tension (Vrms)	480
THDv (%)	1.21%
THDi (%)	2.82%
Potencia activa (kw)	347
FPD	0.866

Fuente: Elaboración Propia.

• **Cálculo e ingeniería de Banco de condensadores**

De la ecuación (2.61)

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Se reemplaza valores de la simulación

$$Q_c = 347 \times (\tan(\cos^{-1}(0.866)) - \tan(\cos^{-1}(0.97)))$$

Capacidad de banco de condensadores

$$Q_c = 113.4\text{kvar}$$

Factor de altitud a 4800m.s.n.m igual a 0.88

$$Q_c = 128.9\text{kvar}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.5

$$Q_c = 193.3\text{kvar}$$

- **Composición del banco de compensación reactiva**

05 Pasos de regulación: **47kVAr**

Potencia total efectiva: 235kVAr

Regulación: 1, 1, 1, 1

TABLA N° 4.28

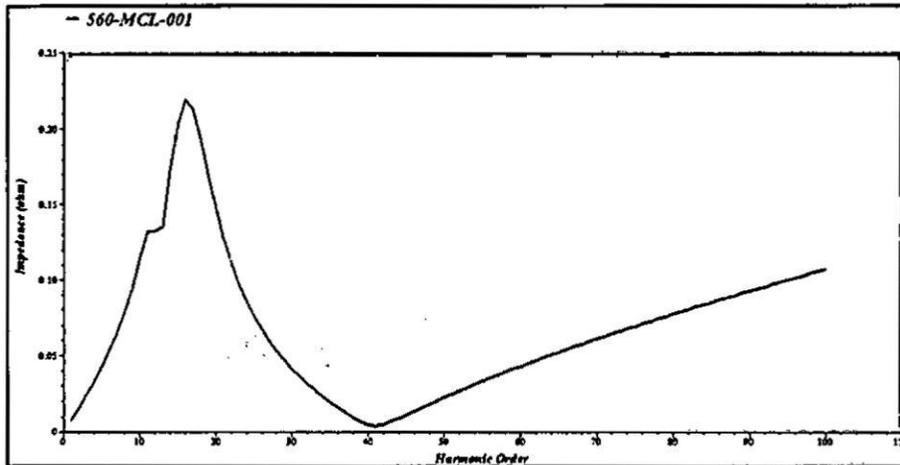
DETALLE DE LOS PASOS AUTOMÁTICOS DEL CCM 560-MCL-001.

DETALLE PASO DE 47kVAr			
CAPACITOR	Pot. (kVar) según las tensiones de operación		
	480 V	525 V	Cantidad
	KVAR	KVAR	UNIDAD
	34.6	41.3	1
	12.5	15	1

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.26

IMPEDANCIA EN FUNCION DEL ORDEN ARMONICO 560-MCL-001.



Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

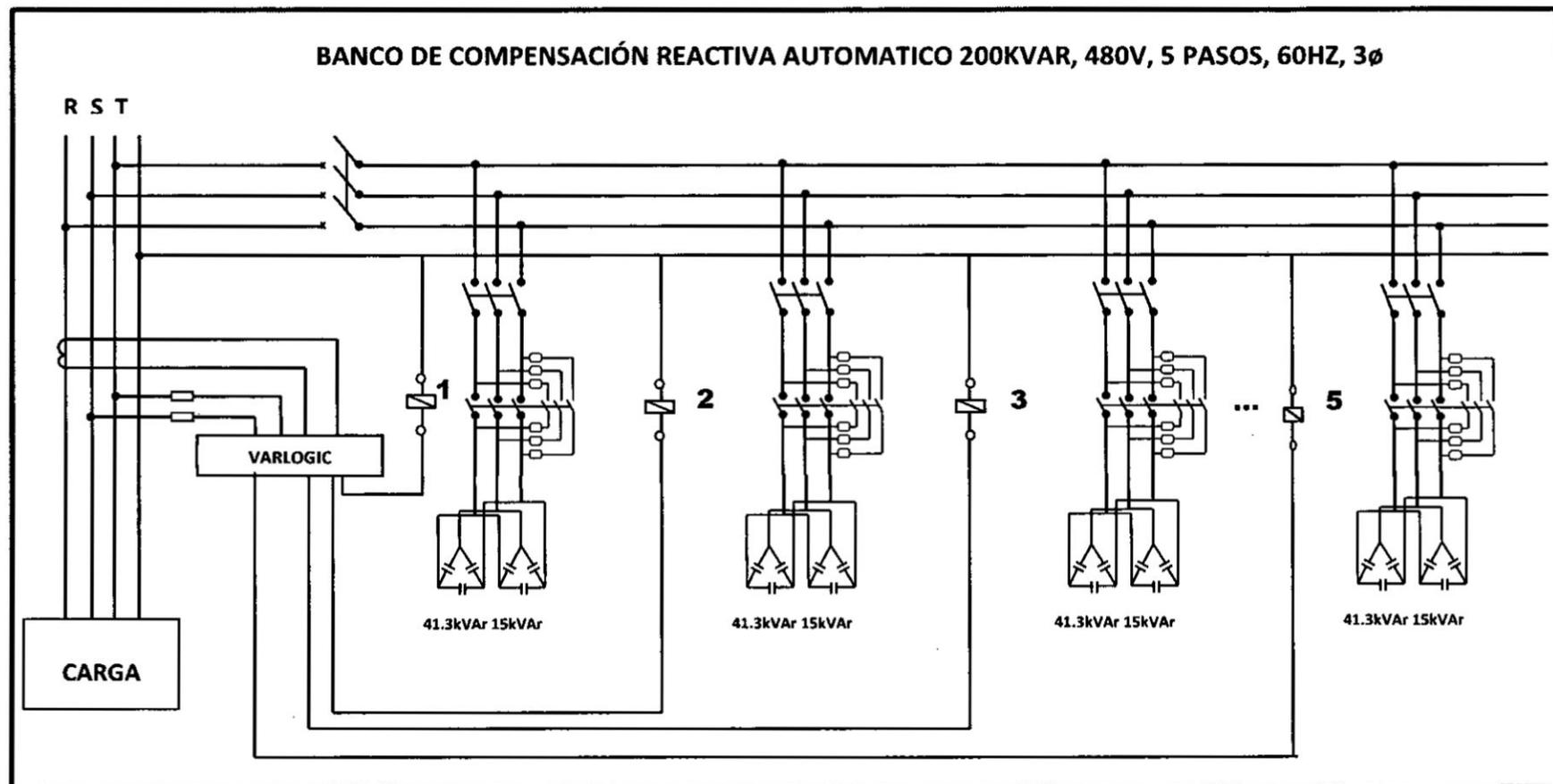
El sistema eléctrico del área 560-MCL-001 tiene la probabilidad de resonancia eléctrica para cargas no lineales que generan armónicos de orden 11th (véase la FIGURA N° 4.26).

TABLA N° 4.29
ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL CCM 560-MCL-001.

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL BANCO DE COMPENSACIÓN DE ENERGIA REACTIVA 200KVAR, 480V, 5 PASOS, 60HZ, 3ø	
Características Eléctricas	
Potencia:	200kVAr
Tensión:	480V, trifásico
Frecuencia:	60Hz
Tipo	Banco de condensadores automático
Capacitores	Trifásicos, Tipo modular, dieléctricos secos, cuentan con resistencias de descarga. Tecnología auto regenerable, desconectado por sobre presión.
Instalación	Gabinete Auto soportado
Tolerancia de capacidad	-5% / 10%
Temperatura máxima	55°C
Maniobras	hasta 5000 anuales
Sobrecargas máximas admisibles en tensión de servicio	Intensidad 30% permanentemente Tensión 10% (8 horas de 24)
Número de Pasos	5
Distribución de pasos	5x47.06kVAr
Regulación	1, 1, 1, 1
Equipos	
Protección principal	Interruptor 400 A, 65kA a 440V, regulable
Controlador de factor de potencia	Si, electrónico, con capacidad de soportar los 12 pasos de regulación.
Accionamiento	Contactores especiales para capacitores con resistencias de pre-inserción limitadoras de corriente
Protección de paso 50kVAr	Interruptor 100 A, 35 kA a 440V
Transformadores de corriente	
Condiciones ambientales	
Temperatura de operación	-25...55 °C
Humedad relativa	95%
Instalación	Interior
Altitud	4800 msnm
Características constructivas del gabinete	
Grado de protección	IP55
Color	RAL 2004
Dimensiones Aproximadas	2100 x 800 x 600 mm (altura x ancho x profundidad)
Sistema de cierre	llave y cerradura
Ventilación	Forzada, control termostato
Fijación	Sobre el suelo (Autosoportado)
Cumplimiento de normas	
IEC 60831 1/2, CSA 22-2 N 190, UNE 20827	

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.27
DIAGRAMA TRIFILAR DE CCM 560-MCL-001



Fuente: Elaboración Propia.

A.4. Dimensionamiento de banco de condensadores Automático del CCM 730-MCL-001.

TABLA N° 4.30
CUADRO DE DATOS DEL CCM 730-MCL-001.

Tension (Vrms)	480
THDv (%)	1.21%
THDi (%)	2.82%
Potencia activa (kw)	557
FPD	0.914

Fuente: Elaboración Propia.

- **Cálculo e ingeniería de Banco de condensadores**

De la ecuación (2.61)

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Se reemplaza valores de la simulación

$$Q_c = 557 \times (\tan(\cos^{-1}(0.914)) - \tan(\cos^{-1}(0.97)))$$

Capacidad de banco de condensadores

$$Q_c = 107.7\text{kvar}$$

Factor de altitud a 4800m.s.n.m igual a 0.88

$$Q_c = 122.3\text{kvar}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.5

$$Q_c = 183.5\text{kvar}$$

- **Composición del banco de compensación reactiva**

05 Pasos de regulación: **47kVAr**

Potencia total efectiva: 235kVAr

Regulación: 1, 1, 1, 1

TABLA N° 4.31

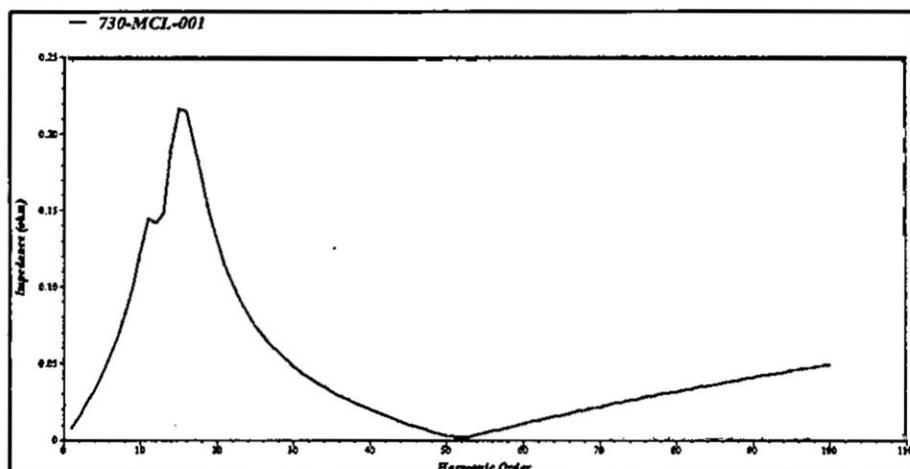
DETALLE DE LOS PASOS AUTOMÁTICOS DEL CCM 730-MCL-001.

DETALLE PASO DE 47.06kVAr			
CAPACITOR	Pot. (kVAr) según las tensiones de operación		
	480 V	525 V	Cantidad
	KVAR	KVAR	UNIDAD
	34.6	41.3	1
	12.5	15	1

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.28

IMPEDANCIA EN FUNCION DEL ORDEN ARMONICO 730-MCL-001.



Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

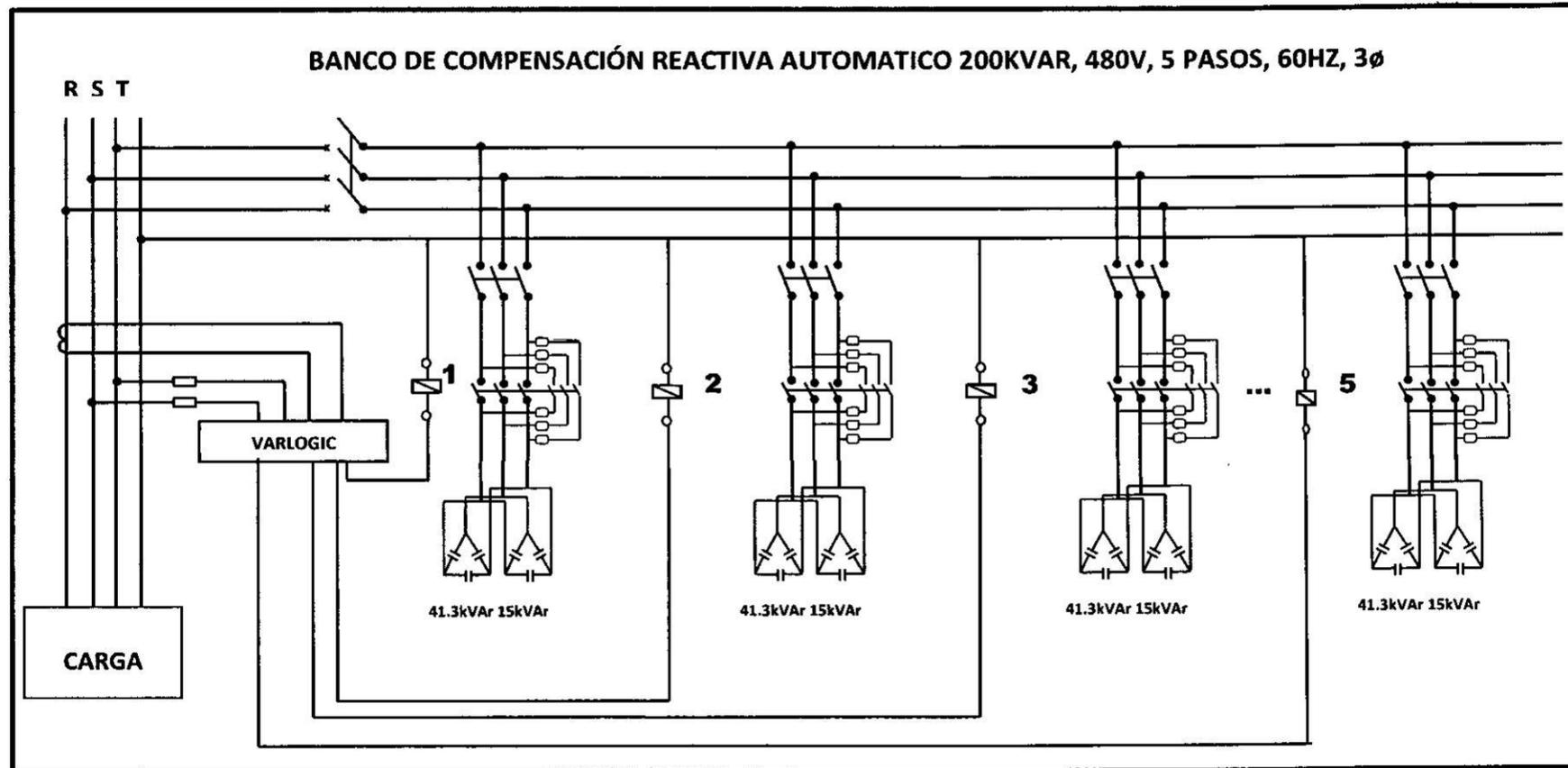
El sistema eléctrico del área 730-MCL-001 tiene la probabilidad de resonancia eléctrica para cargas no lineales que generan armónicos de orden 11th (véase la FIGURA N° 4.28).

TABLA N° 4.32
ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL CCM 730-MCL-001

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL BANCO DE COMPENSACIÓN DE ENERGIA REACTIVA 200KVAR, 480V, 5 PASOS, 60HZ, 3ø	
Características Eléctricas	
Potencia:	200kVAr
Tensión:	480V, trifásico
Frecuencia:	60Hz
Tipo	Banco de condensadores automático
Capacitores	Trifásicos, Tipo modular, dieléctricos secos, cuentan con resistencias de descarga. Tecnología auto regenerable, desconectado por sobre presión.
Instalación	Gabinete Auto soportado
Tolerancia de capacidad	-5% / 10%
Temperatura máxima	55°C
Maniobras	hasta 5000 anuales
Sobrecargas máximas admisibles en tensión de servicio	Intensidad 30% permanentemente Tensión 10% (8 horas de 24)
Número de Pasos	5
Distribución de pasos	5x47.06kVAr
Regulación	1, 1, 1, 1
Equipos	
Protección principal	Interruptor 400 A, 65kA a 440V, regulable
Controlador de factor de potencia	Si, electrónico, con capacidad de soportar los 12 pasos de regulación.
Accionamiento	Contactores especiales para capacitores con resistencias de pre-inserción limitadoras de corriente
Protección de paso 50kVAr	Interruptor 100 A, 35 kA a 440V
Transformadores de corriente	
Condiciones ambientales	
Temperatura de operación	-25...55 °C
Humedad relativa	95%
Instalación	Interior
Altitud	4800 msnm
Características constructivas del gabinete	
Grado de protección	IP55
Color	RAL 2004
Dimensiones Aproximadas	2100 x 800 x 600 mm (altura x ancho x profundidad)
Sistema de cierre	llave y cerradura
Ventilación	Forzada, control termostato
Fijación	Sobre el suelo (Autosoportado)
Cumplimiento de normas	
IEC 60831 1/2, CSA 22-2 N 190, UNE 20827	

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.29
DIAGRAMA TRIFILAR DE CCM 730-MCL-001



Fuente: Elaboración Propia.

A.5. Dimensionamiento de banco de condensadores Automático del CCM 550-MCL-001.

TABLA N° 4.33
CUADRO DE DATOS DEL CCM 550-MCL-001.

Tension (Vrms)	480
THDv (%)	1.21%
THDi (%)	3.51%
Potencia activa (kw)	279
FPD	0.863

Fuente: Elaboración Propia.

Cálculo y diseño de Banco de condensadores

De la ecuación ()

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Se reemplaza valores de la simulación

$$Q_c = 279 \times (\tan(\cos^{-1}(0.863)) - \tan(\cos^{-1}(0.97)))$$

Capacidad de banco de condensadores

$$Q_c = 93.4 \text{ kvar}$$

Factor de altitud a 4800m.s.n.m igual a 0.88

$$Q_c = 106.2 \text{ kvar}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.1

$$Q_c = 116.8 \text{ kvar}$$

- **Composición del banco de compensación reactiva**

01 Pasos de regulación: **25kVAr**

02 Pasos de regulación: **47kVAr**

Potencia total efectiva: 119kVAr

Regulación: 1, 1, 1, 1

TABLA N° 4.34

DETALLE DEL PASO 25KVAR CCM 550-MCL-001.

DETALLE PASO DE 25kVAr			
CAPACITOR	Pot. (kVar) según las tensiones de operación		
	480 V	525 V	Cantidad
	KVAR	KVAR	UNIDAD
	25.1	30	1

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA N° 4.35

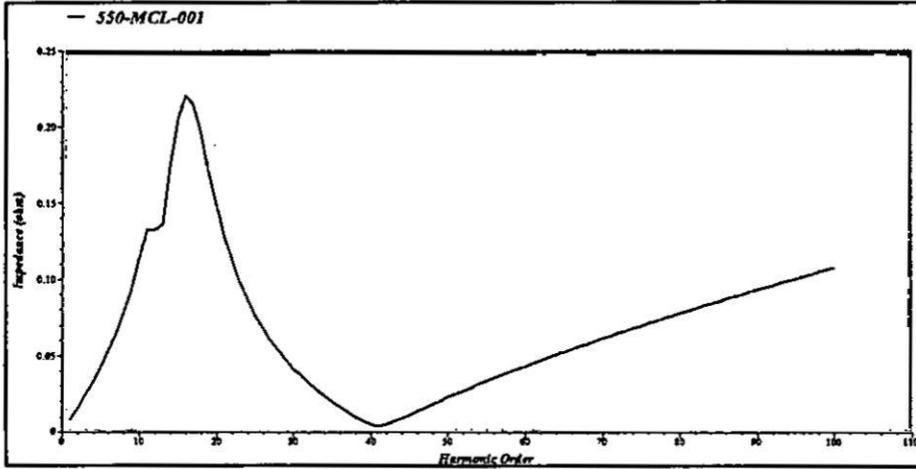
DETALLE DEL PASO 47KVAR CCM 550-MCL-001.

DETALLE PASO DE 47.06kVAr			
CAPACITOR	Pot. (kVar) según las tensiones de operación		
	480 V	525 V	Cantidad
	KVAR	KVAR	UNIDAD
	34.6	41.3	1
	12.5	15	1

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.30

IMPEDANCIA EN FUNCION DEL ORDEN ARMONICO 550-MCL-001.



Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

El sistema eléctrico del área 550-MCL-001 tiene la probabilidad de resonancia eléctrica para cargas no lineales que generan armónicos de orden 11th (véase la FIGURA N° 4.30).

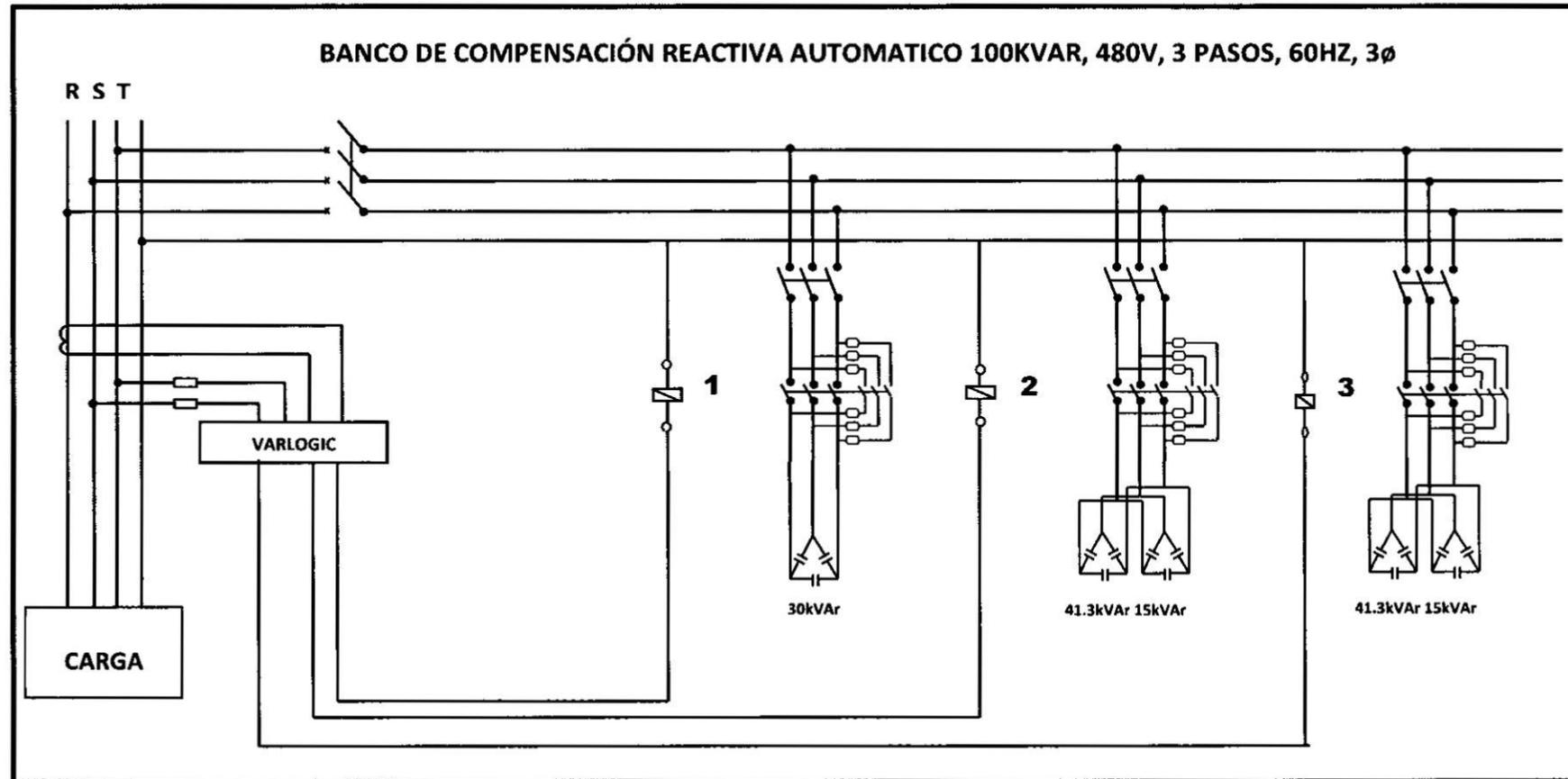
TABLA N° 4.36
ESPECIFICACIONES TECNICAS DE CCM 550-MCL-001

**ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL BANCO DE COMPENSACIÓN DE ENERGIA
 REACTIVA 100KVAR, 480V, 3 PASOS, 60HZ, 3ø**

Características Eléctricas	
Potencia:	100kVAr
Tensión:	480V, trifásico
Frecuencia:	60Hz
Tipo	Banco de condensadores automático
Capacitores	Trifásicos, Tipo modular, dieléctricos secos, cuentan con resistencias de descarga. Tecnología auto regenerable, desconectado por sobre presión.
Instalación	Gabinete Auto soportado
Tolerancia de capacidad	-5% / 10%
Temperatura máxima	55°C
Maniobras	hasta 5000 anuales
Sobrecargas máximas admisibles en tensión de servicio	Intensidad 30% permanentemente Tensión 10% (8 horas de 24)
Número de Pasos	3
Distribución de pasos	1x25+2x47.06kVAr
Regulación	1, 2, 2
Equipos	
Protección principal	Interruptor 200 A, 65kA a 440V, regulable
Controlador de factor de potencia	Si, electrónico, con capacidad de soportar los 6 pasos de regulación.
Accionamiento	Contactores especiales para capacitores con resistencias de pre-inserción limitadoras de corriente
Protección de paso 25kVAr	Interruptor 50 A, 35 kA a 440V
Protección de paso 47kVAr	Interruptor 100 A, 35 kA a 440V
Condiciones ambientales	
Temperatura de operación	-25...55 °C
Humedad relativa	95%
Instalación	Interior
Altitud	4800 msnm
Características constructivas del gabinete	
Grado de protección	IP55
Color	RAL 2004
Dimensiones Aproximadas	2100 x 800 x 600 mm (altura x ancho x profundidad)
Sistema de cierre	llave y cerradura
Ventilación	Forzada, control termostato
Fijación	Sobre el suelo (Autosoportado)
Cumplimiento de normas	
IEC 60831 1/2, CSA 22-2 N 190, UNE 20827	

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.31
DIAGRAMA TRIFILAR DE CCM 550-MCL-001



Fuente: Elaboración Propia.

B. En media tensión (MT)

a) Niveles de corto circuito.

Se resumen en un cuadro los valores más significativos de la operación del sistema con la máxima demanda.

TABLA N° 4.37
NIVELES DE CORTO CIRCUITO EN SE TAMBOMAYO 10 KV.

Subestación Tambomayo			
Subestación Tambomayo	10	11.299	112.99

Fuente: Elaboración Propia.

Para evaluar las tolerancias aplicables a los puntos de medición se realiza el cálculo de la división de la corriente de cortocircuito entre la máxima corriente de carga asociada al circuito (véase en la TABLA N° 4.38).

b) Relación de corriente de cortocircuito respecto a la corriente máxima de carga.

TABLA N° 4.38
RELACIÓN DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO RESPECTO A LA CORRIENTE MÁXIMA DE CARGA.

Subestación Tambomayo					
Subestación Tambomayo	Demanda Máxima	10	11.299	1341.1	8.41
	Demanda Promedio	10	11.299	1114.6	10.137

Fuente: Elaboración Propia.

En base a los resultados previamente obtenidos se seleccionada la tolerancia de la distorsión total de demanda (véase en la TABLA N° 4.39 y TABLA N° 4.40, en la página 1176).

c) Distorsión armónica en tensión.

TABLA N° 4.39
LIMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN TENSIÓN.

Subestación Tambomayo				
Subestación Tambomayo	Demanda Máxima	10	1.17	8
	Demanda Promedio	10	0.99	8

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

Se puede apreciar que la distorsión armónica no supera los límites establecidos por la **NTCSE** (Norma técnica de calidad de servicios eléctricos) menor al 8%.

d) Distorsión armónica en corriente.

TABLA N° 4.40
LIMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN CORRIENTE.

Subestación Tambomayo				
Subestación Tambomayo	Demanda Máxima	10	0.93	5
	Demanda Promedio	10	0.91	5

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

Se observa que la distorsión armónica total no excede la tolerancia establecida por la **IEEE 519**. Asimismo, se debe resaltar que el estándar **IEEE 519 no tiene carácter normativo** y solo debe interpretarse como una recomendación para los límites de emisión de corriente armónica.

e) Contingencias analizadas

Se tiene como consideración principal la carga más grande del sistema bocamina y la carga total del sistema (subestaciones totales) para poder

hacer el análisis de contingencias. Con esto se dimensionara el banco de compensación reactiva en Media Tensión teniendo en consideración lo siguiente para poder elegir los pasos para el banco de media tensión.

La primera consideración es que bocamina no se encuentre compensado localmente por ello se toma en consideración lo siguiente:

- Potencia instalada de 6198kVA.
- Factor de carga 80% (considerado así para demanda máxima).
- Factor de carga 73% (considerado así para demanda media).
- Factor de potencia 0.85 (asumiendo motores de inducción conservadores como carga no compensada).

Asimismo se evalúa como caso que las cargas de bocamina puedan ser compensadas localmente, resultando que para la alimentación:

- Potencia instalada de 6198kVA.
- Factor de carga 80% (considerado así para demanda máxima).
- Factor de carga 73% (considerado así para demanda media).
- Factor de potencia 0.96 (asumiendo motores de inducción compensados en barra principal).

TABLA N° 4.41
ANÁLISIS DEL FACTOR DE POTENCIA SE TAMBOMAYO 10KV SIN
COMPENSACIÓN REACTIVA.

1	Demanda máxima de planta y utilidades + Demanda máxima de BOCAMINA 4840 FP 85%	19960	8065	92.72	97	3062.55	3600	97.59
2	Demanda máxima de planta y utilidades + Demanda máxima de BOCAMINA 4840 FP 96%	20478	7107	94.47	97	1974.73	3600	98.57
3	Demanda media de planta y utilidades + Demanda media de BOCAMINA 4840 FP 85%	16869	6626	93.08	97	2398.23	3600	98.43
4	Demanda media de planta y utilidades + Demanda media de BOCAMINA 4840 FP 96%	16881	5752	94.66	97	1521.22	1800	97.37

Fuente: Elaboración Propia.

Se toma como referencia para obtener un factor de potencia superior a 0.95 en la barra TAMBOMAYO 138kV, y se determinan los requerimientos de compensación reactiva desde la barra TAMBOMAYO 10kV, es decir considerando el aporte de la barra TAMBOMAYO 22kV y el transformador de potencia TP001.

TABLA N° 4.42
ANÁLISIS DEL FACTOR DE POTENCIA SE TAMBOMAYO 10KV CON
COMPENSACIÓN REACTIVA.

1	Demanda máxima de planta y utilidades + Demanda máxima de BOCAMINA 4840 FP 85%	20046	4469	97.60	1	0
2	Demanda máxima de planta y utilidades + Demanda máxima de BOCAMINA 4840 FP 96%	20570	3468	98.61	1	0
3	Demanda media de planta y utilidades + Demanda media de BOCAMINA 4840 FP 85%	16498	3043	98.34	1	1
4	Demanda media de planta y utilidades + Demanda media de BOCAMINA 4840 FP 96%	16817	3983	97.31	0	1

Fuente: Elaboración Propia.

Se evalúa la operación del banco ofertado mediante software de simulación, dando como resultado que la regulación del factor de potencia, se realiza con resultados óptimos. Comprobando que el banco de capacitores necesario en esta barra es de 5400kVAr, con pasos de 3600kVAr+1800kVAr.

f) Análisis de resonancia

El análisis realizado tiene el fin de identificar el nivel de riesgo que implica la existencia de fuentes de corrientes y tensiones múltiplos de la fundamental en la red.

Escenario 1: Con El paso de 1800 kVAR en media tensión

Se analiza la variación de la impedancia vista en la barra de la SE Tambomayo cuando se conecta el primer paso de 1800 kVAR.

Se resume en un cuadro los valores de impedancia en función al orden o múltiplo de la frecuencia de la red cuando se ha compensado la demanda de reactivos (véase en la TABLA N° 4.43 y FIGURA N° 4.32).

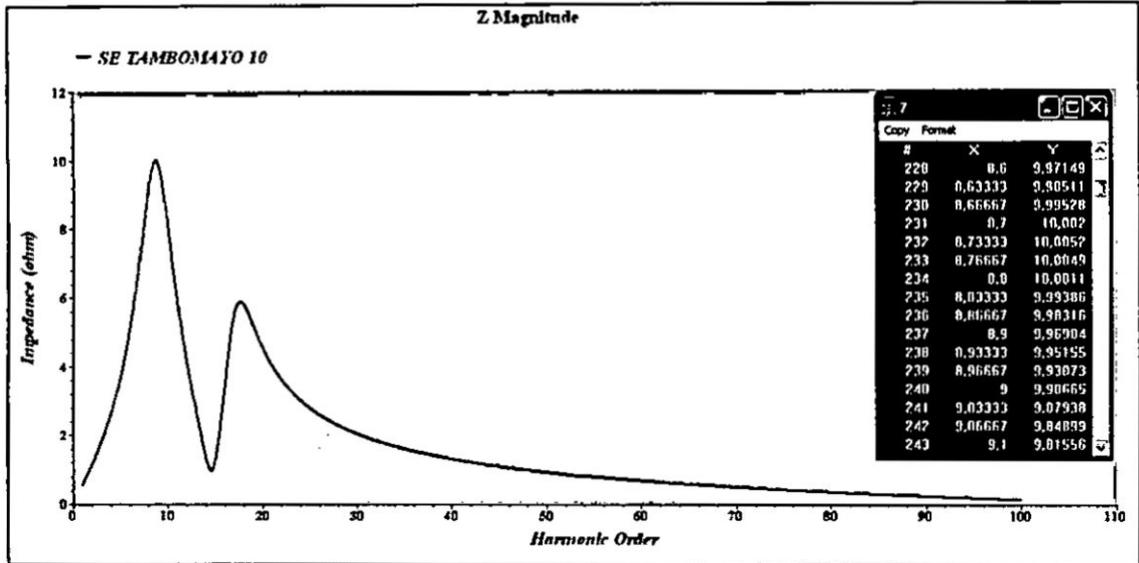
TABLA N° 4.43

RESUMEN DEL ANÁLISIS DE RESONANCIA PARA EL PRIMER PASO DE 1800 KVAR EL SISTEMA ELÉCTRICO.

Subestación Tambomayo	10 kV	10	10	8.8
-----------------------	-------	----	----	-----

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.32
 GRAFICA DE RESONANCIA CON PRIMER ESCALÓN EN OPERACIÓN
 1800KVAR.



Fuente: Elaboración Propia.

Escenario 2: Con El paso de 3600 kVAR en media tensión

Se analiza la variación de la impedancia vista en la barra SE Tambomayo cuando se conecta el primer paso de 3600 kVAR.

Se resume en un cuadro los valores de impedancia en función al orden o múltiplo de la frecuencia de la red cuando se ha compensado la demanda de reactivos (véase en la TABLA N° 4.44 y FIGURA N° 4.33).

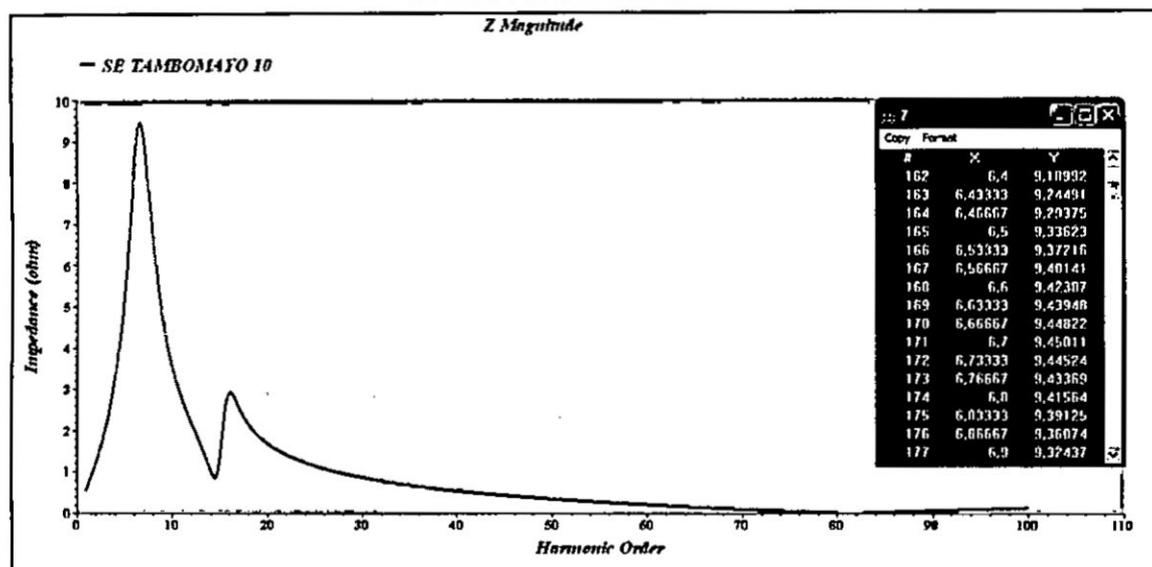
TABLA N° 4.44

RESUMEN DEL ANÁLISIS DE RESONANCIA PARA EL SEGUNDO ESCALON DE 3600 KVAR EL SISTEMA ELÉCTRICO.

Subestación Tambomayo	10 kV	10	9.45	6.7
-----------------------	-------	----	------	-----

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.33
 GRAFICA DE RESONANCIA CON SEGUNDO ESCALÓN EN
 OPERACIÓN 3600KVAR



Fuente: Elaboración Propia.

Escenario 3: Con El paso de 5400 kVAR en media tensión.

Se analiza la variación de la impedancia vista en la barra SE Tambomayo cuando se conecta el banco de media tensión completo 5400 kVAR .

Se resume en un cuadro los valores de impedancia en función al orden o múltiplo de la frecuencia de la red cuando se ha compensado la demanda de reactivos. Se identifica a cada referencia (véase en la TABLA N° 4.45 y FIGURA N° 4.34).

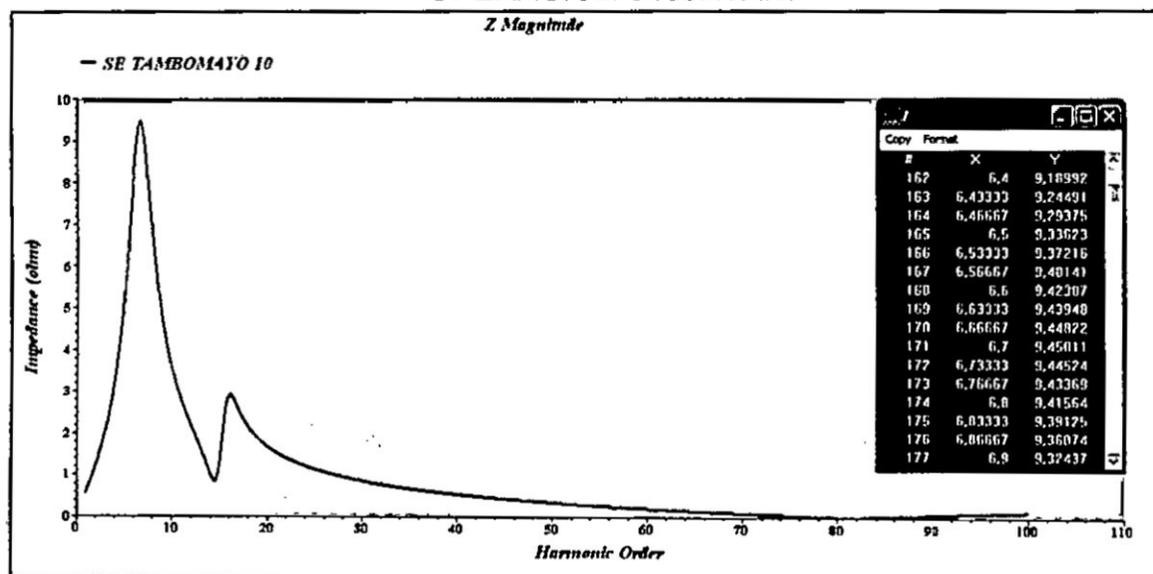
TABLA N° 4.45

RESUMEN DEL ANÁLISIS DE RESONANCIA PARA EL TERCER
 ESCALON DE 5400 KVAR EL SISTEMA ELÉCTRICO.

Subestación Tambomayo	10 kV	10	9.07	5.3
-----------------------	-------	----	------	-----

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.34
 GRAFICA DE RESONANCIA CON TERCER ESCALÓN EN
 OPERACIÓN 5400KVAR.



Fuente: Elaboración Propia.

2. Banco de condensadores con reactancia antiresonante

Este tipo de solución proporciona el diseño mejorado respecto a los bancos de condensadores convencionales frente a redes con contaminación armónica para mitigar el armónico predominante debido al porcentaje de cargas no lineales en el sistema eléctrico y compensar el factor de potencia, relacionados con el proceso de reducir las fluctuaciones de tensión y mejorar la vida útil de los equipos y la capacidad del sistema.

2.1. Funciones

- Mejorar el factor de potencia por exceso de cargas que absorben energía reactiva inductiva.
- Colocar las reactancias antiresonantes ayudan a los condensadores cumplir con sus expectativas de vida.
- Atenúan la corriente de inserción por la naturaleza inductiva de las reactancias antiresonantes.

- El diseño de banco de condensadores con reactancias atenúan el transitorio oscilante natural en la inserción de condensadores en paralelo.
- Se atenúa la amplificación armónica causada por los condensadores en paralelo con el sistema el cual es perjudicial a equipos sensibles existentes en todo sistema industrial.
- Una de los beneficios que resalta en el proyecto es la eliminación de la probabilidad de la resonancia en paralelo del banco de condensadores con el sistema, ya que se logra la variación puramente capacitiva a una relación inductiva-capacitiva en dependencia de la frecuencia.
- La fuente de energía reactiva estará más cercana a las cargas inductivas que requieren para su funcionamiento, logrando que los cables de distribución no se sobrecargan.
- Ayuda a la estabilidad en el sistema eléctrico.
- Mejoramiento de la estabilidad de los procesos productivos.
- Mejoramiento de la calidad de potencia.

2.2. Funcionamiento

El funcionamiento es idéntico a un banco de condensadores convencional, mediante un regulador electrónico que censa la señal de tensión y corriente mide el coseno ϕ , agrega condensadores a medida que aumenta la carga inductiva y los desconecta si baja la carga inductiva.

2.3. Subestaciones con banco de condensadores.

Se presenta en la siguiente tabla el área con este tipo de solución y la capacidad calculada con el modelo de solución:

TABLA N° 4.46
SUBESTACIÓN CON BANCO DE CONDENSADORES CON
REACTANCIA ANTIRESONANTE

FLOTACION	542-MCL-001	Banco de condensadores con reactancia antiresonante BT 100kVar
-----------	-------------	--

Fuente: Elaboración Propia.

Con los parámetros eléctricos que se adquirieron con la simulación del sistema eléctrico en Software ETAP 12.6 (véase en LA TABLA 4.13, en la página 144), los valores de potencia activa, reactiva, factor de potencia; se dimensionó en demanda máxima de la operación de la Mina la capacidad el banco de condensadores.

Esta solución se aplica para los siguientes límites de distorsión armónica:

$$3\% < THD_v < 8\%$$

$$8\% < THD_i < 12\%$$

A.1. Dimensionamiento de banco de condensadores con reactancia antiresonante Automático del CCM 542-MCL-001.

TABLA N° 4.47
CUADRO DE DATOS DEL CCM 542-MCL-001.

Tension (Vrms)	480
THDv (%)	1.46%
THDi (%)	7.23%
Potencia activa (kw)	123
FPD	0.883

Fuente: Elaboración Propia.

De la ecuación (2.61)

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Se reemplaza valores de la simulación

$$Q_c = 123 \times (\tan(\cos^{-1}(0.883)) - \tan(\cos^{-1}(0.97)))$$

Capacidad de banco de condensadores

$$Q_c = 34.6\text{kvar}$$

Factor de altitud a 4800m.s.n.m igual a 0.88

$$Q_c = 40\text{kvar}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.5

$$Q_c = 60\text{kvar}$$

a) Cálculos e ingeniería para en banco de condensadores con reactancia antiresonante.

Análisis de resonancia

Debido a que las cargas principalmente tendrán contenido del **5th** debido a la influencia de los variadores de 6 pulsos, se colocará reactancias de **5.7%**, con la finalidad de proteger frente a estas perturbaciones.

Análisis por tensión

Al colocar la reactancia las unidades capacitivas van a soportar una tensión permanente de **509.01 V**, por lo cual se utilizara condensadores de **525 V**.

Tensión sobre el capacitor

$$V_{sc} = \frac{V_{red}}{1 - \rho} = \frac{480}{1 - 0.057} = 509.01 \text{ v}$$

Los capacitores a elegir son a tensión nominal (>509.01v)

$$V_n = 525\text{Vac}$$

Potencia nominal comercial de capacitor

$$Q_n = 27\text{kvar}$$

b) Calculo de la reactancia antiresonante

- Potencia efectiva que entregara el banco de capacitores con reactancia antiresonante

$$Q_{ef} = \left(\frac{480v}{525v} \right)^2 \frac{27kvar}{(1 - 0.057)} = 23.93kvar$$

- Calculo de la capacitancia

$$C = \frac{23.93 \times 10^3 (1 - 0.057)}{2\pi \times 60 \times 480^2} = 259.84 \text{ } (\mu F)$$

- Calculo de la inductancia antiresonante

$$L = \frac{0.057}{(2\pi \times 60)^2 \times 595.72 \times 10^3} = 1.543 \text{ (mH)}$$

- Cálculo de la corriente fundamental y armónica

$$I_1 = \left| \frac{1.06 \times Q_{efect}}{\sqrt{3} \times V_{sc} \times \left(\frac{1 \times \rho}{100} - \frac{1}{1} \right)} \right| = 30.55 \text{ A}$$

$$I_3 = \left| \frac{0.005 \times Q_{efect}}{\sqrt{3} \times V_{sc} \times \left(\frac{3 \times \rho}{100} - \frac{1}{3} \right)} \right| = 0.84 \text{ A}$$

$$I_5 = \left| \frac{0.05 \times Q_{efect}}{\sqrt{3} \times V_{sc} \times \left(\frac{5 \times \rho}{100} - \frac{1}{5} \right)} \right| = 15.99 \text{ A}$$

$$I_7 = \left| \frac{0.05 \times Q_{efect}}{\sqrt{3} \times V_{sc} \times \left(\frac{7 \times \rho}{100} - \frac{1}{7} \right)} \right| = 5.31 \text{ A}$$

$$I_{efect} = \sqrt{(I_1)^2 + \sum (I_h)^2} = 34.9 \text{ A}$$

Se selecciona la reactancia anti armónica desintonizado al quinto orden armónico (5th, $p=5.7\%$) existente en el mercado eléctrico comercial con $L = 1.421(\text{mH})$ en 480 Vac y $I_{MP} = 40.6\text{Amp}$.

c) Composición del banco de compensación reactiva con reactancia antiresonante

Pasos: 4

04 Pasos de regulación: **23.93kVAr**

Potencia total efectiva: 95.74kVAr

Regulación: 1, 1, 1, 1

TABLA N° 4.48

DETALLE DE LOS ESCALONES AUTOMÁTICOS DEL CCM 542-MCL-001

DETALLE PASO DE 23.93kVAr			
CAPACITOR	Pot. (kVar) según las tensiones de operación		
	480 V KVAR	525 V KVAR	Cantidad UNIDAD
	12.5	15	1
10	12	1	
REACTANCIA ANTIRESONANTE	Relative Impedance %	Inductancia mH	cantidad UNIDAD
	5.7	1.421	1

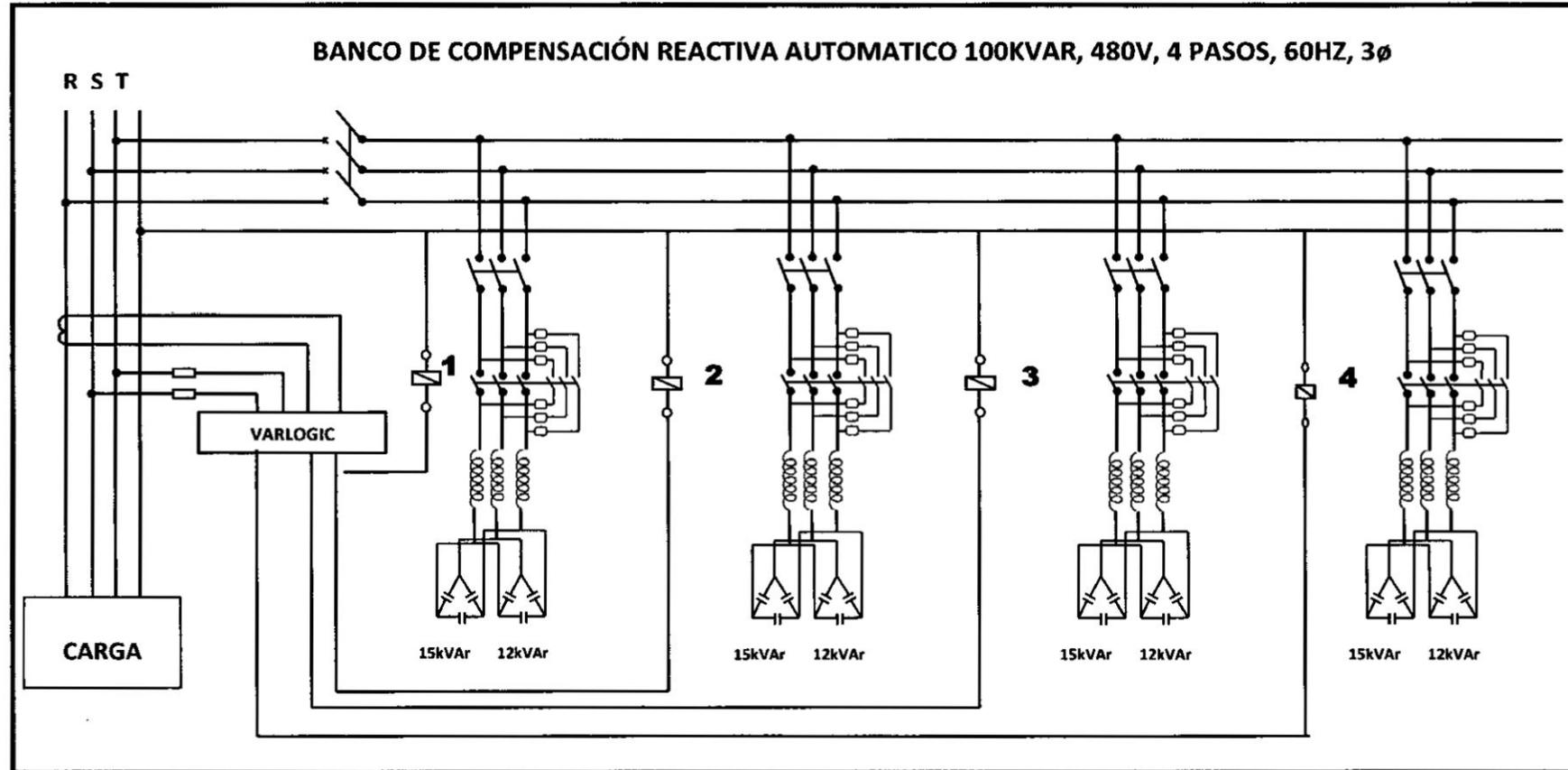
Fuente: Elaboración Propia.

TABLA N° 4.49
ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL CCM 542-MCL-001

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL BANCO DE COMPENSACIÓN DE ENERGIA REACTIVA 100KVAR, 480V, 4 PASOS, 60HZ, 3ø	
Características Eléctricas	
Potencia:	100kVAr
Tensión:	480V, trifásico
Frecuencia:	60Hz
Tipo	Banco de condensadores automático
Capacitores	Trifásicos, Tipo modular, dieléctricos secos, cuentan con resistencias de descarga. Tecnología auto regenerable, desconectado por sobre presión.
Reactancias antiresonantes	Trifásico, seco, con circuito magnético, clase de los aislante Alto, protección térmica.
Instalación	Gabinete Auto soportado
Tolerancia de capacidad	-5% / 10%
Temperatura máxima	55°C
Maniobras	hasta 5000 anuales
Sobrecargas máximas admisibles en tensión de servicio	Intensidad 30% permanentemente Tensión 10% (8 horas de 24)
Número de Pasos	4
Distribución de pasos	4x23.93kVAr
Regulación	1, 1, 1, 1
Equipos	
Protección principal	Interruptor 200 A, 65kA a 440V, regulable
Controlador de factor de potencia	Si, electrónico, con capacidad de soportar los 6 pasos de regulación
Accionamiento	Contactores especiales para capacitores con resistencias de pre-inserción limitadoras de corriente
Protección de paso 24kVAr	Interruptor 50 A, 35 kA a 440V
Transformadores de corriente	
Condiciones ambientales	
Temperatura de operación	-25...55 °C
Humedad relativa	95%
Instalación	Interior
Altitud	4800 msnm
Características constructivas del gabinete	
Grado de protección	IP55
Color	RAL 7035
Dimensiones Aproximadas	2100 x 800 x 600 mm (altura x ancho x profundidad)
Sistema de cierre	llave y cerradura
Ventilación	Forzada, control termostato
Fijación	Sobre el suelo (autosoportado)
Cumplimiento de normas	
IEC 60831 1/2, CSA 22-2 N 190, UNE 20827	

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA N° 4.35
DIAGRAMA TRIFILAR DE 542- MCL-001



Fuente: Elaboración Propia.

3. Filtros Activos

El filtro activo proporciona el más sencillo y eficaz medio para mitigar los armónicos y compensar el factor de potencia, relacionados con el proceso de reducir las fluctuaciones de tensión y mejorar la vida útil de los equipos y la capacidad del sistema. Teniendo conocimiento de las limitaciones de los filtros pasivos, surgió la necesidad de hacer más eficiente el filtrado de armónicos, y es decir mejorar la respuesta dinámica (a las perturbaciones), evitar los problemas de resonancia, entre otros.

Los filtros activos, también denominados acondicionadores de armónicos activos, cancelan los armónicos inyectando corrientes armónicas exactamente iguales donde surgen. Este tipo de filtros reaccionan en tiempo real (es decir, de forma activa) frente a los armónicos existentes para eliminarlos.

3.1. Funciones de un filtro activo

Filtros activos de Potencia es conveniente presentar los distintos tipos de perturbaciones que se pueden presentar en la red eléctrica; para conocer las distintas funciones que puede tener que realizar un Filtros activos de Potencia.

Estas funciones son las siguientes:

- Reducción de los armónicos de corriente que circulen por la red, entre el Filtro activo de Potencia y los centros de generación de energía.
- Reducción de la corriente por el neutro. Si este existe la amplitud de los armónicos de corriente múltiplos de tres se suman a través del neutro.
- Reducción de los armónicos de tensión en los puntos de conexión de las cargas.

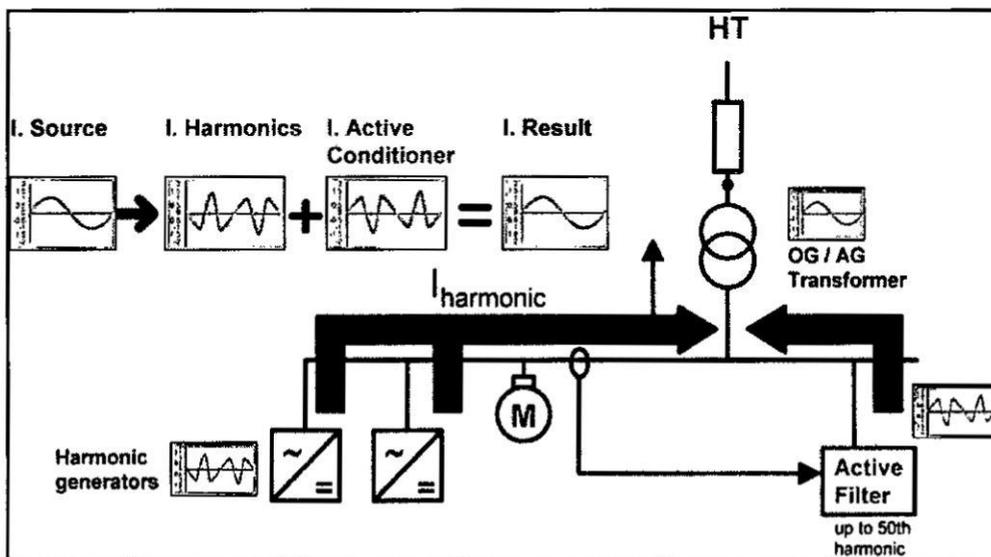
- Corrección del factor de potencia, por exceso de cargas que absorben energía reactiva inductiva.
- Equilibrado de la corriente que circula por las distintas fases.
- Equilibrado de la tensión entre fases y con el neutro.

3.2. Funcionamiento del filtro activo de potencia

El compensador activo analiza los armónicos consumidos por la carga y restituye seguidamente a esta última la misma corriente armónica con la fase adecuada. Consecuencias: en el punto considerado, hay una neutralización completa de las corrientes armónicas. Por consiguiente, estas corrientes ya no circulan aguas arriba y ya no son suministradas por la fuente.

Para la compensación de energía reactiva funciona de la misma manera que un banco de condensadores, la única diferencia es el tiempo de respuesta que este tiene al momento de corregir el factor de potencia (respuesta dinámica).

FIGURA N° 4.36
FUNCIONAMIENTO DE FILTRO ACTIVO DE POTENCIA.



Fuente: Manual de usuario de filtro activo. Schneider Electric

3.3. Subestaciones con filtro activo de potencia

El tratamiento de armónicos requiere un conocimiento preciso y profundo de la instalación. En las instalaciones nuevas, se recomienda el cálculo, en el momento de la concepción, de la tasa de distorsión global en diferentes puntos claves. En las instalaciones existentes, es deseable la intervención de un experto afín de realizar un diagnóstico completo con mediciones. En todos los casos, es conveniente decidir el objetivo prioritario.

- **Calculo de filtros por áreas**

- a) Aguas ácidas 717-MCL-001**

TABLA N° 4.50
DATOS DE SISTEMA INICIAL 717-MCL-001.

Potencia reactiva necesaria	193 kVAR
Distorsión Armónica THDi	1.20%
Tensión de diseño	480 V
Altitud	4800 m.s.n.m

Fuente: Elaboración Propia.

Calculo de Compensación Reactiva

El filtro activo compensa los reactivos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_R = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{193 \text{ Kvar}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ Kv}}$$

$$I_R = 232.14 \text{ A}$$

Desclasificación de la corriente del filtro activo para 4800 m.s.n.m, para evitar sobrecalentamiento al equipo.

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 232.14 / [1 - (4800 - 1000\text{m}) * \frac{1\%}{100\text{m}}]$$

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 374.42 \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = \sqrt{0 + 374.42^2} \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = 374.42 \text{ A}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.2

$$I_{\text{FILTRO}} = 374.42 * 1.2 = 449.304 \text{ A}$$

Capacidad seleccionada según corrientes convencionales:

$$I_{\text{REAL}} = 300 \text{ A} + 200 \text{ A}$$

TABLA N° 4.51

CAPACIDAD NOMINAL DEL FILTRO ACTIVO-ÁREA 717-MCL-001

DETALLE DEL FILTRO ACTIVO			
FILTRO	Características técnicas		
	tensión	corriente	Cantidad
	480 V	300 A	1
480 V	200 A	1	

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

- La corriente armónica no se considera ya que la polución armónica en el CCM cumple con los límites establecidos en el estándar IEEE 519.
- Se consideró una corriente de reserva conservador para futuras ampliaciones, en caso estas cargas adicionales contengan variadores de 6 pulsos convencionales se podrá configurar el filtro activo para que utilice esta corriente de reserva y pueda mitigar armónicos para disminuir la polución armónica en la red.

- El factor de potencia objetivo en barras de baja tensión es de 0.97.

b) Chancado 400-MCL-001

TABLA N° 4.52
DATOS DE SISTEMA INICIAL 400-MCL-001.

Potencia reactiva necesaria	108 kVAR
Distorsión Armónica THDi	1.1%
Tensión de diseño	480 V
Altitud	4800 m.s.n.m

Fuente: Elaboración Propia.

- **Calculo de Compensación Reactiva**

El filtro activo compensa los reactivos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_R = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{108 \text{ Kvar}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ Kv}}$$

$$I_R = 129.90 \text{ A}$$

Desclasificación de la corriente del filtro activo para 4800 m.s.n.m, para evitar sobrecalentamiento al equipo.

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 129.90 / [1 - (4800 - 1000\text{m}) * \frac{1\%}{100\text{m}}]$$

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 209.52 \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = \sqrt{0 + 209.52^2} \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = 209.52 \text{ A}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.2

$$I_{\text{FILTRO}} = 209.52 * 1.2 = 251.42 \text{ A}$$

- **Capacidad seleccionada según corrientes convencionales**

$$I_{\text{REAL}} = 300 \text{ A}$$

TABLA N° 4.53

CAPACIDAD NOMINAL DEL FILTRO ACTIVO-ÁREA 400-MCL-001.

DETALLE DEL FILTRO ACTIVO			
FILTRO	Características técnicas		
	tensión	corriente	Cantidad
	480 V	300 A	1

Nota:

- La corriente armónica no se considera ya que la polución armónica en el CCM cumple con los límites establecidos en la norma IEEE 519.
- Se consideró una corriente de reserva conservador para futuras ampliaciones, en caso estas cargas adicionales contengan variadores de 6 pulsos convencionales se podrá configurar el filtro activo para que utilice esta corriente de reserva y pueda mitigar armónicos para disminuir la polución armónica en la red.
- El factor de potencia objetivo en barras de baja tensión es de 0.97.

c) Merrill Crowe 590-MCL-001

TABLA N° 4.54
DATOS DE SISTEMA INICIAL 590-MCL-001.

Potencia reactiva necesaria	150 kVAR
Distorsión Armónica THDi	0.9%
Tensión de diseño	480 V
Altitud	4800 m.s.n.m

Fuente: Elaboración Propia.

Calculo de Compensación Reactiva

El filtro activo compensa los reactivos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_R = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{150\text{Kvar}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ Kv}}$$

$$I_R = 180.42 \text{ A}$$

Desclasificación de la corriente del filtro activo para 4800 m.s.n.m, para evitar sobrecalentamiento al equipo.

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 180.42 / [1 - (4800 - 1000\text{m}) * \frac{1\%}{100\text{m}}]$$

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 291 \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = \sqrt{0 + 291^2} \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = 291 \text{ A}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.2

$$I_{\text{FILTRO}} = 291 * 1.2 = 349.2 \text{ A}$$

- **Capacidad seleccionada según corrientes convencionales:**

$$I_{\text{REAL}} = 300 \text{ A} + 120 \text{ A}$$

TABLA N° 4.55

CAPACIDAD NOMINAL DEL FILTRO ACTIVO-ÁREA 590-MCL-001.

DETALLE DEL FILTRO ACTIVO			
FILTRO	Características técnicas		
	tensión	corriente	Cantidad
	480 V	300 A	1
480 V	120 A	1	

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

- La corriente armónica no se considera ya que la polución armónica en el CCM cumple con los límites establecidos en la norma IEEE 519.
- Se consideró una corriente de reserva conservador para futuras ampliaciones, en caso estas cargas adicionales contengan variadores de 6 pulsos convencionales se podrá configurar el filtro activo para que utilice esta corriente de reserva y pueda mitigar armónicos para disminuir la polución armónica en la red.
- El factor de potencia objetivo en barras de baja tensión es de 0.97.

d) Merril Crowe 540-MCL-001:

TABLA N° 4.56
DATOS DE SISTEMA INICIAL 540-MCL-001

Potencia reactiva necesaria	217 kVAR
Distorsión Armónica THDi	0.93%
Tensión de diseño	480 V
Altitud	4800 m.s.n.m

Fuente: Elaboración Propia.

Calculo de Compensación Reactiva

El filtro activo compensa los reactivos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_R = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{217 \text{ Kvar}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ Kv}}$$

$$I_R = 261 \text{ A}$$

Desclasificación de la corriente del filtro activo para 4800 m.s.n.m, para evitar sobrecalentamiento al equipo.

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 261 / [1 - (4800 - 1000\text{m}) * \frac{1\%}{100\text{m}}]$$

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 420\text{A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = \sqrt{0 + 420^2} \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = 420 \text{ A}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.05

$$I_{\text{FILTRO}} = 420 * 1.05 = 441 \text{ A}$$

- **Capacidad seleccionada según corrientes convencionales:**

$$I_{\text{REAL}} = 300 \text{ A} + 120 \text{ A}$$

TABLA N° 4.57

CAPACIDAD NOMINAL DEL FILTRO ACTIVO-ÁREA 540-MCL-001.

DETALLE DEL FILTRO ACTIVO			
FILTRO	Características técnicas		
	tensión	corriente	Cantidad
	480 V	300 A	1
480 V	120 A	1	

Nota:

- La corriente armónica no se considera ya que la polución armónica en el CCM cumple con los límites establecidos en la norma IEEE 519.
- Se consideró una corriente de reserva conservador para futuras ampliaciones, en caso estas cargas adicionales contengan variadores de 6 pulsos convencionales se podrá configurar el filtro activo para que utilice esta corriente de reserva y pueda mitigar armónicos para disminuir la polución armónica en la red.
- El factor de potencia objetivo en barras de baja tensión es de 0.97.

e) Molienda 430-MCL-001

TABLA N° 4.58
DATOS DE SISTEMA INICIAL 430-MCL-001.

Potencia reactiva necesaria	260 kVAR
Distorsión Armónica THDi	0.65%
Tensión de diseño	480 V
Altitud	4800 m.s.n.m

Fuente: Elaboración Propia.

Calculo de Compensación Reactiva

El filtro activo compensa los reactivos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_R = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{260 \text{ Kvar}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ Kv}}$$

$$I_R = 312.73 \text{ A}$$

Desclasificación de la corriente del filtro activo para 4800 m.s.n.m, para evitar sobrecalentamiento al equipo.

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 312.73 / [1 - (4800 - 1000\text{m}) * \frac{1\%}{100\text{m}}]$$

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 504.41 \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = \sqrt{0 + 504.41^2} \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = 504.41 \text{ A}$$

Debido a que en la sala eléctrica 430-MCL-001 no tiene proyección de ampliación a futuro de cargas por ende no se considera factor de reserva.

- **Capacidad seleccionada según corrientes convencionales:**

$$I_{\text{REAL}} = 300 \text{ A} + 200 \text{ A}$$

TABLA N° 4.59

CAPACIDAD NOMINAL DEL FILTRO ACTIVO-ÁREA 430-MCL-001.

DETALLE DEL FILTRO ACTIVO			
FILTRO	Características técnicas		
	tensión	corriente	Cantidad
	480 V	300 A	1
480 V	200 A	1	

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

- La corriente armónica no se considera ya que la polución armónica en el CCM cumple con los límites establecidos en la norma IEEE 519.
- El factor de potencia objetivo en barras de baja tensión es de 0.97.

f) Molienda 300-MCL-001

TABLA N° 4.60
DATOS DE SISTEMA INICIAL 300-MCL-001.

Potencia reactiva necesaria	300 kVAR
Distorsión Armónica THDi	0.87%
Tensión de diseño	480 V
Altitud	4800 m.s.n.m

Fuente: Elaboración Propia.

Calculo de Compensación Reactiva

El filtro activo compensa los reactivos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_R = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{300 \text{ Kvar}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ Kv}}$$

$$I_R = 360 \text{ A}$$

Desclasificación de la corriente del filtro activo para 4800 m.s.n.m, para evitar sobrecalentamiento al equipo.

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 360 / [1 - (4800 - 1000\text{m}) * \frac{1\%}{100\text{m}}]$$

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 582 \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = \sqrt{0 + 582^2} \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = 582 \text{ A}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.04

$$I_{\text{FILTRO}} = 582 * 1.04 = 605 \text{ A}$$

- **Capacidad seleccionada según corrientes convencionales:**

$$I_{\text{REAL}} = 300 \text{ A} + 300 \text{ A}$$

TABLA N° 4.61

CAPACIDAD NOMINAL DEL FILTRO ACTIVO-ÁREA 300-MCL-001.

DETALLE DEL FILTRO ACTIVO			
FILTRO	Características técnicas		
	tensión	corriente	Cantidad
	480 V	300 A	1
480 V	300 A	1	

Nota:

- La corriente armónica no se considera ya que la polución armónica en el CCM cumple con los límites establecidos en la norma IEEE 519.
- Se consideró una corriente de reserva conservador para futuras ampliaciones, en caso estas cargas adicionales contengan variadores de 6 pulsos convencionales se podrá configurar el filtro activo para que utilice esta corriente de reserva y pueda mitigar armónicos para disminuir la polución armónica en la red.
- El factor de potencia objetivo en barras de baja tensión es de 0.97.

g) Molienda 580-MCL-001

TABLA N° 4.62
DATOS DE SISTEMA INICIAL 580-MCL-001

Potencia reactiva necesaria	137 kVAR
Distorsión Armónica THDi	12.37%
Tensión de diseño	480 V
Altitud	4800 m.s.n.m

Fuente: Elaboración Propia.

Calculo de Compensación Reactiva

El filtro activo compensa los reactivos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_R = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{137 \text{ Kvar}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ Kv}}$$

$$I_R = 178 \text{ A}$$

Calculo de filtrado de armónicos

El filtro activo mitiga armónicos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_H = \frac{861.7 \text{ A}}{\sqrt{\frac{1}{0.1237^2} + 1}}$$

$$I_H = 105.78 \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = \sqrt{105.78^2 + 178^2} \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = 207 \text{ A}$$

Desclasificación de la corriente del filtro activo para 4800 m.s.n.m, para evitar sobrecalentamiento al equipo.

$$I_{\text{FILTRO-DERRATEADO}} = 207 / [1 - (4800 - 1000\text{m}) * \frac{1\%}{100\text{m}}]$$

$$I_{\text{FILTRO}} = 333.87 \text{ A}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.2

$$I_{\text{FILTRO}} = 333.87 * 1.2 = 400 \text{ A}$$

Capacidad seleccionada según corrientes convencionales:

$$I_{\text{REAL}} = 300 \text{ A} + 120 \text{ A}$$

TABLA N° 4.63

CAPACIDAD NOMINAL DEL FILTRO ACTIVO-ÁREA 580-MCL-001.

DETALLE DEL FILTRO ACTIVO			
FILTRO	Características técnicas		
	tensión	corriente	Cantidad
	480 V	300 A	1
480 V	120 A	1	

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

- En el caso del CCM 580-MCL-001 se considera la corriente armónica ya que la polución armónica en el CCM no cumple con los límites establecidos en la norma IEEE 519.
- Se consideró una corriente de reserva conservadora para futuras ampliaciones en el CCM 580-MCL-001 de filtrado de relaves.
- El factor de potencia objetivo en barras de baja tensión es de 0.97.
- El THDi objetivo es de menor a 8% en barra de baja tensión

h) Filtrado de relaves 620-SBL-001

TABLA N° 4.64

DATOS DE SISTEMA INICIAL 620-SBL-001

Potencia reactiva necesaria	385 kVAR
Distorsión Armónica THDi	13.44%
Tensión de diseño	480 V
Altitud	4800 m.s.n.m

Fuente: Elaboración Propia.

Calculo de Compensación Reactiva

El filtro activo compensa los reactivos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_R = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{385 \text{ Kvar}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ Kv}}$$

$$I_R = 463 \text{ A}$$

Calculo de filtrado de armónicos

El filtro activo mitiga armónicos necesarios por la red mediante inyección dinámica de corriente.

$$I_H = \frac{1429.4 \text{ A}}{\sqrt{\frac{1}{0.1344^2} + 1}}$$

$$I_H = 190.33 \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = \sqrt{190.33^2 + 463^2} \text{ A}$$

$$I_{\text{FILTRO}} = 500 \text{ A}$$

Desclasificación de la corriente del filtro activo para 4800 m.s.n.m, para evitar sobrecalentamiento al equipo.

$$I_{\text{FILTRRO-DERRATEADO}} = 500 / [1 - (4800 - 1000m) * \frac{1\%}{100m}]$$

$$I_{\text{FILTRRO}} = 806.45 \text{ A}$$

Para proyección a futuro de las cargas de la sala eléctrica se considera un factor de reserva igual a 1.2

$$I_{\text{FILTRRO}} = 806.45 * 1.12 = 902.72 \text{ A}$$

Capacidad seleccionada según corrientes convencionales:

$$I_{\text{REAL}} = 300 \text{ A} + 300 \text{ A} + 300 \text{ A}$$

TABLA N° 4.65

CAPACIDAD NOMINAL DEL FILTRO ACTIVO-ÁREA 620-SBL-001

DETALLE DEL FILTRO ACTIVO			
FILTRO	Características técnicas		
	tensión	corriente	Cantidad
	480 V	300 A	1
	480 V	300 A	1
480 V	300 A	1	

Fuente: Elaboración Propia.

Nota:

- En el caso de filtrado de relaves se considera la corriente armónica ya que la polución armónica en el Switchboard no cumple con los límites establecidos en la norma IEEE 519.
- Se consideró una corriente de reserva conservador para futuras ampliaciones en el Switchboard 620-SBL-001 de filtrado de relaves.
- El factor de potencia objetivo en barras de baja tensión es de 0.97.
- El THDi objetivo es de menor a 8% en barra de baja tensión

4.3. Población y muestra

Población:

La investigación comprende el espacio gráfico del sistema eléctrico – proyecto Tambomayo-Arequipa.

Muestra:

Se evaluará barras de media y baja tensión del proyecto minero Tambomayo-Arequipa.

4.4. Técnica e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos fue extraída mediante el software ETAP 12.6, un software de sistemas eléctricos de potencia para evaluar análisis de redes eléctricas. La técnica utilizada fue de tipo experimental ya que mediante contingencias pudo evaluarse el comportamiento del sistema eléctrico para proponer soluciones.

V. RESULTADOS

En los resultados obtenidos ya implementado las soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva (véase la TABLA N° 4.66) se consideró en cada uno de los CCM principales y en la SE Tambomayo, logrando así mejorar el factor de potencia y brindar soluciones ante el problema principal de la presente Tesis.

a) Caso de estudio 1: Demanda Máxima

Se resumen en un cuadro los valores más significativos de la operación del sistema con la máxima demanda.

a.1) Filtros Activos: Áreas en donde se conectaron filtros activos para compensación reactiva.

TABLA N° 4.66
RESUMEN DE FACTOR DE POTENCIA COMPENSADOS CON
FILTROS ACTIVOS A MÁXIMA DEMANDA.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	0.48	1006	216	1269.4	0.978
	590-MCL-001	0.48	367	85	453.8	0.974
CHANCADO	400-MCL-001	0.48	302	75	373.6	0.971
MOLIENDA	430-MCL-001	0.48	1017	255	1273.1	0.97
	300-MCL-001	0.48	902	227	1128.4	0.97
	580-MCL-001	0.48	651	158	808.4	0.972
AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	0.48	734	177	920.7	0.972
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	0.48	992	235	1251.4	0.973

Fuente: Elaboración Propia.

NOTA:

Se aprecia que el factor de potencia en promedio es el óptimo para todos los CCM del sistema, ya que oscila entre el 0.97 como mínimo en el CCM 430-MCL-001 perteneciente a molienda y el 0.978 como máximo en el CCM 540-MCL-001 perteneciente a Merrill Crowe.

a.2) **BANCOS DE CAPACITORES:** Áreas en donde se conectaron bancos de capacitores para compensación de energía reactiva.

TABLA N° 4.67
RESUMEN DE FACTOR DE POTENCIA COMPENSADOS CON BANCOS DE
CAPACITORES A MÁXIMA DEMANDA.

RESUMEN DE FACTOR DE POTENCIA COMPENSADOS CON BANCOS DE CAPACITORES A MÁXIMA DEMANDA.						
FLOTACION	510-MCL-001	0.48	664	135	814	0.98
	510-MCL-002	0.48	558	110	683.4	0.981
	542-MCL-001	0.48	124	19	154.5	0.971
	550-MCL-001	0.48	281	45	342.2	0.987
	560-MCL-001	0.48	351	61	427.7	0.985
	730-MCL-001	0.48	557	129	688.3	0.974
PLANTA SOPLADORAS	730-MCM-001	4.16	174	29	24.9	0.986
MOLIENDA	430-MCM-001	4.16	3607	764	514.6	0.978
SE Tambomayo 10kV	SE Tambomayo	10	20046	4469	1185.3	0.976

Fuente: Elaboración Propia.

NOTA:

Se aprecia que el factor de potencia en promedio es el óptimo para todos los CCM del sistema, ya que oscila entre el 0.971 como mínimo en el CCM 542-MCL-001 perteneciente a Flotación y el 0.987 como máximo en el CCM 550-MCL-001 perteneciente a Flotación.

b) Caso de estudio 2: Demanda Promedio

Se resumen en un cuadro los valores más significativos de la operación del sistema con la demanda promedio.

b.1) FILTROS ACTIVOS: Áreas en donde se conectaron filtros activos para compensación reactiva.

TABLA N° 4.68
RESUMEN DE FACTOR DE POTENCIA COMPENSADOS CON
FILTROS ACTIVOS A DEMANDA PROMEDIO.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	0.48	859	187	1081.5	0.977
	590-MCL-001	0.48	216	50	264.4	0.974
CHANCADO	400-MCL-001	0.48	244	60	301.2	0.971
MOLIENDA	430-MCL-001	0.48	794	187	985.4	0.973
	300-MCL-001	0.48	620	148	767.8	0.973
	580-MCL-001	0.48	566	127	697.2	0.976
AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	0.48	623	150	779.3	0.972
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	0.48	719	163	895.9	0.975

Fuente: Elaboración Propia.

NOTA:

Se aprecia que el factor de potencia en promedio es el óptimo para todos los CCM del sistema, ya que oscila entre el 0.971 como mínimo en el CCM 400-MCL-001 perteneciente a Chancado y el 0.977 como máximo en el CCM 540-MCL-001 perteneciente a Merrill Crowe.

b.2) BANCOS DE CAPACITORES: Áreas en donde se conectaron bancos de capacitores para compensación reactiva.

TABLA N° 4.69
RESUMEN DE FACTOR DE POTENCIA COMPENSADOS CON
FILTROS ACTIVOS A DEMANDA PROMEDIO.

FLOTACION	510-MCL-001	0.48	562	131	690.8	0.974
	510-MCL-002	0.48	332	70	406	0.979
	542-MCL-001	0.48	102	37	124.6	0.982
	550-MCL-001	0.48	231	45	282.6	0.982
	560-MCL-001	0.48	254	60	314.2	0.973
	730-MCL-001	0.48	491	100	601.4	0.98
PLANTA SOPLADORAS	730-MCM-001	4.16	174	29	24.9	0.986
MOLIENDA	430-MCM-001	4.16	3068	638	436.2	0.979
SE Tambomayo 10KV	SE Tambomayo	10	16498	3043	970.5	0.983

Fuente: Elaboración Propia.

NOTA:

Se aprecia que el factor de potencia en promedio es el óptimo para todos los CCM del sistema, ya que oscila entre el 0.973 como mínimo en el CCM 560-MCL-001 perteneciente a Flotación y el 0.977 como máximo en el CCM 730-MCM-001 perteneciente a Planta sopladoras.

TABLA N° 4.70
SOLUCIONES AVANZADAS DE SISTEMAS DE COMPENSACION DE
ENERGIA REACTIVA POR AREAS.

MERRIL CROWE	540-MCL-001	Filtro activo (300A+120A)
	590-MCL-001	Filtro activo (300A+120A)
FLOTACION	510-MCL-001	Banco de condensadores BT 250 kVAR
	510-MCL-002	Banco de condensadores BT 300 kVAR
	542-MCL-001	Banco de condensadores con reactancias anti resonantes BT 100 kVAR
	550-MCL-001	Banco de condensadores BT 100 kVAR
	560-MCL-001	Banco de condensadores BT 200 kVAR
	730-MCL-001	Banco de condensadores BT 200 kVAR
	PLANTA SOPLADORA	730-MCM-001
CHANCADO	400-MCL-001	Filtro activo (300A)
MOLIENDA	430-MCM-001	Banco de condensadores MT (300+300+600) kVAR
	430-MCL-001-002	Filtro activo (300A+200A)
	300-MCL-001	Filtro activo (300A+300A)
	580-MCL-001 & 610-MCL-001	Filtro activo (300A+120A)
AGUAS ACIDAS	717-MCL-001	Filtro activo (300A+200A)
FILTRADO DE RELAVES	620-SBL-001	Filtro activo (300A+300A+300A)
SE Tambomayo 10kV	SE Tambomayo 10kV	Banco de condensadores 1800kVar + 3600kVar

VI. DISCUSION DE RESULTADOS

Contrastación de la Hipótesis con los Resultados.

En el presente trabajo se planteó una hipótesis general:

Desarrollando un modelo de simulación del sistema eléctrico del proyecto minero Tambomayo-Arequipa, se mejorará la calidad potencia diseñando óptimas soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva.

Contraste: Mediante el modelo del sistema eléctrico en el software de simulación de sistemas eléctricos de potencia Etap 12.6, es posible seleccionar e implementar de manera adecuada las soluciones avanzadas de compensación de energía reactiva y así se mejoró la calidad de potencia en todo el sistema eléctrico Tambomayo.

Y se plantaron las siguientes hipótesis específicas:

H1: Analizando el comportamiento y la influencia de las cargas no lineales mediante el software ETAP 12.6 se seleccionará soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva.

Contraste: Con el análisis detallado del comportamiento del sistema eléctrico y la influencia de las cargas no lineales en el software Etap 12.6 se seleccionaron según limitaciones las mejores soluciones de sistemas de compensación de energía reactiva mejorando el factor de potencia en cada uno de los CCM de baja tensión del sistema eléctrico Tambomayo.

H2: Definiendo metodologías y configuraciones de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva se evitará los efectos producidos por distorsión armónica para mejorar la calidad de potencia.

Contraste: Mediante el análisis detallado que se ha realizado a las diferentes subestaciones, este estudio demostró que la instalación podrá

mejorar la calidad de potencia y evitar los efectos producidos por distorsión armónica.

H3: Analizando, porque el criterio no adecuado en el diseño de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva ocasionaría efectos de amplificación armónica y fenómeno de resonancia eléctrica.

Contraste: Por la topología propuesta para los sistemas de compensación de energía reactiva la compañía minera Tambomayo los límites de distorsión armónica no sobrepasarían a las recomendaciones del estándar IEEE 519-2014, a su vez el análisis de resonancia indica que no generara ningún problema de amplificación armónica y efectos destructivos.

VII. CONCLUSIONES

- A.** Es de suma importancia modelar el sistema eléctrico del proyecto minero Tambomayo para mejorar la calidad de potencia, entre los análisis requeridos para evaluar sistemas eléctricos mineros tenemos el análisis armónico y de flujo de potencia, ya que solo verificando dichos escenarios se podrá tener un panorama mayor del comportamiento de la red eléctrica y optar por implementar optimas soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva soluciones en los puntos analizados.
- B.** Modelando las cargas, tanto de elementos lineales, como no lineales podemos predecir el comportamiento de la red eléctrica minera en base a simulaciones de ella, y así se planteó soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva con ello mejoró el factor de potencia global teniendo como consecuencia una mejor calidad de potencia.
- C.** Al definir metodologías y configuraciones de soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva se evitó los efectos producidos por la distorsión armónica y a su vez se mejoró la calidad de potencia en los puntos analizados, ya que el factor de potencia promedio en cada CCM analizado en baja y en media tensión (10kV) tiene como promedio 0.97, cumpliendo así con los requerimientos del Procedimiento 20 (PR20) del Coes.
- D.** Un criterio no adecuado en el diseño de soluciones avanzadas en sistemas de compensación de energía reactiva, conlleva a generar mayores problemas en la red del sistema eléctrico como amplificación armónica y fenómenos de resonancia, es por ello que requiere de un correcto y minucioso análisis para que al seleccionar la solución no genere ninguna repercusión en la red, un claro ejemplo de ello son los filtros activos que no generan ningún tipo de resonancia frente a la

impedancia del sistema debido a que no contempla en su estructura elementos pasivos.

VIII. RECOMENDACIONES

- A. Se recomienda realizar una compensación de factor de potencia con banco de capacitores convencionales por contar con una baja distorsión armónica en corriente y tensión. Estas soluciones según el análisis que se realizó son óptimas para los CCM mencionados a continuación:
- ✓ 510-MCL-001
 - ✓ 510-MCL-002
 - ✓ 550-MCL-001
 - ✓ 560-MCL-001
 - ✓ 730-MCL-001
- B. Para el CCM 580-MCL-001 y el Switchboard 620-MCL-001 se recomienda realizar una mitigación de armónicos con Filtros Activos ya que contemplan un índice de distorsión armónica que sobrepasa los límites establecidos por el estándar IEEE519.A su vez una corrección del factor de potencia logrando un valor promedio de 0.97.
- C. Según las especificaciones técnicas de los arranques de motores, se requirió que todos los motores mayores a 100HP tengan variador de frente activo (AFE) , si bien un variador de frente activo brinda una distorsión menor al 5% , estos generan armónicos de tensión a altas frecuencias que pueden generar resonancia eléctrica a altas frecuencias con los bancos de condensadores convencionales, por ende se recomienda la instalación de filtros activos en estas áreas para compensar el factor de potencia debido a que no generan amplificaciones por fenómeno de resonancia de ningún tipo, a continuación se enlistan los CCM mencionados:
- ✓ 430-MCL-001
 - ✓ 300-MCL-002

- ✓ 580-MCL-001
- ✓ 540-MCL-001
- ✓ 590-MCL-001

- D.** En la subestación Molienda media tensión, se recomienda realizar una compensación de factor de potencia con un banco fijo de 600Kvar y automática de 2 pasos de 300Kvar para corregir el factor de potencia y a su vez para estabilizar la tensión en barra debido al arranque de los motores de gran potencia existentes en esta área, a su vez para la planta sopladoras se recomienda una compensación motor para suplir la corriente de arranque directo de la compresora.
- E.** Para la Subestación eléctrica Tambomayo 10kV se recomienda la instalación de un banco de condensadores en 2 niveles, el primer nivel de 1800kVAr y el segundo nivel de 3600kVAr, es necesario esta configuración para así poder cumplir con los requerimientos de la demanda de reactivos en cada escenario del proyecto minero Tambomayo, asegurando así una mejora en la calidad de potencia y el cumplimiento del procedimiento 20 (PR20) del Coes.
- F.** Se recomienda realizar una investigación sobre los transitorios oscilatorios que pueden causar los bancos de media tensión para tener en cuenta los efectos que pueden ocurrir frente a las protecciones de subtensión y sobretensión en el banco de capacitores Tambomayo 10 kV.
- G.** En caso existan futuras ampliaciones, se recomienda actualizar el modelo del sistema eléctrico para proponer nuevas soluciones en sistemas de compensación de energía reactiva o ver la repercusión en las ya existentes, teniendo así una mejora continua en la red eléctrica.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. ARRILLAGA, J; NEVILLE, Neville R. **Power system Harmonics**: John Wiley & Sons, Ltd., 2ª ed. England 2003. 399 p. ISBN 0-470-85129-5.
- [2]. CHRISTIAN COLLOMBET, JEAN-MARC LUPIN, JACQUES SCHONEK. Cuaderno técnico N° 152 **Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento** .Schneider Electric.Argentina.2003
- [3]. CHRISTIAN SANTIAGO ERAZO PAZMIÑO. **Estudio para la ubicación estratégica de capacitores en las subestaciones de la empresa eléctrica EMELNORTE S.A.** Tesis de titulación. Quito. Escuela politécnica nacional.2007.
- [4]. Cuaderno técnico N°199-**La calidad de energía eléctrica**- Schneider Electric.España.2004
- [5]. DAMAS NIÑO, Marcelo Nemesio. **Guía para la presentación de proyectos de investigación y tesis de pregrado FIEE – UNAC**” Pp. 42. Callao Perú. 2012.
- [6]. EN 61000-4-7 (IEC 1000-4-7). **Armónicos e ínter armónicos**.
- [7]. ENRIQUE GÓMEZ MORALES. **Compensación de potencia reactiva**. Proyecto fin de carrera. Instituto Politécnico Nacional de México, Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2009.
- [8]. ETAP 12.6.**Guia de usuario**._Marzo 2014
- [9]. IEC 60831-1-2 **“Low Voltage Capacitor”**.
- [10]. IEC 61000-2-2/4, **Compatibility Levels for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Low-Voltage Power Supply Systems**.
- [11]. IEEE 1159, **Guide For Recorder and Data Acquisition Requirements For Characterization of Power Quality Events**.

- [12]. IEEE Std 1159-2009, **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality** pp 6.
- [13]. IEEE Std 18-2012, **IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.**
- [14]. IEEE Std 519-2014, **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.** pp 23-24.
- [15]. INGRESO, MODIFICACIÓN Y RETIRO DE INSTALACIONES EN EL SEIN – COES pr20.aprobado-OSENERGMIN: PROCEDIMIENTO N° 035-2013-OS/CD
- [16]. JHAMES JACO TORREJON, JULIO GONZALES ADVINCULA, **"Diseño e implementación de banco automático de capacitores con reactancias antiresonantes en redes industriales con distorsión armónica"**, Artículo que ocupó el 1er lugar del XIII Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Electrónica y Ramas Afines XIII CONEIMERA Piura 2016.
- [17]. JORGE MARIO RUIZ VALLEJO FRANCISCO, HERNANDO ORTÍZ QUINTERO **Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos.** Tesis de titulación. Pereira. Universidad tecnológica de Pereira.2007.
- [18]. JOSÉ DARIEL ARCILA. **Armónicos en sistemas eléctricos.** Disponible en:
[http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.](http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos)
 Artículo web. Consultada 27 octubre del 2016
- [19]. MARCOS HOLGUIN, DAVID GOMEZ COELLO. **Análisis de calidad de energía eléctrica en el "nuevo campus" de la Universidad Politécnica Salesiana.** Tesis de titulación. Guayaquil. Universidad Politécnica Salesiana.2010.

- [20]. Ministerio de Energía y Minas .**Norma técnica de calidad de servicios Eléctricos (NTCSE)**. Perú. 2010.
- [21]. OSCAR PEÑA HUARINGA. **Estudio y simulación de los filtros de potencia**. Tesis de titulación. Lima .Universidad nacional de ingeniería.2006
- [22]. PETIT SUÁREZ, JOHANN FARITH. **Control de Filtros Activos de Potencia para la Mitigación de Armónicos y Mejora del Factor de Potencia en Sistemas Desequilibrados**. Tesis Doctoral, Madrid, Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2007.
- [23]. RODRÍGUEZ LUQUE, JOANA. **Calidad de suministro eléctrico. penetración de armónicos. mitigación de sus efectos en las plantas industriales**. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2013.
- [24]. ROGER C. DUGAN, MARK F., Surya Santoso, H. Wayne Beaty, **Electrical Power Systems Quality**, McGranaghan. 2012.
- [25]. EDUARDO ANTONIO CANO PLATA, SAMUEL RAMÍREZ CASTAÑO. **Calidad del servicio de energía eléctrica**. Universidad Nacional de Colombia sede Manazales. 2006.
- [26]. SINUHÉ RAMÍREZ GUERRERO. **Estudio del filtro activo serie para regulación de tensión y control de corrientes armónicas**. Tesis Doctoral, Moleros, Centro Nacional de investigación y desarrollo tecnológico. 2004.

X. ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia.

Anexo 2: Modelo del sistema eléctrico Tambomayo.

Anexo 1: Matriz de Consistencia

TÍTULO: Modelo para Soluciones Avanzadas de Sistemas de Compensación de Energía Reactiva para el Proyecto Minero Tambomayo-Arequipa.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODO Y DISEÑO	POBLACION Y MUESTRA
<p><u>Problema General:</u></p> <p>PG: ¿Cómo la falta de un modelo de simulación afecta la correcta elección de soluciones avanzadas de sistema de compensación de energía reactiva para el proyecto minero Tambomayo-Arequipa?</p> <p><u>Problemas Específicos:</u></p> <p>1.- ¿Cómo la influencia de cargas no lineales afecta en la elección de soluciones de sistemas de compensación de energía reactiva?</p> <p>2.- ¿Cómo se podría evitar los efectos producidos por la distorsión armónica en soluciones de sistemas de compensación de energía reactiva para mejorar la calidad de potencia?</p> <p>3.- ¿Cómo el mal criterio en el diseño de soluciones de sistemas de compensación de energía reactiva puede ocasionar efectos de amplificación armónica y fenómeno de resonancia eléctrica?</p>	<p><u>Objetivo General:</u></p> <p>OG: Efectuar un modelo de simulación del sistema eléctrico del proyecto minero Tambomayo-Arequipa para evaluar la calidad potencia con el fin de diseñar óptimas soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva.</p> <p><u>Objetivos Específicos:</u></p> <p>1. Analizar el comportamiento y la influencia de las cargas no lineales mediante el software ETAP 12.6 para la selección de soluciones Avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva.</p> <p>2. Definir metodologías y configuraciones de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva con el fin de evitar los efectos producidos por distorsión armónica para mejorar la calidad de potencia.</p> <p>3. Analizar, porque el criterio no adecuado en el diseño de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva puede ocasionar efectos de amplificación armónica y fenómeno de resonancia eléctrica.</p>	<p><u>Hipótesis General:</u></p> <p>HG: Desarrollando un modelo de simulación del sistema eléctrico del proyecto minero Tambomayo-Arequipa, se mejorará la calidad potencia diseñando óptimas soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva.</p> <p><u>Hipótesis Específicas:</u></p> <p>H1: Analizando el comportamiento y la influencia de las cargas no lineales mediante el software ETAP 12.6 se seleccionará soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva.</p> <p>H2: Definiendo metodologías y configuraciones de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva se evitará los efectos producidos por distorsión armónica para mejorar la calidad de potencia.</p> <p>H3: Analizando, porque el criterio no adecuado en el diseño de soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva ocasionaría efectos de amplificación armónica y fenómeno de resonancia eléctrica.</p>	<p><u>Variable Independiente:</u></p> <p>X=Modelo de simulación</p> <p><u>Variable Dependiente:</u></p> <p>Y= calidad de potencia.</p> <p><u>Indicadores :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Y1= Tasas de distorsión armónica de tensión y corriente. ➤ Y2= Frecuencia de resonancia. ➤ Y3= Factor de potencia. <p><u>Variable Interviniente:</u></p> <p>Z=Reconocimiento de las tasas de distorsión armónica en tensión y corriente y de las frecuencias resonantes que pueden formar un circuito de amplificación armónica y resonante.</p> <p><u>Indicadores :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Z1= porcentaje de cargas no lineales. ➤ Z2= Armónico predominante en el sistema eléctrico. ➤ Z3=Flujo de potencia reactiva 	<p><u>Método</u></p> <p>El tipo de Investigación a realizarse será Descriptiva y Aplicada, desarrollando un modelo de simulación para soluciones avanzadas de sistemas de compensación de energía reactiva para mejorar la calidad de potencia en el proyecto minero Tambomayo-Arequipa.</p> <p><u>Diseño</u></p> <p>La investigación es aplicada básica - longitudinal. Se inicia Mayo 2016 y su posible término Diciembre 2016.</p>	<p><u>Población:</u></p> <p>La investigación comprende el espacio gráfico del sistema eléctrico -proyecto Tambomayo a cargo de la empresa Schneider Electric Perú S.A</p> <p><u>Muestra:</u></p> <p>Se evaluará barras de media y baja tensión del proyecto minero Tambomayo-Arequipa.</p>