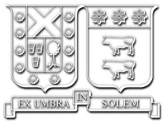
Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Valparaíso, Chile



Análisis técnico-económico de una solución de filtrado activo para la mitigación de armónicos de una subestación eléctrica unitaria con alta penetración de cargas no lineales en una operación minera chilena

Rodrigo Ignacio Burgos Fuenzalida

2026

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor Guía:
Dra.-Ing. Margarita Norambuena Valdivia (UTFSM)

Correferente Externo:
Fabián Espinoza Martínez (Minera Valle Central S.A.)

Valparaíso, septiembre, 2026.

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis técnico-económico de una solución de filtrado activo para la mitigación de armónicos de una subestación eléctrica unitaria con alta penetración de cargas no lineales en una operación minera chilena

Nombre del candidato(a): Rodrigo Ignacio Burgos Fuenzalida

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Eléctrica / Ingeniero Civil Electricista

Campus: Casa Central Valparaíso **Departamento:** Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Margarita Norambuena Valdivia, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

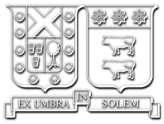
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 14-10-2026 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02-10-2026 **Firma:** _____

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Valparaíso, Chile



Análisis técnico-económico de una solución de filtrado activo para la mitigación de armónicos de una subestación eléctrica unitaria con alta penetración de cargas no lineales en una operación minera chilena

Rodrigo Ignacio Burgos Fuenzalida

2026

"En el momento adecuado, yo, el Señor, haré que suceda."
— Isaías 60:22

Agradecimientos

Primero agradecer a Dios por darme la salud y la fuerza durante todo este camino, a mi familia que siempre me apoyó y me dio ánimos desde la distancia y estuvo para mí siempre que los necesité, en especial a mis padres que me dieron la oportunidad de poder estudiar en esta universidad, me enseñaron a perseverar y no rendirme, a mi hermana, mi roomie que me daba comida sin hacer ruido para no desconcentrarme cuando estaba encerrado intentando hacer una tarea, escribiendo un informe o estudiando para un certamen, me escuchaba en mis momentos donde necesité desahogarme y también fue parte de noches de fiesta.

Mencionar también a mis amigos del colegio la Asamblea y las señoras chismosas que me vienen acompañando hace más de 10 años, siempre con algún mensaje positivo, aguantando todo el caos que a veces puedo generar, las llamadas de atención cuando perdía el camino y animándome a continuar, agradecerles y decirles que luego de esto estamos un poco más cerca todos de lo que nos imaginamos cuando éramos niños.

Este logro también es de los cangri, mi familia en la USM, los que saben cada detalle de lo que fue estar acá, que conocen y entienden lo que fue cada aprobado y reprobado, que saben cuántas noches se pasaron sin dormir, que crecimos juntos durante este proceso y con los que, obvio, carreteamos un montón.

Agradecer también a Minera Valle Central por darme la oportunidad de hacer este trabajo en sus instalaciones, a Alexis Pino quien fue el que me permitió entrar por primera vez a ese lugar y en especial a Fabián Espinoza, Claudio Marcet y Rodrigo Figueroa, mis mentores en este proceso desde que fui practicante hasta el cierre de esta etapa.

No puedo dejar de agradecer a la Universidad Técnica Federico Santa María, por abrirme sus puertas y entregarme las herramientas y la exigencia que hoy me permiten cerrar este proceso. Gracias por hacerme parte de una comunidad que deja huella en quienes pasamos por ella.

Agradecer especialmente a la profesora Margarita Norambuena, guía académica de este trabajo, por su dedicación y paciencia al revisar cada detalle de esta memoria, fundamental para llegar a buen puerto.

Finalmente agradecer a todos los que participaron de esta parte de mi vida y que se me puedan haber olvidado: sin ustedes nada de esto sería posible.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos I

Índice de Figuras VII

Índice de Tablas X

Glosario y nomenclatura XIV

Resumen 1

Abstract 3

1. Introducción 5
- 1.1. Planteamiento del problema . . . 6
- 1.2. Motivación . . . 6
- 1.3. Objetivos . . . 7
  - 1.3.1. Objetivo general . . . 7
  - 1.3.2. Objetivos específicos . . . 7
- 1.4. Alcance . . . 8
- 1.5. Metodología general . . . 8
- 1.6. Estructura de la memoria . . . 9

2. Contexto del sistema eléctrico 10
- 2.1. Contexto industrial de Minera Valle Central . . . 10
- 2.2. Descripción general de la SEU Nº 22 . . . 11
- 2.3. Centros de control de motores CCM6 y CCM7 . . . 12
- 2.4. Presencia de cargas no lineales . . . 12
- 2.5. Condición de equipos de compensación existentes . . . 13
- 2.6. Antecedentes de calidad de energía . . . 14
- 2.7. Crecimiento proyectado de cargas . . . 14

2.8. Relevancia del estudio 15

3. Marco teórico 16
3.1. Calidad de energía en sistemas eléctricos industriales 16
3.2. Armónicos en sistemas eléctricos 17
3.3. Cargas no lineales 18
3.4. Variadores de frecuencia de 6 pulsos 18
3.5. Distorsión armónica total de tensión 19
3.6. Distorsión armónica total de corriente 19
3.7. Distorsión total de demanda 20
3.8. Norma IEEE 519 21
3.9. Mitigación de armónicos 22
3.9.1. Comparación entre filtros pasivos y activos 22
3.10. Filtros activos de potencia 24
3.11. Corriente nominal del filtro activo 25
3.12. Estrategias de compensación 25
3.13. Consideraciones generales para la aplicación de filtros activos 26

4. Diagnóstico armónico de la condición medida 27
4.1. Antecedentes de medición 27
4.2. Criterios de evaluación 29
4.3. Resultados de distorsión armónica total de tensión 30
4.4. Resultados de distorsión total de demanda 31
4.5. Armónicos predominantes 31
4.6. Otros indicadores de calidad de energía 32
4.7. Diagnóstico general 32

5. Modelación del sistema eléctrico en ETAP 34
5.1. Objetivo de la modelación 34
5.2. Alcance del análisis en ETAP 35
5.3. Antecedentes utilizados 37
5.4. Configuración armónica de cargas no lineales 38
5.5. Escenarios de operación considerados 39
5.6. Actualización de cargas respecto de la medición de 2024 . . 41
5.7. Modificaciones y crecimiento de cargas consideradas 41
5.8. Criterios de evaluación 42
5.8.1. Determinación de la corriente máxima de demanda I_L 44
5.8.2. Determinación de la corriente de cortocircuito I_{SC} . . 46
5.8.3. Sensibilidad de la banda normativa aplicable 47
5.9. Estudios realizados en ETAP 48

5.10. Supuestos y limitaciones del modelo 49
5.11. Síntesis del capítulo 50

6. Alternativas de mitigación armónica 51
6.1. Criterio general de comparación 51
6.2. Contraste de coherencia del modelo con la condición medida 52
6.2.1. Construcción del escenario de referencia P95 52
6.2.2. No coincidencia de los percentiles 56
6.2.3. Contraste cuantitativo de THD_v 56
6.2.4. Contraste cuantitativo de TDD 57
6.2.5. Error absoluto y relativo del contraste 58
6.2.6. Criterio de aceptación adoptado 58
6.2.7. Discusión de las discrepancias y declaración de ajustes 59
6.2.8. Conclusión del contraste 60
6.2.9. Contraste por orden armónico y alcance del espectro genérico 61
6.3. Escenario proyectado sin mitigación 63
6.3.1. Bases de cálculo de la TDD y reconciliación entre escenarios 64
6.4. Alternativas evaluadas 68
6.5. Resultados de THD_v por alternativa 70
6.6. Resultados de TDD por alternativa 72
6.7. Comparación técnica de alternativas 74
6.8. Análisis de los resultados no intuitivos de las simulaciones . 75
6.8.1. Capacidad, saturación y objetivo de control en las alternativas centralizadas 76
6.8.2. Aumento de la TDD local en las alternativas centralizadas 77
6.8.3. Desempeño del modo automático frente a la alternativa distribuida 78
6.8.4. Acoplamiento entre los equipos a través de la barra común 79
6.9. Selección preliminar de configuración 79
6.10. Síntesis del capítulo 80

7. Evaluación de filtros activos de 270 A 82
7.1. Antecedentes de alternativas comerciales recibidas 83
7.2. Criterios de evaluación considerados 84
7.3. Configuración de filtros activos evaluada 85
7.4. Condiciones de simulación analizadas 88

7.5. Resultados con filtros activos de 270 A en modo automático 88
7.6. Análisis de armónicos individuales en CCM7 89
7.7. Configuración final propuesta 90
7.8. Resultados finales de la evaluación 91
7.9. Utilización, reserva y holgura de los filtros 94
7.9.1. Corrientes de compensación sin redondeo 94
7.9.2. El resultado de CCM7 corresponde a una condición de saturación 95
7.9.3. Restricción física del alimentador de CCM7 96
7.9.4. Caso de sensibilidad: cargas existentes al 100 % 97
7.9.5. Desclasificación y sobrecarga del equipo de filtrado . . 98
7.9.6. Declaración sobre la holgura del dimensionamiento . . 99
7.10. Comparación global de resultados 99
7.11. Verificación de armónicos individuales en la configuración final 100
7.12. Consideraciones para la implementación 101
7.13. Síntesis del capítulo 102

8. Lineamientos de implementación 104
8.1. Alcance de los lineamientos de implementación 104
8.2. Configuración general de la solución propuesta 105
8.3. Punto de conexión de los filtros activos 106
8.4. Identificación preliminar de espacios disponibles en los CCM 106
8.4.1. Ubicación sugerida en CCM6 108
8.4.2. Ubicación sugerida en CCM7 108
8.5. Conexión eléctrica y alimentadores asociados 110
8.6. Requerimientos de medición y control 111
8.7. Consideraciones de protección y maniobra 112
8.8. Consideraciones físicas de instalación 112
8.9. Puesta en marcha y parametrización 116
8.10. Verificación posterior a la instalación 116
8.11. Riesgos técnicos y medidas de control 117
8.12. Síntesis del capítulo 118

9. Evaluación técnico-económica 120
9.1. Alcance de la evaluación técnico-económica 120
9.2. Limitaciones de la evaluación económica 121
9.3. Alternativas comerciales consideradas 122
9.4. Criterio de conversión económica 123

9.5. Desglose del valor de la oferta del Proveedor A y comparación económica . . . 125
9.6. Análisis de alcance y condiciones de implementación . . . 127
9.7. Criterios de evaluación ponderada . . . 129
9.8. Matriz de evaluación técnico-económica . . . 132
9.8.1. Sensibilidad de los resultados a la ponderación adoptada 133
9.9. Análisis de la alternativa recomendada . . . 134
9.10. Evaluación preliminar de operación, mantenimiento y beneficios . . . 135
9.11. Síntesis del capítulo . . . 137

10. Conclusiones y recomendaciones 139
10.1. Conclusiones generales . . . 139
10.2. Conclusiones del diagnóstico y modelación . . . 140
10.3. Conclusiones de las alternativas de mitigación . . . 141
10.4. Conclusiones de la evaluación por simulación de la configuración de 270 A . . . 141
10.5. Conclusiones de implementación . . . 143
10.6. Conclusiones técnico-económicas . . . 144
10.7. Cumplimiento de los objetivos de la memoria . . . 145
10.8. Recomendaciones . . . 147
10.9. Trabajos futuros . . . 148

A. Resultados de respaldo de ETAP 149
A.1. Flujo de carga del escenario proyectado . . . 149
A.2. Cortocircuito en barra de baja tensión de la SEU Nº 22 . . . 150
A.3. Cortocircuito en CCM6 . . . 151
A.4. Cortocircuito en CCM7 . . . 153

B. Resultados de simulación de alternativas de mitigación 155
B.1. Alertas del análisis armónico . . . 155
B.2. Escenario proyectado sin filtro activo . . . 157
B.3. Filtro activo centralizado de 400 A . . . 159
B.4. Filtro activo centralizado de 500 A . . . 162
B.5. Filtro activo centralizado de 600 A . . . 165
B.6. Filtro activo distribuido 250 A + 300 A . . . 168

C. Simulación de filtros activos de 270 A 172
C.1. Resultados con filtros activos de 270 A en modo automático 172
C.2. Resultados con configuración final propuesta . . . 175

D. Antecedentes de implementación de filtros activos 179
D.1. Ubicaciones referenciales en los CCM 180
D.2. Unilineales de referencia 181
D.2.1. Unilineal actual con incorporación referencial de APF 182
D.2.2. Unilineal proyectado con incorporación referencial de APF 186
D.3. Software de configuración del filtro activo 190
D.4. Ubicación física referencial de los filtros activos 191
D.5. Mediciones referenciales de espacio disponible 191

Referencias 193

Índice de Figuras

5.1. Vista del modelo ETAP asociado a la SEU Nº 22. 36
5.2. Configuración armónica de variador de frecuencia Rockwell de 6 pulsos en ETAP. 39

6.1. Conexión del filtro activo centralizado en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22. 69
6.2. Configuración distribuida de filtros activos en CCM6 y CCM7. 70
6.3. Configuración del filtro activo genérico utilizado en ETAP. 70
6.4. Comparación de THD_v para las alternativas principales de mitigación evaluadas. 71
6.5. Comparación de TDD para las alternativas de mitigación evaluadas. 73

7.1. Configuración del filtro activo de 270 A asociado a CCM7 en ETAP. 86
7.2. Órdenes armónicos considerados en la configuración manual selectiva del APF de CCM7. 87
7.3. Comparación de THD_v para la evaluación de filtros activos de 270 A. 92
7.4. Comparación de TDD para la evaluación de filtros activos de 270 A. 93

8.1. Placas de identificación Allen-Bradley Bulletin 2100 (Serie P) de CCM6 y CCM7, verificadas en terreno. 107
8.2. Ubicaciones sugeridas para la incorporación de alimentadores dedicados de filtros activos en CCM7 y CCM6. Las figuras corresponden a vistas de elevación referenciales intervenidas con fines ilustrativos. 109
8.3. Funciones de parametrización del software del filtro activo ofrecido. 111

8.4. Ubicación exterior de los filtros pasivos existentes asociados a los CCM estudiados. La implementación propuesta considera el retiro de estos equipos fuera de servicio y su reemplazo por gabinetes de filtros activos. 115

A.1. Flujo de carga del escenario proyectado en ETAP. 150
A.2. Resultado de cortocircuito en barra de baja tensión de la SEU Nº 22. 151
A.3. Resultado de cortocircuito en CCM6. 152
A.4. Resultado de cortocircuito en CCM7. 154

B.1. Vista de alertas del análisis de flujo armónico en ETAP para el escenario proyectado. 156
B.2. Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 para el escenario proyectado sin filtro activo. 157
B.3. Resultados de flujo armónico en CCM6 para el escenario proyectado sin filtro activo. 158
B.4. Resultados de flujo armónico en CCM7 para el escenario proyectado sin filtro activo. 159
B.5. Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 para filtro activo centralizado de 400 A. . . . 160
B.6. Resultados de flujo armónico en CCM6 para filtro activo centralizado de 400 A. 161
B.7. Resultados de flujo armónico en CCM7 para filtro activo centralizado de 400 A. 162
B.8. Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 para filtro activo centralizado de 500 A. . . . 163
B.9. Resultados de flujo armónico en CCM6 para filtro activo centralizado de 500 A. 164
B.10. Resultados de flujo armónico en CCM7 para filtro activo centralizado de 500 A. 165
B.11. Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 para filtro activo centralizado de 600 A. . . . 166
B.12. Resultados de flujo armónico en CCM6 para filtro activo centralizado de 600 A. 167
B.13. Resultados de flujo armónico en CCM7 para filtro activo centralizado de 600 A. 168
B.14. Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 para filtros activos distribuidos de 250 A en CCM6 y 300 A en CCM7. 169

B.15. Resultados de flujo armónico en CCM6 para filtro activo distribuido de 250 A. 170
B.16. Resultados de flujo armónico en CCM7 para filtro activo distribuido de 300 A. 171

C.1. Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 con filtros activos de 270 A en modo automático.173
C.2. Resultados de flujo armónico en CCM6 con filtros activos de 270 A en modo automático. 174
C.3. Resultados de flujo armónico en CCM7 con filtros activos de 270 A en modo automático. 175
C.4. Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 con la configuración final de filtros activos de 270 A. 176
C.5. Resultados de flujo armónico en CCM6 con la configuración final de filtros activos de 270 A. 177
C.6. Resultados de flujo armónico en CCM7 con la configuración final de filtros activos de 270 A. 178

D.1. Vista referencial de elevación de CCM7 con alternativa preliminar de conexión para filtro activo. 180
D.2. Vista referencial de elevación de CCM6 con alternativas preliminares de conexión para filtro activo. 181
D.3. Interfaz general del software de configuración del filtro activo.190
D.4. Ejemplo de parametrización de compensación armónica por órdenes. 190
D.5. Ubicación actual de filtros pasivos fuera de servicio. El espacio se considera referencialmente para la instalación de los nuevos filtros activos. 191
D.6. Medición referencial de espacio disponible en la ubicación de los filtros pasivos existentes. 191
D.7. Medición referencial de longitud disponible para instalación de gabinete de filtro activo. 192
D.8. Detalle de medición referencial de espacio disponible en terreno. 192
D.9. Medición referencial de profundidad o distancia disponible en la zona de instalación. 192

Índice de Tablas

2.1. Resumen de potencia nominal instalada en CCM6 y CCM7 12

3.1. Armónicos característicos de un rectificador trifásico de 6 pulsos 19
3.2. Comparación general entre filtros pasivos y filtros activos . 23

4.1. Puntos de medición considerados en el diagnóstico de calidad de energía 28
4.2. Indicadores principales considerados en el diagnóstico . . . 29
4.3. Resultados de THD_v reportados por Tecnored 30
4.4. Resultados de TDD reportados por Tecnored 31

5.1. Carga existente incorporada posterior a la medición de 2024 41
5.2. Modificaciones y cargas proyectadas consideradas en la modelación 42
5.3. Límites de distorsión armónica de tensión según IEEE 519 . 43
5.4. Límites de distorsión armónica de corriente según IEEE 519 para sistemas de 120 V a 69 kV 43
5.5. Límites de TDD aplicables a los puntos evaluados 44
5.6. Máximas demandas mensuales registradas y corriente I_L resultante según IEEE 519 45
5.7. Comparación entre la corriente I_L registrada y la del escenario proyectado 46
5.8. Corrientes de cortocircuito trifásico en los puntos de evaluación 47
5.9. Razón I_{SC}/I_L y banda normativa resultante según la base de corriente adoptada 47

6.1. Demanda registrada en Vantage durante el periodo de la campaña de medición 53

6.2. Calidad del registro de corriente de Vantage en el periodo analizado 54
6.3. Construcción del escenario de referencia P95 utilizado en el contraste 55
6.4. Comparación de THD_v entre medición Tecnored y escenario de referencia P95 en ETAP 57
6.5. Comparación de TDD entre medición Tecnored y escenario de referencia P95 en ETAP 57
6.6. Error absoluto y relativo entre la condición medida y el escenario de referencia P95 58
6.7. Criterio de aceptación del contraste y resultado obtenido . 59
6.8. Contraste por orden armónico entre biblioteca, modelo y medición 61
6.9. Resultados del escenario proyectado sin mitigación 64
6.10. Corrientes de demanda I_L utilizadas como base de cálculo de la TDD 65
6.11. Derivación de la corriente armónica agregada del escenario proyectado sin mitigación a partir de la salida de ETAP . . 66
6.12. Comparación entre el escenario de referencia y el escenario proyectado sin mitigación 67
6.13. Alternativas de mitigación evaluadas 69
6.14. Comparación de THD_v máxima para alternativas de mitigación 71
6.15. Comparación de TDD para alternativas de mitigación . . . 72
6.16. Evaluación comparativa de alternativas 75
6.17. Corriente inyectada por el filtro centralizado según su capacidad nominal 76
6.18. Corriente armónica agregada por punto y alternativa de mitigación 77
6.19. Corriente inyectada, utilización y órdenes compensados por configuración 78

7.1. Resumen de alternativas comerciales recibidas 83
7.2. Criterios de evaluación utilizados para la evaluación de filtros activos de 270 A 84
7.3. Configuración de filtros activos de 270 A evaluada 85
7.4. Resultados armónicos con filtros activos de 270 A en modo automático 88
7.5. Armónicos individuales de corriente en CCM7 con filtro activo en modo automático 89

7.6. Distribución cuadrática de la corriente de compensación del filtro activo de CCM7 90
7.7. Resultados armónicos con configuración final propuesta . . 91
7.8. Corriente de compensación por orden armónico de ambos filtros en la configuración final 94
7.9. Utilización y reserva de los filtros activos en la configuración final 95
7.10. Capacidad de conducción del alimentador de CCM7 y utilización 96
7.11. Comparación entre el escenario proyectado y el caso de sensibilidad con cargas existentes al 100 % 97
7.12. Comparación global de resultados de THD_v 99
7.13. Comparación global de resultados de TDD 100
7.14. Verificación de armónicos individuales de corriente en la configuración final 100

8.1. Configuración general de la solución propuesta 105
8.2. Equivalencia referencial de espacio en CCM Allen-Bradley CENTERLINE 2100 107
8.3. Ubicación sugerida para alimentador de APF en CCM6 . . 108
8.4. Ubicación sugerida para alimentador de APF en CCM7 . . 108
8.5. Dimensiones referenciales del gabinete de filtro activo ofertado113
8.6. Verificación física de espacio exterior para la instalación del filtro activo 114
8.7. Verificaciones recomendadas después de la implementación 117

9.1. Resumen técnico-comercial de alternativas recibidas 122
9.2. Conversión referencial de valores netos de ofertas 124
9.3. Condiciones comerciales declaradas por cada oferta 125
9.4. Desglose económico de la oferta del Proveedor A [25], [28] . 126
9.5. Principales diferenciadores de alcance entre ofertas 128
9.6. Criterios utilizados en la matriz de evaluación ponderada . 130
9.7. Evidencia utilizada para el anclaje de los puntajes técnicos y técnico-comerciales 131
9.8. Matriz de evaluación técnico-económica de alternativas . . 132
9.9. Sensibilidad del puntaje total a distintas ponderaciones técnico/económico 133
9.10. Aspectos asociados a operación, mantenimiento y beneficios de la solución 136

10.1. Síntesis del cumplimiento de los objetivos específicos 146

Glosario y nomenclatura

Acrónimos

Acrónimo	Descripción
APF	Filtro activo de potencia, del inglés *Active Power Filter*.
BT	Baja tensión.
CCM	Centro de control de motores.
ETAP	Software de análisis y simulación de sistemas eléctricos de potencia.
HP	Caballos de fuerza, del inglés *Horsepower* (1 HP $\approx$ 0,746 kW).
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, del inglés *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
IP	Grado de protección de un gabinete o envolvente frente a polvo y agua, del inglés *Ingress Protection*.
MVC	Minera Valle Central S.A.
P95	Percentil 95 de una magnitud medida, utilizado como base del escenario de referencia.
PCC	Punto de acoplamiento común, del inglés *Point of Common Coupling*.
SEU	Subestación Eléctrica Unitaria.
SF	Módulo de altura útil de un centro de control de motores, del inglés *Space Factor*.
TDD	Distorsión total de demanda, del inglés *Total Demand Distortion*.
THD	Distorsión armónica total, del inglés *Total Harmonic Distortion*.
THD_v	Distorsión armónica total de tensión.

Acrónimo	Descripción
THD_i	Distorsión armónica total de corriente.
TTCC	Transformadores de corriente.
VDF	Variador de frecuencia.

Símbolos

Símbolo	Descripción	Unidad
I_L	Corriente máxima de demanda de carga.	A
I_{SC}	Corriente de cortocircuito en el punto de evaluación.	A
h	Orden armónico.	–
H	Orden armónico máximo considerado.	–
V_1	Componente fundamental de tensión.	V
V_h	Componente armónica de tensión de orden h.	V
I_1	Componente fundamental de corriente.	A
I_h	Componente armónica de corriente de orden h.	A
I_{APF}	Corriente nominal del filtro activo.	A
$I_{c,h}$	Corriente de compensación inyectada por el filtro activo, asociada al armónico de orden h.	A
f	Frecuencia fundamental del sistema eléctrico.	Hz
ω	Frecuencia angular fundamental.	rad/s
ϕ_h	Ángulo de fase de la componente armónica de orden h.	rad
S_{cc}	Potencia de cortocircuito.	MVA

Resumen

La presente memoria desarrolla un análisis técnico-económico para la implementación de una solución de filtrado activo orientada a la mitigación de armónicos en la Subestación Eléctrica Unitaria Nº 22 de Minera Valle Central S.A. El estudio se enfoca en los centros de control de motores CCM6 y CCM7, los cuales concentran una alta presencia de cargas no lineales asociadas principalmente a variadores de frecuencia de 6 pulsos.

A partir de los antecedentes de calidad de energía disponibles, se identificaron niveles relevantes de distorsión armónica de tensión y corriente. En particular, los puntos asociados a CCM6 y CCM7 presentaron incumplimientos de distorsión armónica total de tensión, mientras que la distorsión total de demanda superó los límites considerados en los tres puntos evaluados. Esta condición justificó la necesidad de estudiar alternativas de mitigación armónica para la condición actual y proyectada del sistema.

El análisis técnico se desarrolló mediante el modelo eléctrico existente de Minera Valle Central en ETAP, incorporando actualizaciones de carga, cargas proyectadas y escenarios de operación con y sin filtros activos. Se evaluaron configuraciones centralizadas y distribuidas, observándose que las alternativas centralizadas reducen la distorsión vista desde la barra principal, pero no corrigen adecuadamente la distorsión de corriente local en CCM6 y CCM7. En cambio, la configuración distribuida permitió reducir la circulación local de corrientes armónicas y cumplir simultáneamente los límites de THDv y TDD en los puntos evaluados.

Posteriormente, se evaluó por simulación una configuración de filtrado activo de capacidad nominal equivalente a la solución comercial seleccionada compuesta por dos filtros activos de 270 A, uno instalado en CCM6 y otro en CCM7. La configuración final propuesta considera el filtro de CCM6 en modo automático y el filtro de CCM7 en modo manual selectivo. Bajo esta condición, la THDv se redujo a 3,97 % en la barra de baja tensión de la

SEU Nº 22, 4,13 % en CCM6 y 4,17 % en CCM7. Asimismo, la TDD final alcanzó 3,19 %, 3,00 % y 3,44 %, respectivamente. En el escenario simulado, los indicadores evaluados satisfacen los límites de referencia adoptados según IEEE Std. 519; la verificación normativa definitiva debe realizarse en el punto de acoplamiento común definido y bajo el protocolo de medición aplicable.

Finalmente, se realizó una comparación técnico-comercial preliminar de las ofertas recibidas, en la cual se cuantificó la inversión inicial y se evaluaron cualitativamente los aspectos de operación, mantenimiento, implementación y beneficios esperados. La alternativa del Proveedor A resultó favorecida, bajo los precios, alcances, ponderaciones y supuestos declarados, no por presentar el menor costo, sino por su equilibrio entre desempeño técnico, compatibilidad con la red de 600 V, configuración distribuida, gabinetes IP65, transformadores de corriente considerados, repuesto incluido, puesta en marcha y menor incertidumbre relativa de implementación. La comparación no incorpora flujos de operación ni indicadores de rentabilidad, limitación que se declara de forma expresa.

Palabras clave: calidad de energía, armónicos, filtro activo, variadores de frecuencia, IEEE 519, ETAP.

Abstract

This thesis presents a technical and economic analysis for the implementation of an active filtering solution aimed at harmonic mitigation in Unit Electrical Substation No. 22 of Minera Valle Central S.A. The study focuses on motor control centers MCC6 and MCC7, which concentrate a high share of nonlinear loads mainly associated with six-pulse variable frequency drives.

Based on the available power quality background, relevant levels of voltage and current harmonic distortion were identified. In particular, the points associated with MCC6 and MCC7 did not comply with the total harmonic voltage distortion limits, while the total demand distortion exceeded the considered limits at the three evaluated points. This condition justified the need to study harmonic mitigation alternatives for both the current and projected operating conditions of the system.

The technical analysis was developed using the existing electrical model of Minera Valle Central in ETAP, incorporating load updates, projected loads, and operating scenarios with and without active power filters. Centralized and distributed configurations were evaluated. The results showed that centralized alternatives reduce the distortion observed from the main busbar, but do not adequately correct the local current distortion in MCC6 and MCC7. In contrast, the distributed configuration reduced the local circulation of harmonic currents and achieved simultaneous compliance with THDv and TDD limits at the evaluated points.

An active filtering configuration of nominal capacity equivalent to the selected commercial solution, composed of two 270 A units, one installed in MCC6 and the other in MCC7, was then evaluated by simulation. The final proposed configuration considers the MCC6 filter operating in automatic mode and the MCC7 filter operating in selective manual mode. Under this condition, THDv was reduced to 3.97 % at the low-voltage busbar of Unit Electrical Substation No. 22, 4.13 % at MCC6, and 4.17 % at MCC7.

Likewise, the final TDD reached 3.19 %, 3.00 %, and 3.44 %, respectively. In the simulated scenario, the evaluated indicators satisfy the adopted reference limits of IEEE Std. 519; definitive normative verification must be carried out at the defined point of common coupling and under the applicable measurement protocol.

Finally, a preliminary technical and commercial comparison of the received offers was carried out, quantifying the initial investment and qualitatively assessing operation, maintenance, implementation and expected benefits. Supplier A's alternative was favoured, under the declared prices, scopes, weightings and assumptions, not because it presented the lowest cost, but because it offered the best balance between technical performance, compatibility with the 600 V network, distributed configuration, IP65 enclosures, current transformers, an included spare module, commissioning service, and lower relative implementation uncertainty.

Keywords: power quality, harmonics, active power filter, variable frequency drives, IEEE 519, ETAP.

Capítulo 1

Introducción

La creciente incorporación de cargas no lineales en sistemas eléctricos industriales ha generado nuevos desafíos asociados a la calidad de energía. En particular, el uso masivo de equipos basados en electrónica de potencia, tales como variadores de frecuencia, rectificadores e inversores, puede producir corrientes armónicas que se propagan a través del sistema eléctrico [1], [2]. Estas corrientes, al circular por la impedancia equivalente de transformadores, barras y conductores, pueden generar distorsión armónica de tensión en los puntos de alimentación, afectando el desempeño global del sistema eléctrico [3].

En instalaciones industriales con alta presencia de cargas no lineales, el análisis armónico adquiere especial relevancia debido a sus posibles efectos sobre transformadores, conductores, protecciones, motores y equipos sensibles. Por esta razón, normas como IEEE Std. 519 establecen criterios recomendados para evaluar y limitar la distorsión armónica de tensión y corriente en sistemas eléctricos de potencia [4].

En este contexto, la presente memoria aborda el análisis técnico-económico de una alternativa de mitigación armónica mediante filtros activos de potencia en la SEU Nº 22 de Fase II en Minera Valle Central S.A. La solución se estudia considerando la presencia de cargas no lineales asociadas principalmente a variadores de frecuencia, junto con el crecimiento proyectado de carga en los centros de control de motores CCM6 y CCM7.

1.1. Planteamiento del problema

La SEU Nº 22 corresponde a una instalación eléctrica industrial que alimenta cargas relevantes para la operación de Minera Valle Central S.A. Dentro de este sistema, los centros de control de motores CCM6 y CCM7 concentran una parte importante de las cargas no lineales, principalmente asociadas a variadores de frecuencia utilizados en accionamientos eléctricos del proceso.

La operación de este tipo de cargas puede provocar la inyección de corrientes armónicas hacia la red interna de baja tensión. Como consecuencia, se pueden presentar niveles elevados de distorsión armónica de corriente y tensión, lo que hace necesario evaluar el cumplimiento de los límites normativos aplicables y estudiar alternativas de mitigación.

Adicionalmente, el crecimiento proyectado de cargas no lineales en la subestación puede incrementar la exigencia armónica del sistema, por lo que resulta necesario analizar no solo la condición actual, sino también escenarios futuros de operación. Bajo este enfoque, se requiere determinar si la incorporación de filtros activos de potencia permite reducir los indicadores de distorsión armónica a niveles aceptables, considerando tanto su desempeño técnico como su factibilidad económica.

1.2. Motivación

La motivación principal del estudio se relaciona con la necesidad de evaluar una solución técnica frente a una problemática real de calidad de energía en una operación minera. En particular, el aumento de variadores de frecuencia en la SEU Nº 22 puede generar mayores niveles de distorsión armónica, afectando la operación confiable del sistema eléctrico y la continuidad operacional de los procesos asociados.

Los filtros activos de potencia representan una alternativa flexible para la mitigación de armónicos, debido a que se conectan en paralelo al sistema eléctrico e inyectan corrientes de compensación para reducir las componentes armónicas generadas por las cargas no lineales [5], [6]. Esta característica los hace especialmente atractivos en sistemas donde las condiciones de carga son variables y donde se requiere una solución adaptable a distintos escenarios de operación.

Por lo tanto, esta memoria busca entregar antecedentes técnicos y económicos que permitan evaluar la conveniencia de implementar una solución de

filtrado activo en la SEU Nº 22, considerando criterios de calidad de energía, cumplimiento normativo, capacidad requerida del equipo y condiciones prácticas de integración al sistema eléctrico existente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar técnica y económicamente la implementación de una solución de filtrado activo para la mitigación de armónicos en la Subestación Eléctrica Unitaria Nº 22 (SEU Nº 22) de Fase II en Minera Valle Central S.A., con el fin de mejorar la calidad de energía del sistema.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar los resultados del estudio de calidad de energía realizado en la subestación, identificando niveles de distorsión armónica y condiciones de operación relevantes.
- Caracterizar el perfil armónico del sistema eléctrico, identificando las principales fuentes de distorsión asociadas a cargas no lineales, particularmente variadores de frecuencia.
- Evaluar técnicamente una alternativa de filtrado activo mediante la modelación y simulación del sistema eléctrico en el software ETAP.
- Determinar preliminarmente la capacidad de compensación requerida por la solución de filtrado activo, y su distribución entre los puntos de conexión, en función del espectro armónico identificado y del nivel de compensación necesario para cumplir con la norma IEEE Std. 519.
- Evaluar el impacto de la solución en la reducción de los indicadores de calidad de energía, específicamente TDD y THD_v.
- Comparar técnica y comercialmente alternativas de filtrado activo mediante la cuantificación de la inversión inicial y una evaluación cualitativa de aspectos de operación, mantenimiento, implementación y beneficios esperados, declarando las limitaciones de información disponibles.

1.4. Alcance

El estudio considera el análisis de antecedentes técnicos existentes de la SEU Nº 22, incluyendo mediciones previas de calidad de energía, diagramas unilineales, características generales del sistema eléctrico y antecedentes operacionales asociados a la condición actual y proyectada de carga.

A partir de esta información, el análisis se desarrolla sobre el modelo eléctrico existente de Minera Valle Central en ETAP, con el objetivo de evaluar el comportamiento armónico de la SEU Nº 22 bajo distintos escenarios de operación. El análisis se centra principalmente en los indicadores THD_v y TDD, además de la revisión de armónicos individuales cuando corresponda.

El alcance considera la evaluación de alternativas de mitigación mediante filtros activos de potencia, incluyendo la determinación preliminar de capacidad requerida, la comparación de configuraciones de instalación y la evaluación técnica de una solución distribuida en los centros de control de motores CCM6 y CCM7.

Desde el punto de vista económico, la memoria contempla una evaluación preliminar de la solución propuesta, considerando antecedentes de inversión, operación, mantenimiento y criterios técnicos relevantes para una eventual implementación.

El presente trabajo no contempla ingeniería de detalle, adquisición de equipos ni ejecución de obras. Por lo tanto, los resultados deben entenderse como antecedentes técnicos y económicos para una futura etapa de ingeniería, validación en terreno e implementación por parte de la empresa y el proveedor seleccionado.

1.5. Metodología general

La metodología de trabajo se estructura en seis etapas principales. En primer lugar, se realiza el levantamiento y revisión de antecedentes técnicos de la subestación, considerando información eléctrica, mediciones de calidad de energía y condiciones operacionales relevantes.

En segundo lugar, se caracteriza el perfil armónico del sistema, identificando los principales indicadores de distorsión y los armónicos predominantes asociados a la operación de cargas no lineales. Posteriormente, se desarrolla un modelo de simulación en ETAP que permite representar el comportamiento eléctrico de la SEU Nº 22 y evaluar escenarios de operación sin mitigación.

En una cuarta etapa, se analizan alternativas de mitigación armónica mediante filtros activos de potencia, considerando distintas capacidades y configuraciones de instalación. Luego, se evalúa el desempeño de la solución propuesta mediante la comparación de los indicadores de calidad de energía antes y después de la incorporación de los filtros.

Finalmente, se realiza una evaluación técnico-económica preliminar, integrando criterios de desempeño armónico, factibilidad de implementación, costos asociados y beneficios esperados para la operación del sistema eléctrico.

1.6. Estructura de la memoria

La presente memoria se organiza en diez capítulos. El Capítulo 1 presenta la introducción, motivación, objetivos, alcance y metodología general del trabajo. El Capítulo 2 describe el contexto industrial del estudio, la subestación analizada y las cargas relevantes del sistema.

El Capítulo 3 desarrolla los fundamentos teóricos asociados a calidad de energía, armónicos, variadores de frecuencia, normativa aplicable y filtros activos de potencia. El Capítulo 4 presenta el diagnóstico armónico del sistema a partir de los antecedentes y mediciones disponibles.

El Capítulo 5 describe la modelación del sistema eléctrico en ETAP y los escenarios de simulación considerados. El Capítulo 6 analiza las alternativas de mitigación evaluadas y compara su desempeño técnico.

El Capítulo 7 presenta la evaluación por simulación de la configuración de filtrado activo de 270 A instalados en forma distribuida en CCM6 y CCM7. El Capítulo 8 desarrolla lineamientos generales para una eventual implementación de la solución. El Capítulo 9 presenta la evaluación técnico-económica preliminar y, finalmente, el Capítulo 10 resume las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

Capítulo 2

Contexto del sistema eléctrico

El presente capítulo describe el contexto industrial y eléctrico en el cual se desarrolla la memoria. En particular, se presenta una descripción general de Minera Valle Central S.A., de la Subestación Eléctrica Unitaria N° 22 y de los centros de control de motores asociados al estudio. Además, se identifican los principales antecedentes operacionales que justifican la necesidad de evaluar una alternativa de mitigación armónica mediante filtros activos de potencia.

2.1. Contexto industrial de Minera Valle Central

Minera Valle Central S.A. corresponde a una operación minera orientada al procesamiento de relaves provenientes de procesos mineros previos. Debido a la naturaleza continua de sus procesos, la disponibilidad del sistema eléctrico representa un aspecto relevante para la continuidad operacional de la planta.

Dentro de este contexto, los sistemas eléctricos de baja tensión alimentan distintos accionamientos, equipos auxiliares y cargas asociadas al proceso productivo. Parte importante de estas cargas corresponde a motores eléctricos controlados mediante variadores de frecuencia, los cuales permiten regular la velocidad de operación de bombas, correas u otros equipos del proceso.

Si bien los variadores de frecuencia presentan ventajas operacionales relevantes, tales como control de velocidad, eficiencia y flexibilidad de operación,

también constituyen cargas no lineales que pueden inyectar corrientes armónicas hacia el sistema eléctrico. Esta condición hace necesario evaluar su impacto sobre la calidad de energía de las barras de alimentación.

2.2. Descripción general de la SEU Nº 22

La Subestación Eléctrica Unitaria Nº 22, en adelante SEU Nº 22, forma parte del sistema eléctrico de Fase II de Minera Valle Central S.A. Esta subestación alimenta cargas de baja tensión asociadas al proceso industrial, principalmente motores eléctricos utilizados en equipos de bombeo y otros accionamientos relevantes para la operación.

Para efectos normativos, el punto de acoplamiento común (PCC) de este estudio corresponde a la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, ya que es el punto donde el sistema eléctrico de Minera Valle Central se conecta, a través del transformador de la subestación, con el suministro aguas arriba (ver unilineal, Anexo D). Los límites de la norma IEEE Std. 519 se aplican formalmente en este punto.

En cambio, CCM6 y CCM7 corresponden a puntos internos de distribución, ubicados aguas abajo del PCC dentro de la instalación del usuario. En esta memoria, los mismos límites de la norma IEEE Std. 519 se aplican también en CCM6 y CCM7 como criterio interno de diseño y verificación –una práctica conservadora habitual en ingeniería–, pero las declaraciones de cumplimiento en estos dos puntos no constituyen, por sí solas, una determinación de cumplimiento normativo del usuario frente al PCC. Dicha determinación requiere evaluar específicamente la barra de baja tensión de la SEU Nº 22.

De acuerdo con los antecedentes disponibles para el presente estudio, la SEU Nº 22 alimenta únicamente dos centros de control de motores: CCM6 y CCM7. Por esta razón, el análisis armónico de la subestación se concentra en estos dos puntos de distribución, ya que representan las cargas conectadas aguas abajo de la subestación dentro del alcance de esta memoria.

Desde el punto de vista de calidad de energía, la relevancia de la SEU Nº 22 se asocia a la alta presencia de motores controlados mediante variadores de frecuencia. Esta condición puede generar corrientes armónicas que se propagan hacia las barras de alimentación y afectan los indicadores de distorsión armónica del sistema eléctrico.

2.3. Centros de control de motores CCM6 y CCM7

Los centros de control de motores CCM6 y CCM7 corresponden a los puntos de distribución de baja tensión alimentados por la SEU Nº 22. Ambos centros concentran cargas motrices del proceso industrial, con una presencia importante de accionamientos controlados mediante variadores de frecuencia. La potencia de estos equipos se expresa en caballos de fuerza (HP, del inglés *Horsepower*; 1 HP $\approx$ 0,746 kW), unidad estándar en la nomenclatura de placa de los motores del proceso.

A partir del inventario de cargas disponible, sin considerar cargas proyectadas, el CCM6 posee una potencia nominal instalada de 1940 HP, de la cual aproximadamente 1740 HP corresponde a cargas asociadas a variadores de frecuencia. Por su parte, el CCM7 posee una potencia nominal instalada de 2300 HP, asociada en su totalidad a cargas con variadores de frecuencia.

Tabla 2.1: Resumen de potencia nominal instalada en CCM6 y CCM7

Centro	**Potencia nominal total [HP]**	**Potencia con VDF [HP]**
CCM6	1940	1740
CCM7	2300	2300
Total	4240	4040

Nota: El inventario corresponde a las cargas existentes consideradas en los antecedentes disponibles y no incluye cargas proyectadas. En CCM6 existen cargas con y sin variador de frecuencia, mientras que en CCM7 las cargas consideradas se encuentran asociadas a variadores de frecuencia.

La Tabla 2.1 muestra que la mayor parte de la potencia nominal instalada en la SEU Nº 22 se encuentra asociada a cargas con variadores de frecuencia. Esta condición justifica que el análisis del sistema se enfoque en la evaluación de armónicos y en la búsqueda de alternativas de mitigación adecuadas para la operación de CCM6 y CCM7.

2.4. Presencia de cargas no lineales

En el caso de la SEU Nº 22, las principales cargas no lineales corresponden a variadores de frecuencia de 6 pulsos, principalmente de marca Rockwell, utilizados para controlar motores eléctricos del proceso. Estos equipos emplean electrónica de potencia para regular la velocidad de operación, lo que

permite mejorar el control operacional de bombas y otros accionamientos industriales.

Sin embargo, desde el punto de vista eléctrico, los variadores de frecuencia se comportan como cargas no lineales, ya que demandan corrientes no sinusoidales desde la red. Estas corrientes contienen componentes armónicas, principalmente de bajo orden, que pueden circular hacia las barras de alimentación y producir distorsión armónica de tensión.

La magnitud del efecto armónico depende de diversos factores, tales como la cantidad de variadores en operación, el nivel de carga de los motores, la impedancia del sistema eléctrico, la potencia de cortocircuito disponible y la existencia de elementos de compensación o filtrado conectados al sistema.

2.5. Condición de equipos de compensación existentes

Como antecedente relevante, los centros CCM6 y CCM7 contaban con filtros pasivos asociados a la mitigación de armónicos. Sin embargo, dichos equipos se encuentran actualmente fuera de servicio debido a fallas ocurridas en terreno. La causa específica de estas fallas no forma parte de los antecedentes disponibles para el presente estudio, por lo que no se realiza un diagnóstico de falla de los filtros pasivos existentes.

Adicionalmente, la instalación cuenta con un banco de condensadores que también se encuentra fuera de servicio. Tanto los filtros pasivos como el banco de condensadores permanecen fuera de servicio desde el año 2021, condición que abarca por lo tanto el periodo de la campaña de medición de 2024 y todos los escenarios evaluados en esta memoria. Esta condición resulta relevante para el análisis del sistema, ya que implica que los elementos de compensación previamente instalados no se encuentran disponibles para contribuir al control de calidad de energía, y que no existen elementos capacitivos en servicio susceptibles de generar condiciones de resonancia con la red.

Por lo anterior, el presente estudio se enfoca en la evaluación de una alternativa de mitigación mediante filtros activos de potencia, considerando la condición actual del sistema y la alta presencia de cargas no lineales en los centros de control de motores alimentados por la SEU N° 22.

2.6. Antecedentes de calidad de energía

Previo al desarrollo de esta memoria, se contaba con antecedentes de calidad de energía asociados a la SEU Nº 22, los cuales permitieron identificar niveles relevantes de distorsión armónica en el sistema. Estos antecedentes constituyen la base inicial para justificar la necesidad de evaluar alternativas de mitigación.

El análisis de dichos antecedentes permite identificar los puntos de mayor exigencia armónica, los indicadores de calidad de energía más relevantes y las condiciones de operación que deben ser consideradas en la modelación del sistema eléctrico. En particular, el estudio se enfoca en la evaluación de la distorsión armónica total de tensión, THD_v, y la distorsión total de demanda, TDD, como indicadores principales de desempeño.

Los resultados cuantitativos de las mediciones y simulaciones se desarrollan en capítulos posteriores, con el fin de evitar duplicidad de información y mantener este capítulo centrado en la descripción del sistema eléctrico bajo estudio.

2.7. Crecimiento proyectado de cargas

Además de la condición actual del sistema, el estudio considera un escenario de crecimiento proyectado de cargas en la SEU Nº 22. Esta condición resulta relevante debido a que la incorporación de nuevos motores controlados por variadores de frecuencia puede aumentar la presencia de cargas no lineales y, con ello, la exigencia armónica del sistema eléctrico.

El inventario presentado en este capítulo corresponde únicamente a las cargas existentes consideradas en los antecedentes disponibles. Las cargas proyectadas y los escenarios futuros de operación se incorporan posteriormente en la etapa de modelación y simulación del sistema eléctrico.

Por lo anterior, la evaluación de alternativas de mitigación no debe limitarse únicamente a la condición actual, sino que debe considerar escenarios futuros de operación. Esto permite analizar una solución que sea técnicamente adecuada frente a la evolución esperada de la demanda y del perfil armónico de la subestación.

2.8. Relevancia del estudio

La relevancia del presente estudio radica en entregar una evaluación técnica y económica de una solución de mitigación armónica aplicable a un sistema eléctrico industrial real. En particular, la implementación de filtros activos de potencia se presenta como una alternativa flexible para mejorar los indicadores de calidad de energía y reducir el impacto de las cargas no lineales sobre la red interna.

La evaluación de esta solución permite apoyar la toma de decisiones respecto a la capacidad requerida del filtro, su ubicación dentro del sistema eléctrico y su contribución al cumplimiento de los criterios normativos aplicables. De esta manera, el estudio entrega antecedentes útiles para una futura etapa de ingeniería de detalle, validación en terreno e implementación.

Capítulo 3

Marco teórico

El presente capítulo desarrolla los fundamentos teóricos necesarios para comprender el fenómeno de distorsión armónica en sistemas eléctricos industriales y la aplicación de filtros activos de potencia como alternativa de mitigación. En particular, se abordan los conceptos de calidad de energía, cargas no lineales, variadores de frecuencia, indicadores de distorsión armónica, criterios normativos y principio de operación de los filtros activos.

3.1. Calidad de energía en sistemas eléctricos industriales

La calidad de energía corresponde al conjunto de condiciones eléctricas que permiten que los equipos conectados a un sistema operen de manera adecuada, segura y confiable. En sistemas eléctricos industriales, este concepto resulta especialmente relevante debido a la presencia de cargas de alta potencia, equipos sensibles, accionamientos electrónicos y procesos continuos que dependen de la disponibilidad del suministro eléctrico.

Entre los principales fenómenos asociados a la calidad de energía se encuentran las variaciones de tensión, interrupciones, desbalances, transitorios, fluctuaciones de frecuencia y distorsión armónica. Esta última adquiere particular importancia en instalaciones con alta presencia de cargas no lineales, debido a que estas pueden demandar corrientes no sinusoidales desde la red [3], [7].

En una condición ideal, las tensiones y corrientes de un sistema eléctrico de corriente alterna deberían presentar forma de onda sinusoidal a la

frecuencia fundamental. Sin embargo, la conexión de cargas no lineales modifica esta condición, generando componentes cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental, conocidas como armónicos.

3.2. Armónicos en sistemas eléctricos

Los armónicos son componentes sinusoidales cuya frecuencia corresponde a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico. En un sistema de 50 Hz, el quinto armónico corresponde a una frecuencia de 250 Hz, el séptimo a 350 Hz, el undécimo a 550 Hz, y así sucesivamente.

Una señal periódica distorsionada puede representarse como la suma de una componente fundamental y un conjunto de componentes armónicas. Esta descomposición permite analizar el contenido armónico de tensiones y corrientes en un sistema eléctrico mediante herramientas de análisis frecuencial [2].

En términos generales, una señal de corriente distorsionada puede expresarse como:

$$i(t) = \sqrt{2}\, I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}\, I_h \sin(h\omega t + \phi_h) \tag{3.1}$$

donde I_1 corresponde al valor eficaz de la componente fundamental de corriente, I_h al valor eficaz de la componente armónica de orden h, ω a la frecuencia angular fundamental y ϕ_h al ángulo de fase de cada componente armónica. El factor $\sqrt{2}$ convierte cada valor eficaz en la amplitud de cresta de la respectiva componente sinusoidal, de modo que I_1 e I_h se emplean de forma consistente como valores eficaces en las definiciones de $\mathrm{THD_i}$ y TDD presentadas más adelante en este capítulo.

La presencia de corrientes armónicas en un sistema eléctrico puede producir diversos efectos, tales como aumento de pérdidas, calentamiento adicional en transformadores y conductores, operación incorrecta de protecciones, resonancias, interferencias y deterioro de la forma de onda de tensión. Esta última ocurre debido a que las corrientes armónicas circulan por la impedancia del sistema eléctrico, generando caídas de tensión armónicas que distorsionan la tensión en las barras de alimentación [3].

3.3. Cargas no lineales

Una carga lineal es aquella cuya corriente es proporcional a la tensión aplicada, manteniendo una forma de onda sinusoidal cuando es alimentada por una tensión sinusoidal. En cambio, una carga no lineal demanda una corriente que no sigue proporcionalmente la forma de onda de tensión, generando componentes armónicas en la red.

En sistemas industriales modernos, las principales fuentes de corrientes armónicas suelen estar asociadas a equipos basados en electrónica de potencia, tales como rectificadores, inversores, fuentes conmutadas, variadores de frecuencia, sistemas UPS y cargadores de baterías [1], [8].

En el caso del presente estudio, las cargas no lineales de mayor interés corresponden a variadores de frecuencia utilizados para el control de motores eléctricos. Estos equipos permiten regular la velocidad y el torque de los motores, pero su etapa de rectificación puede generar corrientes armónicas en el lado de alimentación.

3.4. Variadores de frecuencia de 6 pulsos

Los variadores de frecuencia permiten controlar la velocidad de un motor de corriente alterna mediante la conversión de la tensión de entrada en una tensión de salida de frecuencia y amplitud variable. De manera general, un variador está compuesto por una etapa rectificadora, un enlace de corriente continua y una etapa inversora.

En muchos sistemas industriales, los variadores de frecuencia convencionales utilizan una etapa rectificadora trifásica de 6 pulsos. Esta topología es ampliamente utilizada debido a su simplicidad, robustez y bajo costo relativo. Sin embargo, desde el punto de vista de calidad de energía, este tipo de rectificador constituye una fuente característica de corrientes armónicas.

Para un rectificador trifásico de 6 pulsos, los armónicos característicos presentes en la corriente de entrada se pueden aproximar mediante:

$$h = 6k \pm 1 \tag{3.2}$$

donde h corresponde al orden armónico y k es un número entero positivo. A partir de esta expresión, los principales armónicos son del orden 5, 7, 11, 13, 17 y 19 entre otros.

Tabla 3.1: Armónicos característicos de un rectificador trifásico de 6 pulsos

k	$6k-1$	$6k+1$
1	5	7
2	11	13
3	17	19
4	23	25
5	29	31

La Tabla 3.1 muestra los armónicos característicos esperados para este tipo de carga. Esta característica resulta relevante para el presente estudio, debido a que los centros CCM6 y CCM7 presentan una alta presencia de variadores de frecuencia de 6 pulsos, principalmente de marca Rockwell.

3.5. Distorsión armónica total de tensión

La distorsión armónica total de tensión, $\mathrm{THD_v}$, es un indicador que permite cuantificar el nivel de distorsión presente en la forma de onda de tensión. Se define como la relación entre el valor eficaz de las componentes armónicas de tensión y el valor eficaz de la componente fundamental.

Matemáticamente, la $\mathrm{THD_v}$ se expresa como:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \tag{3.3}$$

donde V_h corresponde al valor eficaz de la componente armónica de tensión de orden h, V_1 corresponde al valor eficaz de la componente fundamental de tensión y H representa el orden armónico máximo considerado.

Este indicador es relevante porque permite evaluar la calidad de la tensión disponible para las cargas conectadas al sistema eléctrico. En general, niveles elevados de $\mathrm{THD_v}$ pueden afectar el funcionamiento de equipos sensibles, aumentar pérdidas y reducir la vida útil de algunos componentes eléctricos.

3.6. Distorsión armónica total de corriente

La distorsión armónica total de corriente, $\mathrm{THD_i}$, permite cuantificar el contenido armónico de la corriente respecto de su componente fundamental.

Su expresión es análoga a la utilizada para la tensión:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \tag{3.4}$$

donde I_h corresponde al valor eficaz de la componente armónica de corriente de orden h e I_1 corresponde al valor eficaz de la componente fundamental de corriente.

Aunque la $\mathrm{THD_i}$ resulta útil para caracterizar la forma de onda de corriente, su valor puede variar significativamente con el nivel de carga. Por esta razón, para la evaluación normativa de corrientes armónicas en sistemas de potencia se utiliza frecuentemente el indicador TDD.

3.7. Distorsión total de demanda

La distorsión total de demanda, TDD, corresponde a la relación entre el valor eficaz de las corrientes armónicas y la corriente máxima de demanda de carga. A diferencia de la $\mathrm{THD_i}$, que utiliza la corriente fundamental instantánea o medida como referencia, la TDD utiliza una corriente de demanda representativa del sistema.

La TDD se expresa como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H} I_h^2}}{I_L} \cdot 100 \tag{3.5}$$

donde I_L corresponde a la corriente máxima de demanda de carga en el punto de evaluación. Este indicador permite comparar el nivel de distorsión de corriente con una base de carga representativa, evitando interpretaciones erróneas cuando el sistema opera con baja carga.

En este trabajo se adopta $H = 50$ como orden armónico máximo considerado en las Ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5, en concordancia con el rango de órdenes cubierto por los límites individuales de distorsión de corriente de la norma IEEE Std. 519 (Tabla 5.4), que se extiende hasta el orden 50.

La sumatoria de las Ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 considera formalmente tanto armónicos pares como impares. Sin embargo, dado que las cargas no lineales predominantes en este estudio corresponden a variadores de frecuencia con rectificador trifásico de 6 pulsos, cuyo espectro característico es exclusiva-

mente impar (Ecuación 3.2, Tabla 3.1), los armónicos pares obtenidos en la modelación resultan comparativamente despreciables frente a los órdenes impares reportados. Este criterio es coherente con el tratamiento diferenciado que la propia norma IEEE Std. 519 da a los armónicos pares según su orden, permitiendo hasta el 50 % del límite impar para $h \leq 6$ y hasta el 100 % para $h > 6$ (Tabla 5.4). Por esta razón, los armónicos pares se incluyen en el cálculo de THD_v, THD_i y TDD, pero no se presentan de forma individual en las tablas de verificación por orden armónico del Capítulo 7.

De manera análoga, los órdenes comprendidos entre 35 y 50 fueron incluidos en el cálculo global de THD_v, THD_i y TDD mediante la sumatoria de las ecuaciones anteriores, pero no se presentan de forma individual en las tablas de verificación por orden armónico. Esta decisión de presentación se debe a que dichos órdenes se ubican fuera de los armónicos característicos priorizados del rectificador de 6 pulsos modelado (Tabla 3.1); su magnitud individual no fue verificada de forma independiente en este estudio, por lo que su omisión de las tablas se declara como una limitación de alcance y no como una comprobación explícita de cumplimiento para dicho rango.

En el contexto de este estudio, la TDD es uno de los indicadores principales para evaluar el cumplimiento de los límites de distorsión de corriente establecidos por la norma IEEE Std. 519.

3.8. Norma IEEE 519

La norma IEEE Std. 519 establece recomendaciones y límites para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia. Su objetivo es definir criterios que permitan limitar la distorsión armónica de tensión y corriente, reduciendo los efectos negativos sobre la red y los equipos conectados [4].

Desde el punto de vista de tensión, la norma establece límites de distorsión armónica total e individual en función del nivel de tensión del sistema. Para sistemas de baja tensión, estos límites permiten evaluar si la forma de onda de tensión se mantiene dentro de rangos aceptables para la operación de las cargas conectadas.

Desde el punto de vista de corriente, la norma establece límites de distorsión en función de la relación entre la corriente de cortocircuito disponible en el punto de evaluación y la corriente máxima de demanda de carga. Esta relación se expresa como:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} \tag{3.6}$$

donde I_{SC} corresponde a la corriente de cortocircuito en el punto de evaluación e I_L corresponde a la corriente máxima de demanda.

La relación I_{SC}/I_L permite considerar la rigidez eléctrica del sistema. Un sistema con mayor corriente de cortocircuito relativa presenta menor sensibilidad frente a la inyección de corrientes armónicas, mientras que un sistema más débil puede experimentar mayores niveles de distorsión de tensión ante una misma corriente armónica.

3.9. Mitigación de armónicos

Existen distintas alternativas para reducir la distorsión armónica en sistemas eléctricos industriales. Entre las soluciones más utilizadas se encuentran el sobredimensionamiento de equipos, el uso de transformadores especiales, reactancias de línea, filtros pasivos, filtros activos y soluciones híbridas [9], [10].

Los filtros pasivos se basan en la conexión de elementos inductivos y capacitivos sintonizados para ofrecer una baja impedancia a determinados armónicos. Si bien pueden ser una solución efectiva para armónicos específicos, su desempeño depende de las condiciones del sistema eléctrico y puede verse afectado por resonancias, cambios de carga o variaciones en la impedancia de la red.

Los filtros activos de potencia, en cambio, utilizan electrónica de potencia para inyectar corrientes de compensación en tiempo real. Esta característica permite una respuesta más flexible frente a perfiles de carga variables, lo que resulta atractivo en instalaciones con alta presencia de variadores de frecuencia y condiciones operacionales cambiantes [5], [6], [11].

3.9.1. Comparación entre filtros pasivos y activos

La selección de una tecnología de mitigación armónica debe considerar no solo su capacidad nominal, sino también el comportamiento de las cargas, la variación del espectro armónico, las condiciones de la red y los requerimientos de operación. La Tabla 3.2 presenta una comparación general entre filtros pasivos y activos, considerando su aplicación en la SEU N° 22.

Tabla 3.2: Comparación general entre filtros pasivos y filtros activos

Criterio	**Filtro pasivo**	**Filtro activo**	**Aplicación en la SEU N° 22**
Principio de operación	Utiliza ramas compuestas principalmente por inductancias y condensadores sintonizados para determinados órdenes armónicos.	Mide la corriente del sistema e inyecta dinámicamente corrientes de compensación.	La presencia de numerosos VDF y diferentes condiciones de carga favorece una solución adaptable.
Respuesta frente a cambios de carga	Su desempeño depende de la frecuencia de sintonización, de la impedancia de la red y de la condición de carga considerada en el diseño.	Puede modificar la corriente de compensación de acuerdo con el contenido armónico medido durante la operación.	Los CCM6 y CCM7 presentan condiciones operacionales variables y crecimiento proyectado de cargas no lineales.
Órdenes armónicos compensados	Una rama sintonizada actúa principalmente sobre un orden o rango limitado de frecuencias, pudiendo requerirse varias ramas.	Puede compensar simultáneamente diferentes órdenes armónicos dentro de la capacidad del equipo.	El sistema presenta componentes de orden 5, 7, 11, 13 y otros órdenes de menor magnitud.
Interacción con la red	Puede presentar variaciones de desempeño o condiciones de resonancia ante cambios en la impedancia equivalente del sistema.	Presenta menor dependencia de una frecuencia fija de sintonización, aunque requiere verificar su estabilidad, parametrización y emisiones asociadas a la conmutación.	Los filtros pasivos existentes se encuentran fuera de servicio y no se dispone de antecedentes suficientes para diagnosticar su falla.
Flexibilidad de control	La compensación queda definida principalmente por los parámetros físicos de sus componentes.	Permite modos automáticos y compensación selectiva de determinados armónicos.	La evaluación de CCM7 requirió priorizar manualmente los armónicos relevantes para lograr el cumplimiento de TDD.
Costo y complejidad	Generalmente presenta menor costo inicial y una estructura de control más simple, pero requiere un diseño cuidadoso frente a resonancias y variaciones de red.	Presenta mayor costo inicial, pérdidas de conmutación y mayor complejidad de control, pero ofrece mayor adaptabilidad operacional.	La evaluación técnico-económica debe considerar el costo junto con el desempeño, la ubicación, la puesta en marcha y el soporte del proveedor.

Para el caso estudiado, la selección de filtros activos no implica que los filtros pasivos sean inadecuados en términos generales. La decisión responde específicamente a la alta penetración de variadores de frecuencia, a la variabilidad esperada del perfil de carga, a la necesidad de compensar diferentes órdenes armónicos y a la conveniencia de implementar una estrategia distribuida en CCM6 y CCM7.

Asimismo, la condición fuera de servicio de los filtros pasivos existentes se utiliza únicamente como antecedente operacional. Debido a que no se dispone de información suficiente sobre las causas de sus fallas, este estudio no atribuye dichas fallas a una característica propia de la tecnología pasiva.

3.10. Filtros activos de potencia

Un filtro activo de potencia corresponde a un equipo electrónico conectado al sistema eléctrico con el objetivo de compensar componentes no deseadas de corriente o tensión. En aplicaciones de mitigación armónica, el filtro activo se conecta típicamente en paralelo con la carga o con la barra que se desea compensar [12].

El principio general de operación consiste en medir la corriente de carga, identificar las componentes armónicas presentes y generar una corriente de compensación de igual magnitud y fase opuesta. De esta manera, la corriente armónica demandada por la carga es suministrada localmente por el filtro activo, reduciendo la corriente armónica que circula hacia la red.

De forma simplificada, la corriente vista por la red puede expresarse como:

$$i_s(t) = i_L(t) + i_c(t) \tag{3.7}$$

donde $i_s(t)$ corresponde a la corriente de la red, $i_L(t)$ corresponde a la corriente de carga e $i_c(t)$ corresponde a la corriente de compensación inyectada por el filtro activo.

Si la corriente de carga se compone de una componente fundamental y una componente armónica, la estrategia de compensación busca que el filtro inyecte una corriente armónica opuesta:

$$i_c(t) \approx -i_{L,h}(t) \tag{3.8}$$

Con ello, la corriente entregada por la red se aproxima a una forma de

onda sinusoidal asociada principalmente a la componente fundamental de la carga.

3.11. Corriente nominal del filtro activo

Un aspecto relevante en la selección de un filtro activo es que su corriente nominal no corresponde a la corriente total de carga de la barra, sino a la corriente de compensación que el equipo es capaz de inyectar. Esta corriente depende del contenido armónico que se desea compensar y de la estrategia de control utilizada.

La corriente total requerida por el filtro se obtiene a partir de la suma cuadrática de las componentes armónicas compensadas, y no mediante una suma aritmética directa. De forma general, puede expresarse como:

$$I_{APF} = \sqrt{I_{c,5}^2 + I_{c,7}^2 + I_{c,11}^2 + I_{c,13}^2 + \cdots} \tag{3.9}$$

donde $I_{c,h}$ corresponde a la corriente de compensación asociada al armónico de orden h.

Esta consideración es importante para el presente estudio, ya que la capacidad requerida del filtro activo debe evaluarse en función del perfil armónico del sistema y no únicamente a partir de la corriente total de carga de los centros de control de motores.

3.12. Estrategias de compensación

Los filtros activos pueden operar mediante distintas estrategias de compensación, dependiendo del fabricante, el algoritmo de control y la configuración seleccionada. En términos generales, pueden utilizarse esquemas automáticos, en los cuales el equipo identifica y compensa las componentes armónicas según su lógica interna, o esquemas selectivos, donde se prioriza la compensación de determinados órdenes armónicos.

La compensación automática resulta útil cuando el objetivo es reducir globalmente la distorsión armónica del sistema. Sin embargo, en algunos casos puede ser necesario priorizar ciertos armónicos específicos para cumplir límites normativos individuales o para utilizar de mejor forma la capacidad disponible del filtro.

En el contexto de una aplicación industrial, la selección de la estrategia

de compensación debe considerar el espectro armónico presente, la capacidad nominal del equipo, los límites normativos aplicables y la respuesta real del sistema eléctrico. Por esta razón, la configuración final de un filtro activo debe ser validada tanto mediante simulaciones como mediante mediciones posteriores a su instalación [13].

3.13. Consideraciones generales para la aplicación de filtros activos

La aplicación de filtros activos en sistemas eléctricos industriales requiere considerar diversos aspectos técnicos. Entre ellos se encuentran el punto de conexión del equipo, la ubicación y relación de transformación de los transformadores de corriente, la coordinación con protecciones existentes, la capacidad de compensación requerida, la tensión nominal, las condiciones ambientales y la compatibilidad con otros elementos de compensación conectados al sistema.

Además, la efectividad del filtro activo depende de que el equipo mida correctamente la corriente de carga o la corriente de red, según la estrategia de control empleada. Errores en la polaridad, relación o ubicación de los transformadores de corriente pueden afectar el desempeño de la compensación.

Finalmente, debe considerarse que la reducción de la distorsión de corriente no garantiza por sí sola una reducción proporcional de la distorsión de tensión, ya que esta última también depende de la impedancia del sistema. Sin embargo, en términos generales, al reducir la circulación de corrientes armónicas por la red, se disminuyen las caídas de tensión armónicas y, por lo tanto, se mejora la forma de onda de tensión en las barras de alimentación.

Capítulo 4

Diagnóstico armónico de la condición medida

El presente capítulo desarrolla el diagnóstico armónico de la SEU Nº 22 a partir de los antecedentes de medición de calidad de energía disponibles. En particular, se analizan los resultados entregados por el informe de calidad de energía realizado por Tecnored S.A., considerando los puntos de medición asociados a la subestación y a los centros de control de motores CCM6 y CCM7.

El objetivo de este capítulo es establecer una línea base de la condición armónica medida, identificando los principales indicadores de distorsión y los puntos del sistema que presentan mayores niveles de exigencia. Estos antecedentes permiten justificar la necesidad de evaluar alternativas de mitigación armónica en los capítulos posteriores.

4.1. Antecedentes de medición

El informe de calidad de energía considerado en este estudio corresponde a mediciones realizadas por Tecnored S.A. en las instalaciones de Minera Valle Central S.A. [14]. El periodo de medición comprendió desde el 30 de agosto de 2024 hasta el 6 de septiembre de 2024, considerando una semana continua de registro.

El registro se inició el 30 de agosto de 2024 a las 12:42 y finalizó el 6 de septiembre de 2024 a las 12:42, totalizando exactamente 7 días sin interrupciones [14, pág. 8]. El registro se realizó mediante intervalos de agregación

de 15 min, sobre los cuales se calculó el percentil 95 (P95) de THD_v y TDD de forma independiente para cada línea o fase (L1, L2 y L3); el factor de potencia, en cambio, se reporta como un promedio mensual y no mediante P95 por intervalo [14, pág. 7]. Dado que los indicadores de THD_v y TDD presentados en este capítulo provienen del mismo registro continuo de 7 días y de la misma base de intervalos de 15 minutos, los percentiles por fase de ambos indicadores fueron calculados sobre ventanas temporales equivalentes. La completitud del registro puede verificarse de forma indirecta a partir del conteo de intervalos válidos reportado para la variable frecuencia: el informe registra 672 intervalos de 15 minutos clasificados en estado normal, cifra que coincide exactamente con el número teórico de intervalos contenidos en 7 días ($7 \times 24 \times 4 = 672$), sin registros en las categorías de error o fuera de rango [14, pág. 19]. Esto respalda que el periodo de medición no presentó vacíos de datos relevantes, aun cuando el informe no reporta explícitamente un indicador de disponibilidad como tal.

Las mediciones fueron efectuadas en tres puntos del sistema eléctrico de la SEU Nº 22: la barra general de la subestación, identificada como SEU Nº 22, y los puntos asociados a los centros de control de motores PM-5000-6 y PM-5000-7. Estos últimos se relacionan con CCM6 y CCM7, respectivamente.

Tabla 4.1: Puntos de medición considerados en el diagnóstico de calidad de energía

Punto de medición	**Descripción**	**Relación de TTCC**
SEU Nº 22	Barra general de baja tensión	4000/5
PM-5000-6	Punto asociado a CCM6	2000/5
PM-5000-7	Punto asociado a CCM7	2000/5

La Tabla 4.1 resume los puntos considerados en el diagnóstico y las relaciones de transformación de corriente utilizadas para el registro. Estas relaciones corresponden a los datos de escalamiento empleados durante la medición y no necesariamente representan la corriente de demanda utilizada posteriormente para análisis normativos de TDD.

Para el presente capítulo se consideran directamente los resultados de THD_v y TDD reportados por Tecnored como antecedente de diagnóstico. El análisis detallado de escenarios de operación, corrientes de demanda y relación I_{SC}/I_L se desarrolla posteriormente en la etapa de modelación y contraste de coherencia.

4.2. Criterios de evaluación

El informe de calidad de energía utiliza como referencia la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución. En el caso de la distorsión armónica total de tensión, el informe considera un límite de 8 % para el sistema evaluado.

Para la distorsión total de demanda, TDD, el informe presenta los resultados porcentuales obtenidos a partir de las mediciones de distorsiones armónicas individuales de corriente, considerando un límite de 15 % para efectos del diagnóstico reportado.

Tabla 4.2: Indicadores principales considerados en el diagnóstico

Indicador	**Descripción**	**Límite utilizado**
THD_v	Distorsión armónica total de tensión	8 %
TDD	Distorsión total de demanda de corriente	15 %

La Tabla 4.2 muestra los criterios utilizados para interpretar los resultados medidos. Estos valores permiten clasificar preliminarmente el estado de cumplimiento de cada punto de medición respecto de los indicadores principales de calidad de energía. Cabe recordar que, de los tres puntos evaluados, únicamente la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 corresponde al punto de acoplamiento común (PCC) definido en el Capítulo 2; las declaraciones de cumplimiento en CCM6 y CCM7 se refieren al criterio interno de diseño adoptado en esta memoria, no a una determinación normativa directa sobre el usuario.

Cabe señalar que el límite de 15 % utilizado por Tecnored para TDD corresponde a un valor genérico de referencia, definido una única vez para todo el sistema evaluado [14, pág. 7] y aplicado de manera uniforme a los tres puntos de medición sin diferenciar según la relación I_{SC}/I_L propia de cada barra. En cambio, en la evaluación técnica desarrollada en este trabajo se aplica la norma IEEE Std. 519 de forma diferenciada por punto de evaluación, calculando la relación I_{SC}/I_L específica de la SEU Nº 22, CCM6 y CCM7, lo que da origen a bandas normativas de 5 % y 8 % según corresponda (ver Tabla 5.5, Capítulo 5). Por lo tanto, el límite de 15 % se utiliza en este capítulo únicamente como criterio de diagnóstico preliminar informado por el proveedor de medición, y no debe confundirse con el criterio normativo aplicado en la evaluación técnica de los capítulos siguientes. Ambos criterios coinciden, sin embargo, en identificar una condición de incumplimiento en

los tres puntos evaluados.

4.3. Resultados de distorsión armónica total de tensión

La distorsión armónica total de tensión, THD_v, permite evaluar el nivel de deformación presente en la forma de onda de tensión respecto de su componente fundamental. En el informe analizado, los valores de THD_v fueron evaluados mediante el percentil 95 del periodo de medición.

Tabla 4.3: Resultados de THD_v reportados por Tecnored

Punto	**L1 [%]**	**L2 [%]**	**L3 [%]**	**Cumplimiento**
SEU Nº 22	7,323	7,351	7,127	Cumple
PM-5000-6	8,077	8,162	8,128	No cumple
PM-5000-7	8,077	8,162	8,128	No cumple

*Nota: Los valores corresponden al percentil 95 reportado en las tablas de cumplimiento de distorsión armónica total de tensión del informe de calidad de energía. Los valores de PM-5000-6 y PM-5000-7 son idénticos en las tres líneas, reproduciendo exactamente lo indicado en las Tablas 18 y 19 del informe de origen [14, pág. 11]. Se identificó además una segunda inconsistencia en el mismo informe: la tabla de detalle por línea de PM-5000-7 reproduce en cambio los valores de la SEU Nº 22, entregando un percentil 95 distinto (*7,323 %*;* 7,351 %*;* 7,127 %*) al de su propia tabla de cumplimiento (*8,077 %*;* 8,162 %*;* 8,128 %*) [14, pág. 11–12]. Debido a esta doble inconsistencia interna, el valor independiente de THD_v para PM-5000-7 no puede establecerse con certeza a partir del informe fuente. Para este diagnóstico se conserva el valor de la tabla de cumplimiento, por ser el nivel de resumen reportado de manera consistente para los tres puntos evaluados, dejando expresamente declarada esta limitación de los datos de origen.*

De acuerdo con la Tabla 4.3, la barra general de la SEU Nº 22 cumple con el límite de 8 % utilizado en el informe. Sin embargo, sus valores se encuentran cercanos al límite, con un máximo reportado de 7,351 % en la línea L2.

En cambio, los puntos PM-5000-6 y PM-5000-7 presentan valores de THD_v superiores al límite de referencia, alcanzando valores del orden de 8,1 %. Esto indica que la distorsión armónica de tensión en los centros de control de motores asociados a CCM6 y CCM7 se encuentra en una condición de incumplimiento respecto del criterio utilizado en el informe.

4.4. Resultados de distorsión total de demanda

La distorsión total de demanda, TDD, permite evaluar el contenido armónico de corriente respecto de una corriente de demanda representativa. En este diagnóstico se consideran directamente los valores de TDD reportados por Tecnored, sin recalcular el indicador a partir de corrientes base, debido a que el objetivo de esta sección es presentar la condición medida informada en el estudio de calidad de energía.

Tabla 4.4: Resultados de TDD reportados por Tecnored

Punto	**L1 [%]**	**L2 [%]**	**L3 [%]**	**Cumplimiento**
SEU Nº 22	28,515	29,010	28,905	No cumple
PM-5000-6	24,516	25,560	24,526	No cumple
PM-5000-7	29,065	29,277	30,122	No cumple

Nota: Los valores corresponden al percentil 95 reportado por Tecnored para la distorsión total de demanda de corriente.

Los resultados de la Tabla 4.4 muestran que los tres puntos de medición presentan niveles de TDD superiores al límite de 15 % utilizado en el informe. Esta condición evidencia una presencia significativa de corrientes armónicas en el sistema eléctrico de la SEU Nº 22.

El mayor valor de TDD reportado corresponde al punto PM-5000-7, con 30,122 % en la línea L3. Por su parte, la barra general de la SEU Nº 22 presenta valores cercanos al 29 %, mientras que PM-5000-6 presenta valores entre aproximadamente 24,5 % y 25,6 %. Estos resultados permiten concluir que la problemática armónica no se limita a un único centro de control de motores, sino que se manifiesta en ambos centros y también en la barra general de la subestación.

4.5. Armónicos predominantes

Además de los indicadores globales de distorsión, el informe de calidad de energía presenta resultados de armónicos individuales de tensión y corriente. A partir de estos antecedentes, se identifica que el quinto armónico presenta una participación relevante dentro del perfil armónico del sistema.

En el caso de la tensión, el informe concluye que los armónicos individuales se encuentran dentro de los límites establecidos para la SEU Nº 22. Sin

embargo, para los puntos PM-5000-6 y PM-5000-7, el quinto armónico de tensión se encuentra por sobre el límite individual considerado en el informe.

En el caso de la corriente, el informe identifica niveles relevantes de distorsión armónica individual, destacando nuevamente la presencia del quinto armónico. Esta condición es coherente con la alta presencia de variadores de frecuencia de 6 pulsos en los centros de control de motores, ya que este tipo de carga tiende a generar armónicos característicos de bajo orden, tales como el 5º, 7º, 11º y 13º.

Por lo tanto, el diagnóstico permite asociar la problemática armónica del sistema con la presencia de cargas no lineales concentradas en CCM6 y CCM7, particularmente aquellas alimentadas mediante variadores de frecuencia.

4.6. Otros indicadores de calidad de energía

Si bien el foco principal del presente estudio corresponde a la distorsión armónica, el informe de calidad de energía también evaluó otros indicadores eléctricos. Entre ellos se encuentran la regulación de tensión, el desequilibrio de tensión, la frecuencia, los huecos y sobretensiones de corta duración, el flicker y el factor de potencia.

De acuerdo con las conclusiones del informe, la regulación de tensión se encuentra dentro de los valores permitidos, el desequilibrio de tensión cumple con el límite establecido, no se registraron eventos relevantes de huecos o sobretensiones de corta duración y la frecuencia se mantuvo dentro de valores normales. Asimismo, los indicadores de flicker se encuentran dentro de los límites considerados.

Respecto del factor de potencia, el informe indica que este se encuentra en condición correcta durante el periodo de medición. No obstante, se menciona la conveniencia de considerar compensación reactiva para mantener un comportamiento adecuado del sistema. Para efectos de la presente memoria, estos antecedentes se consideran complementarios, ya que el problema técnico principal corresponde a la distorsión armónica de tensión y corriente.

4.7. Diagnóstico general

A partir de los resultados entregados por Tecnored, se concluye que la SEU Nº 22 presenta una condición armónica relevante, especialmente en los

centros de control de motores CCM6 y CCM7. Si bien la barra general de la SEU Nº 22 cumple con el límite de THD_v utilizado en el informe, sus valores se encuentran cercanos al máximo permitido. En cambio, los puntos PM-5000-6 y PM-5000-7 presentan incumplimiento en THD_v.

Desde el punto de vista de corriente, los tres puntos evaluados presentan incumplimiento de TDD, con valores significativamente superiores al límite utilizado en el diagnóstico. Esta condición confirma la presencia de corrientes armónicas relevantes en el sistema y justifica la necesidad de analizar alternativas de mitigación.

El diagnóstico también permite identificar que el quinto armónico tiene una participación importante dentro del perfil armónico del sistema, lo que resulta coherente con la presencia de variadores de frecuencia de 6 pulsos conectados aguas abajo de la subestación.

En consecuencia, los antecedentes de medición permiten establecer que la condición armónica de la SEU Nº 22 requiere ser evaluada mediante herramientas de modelación y simulación, con el objetivo de analizar escenarios actuales y proyectados, estimar el impacto del crecimiento de cargas no lineales y determinar la efectividad de alternativas de mitigación mediante filtros activos de potencia.

Capítulo 5

Modelación del sistema eléctrico en ETAP

El presente capítulo describe la modelación del sistema eléctrico de la SEU N° 22 en el software ETAP [15], utilizada para evaluar el comportamiento armónico del sistema bajo distintos escenarios de operación. La modelación permite analizar la condición eléctrica de la subestación, incorporar actualizaciones de carga, considerar crecimiento proyectado y evaluar posteriormente alternativas de mitigación mediante filtros activos de potencia.

El uso de ETAP se enmarca en la metodología definida para la memoria, donde se realizan estudios de flujo de carga y flujo armónico con el objetivo de estimar los niveles de TDD y THD_v en distintos puntos del sistema. Estos resultados son comparados posteriormente con los criterios establecidos por la norma IEEE Std. 519.

5.1. Objetivo de la modelación

El objetivo principal de la modelación es analizar el impacto de las cargas no lineales sobre la calidad de energía de la SEU N° 22, utilizando como base el modelo eléctrico existente de Minera Valle Central en ETAP. En particular, se busca estimar los niveles de distorsión armónica de tensión y corriente en la barra principal de baja tensión de la subestación y en los centros de control de motores CCM6 y CCM7.

La modelación permite evaluar una condición base actualizada del sis-

tema, incorporar cargas proyectadas y comparar el desempeño de distintas alternativas de mitigación armónica mediante filtros activos de potencia.

En este sentido, el modelo no tiene como finalidad reemplazar una ingeniería de detalle, sino entregar una herramienta de análisis técnico que permita apoyar la toma de decisiones respecto a la capacidad requerida, ubicación y desempeño esperado de la solución de mitigación.

5.2. Alcance del análisis en ETAP

La modelación se desarrolló a partir del modelo eléctrico existente de Minera Valle Central en ETAP, el cual representa el sistema eléctrico de la planta con sus principales niveles de tensión, subestaciones, transformadores, barras, centros de control de motores y cargas asociadas. Sobre esta base, el presente estudio se enfocó en la SEU Nº 22, considerando su alimentación en media tensión, el transformador principal, la barra de baja tensión y los centros de control de motores CCM6 y CCM7.

El uso del modelo existente permitió trabajar con una representación eléctrica coherente con la configuración general de la planta. A partir de dicho modelo se realizó el análisis armónico asociado a la SEU Nº 22 y, posteriormente, se generaron casos de estudio incorporando cargas actualizadas, cargas proyectadas y filtros activos de potencia según cada escenario de mitigación.

Cabe señalar que la condición medida por Tecnored durante el año 2024 no corresponde a un escenario modelado directamente en ETAP dentro de esta memoria. Dicha medición se utiliza como antecedente de diagnóstico y como referencia para identificar la existencia de una problemática armónica en la subestación. En cambio, los escenarios desarrollados en ETAP corresponden a condiciones de análisis construidas a partir del modelo eléctrico de MVC y de los antecedentes actualizados del sistema.

Si bien el modelo base corresponde al sistema eléctrico de MVC, el análisis de esta memoria se limita a los puntos de interés asociados a la SEU Nº 22, debido a que en ellos se concentra la problemática armónica evaluada. En consecuencia, los resultados se presentan principalmente para la barra de baja tensión de la subestación, CCM6 y CCM7.

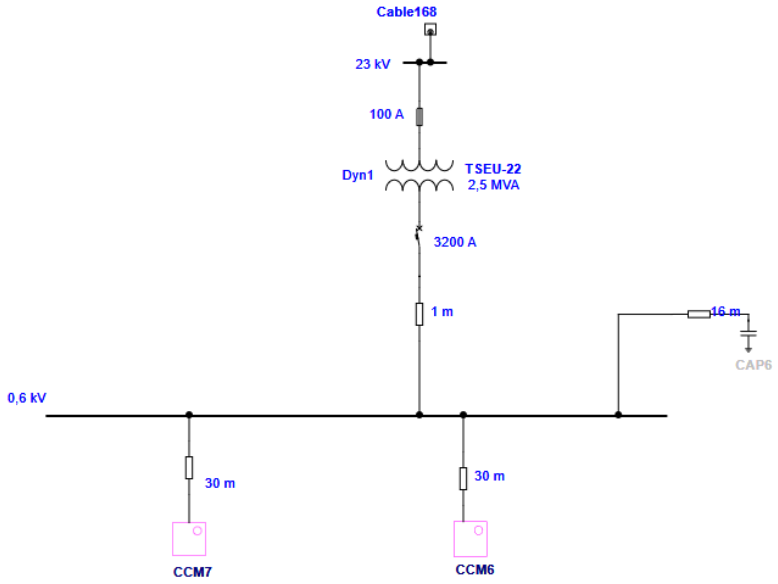


Figura 5.1: Vista del modelo ETAP asociado a la SEU Nº 22.

La Figura 5.1 presenta una vista del modelo ETAP utilizado para el análisis de la SEU Nº 22, donde se identifican el transformador principal TSEU-22, la barra de baja tensión de 0,6 kV y los centros de control de motores CCM6 y CCM7.

En la figura también se observa el banco de condensadores CAP6; sin embargo, este equipo se considera fuera de servicio en los escenarios analizados, por lo que no participa como elemento activo de compensación en la modelación armónica.

Para efectos del análisis armónico de la SEU Nº 22, se consideraron principalmente los siguientes elementos:

- Fuente equivalente de alimentación del sistema.
- Transformador de la SEU Nº 22.
- Barra principal de baja tensión.
- Centros de control de motores CCM6 y CCM7.
- Cargas motrices existentes.
- Cargas incorporadas con posterioridad a la medición de 2024.
- Modificaciones y cargas proyectadas consideradas en el escenario futu-

ro.

- Cargas no lineales asociadas a variadores de frecuencia Rockwell de 6 pulsos, configuradas en el módulo armónico de ETAP mediante la librería del software [16].
- Filtros activos de potencia incorporados en los escenarios de mitigación.

El alcance del estudio se limita al análisis de flujo de carga y flujo armónico en régimen permanente. No se incluyen estudios dinámicos, transitorios electromagnéticos, coordinación detallada de protecciones ni análisis de falla de los filtros pasivos existentes.

5.3. Antecedentes utilizados

Para la construcción y actualización de los casos de estudio en ETAP se consideraron antecedentes técnicos disponibles de la instalación, incluyendo diagramas unilineales, inventario de cargas, mediciones de calidad de energía, datos de cortocircuito y características generales de los equipos principales.

Los antecedentes principales utilizados fueron:

- Modelo eléctrico existente de Minera Valle Central en ETAP.
- Informe de calidad de energía de la SEU N° 22 [14].
- Inventario de cargas asociadas a CCM6 y CCM7.
- Diagramas unilineales disponibles de la subestación (ver Anexo D).
- Datos de tensión nominal del sistema.
- Información de cargas existentes, cargas incorporadas posterior a la medición de 2024 y cargas proyectadas.
- Datos de corrientes de cortocircuito en los puntos de evaluación.
- Características generales de los variadores de frecuencia presentes en el sistema.

El inventario de cargas permitió identificar la potencia nominal instalada en cada centro de control de motores y diferenciar las cargas asociadas a variadores de frecuencia. Por su parte, las mediciones de calidad de energía permitieron establecer una referencia de la condición armónica medida durante el año 2024, utilizada como antecedente para justificar la necesidad de evaluar alternativas de mitigación.

5.4. Configuración armónica de cargas no lineales

El modelo eléctrico de MVC en ETAP contaba con la representación de los principales equipos, cargas y centros de control de motores de la planta. Sin embargo, para realizar el estudio de flujo armónico fue necesario configurar las cargas no lineales asociadas a variadores de frecuencia dentro del módulo armónico del software.

En particular, los variadores de frecuencia considerados en la SEU Nº 22 corresponden a equipos marca Rockwell de 6 pulsos. Por esta razón, para el estudio armónico se utilizó la librería de ETAP seleccionando el fabricante Rockwell y el modelo de variador de frecuencia de 6 pulsos, configurado como fuente de corriente armónica balanceada.

La configuración armónica utilizada para los variadores consideró los siguientes criterios generales:

- Tipo de fuente armónica: fuente de corriente.
- Fabricante: Rockwell.
- Modelo: variador de frecuencia de 6 pulsos.
- Tipo de fase: balanceado.
- Espectro armónico obtenido desde la librería de ETAP.

Esta configuración permite representar de forma consistente el espectro armónico característico de los variadores instalados en terreno, ya que coincide tanto el fabricante como la topología de rectificación utilizada por los equipos presentes en la subestación. Además, resulta coherente con el comportamiento esperado de variadores de frecuencia de 6 pulsos, los cuales presentan armónicos característicos de bajo orden, principalmente armónicos de orden 5, 7, 11, 13, 17 y 19.

La Figura 5.2 muestra un ejemplo de la configuración armónica aplicada a los variadores de frecuencia en ETAP.

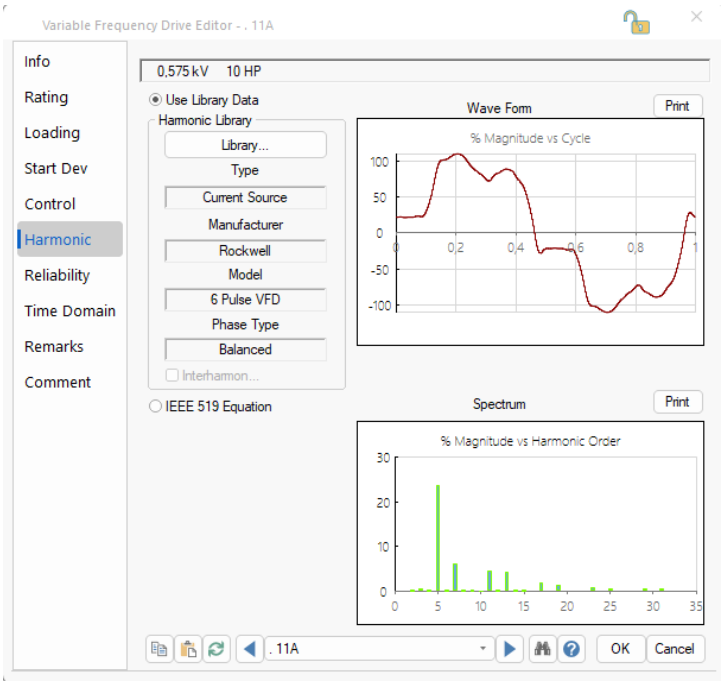


Figura 5.2: Configuración armónica de variador de frecuencia Rockwell de 6 pulsos en ETAP.

De esta forma, el análisis armónico no se basa únicamente en la potencia nominal de las cargas, sino también en la asignación de un espectro armónico representativo para los variadores de frecuencia presentes en el sistema.

5.5. Escenarios de operación considerados

La evaluación del sistema considera distintos escenarios de operación con el objetivo de diferenciar la condición medida en terreno, la condición de referencia utilizada para contrastar el modelo, la condición actualizada del sistema y la condición futura proyectada. Esta distinción resulta relevante debido a que el diagnóstico presentado en el Capítulo 4 corresponde a una campaña de medición realizada durante el año 2024, mientras que la modelación en ETAP considera antecedentes posteriores y crecimiento esperado de cargas.

De manera general, los escenarios considerados son los siguientes:

- **Condición medida 2024:** corresponde a la condición registrada por

el informe de calidad de energía de Tecnored. Esta condición se utiliza como antecedente de diagnóstico y como referencia para contrastar los resultados del modelo, pero no corresponde por sí misma a un escenario modelado directamente en ETAP.

- **Escenario de referencia P95:** representa una condición de cargas existentes comparable con la campaña de medición de 2024, evaluada en una demanda equivalente al percentil 95 registrado en la SEU Nº 22. Este escenario permite contrastar los resultados del modelo armónico contra los valores reportados por Tecnored, antes de incorporar actualizaciones de carga, crecimiento proyectado o filtros activos de potencia.
- **Escenario base actualizado:** representa la condición del sistema posterior a la medición de 2024, incorporando las cargas existentes al momento del análisis, incluyendo aquellas implementadas con posterioridad a la campaña de medición, pero sin considerar aún las cargas proyectadas ni filtros activos de potencia.
- **Escenario proyectado sin mitigación:** incorpora las nuevas cargas consideradas para la SEU Nº 22 y la redistribución de carga entre centros de control de motores, permitiendo evaluar el cambio en la demanda, en la distribución de corrientes armónicas y en la distorsión armónica antes de aplicar una solución de filtrado.
- **Escenarios con mitigación armónica:** consideran la incorporación de filtros activos de potencia en distintas capacidades y ubicaciones, con el fin de analizar su efecto sobre los indicadores THD_v y TDD.

El escenario de referencia P95 se utiliza como una etapa de contraste del modelo, ya que permite comparar los resultados simulados con los antecedentes de medición disponibles. Debido a que las condiciones operacionales exactas de la campaña de medición pueden diferir de las condiciones representadas en el modelo, esta comparación no se interpreta como una reproducción exacta punto a punto ni como una validación formal, sino como un contraste de coherencia con criterio de aceptación explícito, desarrollado en la Sección 6.2 del Capítulo 6.

El escenario proyectado sin mitigación constituye la condición crítica para el dimensionamiento preliminar de la solución, ya que representa una operación futura esperada con mayor presencia de variadores de frecuencia y, por lo tanto, con mayor exigencia armónica.

5.6. Actualización de cargas respecto de la medición de 2024

El diagnóstico presentado en el Capítulo 4 se basa en las mediciones realizadas durante el año 2024. Sin embargo, para la etapa de modelación se considera una condición actualizada del sistema, incorporando antecedentes posteriores a dicha campaña de medición.

Dentro de estas actualizaciones se considera la bomba B102 de 500 HP con variador de frecuencia, implementada durante el año 2025. Esta carga no forma parte de la condición medida por Tecnored en 2024, pero sí corresponde a una carga existente al momento de desarrollar el análisis de modelación. Por esta razón, la B102 no se clasifica como carga proyectada, sino como una actualización de la condición base utilizada en ETAP.

Tabla 5.1: Carga existente incorporada posterior a la medición de 2024

Carga	Potencia nominal [HP]	Condición
B102	500	Existente, implementada en 2025

Nota: La carga B102 no se encuentra representada en la medición de calidad de energía de 2024, pero se incorpora en la modelación por corresponder a una carga existente en la condición actualizada del sistema.

La incorporación de esta carga permite que el escenario base actualizado represente de mejor manera la condición existente del sistema al momento del estudio, evitando que la modelación se limite únicamente a la condición histórica medida en 2024.

5.7. Modificaciones y crecimiento de cargas consideradas

Además de la actualización de cargas existentes posterior a la medición de 2024, el estudio considera modificaciones operacionales y crecimiento proyectado de cargas en la SEU N° 22. Estas modificaciones se incorporan con el objetivo de representar una condición futura de operación más exigente para el sistema eléctrico y para el análisis armónico.

Dentro de estas modificaciones se considera la incorporación de nuevas cargas y la redistribución de una carga existente entre centros de control de motores. En particular, la carga B209 de 200 HP, originalmente asociada a

CCM7, se considera trasladada hacia CCM6. Esta modificación no representa un aumento neto de potencia instalada en la SEU Nº 22, pero sí modifica la distribución de carga y la contribución armónica entre ambos centros de control de motores.

Tabla 5.2: Modificaciones y cargas proyectadas consideradas en la modelación

Carga	**Potencia [HP]**	**Centro**	**Condición**
CavTube	100	CCM6	Nueva carga proyectada
B209	200	CCM6	Traslado desde CCM7
BM05A	350	CCM7	Nueva carga proyectada

Nota: La carga B209 se considera como una redistribución de carga existente desde CCM7 hacia CCM6, por lo que no representa un aumento neto de potencia instalada en la SEU Nº 22.

La Tabla 5.2 resume las modificaciones consideradas en el escenario proyectado de modelación. En CCM6 se incorpora el CavTube de 100 HP y se considera el traslado de la carga B209 de 200 HP desde CCM7. En CCM7 se considera la incorporación de la carga BM05A de 350 HP. Estas modificaciones permiten representar una condición futura de operación en la cual cambia tanto la demanda como la distribución de cargas no lineales entre los centros de control de motores.

5.8. Criterios de evaluación

Los resultados de la modelación se evalúan considerando principalmente los indicadores THD_v y TDD. La THD_v permite evaluar la distorsión de la forma de onda de tensión en las barras del sistema, mientras que la TDD permite evaluar la distorsión de corriente respecto de una corriente de demanda representativa.

Para la evaluación de tensión se consideran los límites recomendados por la norma IEEE Std. 519 para distorsión armónica de tensión. Dado que los puntos evaluados en la SEU Nº 22 corresponden a barras de baja tensión de 0,6 kV, se utiliza el rango $V \leq 1\,\text{kV}$.

Tabla 5.3: Límites de distorsión armónica de tensión según IEEE 519

Tensión en el punto de evaluación	**Armónico individual [%]**	**THD_v [%]**
$V \leq 1\,\text{kV}$	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

Fuente: Adaptado de IEEE Std. 519-2022 [4].

De acuerdo con la Tabla 5.3, para las barras de 0,6 kV analizadas en este estudio se considera un límite de THD_v de 8 % y un límite de armónico individual de tensión de 5 %.

Para la evaluación de corriente se utilizan los límites de distorsión armónica recomendados para sistemas entre 120 V y 69 kV. Estos límites dependen de la relación I_{SC}/I_L, donde I_{SC} corresponde a la corriente de cortocircuito disponible en el punto de evaluación e I_L corresponde a la corriente máxima de demanda de carga.

Tabla 5.4: Límites de distorsión armónica de corriente según IEEE 519 para sistemas de 120 V a 69 kV

I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	**TDD [%]**
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 \leq I_{SC}/I_L < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 \leq I_{SC}/I_L < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 \leq I_{SC}/I_L < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
≥ 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fuente: Adaptado de IEEE Std. 519-2022 [4]. Los valores corresponden a porcentajes de la corriente máxima de demanda I_L. Para armónicos pares de orden $h \leq 6$, el límite corresponde al 50 % del valor indicado para armónicos impares; para $h > 6$, el límite puede alcanzar el 100 % del valor indicado para armónicos impares.

A partir de la Tabla 5.4 y de las relaciones I_{SC}/I_L calculadas previamente, se definen los límites de TDD aplicables al escenario proyectado.

Tabla 5.5: Límites de TDD aplicables a los puntos evaluados

Punto	I_{SC}/I_L	**Rango IEEE 519**	**Límite TDD [%]**
SEU Nº 22 BT	14,23	< 20	5
CCM6	27,40	$20 \leq I_{SC}/I_L < 50$	8
CCM7	22,00	$20 \leq I_{SC}/I_L < 50$	8

De acuerdo con la Tabla 5.5, para la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 se considera un límite de TDD de 5 %, debido a que la relación I_{SC}/I_L es menor a 20. En cambio, para CCM6 y CCM7 se considera un límite de TDD de 8 %, ya que sus relaciones I_{SC}/I_L se encuentran en el rango entre 20 y 50.

Adicionalmente, cuando corresponde, se revisan armónicos individuales de corriente y tensión, con especial atención a los armónicos característicos de variadores de frecuencia de 6 pulsos. Esta revisión permite identificar si el cumplimiento global de TDD y $\mathrm{THD_v}$ es consistente con el cumplimiento de los límites individuales por orden armónico.

5.8.1. Determinación de la corriente máxima de demanda I_L

La norma IEEE Std. 519 define I_L como la corriente máxima de demanda de carga en el punto de evaluación, obtenida como el promedio de las máximas demandas mensuales registradas durante los doce meses previos. Para instalaciones nuevas o para condiciones de operación que aún no se han materializado, la norma admite estimar dicha corriente a partir de la demanda máxima proyectada de las cargas consideradas.

Ambos criterios resultan pertinentes en esta memoria y se aplican de forma complementaria. El primero permite caracterizar la demanda efectivamente registrada por la instalación y verificar el orden de magnitud de la condición actual; el segundo permite establecer la base de cálculo del escenario proyectado, que es el escenario sobre el cual se evalúan las alternativas de mitigación.

Demanda máxima registrada

Para caracterizar la demanda histórica se utilizó el registro de corriente de la plataforma Vantage [17], que almacena las mediciones de campo de la instalación con una resolución del orden de algunos minutos. A partir de

dicho registro se construyeron ventanas de demanda de 15 min, se determinó el valor máximo de cada uno de los doce meses previos y se promediaron los máximos mensuales, siguiendo la definición de la norma.

Tabla 5.6: Máximas demandas mensuales registradas y corriente I_L resultante según IEEE 519

Mes	**SEU Nº 22 BT [A]**	**CCM6 [A]**	**CCM7 [A]**
2025-09	2012,0	976,6	1213,4
2025-10	1960,0	927,9	1195,7
2025-11	1823,0	955,0	1182,8
2025-12	2014,0	991,1	1151,0
2026-01	1774,0	929,8	1105,2
2026-02	1718,0	1047,8	939,7
2026-03	1706,0	954,6	957,6
2026-04	1811,0	920,2	1093,0
2026-05	1905,0	976,9	1148,1
2026-06	1950,0	925,4	1173,2
2026-07	1796,0	952,0	1016,5
2026-08	1812,0	973,5	937,4
I_L **registrada**	**1856,8**	**960,9**	**1092,8**

Nota: Máximo de la demanda promediada en ventanas de 15 min *para cada uno de los doce meses previos, correspondientes al periodo septiembre de 2025 a agosto de 2026. Se excluyeron los intervalos con señal no válida, identificados mediante el conteo de valores distintos por día y correspondientes a episodios puntuales de enero y marzo de 2026, en que una o más señales permanecieron congeladas en un valor constante. La cobertura del registro depurado supera el* 94 % *de los intervalos teóricos en diez de los doce meses.*

Demanda máxima del escenario proyectado

El escenario proyectado incorpora cargas que no están presentes en el registro histórico, por lo que su corriente de demanda no puede obtenerse de mediciones. Se adopta entonces el segundo criterio admitido por la norma y se emplea la corriente de demanda obtenida del flujo de carga del escenario proyectado, presentada en el Anexo A.

Tabla 5.7: Comparación entre la corriente I_L registrada y la del escenario proyectado

Punto	I_L **registrada [A]**	I_L **proyectada [A]**	**Variación**
SEU N° 22 BT	1856,8	2249	+21,1 %
CCM6	960,9	1022	+6,4 %
CCM7	1092,8	1227	+12,3 %

El incremento de la corriente proyectada respecto de la registrada resulta coherente con las cargas incorporadas en el escenario futuro, descritas en la Tabla 5.2: el CavTube de 100 HP y el traslado de la carga B209 hacia CCM6, y la BM05A de 350 HP en CCM7. La mayor variación relativa en la barra de baja tensión se explica porque, además de las cargas nuevas, el escenario proyectado corresponde a una condición de operación simultánea de ambos centros, mientras que la demanda registrada refleja máximos mensuales que no necesariamente ocurren de forma coincidente.

Se adopta la corriente proyectada como base normativa de todo el estudio, por dos razones. En primer lugar, es la única consistente con el contenido armónico del mismo escenario: numerador y denominador de la TDD provienen de la misma corrida del modelo. En segundo lugar, corresponde a la condición de mayor exigencia considerada, que es la que debe gobernar el dimensionamiento de la solución de mitigación.

5.8.2. Determinación de la corriente de cortocircuito I_{SC}

Las corrientes de cortocircuito empleadas para calcular la razón I_{SC}/I_L corresponden a la corriente simétrica inicial de cortocircuito trifásico I''_k, obtenida mediante el módulo de cálculo de cortocircuito de ETAP según el procedimiento de la norma IEC 60909 [18]. Se adopta este valor por corresponder a la corriente de cortocircuito disponible en el punto de evaluación en términos eficaces, magnitud a la que se refiere la razón I_{SC}/I_L definida por IEEE Std. 519.

Tabla 5.8: Corrientes de cortocircuito trifásico en los puntos de evaluación

Punto	I_k'' **[kA]**	i_p **[kA]**	$\kappa = i_p/(\sqrt{2}\, I_k'')$
SEU N° 22 BT	32	71,796	1,586
CCM6	28	60,846	1,537
CCM7	27	57,954	1,518

Nota: I_k'' corresponde a la corriente simétrica inicial de cortocircuito trifásico e i_p al valor de cresta, ambos calculados en ETAP según IEC 60909. Únicamente I_k'' interviene en la razón I_{SC}/I_L; el valor de cresta se reporta por completitud y es relevante para la verificación de soportabilidad de los equipos de maniobra, aspecto condicionado a la ingeniería de detalle.

5.8.3. Sensibilidad de la banda normativa aplicable

Dado que los límites de TDD dependen de la banda en que se ubica la razón I_{SC}/I_L, corresponde verificar en qué medida la selección de I_L condiciona el límite adoptado. La Tabla 5.9 presenta la razón obtenida con ambas bases de corriente.

Tabla 5.9: Razón I_{SC}/I_L y banda normativa resultante según la base de corriente adoptada

	Base registrada		**Base proyectada**		**Límite**
Punto	**Razón**	**Banda**	**Razón**	**Banda**	**TDD [%]**
SEU N° 22 BT	17,23	< 20	14,23	< 20	5
CCM6	29,14	20–50	27,40	20–50	8
CCM7	24,71	20–50	22,00	20–50	8

El resultado más relevante de la Tabla 5.9 es que la banda normativa aplicable es la misma para ambas bases de corriente en los tres puntos evaluados. El límite de TDD adoptado no depende, por lo tanto, de cuál de las dos definiciones admitidas por la norma se utilice.

Margen respecto del cambio de banda en CCM7

De los tres puntos evaluados, CCM7 es el que se encuentra más próximo al umbral de razón 20 que separa las bandas de 8 % y 5 %. Corresponde por lo tanto cuantificar su margen. La corriente de demanda que situaría la razón exactamente en el umbral es

$$I_{L,\text{umbral}} = \frac{I_{SC}}{20} = \frac{27\,\text{kA}}{20} = 1350\,\text{A} \tag{5.1}$$

Este valor supera en un 10,0 % la corriente proyectada de 1227 A, en un 23,5 % la corriente registrada de 1092,8 A y en un 11,3 % la mayor demanda de 15 min observada en los doce meses de registro, igual a 1213,4 A en septiembre de 2025. El cambio de banda requeriría, en consecuencia, una condición de demanda que no solo excede la proyección, sino que no ha sido registrada en la instalación.

Los otros dos puntos presentan márgenes considerablemente mayores: CCM6 requeriría una demanda de 1400 A, un 37,0 % superior a la proyectada, mientras que la barra de baja tensión de la SEU N° 22 requeriría que su demanda descendiera hasta 1600 A, valor muy inferior a los 1856,8 A registrados como demanda máxima promedio en los doce meses previos.

Efecto de la restricción física sobre la banda aplicable

La posibilidad de que CCM7 alcance la corriente de demanda de 1350 A necesaria para cambiar de banda se encuentra acotada por una restricción física de la instalación. Su alimentador presenta una capacidad de conducción desclasificada de 1252,5 A, según se detalla en la Sección 7.9.3, valor un 7,8 % inferior al umbral de cambio de banda. La razón mínima físicamente alcanzable resulta por lo tanto $I_{SC}/I_L = 21{,}56$, superior a 20.

Se concluye que CCM7 permanece en la banda $20 \leq I_{SC}/I_L < 50$ bajo cualquier condición de operación admisible de la instalación, ya que la protección del conductor actúa antes de que la razón pueda descender bajo el umbral. La verificación del desempeño en la condición límite de capacidad del alimentador se presenta en la Sección 7.9.4.

5.9. Estudios realizados en ETAP

A partir del modelo eléctrico existente de MVC en ETAP, se realizaron estudios de flujo de carga y flujo armónico enfocados en la SEU N° 22. El flujo de carga permite estimar las corrientes fundamentales, niveles de tensión y distribución de carga del sistema. Estos resultados sirven como base para la evaluación armónica, ya que permiten establecer las condiciones de operación sobre las cuales se inyectan las componentes armónicas.

Posteriormente, el estudio de flujo armónico permite estimar la propagación de corrientes armónicas generadas por las cargas no lineales y la distorsión de tensión resultante en los distintos puntos de evaluación. En particular, se analizan los resultados en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, en CCM6 y en CCM7.

Los estudios realizados permiten comparar la condición sin mitigación con los escenarios posteriores en que se incorporan filtros activos de potencia. De esta forma, es posible cuantificar la reducción de THD_v y TDD obtenida mediante cada alternativa de mitigación.

5.10. Supuestos y limitaciones del modelo

La modelación se desarrolló sobre el modelo eléctrico disponible de MVC en ETAP. No obstante, los resultados del análisis armónico dependen de los antecedentes eléctricos, espectros armónicos, niveles de carga y escenarios de operación definidos para el estudio.

Entre los principales supuestos y consideraciones del análisis se encuentran:

- El análisis se enfoca en los puntos de evaluación asociados a la SEU Nº 22, CCM6 y CCM7.
- Los variadores de frecuencia se configuraron armónicamente como fuentes de corriente de 6 pulsos, utilizando la librería de ETAP para equipos Rockwell.
- El análisis se realiza en régimen permanente.
- La condición medida por Tecnored en 2024 se utiliza como antecedente de diagnóstico, pero no corresponde a un escenario modelado directamente en ETAP.
- Las cargas existentes se modelan con un factor de carga de 80 % de su potencia nominal, según el criterio interno de MVC para instalaciones existentes; las cargas proyectadas se modelan al 100 %.
- Las corrientes de demanda utilizadas como base de la TDD difieren según el escenario: el escenario de referencia P95 emplea las corrientes medidas en Vantage, mientras que los escenarios proyectados emplean las corrientes del flujo de carga proyectado.
- Los filtros pasivos existentes y el banco de condensadores fuera de servicio no se consideran como elementos activos de compensación.
- Los resultados dependen de los espectros armónicos, niveles de carga

y datos eléctricos ingresados al modelo.

Además, la configuración final de un filtro activo debe ser validada por el proveedor del equipo y posteriormente verificada mediante mediciones en terreno, considerando la ubicación de transformadores de corriente, polaridad, relación de transformación, modo de control y condiciones reales de operación.

5.11. Síntesis del capítulo

La modelación en ETAP permite analizar el comportamiento armónico de la SEU Nº 22 a partir del modelo eléctrico existente de Minera Valle Central. Para ello, se definieron puntos de evaluación, escenarios de operación, corrientes de demanda, corrientes de cortocircuito y criterios normativos para el análisis armónico.

La diferenciación entre la condición medida en 2024, la condición base actualizada y el escenario proyectado permite ordenar el análisis y evitar que las mediciones históricas sean confundidas con escenarios modelados directamente en ETAP. Asimismo, permite distinguir entre cargas existentes incorporadas posteriormente a la medición, como la B102 de 500 HP, y nuevas cargas proyectadas, como CavTube y BM05A, junto con la redistribución de la carga B209 desde CCM7 hacia CCM6.

Sobre esta base, en el capítulo siguiente se analizan distintas alternativas de mitigación mediante filtros activos de potencia, comparando su desempeño en términos de reducción de THD_v y TDD.

Capítulo 6

Alternativas de mitigación armónica

El presente capítulo analiza distintas alternativas de mitigación armónica mediante filtros activos de potencia aplicadas al sistema eléctrico de la SEU Nº 22. A partir del modelo desarrollado en ETAP y de los criterios de evaluación definidos en el Capítulo 5, se comparan configuraciones centralizadas y distribuidas con el objetivo de determinar una solución técnicamente adecuada para reducir los niveles de THD_v y TDD.

La evaluación se realiza considerando el escenario proyectado de operación, debido a que este representa la condición de mayor exigencia armónica dentro del alcance del estudio. Sobre dicho escenario se analiza primero la condición sin mitigación y posteriormente se incorporan filtros activos de distintas capacidades y ubicaciones.

6.1. Criterio general de comparación

Las alternativas de mitigación se comparan principalmente en función de su capacidad para reducir la distorsión armónica total de tensión, THD_v, y la distorsión total de demanda, TDD, en los puntos de evaluación definidos para la SEU Nº 22: barra de baja tensión de la subestación, CCM6 y CCM7.

Además del cumplimiento de los límites normativos definidos en el Capítulo 5, se consideran criterios prácticos de implementación, tales como la ubicación del filtro, la distribución de la compensación, la capacidad nominal requerida y la flexibilidad de operación frente a cambios en el perfil de carga.

En términos generales, se analizan dos enfoques de instalación:

- **Configuración centralizada:** considera la instalación de un filtro activo en la barra principal de baja tensión de la SEU Nº 22.
- **Configuración distribuida:** considera la instalación de filtros activos directamente asociados a CCM6 y CCM7.

La configuración centralizada permite concentrar la compensación en un único punto del sistema, mientras que la configuración distribuida permite compensar las corrientes armónicas más cerca de las cargas que las generan. Esta diferencia resulta relevante debido a que la SEU Nº 22 alimenta los centros CCM6 y CCM7, los cuales concentran casi en su totalidad cargas no lineales.

6.2. Contraste de coherencia del modelo con la condición medida

Antes de evaluar las alternativas de mitigación armónica, se contrastaron los resultados del modelo ETAP con los antecedentes de medición disponibles. Este contraste no constituye una validación formal del modelo: no se dispone de un registro sincronizado de las condiciones operacionales exactas durante la campaña de medición, no se ejecutó un ensayo de calibración sobre los indicadores de distorsión y las bases de cálculo de ambos conjuntos de datos no son homologables en todos los indicadores. Su objetivo es verificar, de forma preliminar, que el modelo reproduzca el orden de magnitud, la jerarquía de criticidad entre puntos y el sentido del error respecto de la condición observada en terreno. Por esta razón, en adelante se emplea el término *contraste de coherencia* y no *validación* para referirse a esta etapa.

6.2.1. Construcción del escenario de referencia P95

El escenario utilizado para el contraste se denomina en esta memoria *escenario de referencia P95* y corresponde al escenario de referencia en ETAP definido en el Capítulo 5, evaluado en una condición de demanda equivalente al percentil 95 registrado en la SEU Nº 22. Se adopta el percentil 95 y no el máximo absoluto para excluir eventos atípicos o puntuales que no representan una condición operacional sostenida, criterio consistente con el utilizado por el proveedor de medición para reportar sus propios indicadores.

El nivel de carga de las cargas existentes se fijó en 80 % de su potencia

nominal, de acuerdo con el criterio interno de Minera Valle Central para la simulación de instalaciones existentes. Este criterio reconoce que las cargas motrices de la planta se encuentran sobredimensionadas respecto de su requerimiento de proceso, por definición del área mecánica, por lo que su potencia de placa no representa la demanda efectiva en operación. Para las cargas proyectadas, en cambio, se adopta un factor de 100 %, con el fin de mantener un criterio conservador en la proyección.

El escenario así construido presenta una corriente fundamental de 1838,51 A en la barra de baja tensión de la SEU N° 22, distribuida en 760,06 A hacia CCM6 y 1078,47 A hacia CCM7. Corresponde precisar que este valor no coincide con el percentil 95 de demanda registrado durante la campaña de medición de 2024, sino que resulta del conjunto de cargas existentes representadas en el modelo operando bajo el criterio de carga descrito. Su magnitud es cercana a la corriente máxima de demanda determinada según IEEE Std. 519 sobre el registro histórico de doce meses, presentada en el Capítulo 5, de la cual difiere en un 1,0 %. El escenario representa, por lo tanto, una condición de demanda elevada de la instalación existente, y no la condición puntual registrada durante la semana de medición.

Las corrientes de demanda de referencia utilizadas se presentan en la Tabla 6.1. Estas corrientes cumplen una doble función: constituyen el objetivo de demanda al que se ajustó el escenario y son el denominador I_L empleado para expresar la TDD simulada de este contraste.

Tabla 6.1: Demanda registrada en Vantage durante el periodo de la campaña de medición

Punto de evaluación	I_L **P95** 15 min **[A]**
SEU N° 22 BT	1008,29
CCM6	575,74
CCM7	599,02

Nota: Percentil 95 sobre intervalos de 15 min *de demanda, calculado a partir del registro histórico de la plataforma Vantage de Minera Valle Central para el periodo 23-08-2024 a 12-09-2024, que contiene la campaña de medición de Tecnored. Los intervalos afectados por señal no válida fueron excluidos según se detalla en la Tabla 6.2. Estas corrientes caracterizan la demanda efectivamente registrada durante el periodo de la campaña y se emplean en el análisis de coincidencia de percentiles de la Sección siguiente. No constituyen la base de cálculo de la TDD simulada, la cual se expresa sobre la corriente del propio caso simulado, ni deben confundirse con las corrientes de demanda del escenario proyectado utilizadas en la evaluación normativa del Capítulo 7.*

Ventana de cálculo y calidad del registro

La ventana empleada para obtener las corrientes de la Tabla 6.1 no coincide con los siete días de la campaña de medición, sino que abarca el periodo 23-08-2024 a 12-09-2024. Esta ampliación no responde a un criterio discrecional, sino a una limitación del registro histórico verificada durante el desarrollo de este trabajo: al auditar los datos de origen se identificaron intervalos en que las señales de corriente permanecieron congeladas en un valor constante, sin variación alguna a lo largo de días completos.

Tabla 6.2: Calidad del registro de corriente de Vantage en el periodo analizado

Punto	**Intervalos no válidos**	**Valor registrado**	**Días útiles**
SEU Nº 22 BT	23-08-2024 a 29-08-2024	0 A constante	14
CCM6	Sin intervalos no válidos	—	21
CCM7	31-08-2024 a 05-09-2024	213,96 A constante	15

Nota: La condición de señal no válida se identificó mediante el conteo de valores distintos por día: los días afectados presentan un único valor repetido en la totalidad de sus registros, frente a un orden de 1.500 a 4.000 valores distintos por día en condición normal. Los intervalos correspondientes fueron excluidos del cálculo del percentil 95.

La consecuencia más relevante afecta a CCM7: su señal permaneció congelada entre el 31 de agosto y el 5 de septiembre de 2024, es decir, durante seis de los siete días de la campaña de medición de Tecnored. Restringir el cálculo a la ventana de la campaña habría dejado a este punto sin registro válido de demanda. Por esta razón se adoptó la ventana ampliada de 21 días, que contiene la campaña y aporta además días con señal válida antes y después de ella.

Como consecuencia de lo anterior, la ventana efectiva de cálculo difiere entre puntos: 14 días en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, 21 días en CCM6 y 15 días en CCM7. Esta diferencia constituye una limitación declarada del contraste y se suma a la no coincidencia de percentiles descrita a continuación. Se evaluó como alternativa restringir el cálculo a los ocho días con señal simultáneamente válida en los tres puntos, opción que se descartó por reducir la muestra a menos de la mitad y comprometer la

representatividad del percentil.

Cabe señalar, adicionalmente, que la indisponibilidad de la señal de CCM7 durante la campaña resulta consistente con la inconsistencia interna del informe de calidad de energía documentada en el Capítulo 4, donde las tablas correspondientes a PM-5000-7 reproducen valores de otro punto de medición. Ambos antecedentes sugieren que el punto de medición asociado a CCM7 presentó dificultades de registro durante el periodo, aunque esta relación se plantea como hipótesis y no ha sido confirmada con el proveedor de medición.

La Tabla 6.3 identifica el origen, la ventana temporal y el tratamiento aplicado a cada entrada principal del caso, con el fin de permitir su reconstrucción por un tercero.

Tabla 6.3: Construcción del escenario de referencia P95 utilizado en el contraste

Entrada del modelo	**Origen**	**Ventana o base**	**Tratamiento**
Topología, transformador y parámetros de red	Modelo eléctrico de MVC en ETAP	Configuración vigente al momento del estudio	Sin modificación
Inventario de cargas	Listado de cargas de CCM6 y CCM7	Condición previa a la incorporación de B102	Se excluyen cargas posteriores a la medición y cargas proyectadas
Factor de carga	Criterio interno de MVC para instalaciones existentes	Potencia nominal de placa	80 % en cargas existentes; 100 % reservado para cargas proyectadas
Condición de operación	Conjunto de cargas existentes representadas en el modelo	Factor de carga de 80 %	Corriente resultante: 1838,51 A en la barra BT
Espectro armónico de cargas no lineales	Librería de ETAP, fabricante Rockwell, variador de frecuencia de 6 pulsos	Catálogo del software	Sin ajuste respecto del espectro de biblioteca
Impedancia equivalente de la fuente	Estudio de cortocircuito del modelo de MVC	Condición de operación normal	Sin ajuste
Corriente base de la TDD simulada	Corriente fundamental del propio caso simulado	Solución de flujo armónico	1838,51 A; 760,06 A; 1078,47 A
Valor medido de referencia	Informe de calidad de energía [14]	P95 por línea, intervalos de 15 min, 7 días	Se adopta el máximo entre líneas por punto

6.2.2. No coincidencia de los percentiles

Corresponde precisar una limitación metodológica relevante del contraste. Los indicadores medidos fueron calculados por el proveedor de medición de forma independiente para cada línea y para cada variable sobre los 672 intervalos de 15 min del registro, según se detalla en el Capítulo 4. En consecuencia, el P95 de THD_v, el P95 de TDD y el P95 de corriente de demanda no corresponden necesariamente al mismo intervalo temporal ni a la misma condición operacional instantánea.

Las propias corrientes de la Tabla 6.1 permiten verificar esta condición de forma directa. Dado que CCM6 y CCM7 constituyen la totalidad de la carga alimentada desde la barra de baja tensión de la SEU N° 22, la suma de sus corrientes debería ser inferior o a lo sumo igual a la corriente de la barra en cualquier instante. Sin embargo, la suma de los percentiles individuales alcanza 1174,76 A, valor superior en un 16,5 % a los 1008,29 A registrados como percentil 95 en la barra. Esta diferencia no constituye un error de medición, sino la consecuencia directa de que cada percentil se alcanza en un intervalo distinto: los máximos de demanda de ambos centros de control de motores no ocurren de forma simultánea. Se confirma, por lo tanto, que los percentiles utilizados en el contraste no son coincidentes.

El modelo ETAP, en cambio, representa un único punto de operación determinístico en régimen permanente, en el cual todas las magnitudes son necesariamente simultáneas. El contraste compara entonces un estadístico de envolvente construido sobre varias semanas de registro contra un caso de operación puntual, lo que constituye por sí solo una fuente de discrepancia estructural que no puede eliminarse con los datos disponibles.

6.2.3. Contraste cuantitativo de THD_v

En la comparación se utiliza el valor máximo entre fases o líneas para cada punto de evaluación, con el fin de representar la condición más exigente registrada o simulada.

Tabla 6.4: Comparación de THD_v entre medición Tecnored y escenario de referencia P95 en ETAP

Punto	Tecnored	ETAP P95	Proyectado	Límite
SEU Nº 22 BT	7,351	8,18	10,08	8
CCM6 / PM-5000-6	8,162	8,54	10,57	8
CCM7 / PM-5000-7	8,162	8,75	10,74	8

Nota: Todos los valores corresponden a THD_v en porcentaje. Para cada punto se considera el valor máximo entre fases o líneas. Los valores medidos de PM-5000-6 y PM-5000-7 son idénticos por efecto de la inconsistencia del informe fuente declarada en el Capítulo 4.

6.2.4. Contraste cuantitativo de TDD

Para la comparación de corriente, la TDD simulada fue calculada a partir de los espectros de corriente exportados desde ETAP, utilizando como denominador la corriente fundamental del propio caso simulado, de modo que numerador y denominador provengan de una misma condición de operación. La TDD medida, por su parte, corresponde a la reportada por el proveedor de medición sobre la base de corriente adoptada por dicho proveedor, la cual no se encuentra documentada en el informe fuente. Esta comparación se utiliza como contraste de consistencia entre medición y simulación; la evaluación normativa de las alternativas de mitigación se realiza posteriormente con las corrientes de demanda del escenario proyectado y los límites definidos en el Capítulo 5.

Tabla 6.5: Comparación de TDD entre medición Tecnored y escenario de referencia P95 en ETAP

Punto	Tecnored	ETAP P95
SEU Nº 22 BT	29,010	20,18
CCM6 / PM-5000-6	25,560	18,53
CCM7 / PM-5000-7	30,122	21,35

Nota: Todos los valores corresponden a TDD en porcentaje. Cada columna se expresa respecto de la corriente de demanda de su propia condición: la columna Tecnored, respecto de la base adoptada por el proveedor de medición; la columna ETAP P95, respecto de la corriente fundamental del caso simulado. Esta tabla se utiliza como contraste de tendencia entre medición y simulación, no como criterio normativo de las alternativas de mitigación. La TDD del escenario proyectado no se incluye aquí por calcularse sobre una base de corriente distinta; su reconciliación con estos valores se desarrolla en la Sección 6.3.1.

6.2.5. Error absoluto y relativo del contraste

La Tabla 6.6 cuantifica la diferencia entre el valor medido y el valor simulado para cada indicador y punto de evaluación. El error absoluto se expresa en puntos porcentuales (pp) y el error relativo se calcula respecto del valor medido, según las expresiones $\varepsilon_{\text{abs}} = X_{\text{sim}} - X_{\text{med}}$ y $\varepsilon_{\text{rel}} = \varepsilon_{\text{abs}}/X_{\text{med}}$.

Tabla 6.6: Error absoluto y relativo entre la condición medida y el escenario de referencia P95

Indicador	**Punto**	**Medido [%]**	**Simulado [%]**	ε_{abs} **[pp]**	ε_{rel} **[%]**
THD_v	SEU N° 22 BT	7,351	8,18	+0,829	+11,28
THD_v	CCM6	8,162	8,54	+0,378	+4,63
THD_v	CCM7	8,162	8,75	+0,588	+7,20
TDD	SEU N° 22 BT	29,010	20,18	−8,827	−30,43
TDD	CCM6	25,560	18,53	−7,031	−27,51
TDD	CCM7	30,122	21,35	−8,773	−29,13

Nota: Los valores medidos corresponden al máximo entre líneas reportado en las Tablas 4.3 y 4.4. Un error positivo indica que la simulación entrega un valor superior al medido. El modelo sobrestima la distorsión de tensión y subestima la distorsión de corriente, comportamiento que se analiza en la Sección 6.2.9.

6.2.6. Criterio de aceptación adoptado

Dado que el uso previsto del modelo es la comparación relativa de alternativas de mitigación sobre una base común, y no la certificación absoluta de cumplimiento normativo, el criterio de aceptación se define en función de la utilidad del modelo para ese propósito y no de una tolerancia de reproducción exacta.

El criterio se establece de forma diferenciada para ambos indicadores. La THD_v se compara respecto de una base común e inequívoca en ambas fuentes, la componente fundamental de tensión en el mismo punto, por lo que admite un umbral cuantitativo. La TDD, en cambio, presenta una diferencia sistemática entre modelo y medición cuya magnitud excede cualquier umbral razonable de reproducción. Por esta razón no se adopta para ella un umbral de error, sino dos criterios orientados al uso comparativo del modelo: que reproduzca la jerarquía de criticidad entre puntos, y que el sesgo sea sistemático y no errático, condición bajo la cual un error común a todos los casos no altera el ordenamiento relativo de las alternativas evaluadas.

Tabla 6.7: Criterio de aceptación del contraste y resultado obtenido

ID	Criterio	Umbral adoptado	Resultado obtenido	Estado
C1	Sentido del error en THD_v: el modelo no debe subestimar la condición medida	$\varepsilon_{rel} \geq 0$ en los tres puntos	Entre +4,63 y +11,28 %	Se cumple
C2	Magnitud del error en THD_v	$\lvert\varepsilon_{rel}\rvert \leq 15\,\%$	Máximo +11,28 % en la SEU N° 22	Se cumple
C3	Jerarquía de criticidad en TDD: mismo ordenamiento entre puntos	Ordenamiento medido igual al simulado	CCM7 > SEU > CCM6 en ambos conjuntos	Se cumple
C4	Carácter sistemático del sesgo en TDD: el error relativo debe mantener signo y magnitud comparables entre puntos	Dispersión del error relativo ≤ 5 pp	Entre −30,43 y −27,51 %; dispersión de 2,92 pp	Se cumple

6.2.7. Discusión de las discrepancias y declaración de ajustes

Los errores relativos de THD_v se mantienen entre 4,63 % y 11,28 %, y en los tres puntos el modelo entrega un valor superior al medido. Los errores relativos de TDD, en cambio, se sitúan entre −27,51 % y −29,13 %: el modelo subestima de forma sistemática la distorsión de corriente respecto de la condición registrada en terreno.

La coexistencia de ambos comportamientos, sobrestimación de la distorsión de tensión y subestimación de la distorsión de corriente, admite una explicación coherente. La distorsión de tensión resulta del producto entre la corriente armónica inyectada y la impedancia de la red a cada frecuencia. Una impedancia equivalente de fuente superior a la real permitiría que una corriente armónica menor produjera una distorsión de tensión comparable o superior a la medida. Este mecanismo se plantea como hipótesis consistente con los datos disponibles y no como demostración, ya que su verificación requeriría una medición de impedancia de red que no forma parte del alcance de esta memoria. El origen de la subestimación de corriente se analiza en la Sección 6.2.9.

Respecto de eventuales ajustes del modelo, corresponde declarar con precisión su alcance. No se ejecutó ningún proceso de calibración sobre los indicadores de distorsión. En particular, no se modificaron los espectros armónicos de biblioteca, las impedancias de red, los parámetros del transformador ni el factor de carga adoptado, ni se ejecutó ninguna modificación con pos-

terioridad a la obtención de los resultados de distorsión con el fin de reducir la diferencia respecto de los valores medidos. En consecuencia, los errores de THD_v y TDD de la Tabla 6.6 corresponden a un contraste no calibrado sobre los indicadores evaluados.

6.2.8. Conclusión del contraste

El contraste permite concluir que el modelo resulta adecuado para el uso que se le dará en esta memoria, con las limitaciones que a continuación se declaran. Los cuatro criterios de aceptación adoptados se cumplen: el modelo no subestima la distorsión de tensión en ninguno de los tres puntos, mantiene el error de THD_v bajo el 15 %, reproduce la jerarquía de criticidad de TDD entre puntos y presenta en TDD un sesgo sistemático, con una dispersión de 2,92 pp entre los tres puntos evaluados.

La discrepancia observada resulta aceptable para el uso previsto del modelo, que es la comparación de alternativas de mitigación entre sí bajo una misma base de cálculo. Bajo esa condición, un sesgo sistemático común a todos los casos no altera el ordenamiento relativo de las alternativas ni la selección de la solución más adecuada.

Corresponde no obstante declarar de forma explícita que el sesgo identificado no es conservador en corriente. El modelo subestima la distorsión de corriente medida en aproximadamente un 30 %, y el contraste por orden armónico de la Sección 6.2.9 localiza el origen de esta diferencia en el espectro genérico adoptado para las cargas no lineales. En consecuencia, la capacidad de compensación requerida en terreno podría resultar superior a la determinada mediante simulación, lo que constituye una limitación relevante para la interpretación de los resultados de dimensionamiento de los capítulos siguientes.

No obstante, el contraste no habilita al modelo para declarar cumplimiento normativo absoluto en valores puntuales. Las conclusiones de los capítulos siguientes se refieren al desempeño obtenido en el escenario simulado, y la verificación normativa definitiva deberá realizarse en el PCC definido en el Capítulo 2 mediante mediciones en terreno posteriores a la implementación, bajo el protocolo de medición aplicable.

6.2.9. Contraste por orden armónico y alcance del espectro genérico

La subestimación sistemática de la TDD identificada en la Sección anterior admite un análisis más específico al comparar los órdenes armónicos individuales. La Tabla 6.8 contrasta, para los cuatro órdenes característicos dominantes de un rectificador de seis pulsos, el espectro de la biblioteca empleada, el resultado del modelo en cada punto y el valor medido en terreno.

Tabla 6.8: Contraste por orden armónico entre biblioteca, modelo y medición

Punto	**Orden**	**Biblioteca**	**ETAP**	**Medido**	ε_{rel} **[%]**
SEU N° 22 BT	5	23,52	18,836	35,23	−46,5
	7	6,08	4,872	13,23	−63,2
	11	4,56	3,656	7,05	−48,1
	13	4,19	3,358	3,57	−5,9
CCM6	5	23,52	17,292	31,86	−45,7
	7	6,08	4,473	10,84	−58,7
	11	4,56	3,357	6,97	−51,8
	13	4,19	3,083	3,71	−16,9
CCM7	5	23,52	19,924	53,88	−63,0
	7	6,08	5,153	28,23	−81,7
	11	4,56	3,867	8,28	−53,3
	13	4,19	3,551	6,99	−49,2

Nota: Todos los valores se expresan en porcentaje de la componente fundamental de corriente. La columna Biblioteca corresponde al espectro genérico de variador de frecuencia de seis pulsos empleado en el modelo, referido a la corriente de cada variador individual. Las columnas ETAP y Medido corresponden a la corriente de rama en cada punto de evaluación. Los valores medidos son el máximo entre líneas del percentil 95 por orden reportado por el proveedor de medición [14], mientras que los del modelo corresponden a un punto de operación determinístico.

El contraste permite localizar el origen de la discrepancia. Los valores del modelo son inferiores a los de la biblioteca en todos los casos, lo cual es esperable: la corriente de rama incorpora tanto cargas no lineales como cargas lineales, y estas últimas aumentan la componente fundamental sin aportar contenido armónico, reduciendo el porcentaje resultante. El modelo es, en este sentido, internamente consistente con el espectro que se le entregó.

La discrepancia se encuentra entre la biblioteca y la medición. El espectro genérico asigna al quinto armónico un 23,52 % de la corriente de cada variador, mientras que la medición registra 35,23 % en la barra de baja tensión

de la SEU Nº 22 y 53,88 % en CCM7. Dado que, ante un espectro común a todas las cargas no lineales, la proporción armónica de una barra corresponde al promedio de las proporciones individuales ponderado por corriente fundamental, y que la presencia de cargas lineales solo puede reducir dicha proporción, el resultado indica que los accionamientos efectivamente instalados inyectan un contenido armónico superior al representado por el espectro genérico de biblioteca.

Esta interpretación se sostiene bajo dos condiciones que corresponde declarar. En primer lugar, supone la ausencia de una resonancia paralela próxima al quinto armónico que pudiera amplificar la corriente medida en la barra. Dicha condición se verifica en este caso: el banco de condensadores y los filtros pasivos de CCM6 y CCM7 permanecen fuera de servicio desde 2021, según se establece en el Capítulo 2, por lo que durante la campaña de medición de 2024 no existían elementos capacitivos en servicio capaces de producir amplificación por resonancia. En segundo lugar, los valores medidos corresponden al percentil 95 de cada orden a lo largo de la campaña, mientras que los del modelo corresponden a un punto de operación determinístico, por lo que parte de la diferencia se atribuye a la distinta naturaleza estadística de ambas magnitudes. La brecha observada, sin embargo, excede lo explicable por este último efecto en combinación con la dilución por cargas lineales.

La diferencia resulta consistente con los factores que determinan el espectro real de un accionamiento: el nivel de carga del variador, la presencia o ausencia de reactor de línea o de enlace de continua, y la impedancia de la red aguas arriba. Ninguno de estos factores está representado en un espectro genérico de catálogo, que corresponde a una condición de referencia del fabricante y no a la configuración específica de cada equipo instalado.

Entradas del modelo armónico y limitaciones declaradas

Con el fin de permitir la reconstrucción del caso por un tercero, se declaran las entradas efectivamente empleadas en la representación de las cargas no lineales:

- **Origen del espectro:** biblioteca de ETAP, opción *Use Library Data*. No se empleó la formulación analítica alternativa disponible en el software.
- **Modelo de carga:** fuente de corriente armónica, fabricante Rockwell, modelo variador de frecuencia de seis pulsos.

- **Magnitudes por orden:** 23,52 % en el orden 5; 6,08 % en el 7; 4,56 % en el 11; 4,19 % en el 13; 1,80 % en el 17; 1,37 % en el 19; 0,75 % en el 23; 0,55 % en el 25; 0,49 % en el 29 y 0,53 % en el 31, referidas a la corriente fundamental de cada variador.
- **Ángulos de fase:** la biblioteca no proporciona información de ángulo por orden. El modelo opera únicamente con magnitudes, por lo que no representa cancelaciones ni refuerzos por diferencia de fase entre variadores.
- **Tratamiento de fases:** equilibrado. El modelo asigna idéntico espectro a las tres fases, mientras que la medición registra diferencias entre líneas de hasta 4,25 pp en el quinto armónico de CCM7.
- **Interarmónicos:** no considerados.
- **Rango espectral:** los espectros exportados abarcan hasta el orden 31, mientras que el rango normativo se extiende hasta el orden 50.

Estas limitaciones acotan el alcance de los resultados obtenidos. El modelo permite comparar alternativas de mitigación entre sí sobre una base común y establecer el orden de magnitud de la capacidad de compensación requerida, pero no reproduce el contenido armónico específico de los accionamientos instalados. En consecuencia, y considerando que el equipo asociado a CCM7 resulta dimensionado en su capacidad nominal sin reserva demostrada según se establece en el Capítulo 7, se declara que existe un riesgo de que la capacidad de compensación requerida en terreno supere la determinada por simulación. Este riesgo no puede cuantificarse con los antecedentes disponibles y deberá evaluarse mediante mediciones posteriores a la implementación.

6.3. Escenario proyectado sin mitigación

El primer caso evaluado corresponde al escenario proyectado sin filtros activos de potencia. Este escenario permite estimar la condición armónica esperada del sistema ante la incorporación de nuevas cargas, la redistribución de cargas considerada en la modelación y la operación de una mayor cantidad de cargas no lineales asociadas a variadores de frecuencia.

Los resultados de este caso constituyen la referencia base para evaluar el desempeño de las alternativas de mitigación. En particular, permiten identificar los niveles de THD_v y TDD que se obtendrían si el sistema operara bajo la condición proyectada sin incorporar medidas adicionales de compensación

armónica.

Tabla 6.9: Resultados del escenario proyectado sin mitigación

Punto	THD_v [%]	Lím. THD_v [%]	TDD [%]	Lím. TDD [%]	Estado
SEU Nº 22 BT	10,08	8	20,15	5	No cumple
CCM6	10,57	8	18,79	8	No cumple
CCM7	10,74	8	21,28	8	No cumple

*Nota: La TDD se expresa respecto de las corrientes de demanda del escenario proyectado obtenidas del flujo de carga (*2249 A *en la SEU Nº 22,* 1022 A *en CCM6 y* 1227 A *en CCM7; ver Tabla 6.10 y Anexo A). La derivación de estos valores desde la salida de ETAP se detalla en la Sección 6.3.1.*

De acuerdo con la Tabla 6.9, el escenario proyectado sin mitigación presenta incumplimiento tanto en THD_v como en TDD en los tres puntos de evaluación. Esta condición confirma que el crecimiento y redistribución de cargas considerados incrementan la exigencia armónica del sistema, haciendo necesaria la incorporación de una solución de mitigación.

En particular, la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 presenta una THD_v de 10,08 %, superando el límite de 8 %. Desde el punto de vista de corriente, el incumplimiento es más crítico debido a que la TDD alcanza 20,15 % frente a un límite aplicable de 5 %. En CCM6 y CCM7 también se observan valores superiores a los límites definidos, tanto para tensión como para corriente. Las capturas de respaldo del modelo ETAP para este escenario se presentan en el Anexo B.

6.3.1. Bases de cálculo de la TDD y reconciliación entre escenarios

La TDD es un indicador relativo cuyo valor depende directamente de la corriente de demanda adoptada como denominador. Dado que en esta memoria conviven dos escenarios con corrientes de demanda distintas, corresponde identificar de forma explícita la base utilizada en cada caso y demostrar que ambos conjuntos de resultados son reconciliables.

Tabla 6.10: Corrientes de demanda I_L utilizadas como base de cálculo de la TDD

Base	**Fuente y fecha**	**SEU [A]**	**CCM6 [A]**	**CCM7 [A]**
I_L del escenario de referencia	Corriente fundamental del caso de referencia P95 en ETAP; instalación existente	1838,51	760,06	1078,47
I_L del escenario proyectado	Flujo de carga del escenario proyectado en ETAP; condición futura modelada	2249	1022	1227

Nota: Cada escenario se evalúa exclusivamente sobre su propia corriente de demanda. La base del escenario de referencia se emplea únicamente en el contraste del modelo de la Sección 6.2. La base proyectada se emplea en toda la evaluación normativa de los Capítulos 6 y 7, y es la que define los límites aplicables mediante la relación I_{SC}/I_L. El respaldo del flujo de carga proyectado se presenta en el Anexo A.

Obtención de la corriente armónica desde la salida de ETAP

ETAP reporta para cada rama la corriente eficaz total I_{rms} y la distorsión armónica total de corriente THD_i, esta última referida a la componente fundamental. Dado que la corriente eficaz total satisface

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{H} I_h^2} = I_1\sqrt{1 + \mathrm{THD}_i^2} \tag{6.1}$$

la componente fundamental y la corriente armónica agregada I_H se obtienen como

$$I_1 = \frac{I_{rms}}{\sqrt{1 + \mathrm{THD}_i^2}} \qquad \text{y} \qquad I_H = I_1 \cdot \mathrm{THD}_i \tag{6.2}$$

de donde la distorsión total de demanda resulta

$$\mathrm{TDD} = \frac{I_H}{I_L} \tag{6.3}$$

La distinción entre las Ecuaciones (6.2) y (6.3) es esencial: THD_i y TDD comparten numerador, pero difieren en el denominador. El primero se refiere

a la fundamental efectivamente circulante y el segundo a la corriente de demanda adoptada como referencia normativa.

Tabla 6.11: Derivación de la corriente armónica agregada del escenario proyectado sin mitigación a partir de la salida de ETAP

Punto	I_{rms} **[A]**	THD_i **[%]**	I_1 **[A]**	I_H **[A]**	I_L **proy. [A]**
SEU N° 22 BT	2306	20,04	2261,04	453,11	2249
CCM6	1041	18,78	1023,11	192,14	1022
CCM7	1265	21,09	1237,77	261,05	1227

Nota: I_{rms} *y* THD_i *corresponden a valores reportados directamente por ETAP para el escenario proyectado sin mitigación;* I_1 *e* I_H *se obtienen mediante la Ecuación* (6.2)*. Dado que ETAP reporta* I_{rms} *redondeada al ampere, la incertidumbre asociada a* I_H *es del orden de* 0,05 %*.*

Aplicando la Ecuación (6.3) con la base proyectada se obtiene 20,15 % en la barra de baja tensión de la SEU N° 22, 18,80 % en CCM6 y 21,28 % en CCM7, valores que reproducen los de la Tabla 6.9. La única diferencia corresponde a CCM6, donde el recálculo entrega 18,80 % frente al 18,79 % tabulado, discrepancia de 0,01 pp atribuible al redondeo de I_{rms} al ampere entero.

Verificación del balance de corriente armónica en la barra

Dado que CCM6 y CCM7 constituyen la totalidad de la carga alimentada desde la barra de baja tensión de la SEU N° 22, las corrientes derivadas permiten verificar el balance de la barra de forma independiente. La suma de las componentes fundamentales de ambos centros alcanza 2260,88 A frente a los 2261,04 A obtenidos en la barra, con una diferencia de −0,007 %. La suma de las corrientes armónicas agregadas alcanza 453,19 A frente a 453,11 A en la barra, con una diferencia de 0,016 %.

Este resultado tiene dos lecturas. Por una parte, tres corridas independientes del análisis de flujo armónico cierran el balance de corriente de la barra con un error inferior al 0,02 %, lo que constituye una verificación de consistencia interna del conjunto de resultados. Por otra parte, el hecho de que las corrientes armónicas de ambos centros se sumen de forma prácticamente aritmética indica que no existe cancelación apreciable entre ellas. Este comportamiento es coherente con que ambos centros concentran cargas alimentadas mediante variadores de frecuencia de 6 pulsos, cuyos espectros

característicos presentan órdenes y ángulos de fase similares, por lo que sus contribuciones armónicas se superponen en lugar de compensarse.

Comparación entre el escenario de referencia y el escenario proyectado

La Tabla 6.12 compara ambos escenarios, cada uno evaluado sobre su propia corriente de demanda. Esta comparación permite separar el efecto del crecimiento del contenido armónico absoluto del efecto del crecimiento de la demanda.

Tabla 6.12: Comparación entre el escenario de referencia y el escenario proyectado sin mitigación

	Escenario de referencia		**Escenario proyectado**		
Punto	I_H **[A]**	I_L **[A]**	I_H **[A]**	I_L **[A]**	ΔI_H
SEU Nº 22 BT	371,07	1838,51	453,11	2249	+22,1 %
CCM6	140,83	760,06	192,14	1022	+36,4 %
CCM7	230,24	1078,47	261,05	1227	+13,4 %

Nota: La TDD resultante es de 20,18 %, 18,53 % *y* 21,35 % *en el escenario de referencia, y de* 20,15 %, 18,80 % *y* 21,28 % *en el escenario proyectado. Únicamente los valores del escenario proyectado son comparables con los límites normativos de la Tabla 5.5.*

De la Tabla 6.12 se desprende un punto que conviene subrayar para la interpretación de los resultados de esta memoria. El escenario proyectado incrementa la corriente armónica absoluta en un 22,1 % en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, pero la corriente de demanda crece en una proporción prácticamente idéntica, de un 22,3 %. En consecuencia, la TDD permanece esencialmente constante entre ambos escenarios, pese a que la exigencia armónica sobre el sistema aumenta de forma significativa.

Este comportamiento ilustra una limitación intrínseca de la TDD como indicador de seguimiento: al tratarse de un cociente, un aumento proporcional de numerador y denominador no se refleja en su valor. La estabilidad del indicador no debe interpretarse, por lo tanto, como ausencia de deterioro de la condición armónica. El deterioro efectivo se manifiesta en el crecimiento de la corriente armónica absoluta, que es la magnitud que determina el dimensionamiento de la capacidad de compensación requerida.

Por esta razón, y para evitar que una misma etiqueta designe magnitudes calculadas sobre bases distintas, en esta memoria la TDD de cada escena-

rio se reporta exclusivamente sobre la corriente de demanda de ese mismo escenario. La base del escenario de referencia no vuelve a utilizarse en la evaluación de alternativas de mitigación.

Consistencia entre la corriente de flujo de carga y la de flujo armónico

Corresponde precisar una diferencia menor entre ambas corridas del modelo. La corriente I_L adoptada como base normativa proviene del estudio de flujo de carga del escenario proyectado, mientras que la componente fundamental I_1 derivada en la Tabla 6.11 proviene del estudio de flujo armónico del mismo escenario. Ambos valores difieren en 0,53 % en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, en 0,11 % en CCM6 y en 0,88 % en CCM7. Esta diferencia se explica porque el flujo armónico resuelve la red considerando la inyección de corrientes armónicas de las cargas no lineales, lo que modifica levemente el punto de operación respecto de la solución de flujo de carga a frecuencia fundamental.

Se mantiene como base normativa la corriente de flujo de carga, por corresponder a la magnitud que representa la demanda del sistema con independencia del contenido armónico, y por ser la que respalda las relaciones I_{SC}/I_L documentadas. La diferencia observada es inferior al 1 % y no modifica la banda normativa aplicable en ninguno de los tres puntos evaluados.

6.4. Alternativas evaluadas

A partir del escenario proyectado sin mitigación, se analizaron alternativas de filtros activos conectados en configuración centralizada y distribuida. El objetivo de esta etapa es identificar la influencia de la ubicación y de la capacidad nominal de compensación sobre la reducción de $\mathrm{THD_v}$ y TDD.

Las alternativas consideradas se resumen en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13: Alternativas de mitigación evaluadas

Alternativa	**Configuración**	**Descripción**
Sin mitigación	Sin filtro	Escenario proyectado base
Centralizada 400 A	APF de 400 A en barra BT de SEU Nº 22	Compensación desde barra principal
Centralizada 500 A	APF de 500 A en barra BT de SEU Nº 22	Compensación desde barra principal
Centralizada 600 A	APF de 600 A en barra BT de SEU Nº 22	Sensibilidad respecto de 500 A
Distribuida 250+300 A	APF de 250 A en CCM6 y 300 A en CCM7	Compensación cercana a cargas no lineales

La alternativa centralizada permite evaluar el efecto de compensar la corriente armónica resultante desde la barra común de baja tensión de la SEU Nº 22. En cambio, la alternativa distribuida permite evaluar el efecto de compensar directamente en los centros donde se concentran las principales fuentes armónicas.

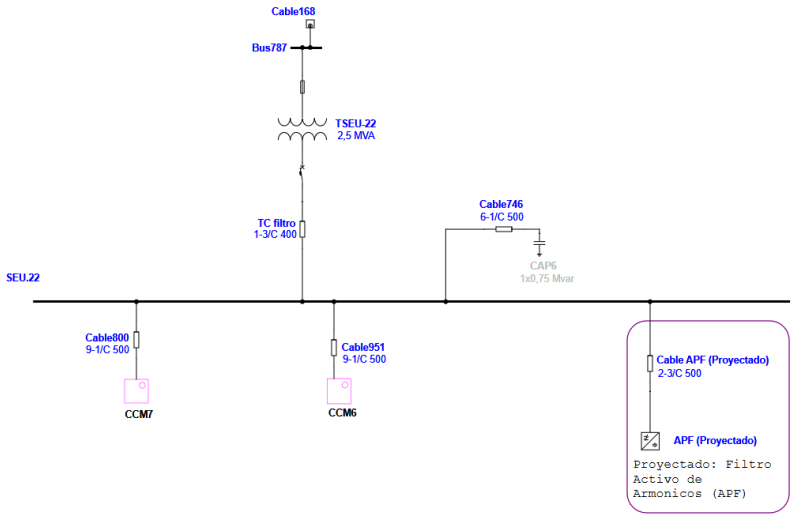
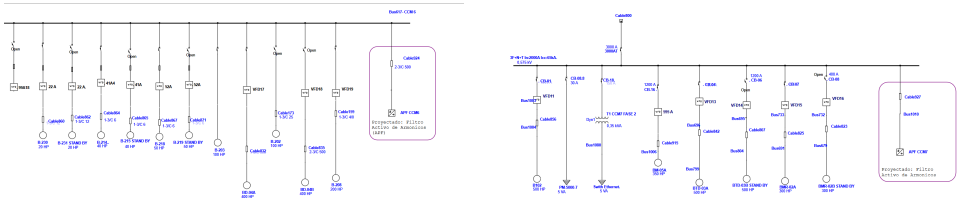


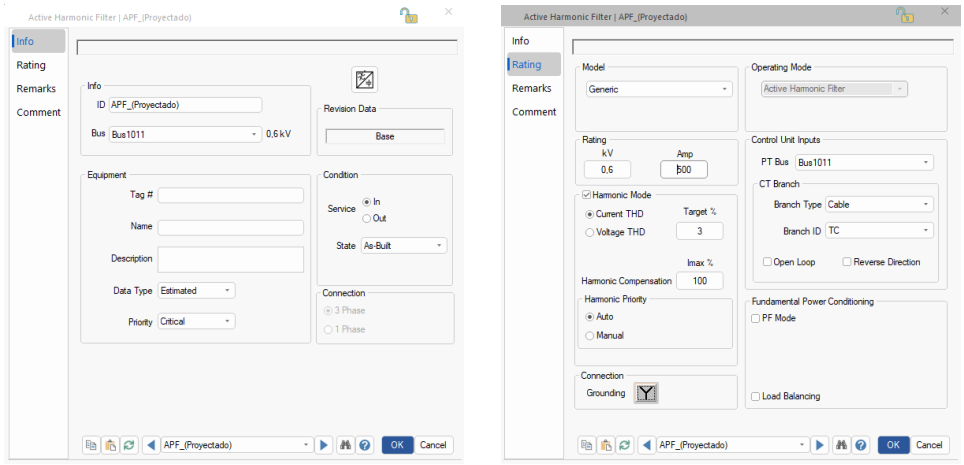
Figura 6.1: Conexión del filtro activo centralizado en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22.



Filtro activo en CCM6. Filtro activo en CCM7.

Figura 6.2: Configuración distribuida de filtros activos en CCM6 y CCM7.

Adicionalmente, se utilizó el modelo genérico de filtro activo disponible en ETAP. La Figura 6.3 muestra la configuración general del equipo y los parámetros de operación armónica definidos en el software. Para cada alternativa, la capacidad nominal del filtro fue ajustada según la corriente de compensación evaluada, manteniendo la tensión nominal de 0,6 kV y la operación en modo armónico.



Datos generales de conexión del filtro activo. Parámetros de operación armónica del filtro activo.

Figura 6.3: Configuración del filtro activo genérico utilizado en ETAP.

6.5. Resultados de THD_v por alternativa

En la Tabla 6.14 se presenta la comparación de THD_v máxima para el escenario proyectado sin mitigación y para las alternativas de filtros activos evaluadas.

Tabla 6.14: Comparación de THD_v máxima para alternativas de mitigación

Punto	Sin APF	Cent. 400 A	Cent. 500 A	Cent. 600 A	Dist. 250+300 A
SEU N° 22 BT	10,08	6,97	4,09	4,09	4,10
CCM6	10,57	7,36	4,41	4,41	4,26
CCM7	10,74	7,50	4,53	4,53	4,31

Nota: Todos los valores corresponden a THD_v en porcentaje. La alternativa centralizada de 600 A se considera como sensibilidad, ya que presentó resultados equivalentes a la alternativa de 500 A.

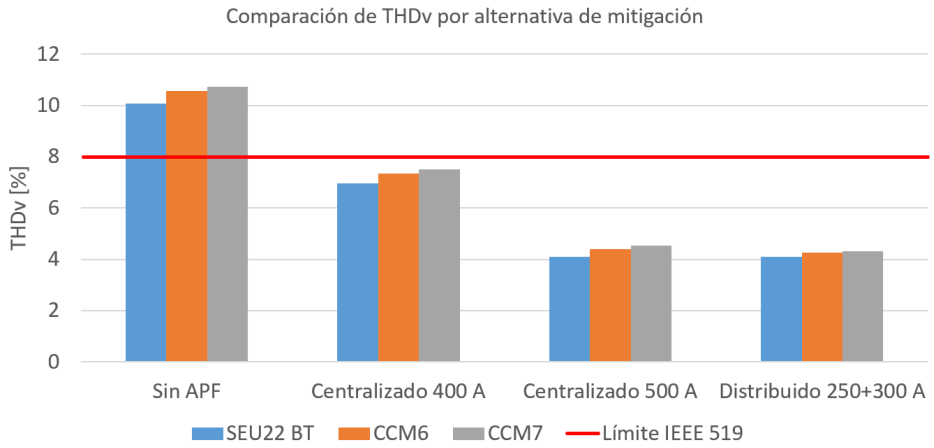


Figura 6.4: Comparación de THD_v para las alternativas principales de mitigación evaluadas.

Los resultados muestran que todas las alternativas con filtro activo permiten reducir la THD_v bajo el límite de 8 % en los tres puntos evaluados. La alternativa centralizada de 400 A corrige la condición de incumplimiento, aunque mantiene valores más cercanos al límite, entre 6,97 % y 7,50 %.

La alternativa centralizada de 500 A presenta una reducción más significativa de la distorsión de tensión, alcanzando valores cercanos a 4 %. La sensibilidad de 600 A no presenta mejoras apreciables respecto de 500 A, por lo que no se justifica técnicamente como una mejora directa bajo la configuración de simulación evaluada.

Por su parte, la alternativa distribuida de 250 A en CCM6 y 300 A en CCM7 presenta resultados de THD_v similares a la alternativa centralizada de 500 A, con valores de 4,10 % en la barra de baja tensión de la SEU N° 22, 4,26 % en CCM6 y 4,31 % en CCM7. Las capturas de respaldo de ETAP

para cada una de estas alternativas se presentan en el Anexo B.

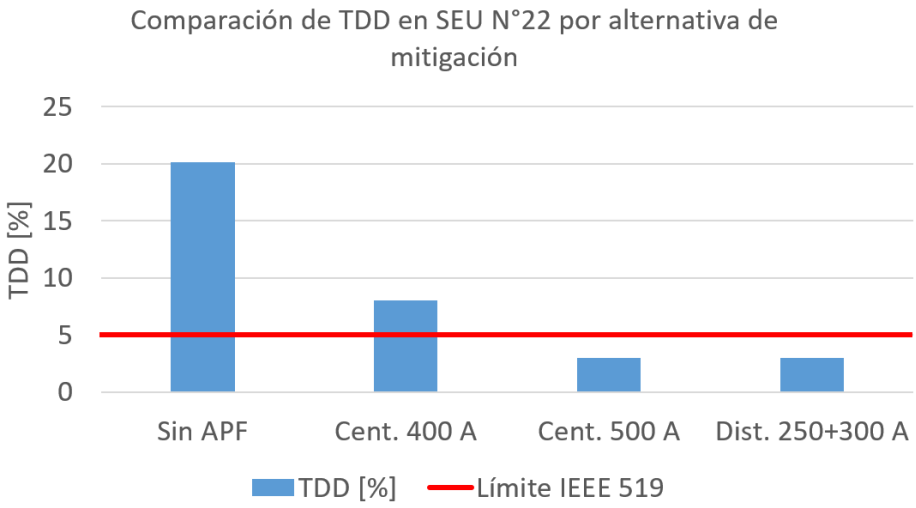
6.6. Resultados de TDD por alternativa

En la Tabla 6.15 se presenta la comparación de TDD para las alternativas evaluadas. En esta tabla se utiliza el criterio normativo definido en el Capítulo 5, es decir, las corrientes de demanda del escenario proyectado y los límites de TDD aplicables a cada punto de evaluación.

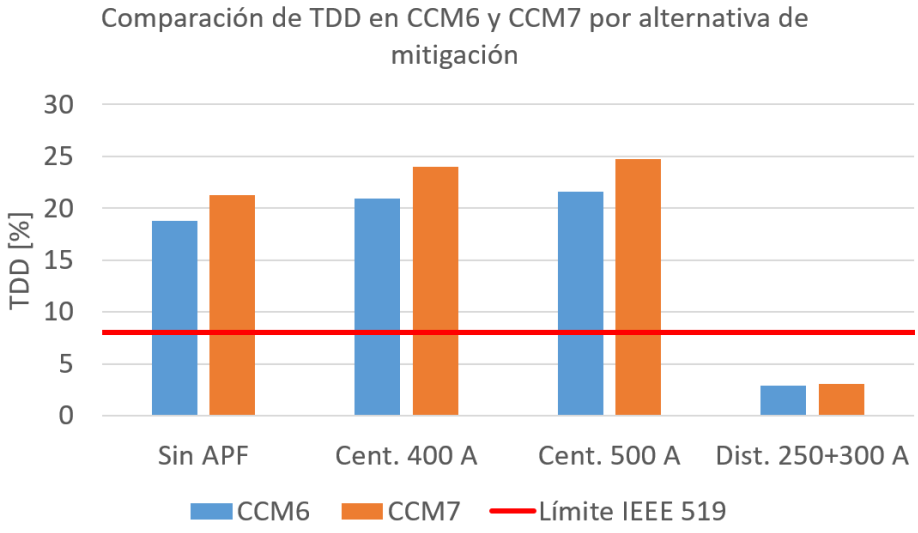
Tabla 6.15: Comparación de TDD para alternativas de mitigación

Punto	**Lím.**	**Sin APF**	**Cent. 400 A**	**Cent. 500 A**	**Cent. 600 A**	**Dist. 250+300 A**
SEU N° 22 BT	5	20,15	8,05	2,98	2,98	2,99
CCM6	8	18,79	20,89	21,60	21,60	2,94
CCM7	8	21,28	24,02	24,75	24,75	3,04

*Nota: Todos los valores corresponden a TDD en porcentaje, expresados respecto de las corrientes de demanda del escenario proyectado obtenidas del flujo de carga (*2249 A *en la SEU N° 22,* 1022 A *en CCM6 y* 1227 A *en CCM7), base consistente con los límites definidos mediante la relación I_{SC}/I_L en la Tabla 5.5.*



Comparación de TDD en la barra de baja tensión de la SEU N° 22.



Comparación de TDD en CCM6 y CCM7.

Figura 6.5: Comparación de TDD para las alternativas de mitigación evaluadas.

Los resultados muestran que la alternativa centralizada reduce de manera significativa la TDD vista desde la barra de baja tensión de la SEU N° 22. En particular, la alternativa centralizada de 500 A reduce la TDD en dicho

punto hasta aproximadamente 2,98 %, quedando bajo el límite aplicable de 5 %. Sin embargo, esta configuración no reduce la TDD local en CCM6 y CCM7, debido a que las principales fuentes armónicas se encuentran aguas abajo del punto de compensación.

Este comportamiento no debe interpretarse como una falla del filtro centralizado, sino como una consecuencia de su ubicación eléctrica. Al instalarse en la barra principal de baja tensión de la SEU Nº 22, el filtro activo reduce la corriente armónica vista desde la subestación y contribuye a controlar la distorsión de tensión del sistema. No obstante, las corrientes armónicas siguen circulando localmente por los alimentadores principales y barras de los centros de control de motores antes de ser compensadas en el punto común.

En cambio, la alternativa distribuida reduce la TDD tanto en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 como en los centros de control de motores. En este caso, la TDD alcanza aproximadamente 2,99 % en SEU Nº 22, 2,94 % en CCM6 y 3,04 % en CCM7, cumpliendo con los límites aplicables en los tres puntos evaluados.

6.7. Comparación técnica de alternativas

La comparación técnica muestra que las alternativas centralizadas y distribuidas tienen efectos distintos sobre el sistema. Desde el punto de vista de THD_v, tanto la alternativa centralizada de 500 A como la alternativa distribuida de 250 A+300 A logran reducciones similares, llevando la distorsión de tensión a valores cercanos a 4 %.

Sin embargo, al analizar la TDD, se observa una diferencia importante. La alternativa centralizada de 500 A cumple el límite de TDD en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, pero no en los centros de control de motores CCM6 y CCM7. En cambio, la alternativa distribuida cumple simultáneamente con los límites de TDD en los tres puntos evaluados.

Tabla 6.16: Evaluación comparativa de alternativas

Alternativa	**Cumplimiento THD_v**	**Cumplimiento TDD**	**Observación principal**
Centralizada 400 A	Cumple	No cumple en SEU, CCM6 y CCM7	Reduce tensión, pero con menor margen
Centralizada 500 A	Cumple	Cumple en SEU, no cumple en CCM6 ni CCM7	Buena para barra común, limitada localmente
Centralizada 600 A	Cumple	Similar a 500 A	No entrega mejora apreciable
Distribuida 250+300 A	Cumple	Cumple en SEU, CCM6 y CCM7	Mejor desempeño local

De acuerdo con la Tabla 6.16, la alternativa distribuida presenta el mejor desempeño técnico global, ya que permite cumplir simultáneamente los límites de THD_v y TDD en los tres puntos de evaluación. Esta condición se explica por la ubicación de los filtros activos directamente en los centros de carga, lo que permite reducir la circulación local de corrientes armónicas.

La alternativa centralizada de 500 A, en cambio, resulta técnicamente adecuada si el objetivo principal es controlar la distorsión armónica de tensión y reducir la corriente armónica vista desde la barra de baja tensión de la SEU Nº 22. No obstante, si se exige cumplimiento de TDD también en las barras internas CCM6 y CCM7, la solución centralizada no resulta suficiente desde el punto de vista local.

6.8. Análisis de los resultados no intuitivos de las simulaciones

La comparación de alternativas presenta cuatro resultados que no resultan evidentes a partir de la sola capacidad nominal de los equipos y que, por lo tanto, requieren un análisis específico. Esta sección los examina a partir de las corrientes efectivamente inyectadas por cada filtro, obtenidas de los espectros exportados desde ETAP.

6.8.1. Capacidad, saturación y objetivo de control en las alternativas centralizadas

Las alternativas centralizadas de 500 A y 600 A entregan resultados idénticos a dos decimales en los tres puntos de evaluación, mientras que la de 400 A presenta un desempeño marcadamente inferior. La Tabla 6.17 compara la corriente efectivamente inyectada por el filtro en las tres alternativas.

Tabla 6.17: Corriente inyectada por el filtro centralizado según su capacidad nominal

Orden	**Filtro** 400 A **[A]**	**Filtro** 500 A **[A]**	**Filtro** 600 A **[A]**
5	399,998	470,082	470,082
7	—	98,341	98,341
11	—	66,047	66,047
13	—	58,137	58,137
17	—	6,997	6,997
Total (RSS)	**399,998**	**488,302**	**488,302**
Utilización	100,00 %	97,66 %	81,38 %
Reserva	0,002 A	11,70 A	111,70 A
Estado	Saturado	No saturado	No saturado

Nota: Corrientes obtenidas del espectro del filtro exportado desde ETAP, expresado por el software como porcentaje de la capacidad nominal de compensación del equipo. La utilización se calcula respecto de dicha capacidad. El símbolo — indica que el orden no es compensado por el equipo.

La Tabla 6.17 permite explicar los dos comportamientos observados. El equipo de 400 A opera en saturación: alcanza el 100,00 % de su capacidad concentrando la totalidad de su corriente en el quinto armónico, sin compensar los órdenes 7, 11, 13 y 17. Su capacidad resulta insuficiente para alcanzar el objetivo de control, lo que se traduce en una TDD de 8,05 % en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22.

Los equipos de 500 A y 600 A, en cambio, inyectan la misma corriente orden por orden, con diferencias inferiores a 0,001 A, y compensan los cinco órdenes característicos. Ninguno opera en saturación, ya que el primero conserva 11,70 A de reserva y el segundo 111,70 A. Ambos alcanzan su objetivo de control antes de agotar su capacidad, de modo que la capacidad adicional del equipo de 600 A permanece sin utilizar y no produce mejora alguna en los resultados.

La serie delimita con precisión el punto en que la capacidad deja de ser restrictiva: la capacidad requerida para alcanzar el objetivo de control se sitúa entre 400 A y 500 A, y todo incremento por sobre 500 A resulta inefectivo.

6.8.2. Aumento de la TDD local en las alternativas centralizadas

Las alternativas centralizadas reducen de forma sustancial la TDD en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, pero incrementan la TDD local en CCM6 y CCM7. La Tabla 6.18 expresa este comportamiento en términos de corriente armónica absoluta, magnitud que permite interpretarlo sin el efecto del denominador.

Tabla 6.18: Corriente armónica agregada por punto y alternativa de mitigación

Alternativa	**SEU Nº 22 BT [A]**	**CCM6 [A]**	**CCM7 [A]**
Sin filtrado activo	453,17	192,03	261,11
Centralizada 400 A	181,04	213,50	294,73
Centralizada 500 A	67,02	220,75	303,68
Centralizada 600 A	67,02	220,75	303,68
Distribuida 250 A + 300 A	67,25	30,05	37,30

Nota: Corriente armónica agregada obtenida como el producto entre la TDD de la Tabla 6.15 y la corriente de demanda del escenario proyectado en cada punto.

El comportamiento admite dos componentes. La primera es de carácter topológico y no requiere hipótesis adicionales: el filtro centralizado se conecta en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, de modo que las corrientes armónicas generadas por las cargas de cada centro de control de motores circulan íntegramente por sus respectivos alimentadores antes de alcanzar el punto de compensación. La TDD local no puede reducirse mediante un equipo situado aguas arriba del punto de medición.

La segunda componente explica el incremento observado. El filtro de 500 A inyecta 488,302 A, valor superior en un 7,8 % a los 453,17 A de corriente armónica agregada que presenta el sistema sin mitigación en la barra. La corriente inyectada en un nudo se distribuye entre todas las ramas conectadas a él según sus impedancias a cada frecuencia, por lo que una fracción de la inyección del filtro circula hacia los alimentadores de CCM6

y CCM7 en lugar de hacia el transformador. Los incrementos observados en ambos centros suman 71,30 A, magnitud del mismo orden que el exceso de inyección respecto de la corriente armónica de las cargas. Este mecanismo se plantea como explicación consistente con los resultados obtenidos y no como demostración, ya que su verificación requeriría el detalle de la distribución de corriente por rama a cada frecuencia.

Corresponde señalar que este comportamiento resulta coherente con la ausencia de cancelación armónica entre ambos centros verificada en la Sección 6.3.1, donde la suma de las corrientes armónicas de CCM6 y CCM7 reproduce la de la barra con un error inferior al 0,02 %. Al no existir compensación mutua entre los centros, la totalidad de la corriente armónica de cada uno debe circular por su alimentador.

La alternativa distribuida no presenta este comportamiento, ya que compensa las corrientes armónicas en el mismo punto donde se generan: reduce la corriente armónica local en un 84,4 % en CCM6 y en un 85,7 % en CCM7, manteniendo simultáneamente la reducción en la barra de baja tensión.

6.8.3. Desempeño del modo automático frente a la alternativa distribuida

Dos filtros de 270 A en modo automático entregan un desempeño inferior al de la alternativa distribuida de 250 A más 300 A, pese a disponer de una capacidad total comparable. La Tabla 6.19 presenta la corriente inyectada y el estado de cada equipo.

Tabla 6.19: Corriente inyectada, utilización y órdenes compensados por configuración

Equipo y configuración	**Inyecta [A]**	**Util. [%]**	**Reserva [A]**	**Órdenes**
CCM6 270 A automático	207,784	76,96	62,216	5, 7, 11, 13, 17
CCM7 270 A automático	269,999	100,00	0,001	5
CCM6 250 A distribuido	208,541	83,42	41,459	5, 7, 11, 13, 17
CCM7 300 A distribuido	284,885	94,96	15,115	5, 7, 11, 13, 17

El resultado se explica por la saturación del equipo asociado a CCM7. En la configuración distribuida, dicho equipo requiere 284,885 A para compensar los cinco órdenes característicos. Un equipo de 270 A no dispone de dicha capacidad: la diferencia es de 14,886 A, equivalente a un 5,5 %. Al alcanzar

su límite, el algoritmo automático concentra la totalidad de la capacidad disponible en el quinto armónico y deja sin compensar los órdenes 7, 11, 13 y 17, lo que se traduce en una TDD de 8,14 % en CCM7 frente al 3,04 % de la alternativa distribuida.

Este comportamiento es idéntico al observado en la alternativa centralizada de 400 A, la cual también concentra la totalidad de su capacidad en el quinto armónico al saturarse. Se trata, por lo tanto, de una característica del criterio de priorización del modelo de control empleado ante una condición de capacidad insuficiente, y no de un comportamiento particular de un caso aislado.

La diferencia de desempeño no responde, en consecuencia, a la capacidad total instalada, que es prácticamente equivalente entre ambas configuraciones, sino a su distribución entre centros. La alternativa distribuida asigna la capacidad de modo que ningún equipo opere en saturación, mientras que la configuración simétrica de 270 A deja al equipo de mayor exigencia por debajo de su requerimiento.

6.8.4. Acoplamiento entre los equipos a través de la barra común

El ajuste del modo de operación del filtro de CCM7 modifica levemente la TDD de CCM6. Este efecto se verifica en la corriente inyectada por el equipo de CCM6, que alcanza 207,784 A cuando el filtro de CCM7 opera en modo automático y 207,423 A cuando lo hace en modo manual selectivo, con una diferencia de 0,361 A equivalente al 0,17 %.

El mecanismo es el esperable en una topología de barra común: la corriente armónica compensada por el filtro de CCM7 modifica la distorsión de tensión de la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, la cual constituye a su vez la condición de contorno del filtro de CCM6. Ambos equipos operan por lo tanto sobre un sistema acoplado y no de forma independiente. La magnitud del efecto es reducida y no altera las conclusiones de la comparación, pero corresponde declararlo para evitar que la variación observada sea interpretada como una inconsistencia del modelo.

6.9. Selección preliminar de configuración

A partir de la comparación realizada, se considera técnicamente conveniente priorizar una configuración distribuida de mitigación armónica, con

filtros activos conectados en CCM6 y CCM7. Esta selección preliminar se basa en la localización de las cargas no lineales, la posibilidad de reducir la circulación de corrientes armónicas desde su origen y el cumplimiento simultáneo de los indicadores THD_v y TDD en los puntos evaluados.

La configuración distribuida también resulta coherente con la estructura eléctrica de la SEU Nº 22, debido a que la subestación alimenta los centros CCM6 y CCM7, donde se concentra la mayor parte de las cargas no lineales asociadas a variadores de frecuencia. Por lo tanto, instalar filtros activos en ambos centros permite tratar la problemática armónica desde los puntos donde se origina la mayor parte de la distorsión.

No obstante, la selección preliminar no debe interpretarse como una definición comercial definitiva de capacidad. Las simulaciones de este capítulo permiten identificar que una estrategia distribuida presenta ventajas técnicas respecto de una estrategia centralizada, especialmente en la reducción de TDD local. En una etapa posterior se debe validar una solución comercial específica, considerando la corriente nominal disponible por equipo, la lógica de control, la capacidad de compensación efectiva y las condiciones reales de implementación.

6.10. Síntesis del capítulo

El escenario proyectado sin mitigación presenta incumplimientos en los indicadores THD_v y TDD en los puntos principales de evaluación, lo que confirma la necesidad de implementar una solución de mitigación armónica.

Las alternativas centralizadas permiten reducir la distorsión armónica de tensión desde la barra principal de baja tensión de la SEU Nº 22. En particular, la alternativa de 500 A logra controlar la THD_v y reducir la TDD vista desde la subestación. Sin embargo, esta configuración no reduce de forma suficiente la TDD local en CCM6 y CCM7, debido a que las corrientes armónicas siguen circulando en los alimentadores y barras de dichos centros antes de ser compensadas en el punto común.

Por otra parte, la alternativa distribuida permite compensar las corrientes armónicas directamente en los centros de control de motores, obteniendo niveles de THD_v similares a los de la alternativa centralizada de 500 A, pero con una reducción significativamente mayor de la TDD local. Por esta razón, se selecciona preliminarmente una estrategia distribuida como alternativa más adecuada desde el punto de vista técnico.

En consecuencia, el Capítulo 7 desarrolla la evaluación por simulación de una configuración de capacidad nominal equivalente a la solución comercial seleccionada, mediante filtros activos de 270 A por centro, considerando su desempeño frente a los límites de THD_v, TDD y armónicos individuales definidos previamente.

Capítulo 7

Evaluación por simulación de una configuración de filtrado activo de 270 A

En el Capítulo 6 se compararon distintas alternativas de mitigación armónica, concluyéndose que una estrategia distribuida presenta el mejor desempeño técnico global, especialmente en la reducción de la distorsión de corriente local en CCM6 y CCM7. A partir de dicha conclusión, el presente capítulo desarrolla la evaluación por simulación de una configuración de filtrado activo compuesta por dos equipos de 270 A, instalados en forma distribuida en los centros de control de motores asociados a la SEU Nº 22.

Corresponde precisar el alcance de esta evaluación. El análisis se realiza sobre una configuración genérica de filtrado activo, de capacidad nominal equivalente a la alternativa seleccionada en el Capítulo 9. El filtro se representa mediante el modelo genérico disponible en ETAP, parametrizado según la capacidad de compensación declarada en la oferta, y no mediante un modelo del control específico del equipo comercial. En consecuencia, los resultados permiten establecer si una capacidad de compensación de 270 A por centro de control de motores resulta suficiente para alcanzar los objetivos de mitigación en el escenario simulado, pero no constituyen una validación del desempeño del equipo del Proveedor A, cuyo comportamiento depende de su estrategia de control, de sus límites internos y de sus tolerancias de fabricación. La verificación del desempeño del equipo efectivamente instalado deberá realizarse mediante mediciones posteriores a la puesta en marcha.

El objetivo de esta evaluación es verificar si una capacidad de compensación de 270 A por centro permite cumplir simultáneamente los límites de THD_v, TDD y armónicos individuales definidos previamente para el escenario proyectado. Para ello, se evalúan tres condiciones de operación: el escenario proyectado sin mitigación, la operación de dos filtros activos de 270 A en modo automático y una configuración final ajustada, manteniendo el filtro de CCM6 en modo automático y configurando el filtro de CCM7 en modo manual selectivo.

7.1. Antecedentes de alternativas comerciales recibidas

Durante el desarrollo del proyecto se recibieron distintas alternativas comerciales para la mitigación armónica mediante filtros activos de potencia. Estas alternativas presentan diferencias en fabricante, capacidad nominal, cantidad de equipos y forma de implementación propuesta. La Tabla 7.1 resume las alternativas recibidas, desde el punto de vista técnico general.

Tabla 7.1: Resumen de alternativas comerciales recibidas

Proveedor	**Cantidad**	**Capacidad total**	**Observación técnica**
Proveedor A	2 armarios	540 A	Solución distribuida de 270 A por centro
Proveedor B	3 equipos	840 A	Mayor capacidad total instalada
Proveedor C	1 equipo	100 A	Capacidad menor respecto de la requerida

A partir de los resultados obtenidos en el Capítulo 6, la alternativa distribuida resulta técnicamente más conveniente que una solución centralizada cuando se busca reducir tanto la distorsión armónica vista desde la barra de baja tensión de la SEU N° 22 como la distorsión de corriente local en CCM6 y CCM7. En este contexto, la alternativa compuesta por dos filtros activos de 270 A resulta coherente con la estrategia distribuida seleccionada preliminarmente, ya que considera la instalación de un equipo asociado a cada centro de carga.

El presente capítulo no desarrolla aún la comparación económica completa entre proveedores, sino que se concentra en evaluar por simulación el desempeño de una configuración distribuida de 270 A por centro. La compa-

ración económica y otros aspectos asociados a adquisición, implementación, repuestos y puesta en marcha se abordan posteriormente en el Capítulo 9.

7.2. Criterios de evaluación considerados

La evaluación técnica se realiza sobre el escenario proyectado de operación, el cual representa la condición de mayor exigencia armónica considerada en la memoria. Para el cálculo de la TDD se utilizan las corrientes de demanda obtenidas desde el flujo de carga del escenario proyectado, mientras que los límites de corriente se determinan a partir de la razón I_{SC}/I_L definida en el Capítulo 5.

La Tabla 7.2 resume las corrientes de demanda, corrientes de cortocircuito y límites de TDD aplicables en cada punto de evaluación.

Tabla 7.2: Criterios de evaluación utilizados para la evaluación de filtros activos de 270 A

Punto	I_L **[A]**	I_{SC} **[kA]**	I_{SC}/I_L	**Límite TDD [%]**
SEU N° 22 BT	2249	32	14,23	5
CCM6	1022	28	27,40	8
CCM7	1227	27	22,00	8

Nota: Las corrientes I_L provienen del flujo de carga del escenario proyectado (Anexo A) y corresponden a la base proyectada identificada en la Tabla 6.10. Toda la TDD reportada en este capítulo se expresa sobre esta misma base. Las corrientes I_{SC} corresponden a la corriente simétrica inicial de cortocircuito trifásico según IEC 60909, conforme a la Sección 5.8.2; el análisis de sensibilidad de la banda normativa aplicable a CCM7 se presenta en la Sección 5.8.3.

Corresponde reiterar que, conforme a lo establecido en el Capítulo 2, únicamente la barra de baja tensión de la SEU N° 22 constituye el punto de acoplamiento común. Las declaraciones de cumplimiento referidas a CCM6 y CCM7 en el presente capítulo corresponden al criterio interno de diseño adoptado en esta memoria, evaluado en el escenario proyectado y bajo los límites de IEEE Std. 519-2022 determinados en el Capítulo 5, y no constituyen una determinación normativa directa sobre el usuario.

De acuerdo con la Tabla 7.2, la barra de baja tensión de la SEU N° 22 posee un límite de TDD más exigente, igual a 5 %, debido a que su razón I_{SC}/I_L es menor a 20. En cambio, CCM6 y CCM7 se encuentran dentro del rango $20 \leq I_{SC}/I_L < 50$, por lo que el límite de TDD aplicable en ambos

centros es de 8 %.

Para la distorsión armónica total de tensión se mantiene el criterio utilizado en los capítulos anteriores:

$$\mathrm{THD}_v \leq 8\,\% \tag{7.1}$$

Adicionalmente, se revisan los armónicos individuales de corriente, especialmente en CCM7, debido a que en dicho centro se observa la condición más ajustada al evaluar inicialmente el filtro activo en modo automático.

7.3. Configuración de filtros activos evaluada

La solución evaluada considera dos filtros activos de potencia conectados en paralelo, uno en la barra de CCM6 y otro en la barra de CCM7. Cada equipo se modela en ETAP como un filtro activo genérico, con tensión nominal de 0,6 kV y corriente nominal de compensación de 270 A.

$$I_{APF} = 270\,\mathrm{A} \tag{7.2}$$

Esta corriente corresponde a la capacidad nominal de compensación armónica del filtro activo, y no debe interpretarse como la corriente total de carga del centro. El filtro inyecta corrientes armónicas de compensación en oposición a las componentes generadas por las cargas no lineales, reduciendo así la corriente armónica residual que circula por la red.

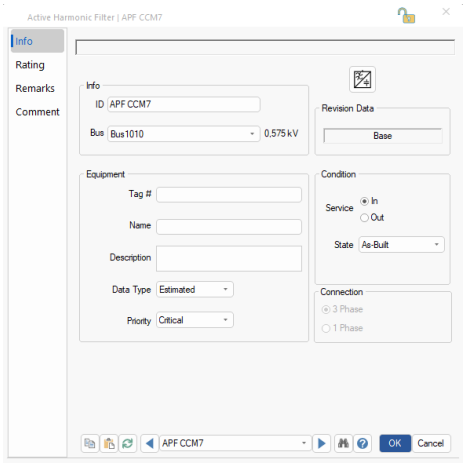
La Tabla 7.3 resume la configuración final evaluada.

Tabla 7.3: Configuración de filtros activos de 270 A evaluada

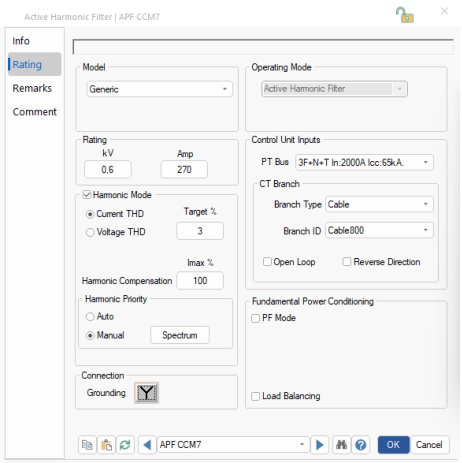
Barra	**Corriente APF [A]**	**Modo de control**	**Observación**
CCM6	270	Automático	No requiere priorización manual
CCM7	270	Manual selectivo	Requiere redistribución de compensación

En CCM6, el filtro activo de 270 A fue mantenido en modo automático, debido a que esta configuración permite reducir la distorsión armónica de tensión y corriente bajo los límites definidos. En CCM7, en cambio, se observó que el filtro operando en modo automático quedaba en una condición más exigente, por lo que se evaluó una configuración manual selectiva de armónicos.

La Figura 7.1 presenta la configuración general del filtro activo modelado en CCM7 y sus parámetros de operación armónica.



Datos generales de conexión del APF en CCM7.



Parámetros de operación armónica del APF en CCM7.

Figura 7.1: Configuración del filtro activo de 270 A asociado a CCM7 en ETAP.

La configuración manual utilizada en CCM7 considera la priorización de armónicos característicos de cargas con variadores de frecuencia de seis pulsos. Los órdenes considerados en el espectro manual se presentan en la Figura 7.2.

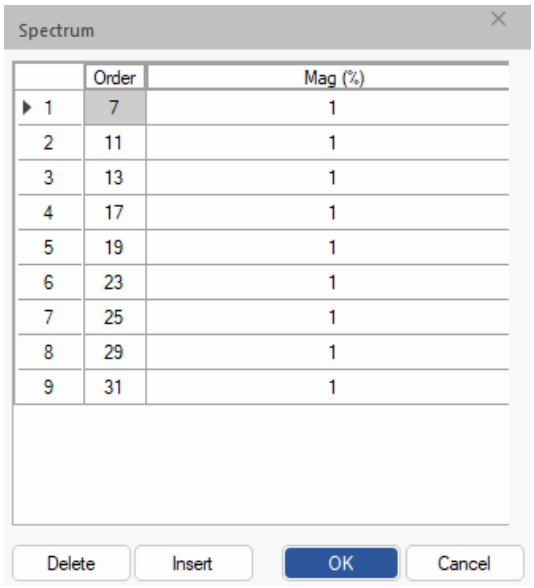


Figura 7.2: Órdenes armónicos considerados en la configuración manual selectiva del APF de CCM7.

La selección de estos órdenes debe interpretarse como una priorización dentro del modelo genérico de ETAP, y no como una exclusión absoluta de los armónicos no listados. En particular, aunque el quinto armónico no fue definido como orden explícito de prioridad en el espectro manual, esto no implica que su compensación quede anulada en el resultado final de la simulación.

El campo *Mag (%)* de la ventana de configuración (Figura 7.2) no corresponde a la magnitud de la corriente armónica presente en el sistema, sino a un factor de peso relativo que ETAP utiliza para distribuir la capacidad de compensación disponible entre los órdenes incluidos en la lista de priorización manual. Un valor de *Mag (%)* = 1 en los nueve órdenes ingresados (7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29 y 31) indica que todos ellos fueron definidos con igual peso relativo de priorización, y no que su magnitud de corriente armónica resultante sea idéntica entre sí; la magnitud efectiva de cada orden, antes y después de la compensación, se obtiene de los resultados de flujo armónico presentados en las tablas de este capítulo y en el Anexo C. Esta interpretación es consistente con el modo de operación selectivo del filtro genérico de ETAP y debe quedar respaldada citando la versión y el manual de usuario del software empleado.

7.4. Condiciones de simulación analizadas

La evaluación técnica considera tres condiciones de operación comparables entre sí:

- **Escenario proyectado sin APF:** corresponde al caso base sin mitigación armónica.
- **Dos APF de 270 A en modo automático:** considera un filtro activo de 270 A en CCM6 y otro de 270 A en CCM7, ambos operando en modo automático.
- **Configuración final de 270 A:** mantiene el filtro de CCM6 en modo automático y configura el filtro de CCM7 en modo manual selectivo.

La condición automática permite evaluar el desempeño inicial de una solución distribuida de 270 A por centro. Posteriormente, la configuración final permite verificar si una redistribución de la compensación armónica en CCM7 mejora el cumplimiento del indicador TDD y de los armónicos individuales.

7.5. Resultados con filtros activos de 270 A en modo automático

La Tabla 7.4 presenta los resultados obtenidos al incorporar dos filtros activos de 270 A en modo automático.

Tabla 7.4: Resultados armónicos con filtros activos de 270 A en modo automático

Punto	THD_v [%]	Lím. THD_v [%]	TDD [%]	Lím. TDD [%]	Estado
SEU Nº 22 BT	5,61	8	5,53	5	No cumple TDD
CCM6	5,77	8	2,77	8	Cumple
CCM7	6,01	8	8,14	8	No cumple TDD

Los resultados muestran que la operación automática de los filtros permite reducir la THD_v bajo el límite de 8 % en los tres puntos evaluados. Sin embargo, la TDD en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 alcanza 5,53 %, superando levemente el límite de 5 %. En CCM7, la TDD alcanza 8,14 %, también levemente por sobre el límite aplicable de 8 %.

Este resultado evidencia que, si bien la capacidad total instalada de 540 A permite reducir de forma significativa la distorsión armónica, la distribución

automática de la corriente de compensación no resulta suficiente para asegurar el cumplimiento global de todos los indicadores en la condición evaluada. Las capturas de respaldo de ETAP para esta condición se presentan en el Anexo C.

7.6. Análisis de armónicos individuales en CCM7

Debido a que CCM7 presenta una TDD de 8,14 % en modo automático, se revisaron los armónicos individuales de corriente en dicho centro. Esta revisión permite identificar qué componentes armónicos permanecen con mayor aporte a la distorsión residual.

La Tabla 7.5 presenta los armónicos individuales de corriente en CCM7 para la condición de filtros activos en modo automático.

Tabla 7.5: Armónicos individuales de corriente en CCM7 con filtro activo en modo automático

Orden	**Rango normativo**	**Límite individual**	**Modo automático [% de I_L]**
5	$3 \leq h < 11$	7,0	1,456
7	$3 \leq h < 11$	7,0	5,422
11	$11 \leq h < 17$	3,5	4,043
13	$11 \leq h < 17$	3,5	3,703
17	$17 \leq h < 23$	2,5	1,533
19	$17 \leq h < 23$	2,5	1,153
23	$23 \leq h < 35$	1,0	0,632
25	$23 \leq h < 35$	1,0	0,467
29	$23 \leq h < 35$	1,0	0,414
31	$23 \leq h < 35$	1,0	0,447

De la Tabla 7.5 se observa que, en modo automático, el quinto armónico se mantiene bajo su límite individual. Sin embargo, los armónicos de orden 11 y 13 superan el límite correspondiente al rango $11 \leq h < 17$, mientras que el séptimo armónico permanece elevado, aunque dentro de su límite individual.

Este comportamiento indica que el modo automático del modelo genérico no distribuye de forma óptima la corriente de compensación disponible para la condición específica de CCM7. En consecuencia, se justifica evaluar una configuración manual selectiva que permita asignar parte de la capacidad del filtro a los armónicos superiores que permanecen relevantes en el caso automático.

7.7. Configuración final propuesta

A partir del comportamiento observado en CCM7, se evaluó una configuración final manteniendo dos filtros activos de 270 A, uno instalado en CCM6 y otro en CCM7. En esta condición, el filtro de CCM6 se mantiene en modo automático, mientras que el filtro de CCM7 se configura en modo manual selectivo.

La estrategia adoptada en CCM7 no busca eliminar la compensación del quinto armónico, sino modificar la forma en que el filtro distribuye su corriente de compensación entre distintos órdenes armónicos. Esto es relevante porque, en el caso automático, los armónicos 11 y 13 permanecen sobre sus límites individuales y el séptimo armónico mantiene una magnitud relevante.

La corriente de compensación utilizada por el filtro activo de CCM7 en la configuración final se resume en la Tabla 7.6.

Tabla 7.6: Distribución cuadrática de la corriente de compensación del filtro activo de CCM7

Orden armónico	**Corriente de compensación [A]**	**Aporte a I^2_{APF} [%]**
5	257,164	90,72
7	60,244	4,98
11	41,483	2,36
13	36,888	1,87
17	7,181	0,07
19	1,972	0,01

La corriente total utilizada por el filtro no corresponde a la suma aritmética de las corrientes por armónico, ya que cada componente se encuentra a una frecuencia distinta. Por lo tanto, la corriente RMS total del filtro se obtiene mediante suma cuadrática:

$$I_{APF,total} = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2} \tag{7.3}$$

Reemplazando los valores obtenidos en ETAP:

$$I_{APF,total} = \sqrt{257{,}164^2 + 60{,}244^2 + 41{,}483^2 + 36{,}888^2 + 7{,}181^2 + 1{,}972^2} = 269{,}999\,\text{A} \tag{7.4}$$

Este resultado muestra que la configuración final utiliza la totalidad de la capacidad nominal del filtro activo. La compensación se concentra principalmente en el quinto armónico, pero la configuración manual permite que los armónicos 7, 11 y 13 también sean compensados de forma más efectiva, reduciendo la corriente armónica residual total en CCM7. El análisis de la utilización y la reserva de ambos equipos, así como de las implicancias de este resultado para el dimensionamiento, se desarrolla en la Sección 7.9.

7.8. Resultados finales de la evaluación

La Tabla 7.7 presenta los resultados obtenidos con la configuración final propuesta.

Tabla 7.7: Resultados armónicos con configuración final propuesta

Punto	**THD_v [%]**	**Lím. THD_v [%]**	**TDD [%]**	**Lím. TDD [%]**	**Estado**
SEU Nº 22 BT	3,97	8	3,19	5	Cumple
CCM6	4,13	8	3,00	8	Cumple
CCM7	4,17	8	3,44	8	Cumple

Los resultados muestran que la configuración final propuesta permite cumplir simultáneamente con el límite de THD_v y con el límite de TDD en los tres puntos evaluados. En particular, la TDD de CCM7 disminuye desde 8,14 % en modo automático hasta 3,44 % en la configuración manual selectiva, quedando con margen respecto del límite de 8 %. Las capturas de respaldo de ETAP para la configuración final propuesta se presentan en el Anexo C.

La Figura 7.3 presenta la comparación de THD_v entre el escenario sin mitigación, la operación automática de los filtros de 270 A y la configuración final propuesta.

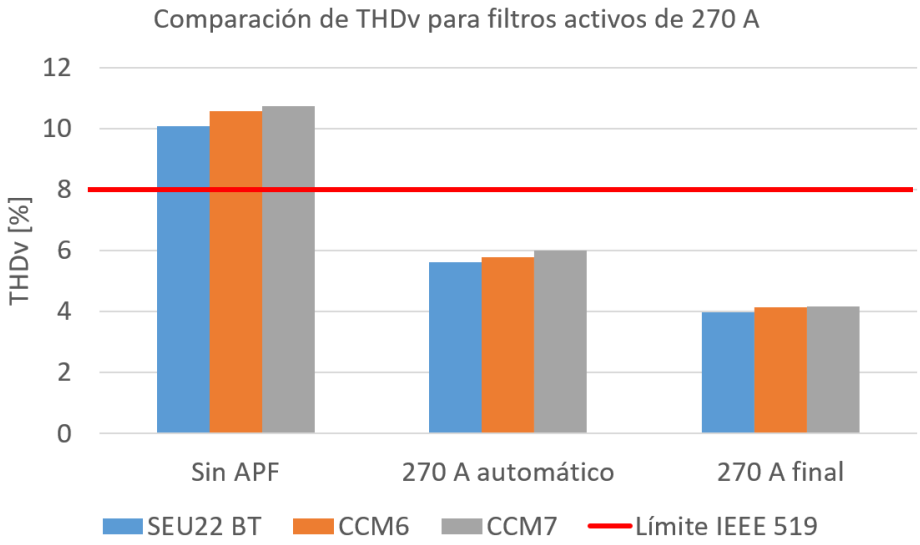
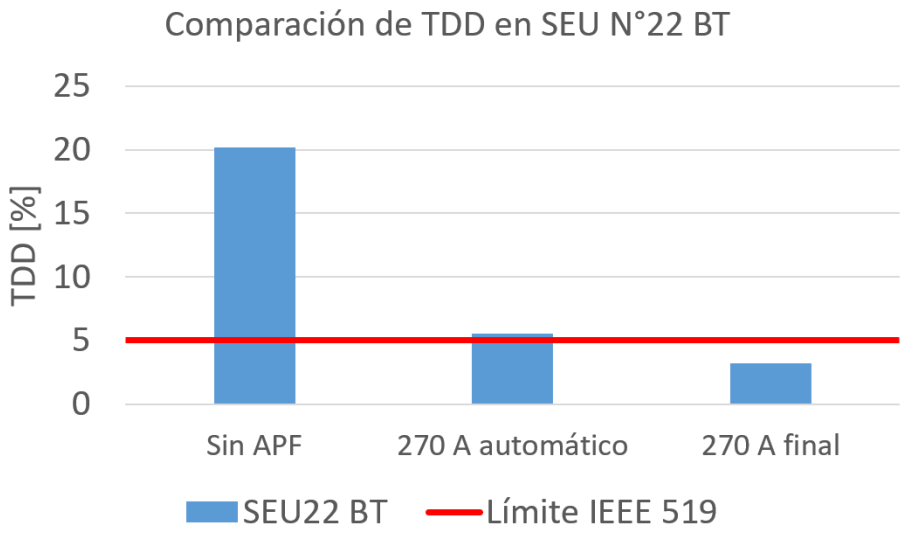


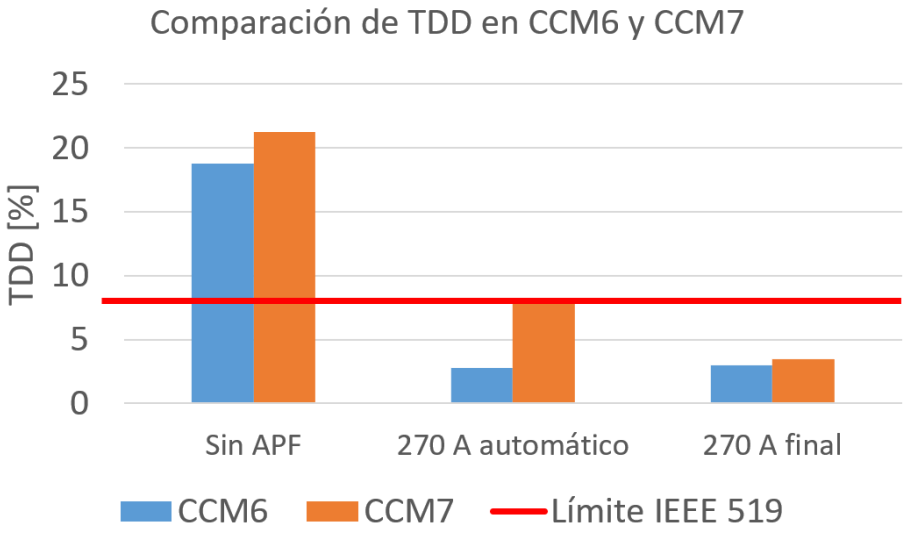
Figura 7.3: Comparación de THD_v para la evaluación de filtros activos de 270 A.

De acuerdo con la Figura 7.3, la incorporación de los filtros activos reduce la THD_v bajo el límite de 8 % en todos los puntos evaluados. Además, la configuración final permite alcanzar valores cercanos a 4 %, entregando un margen técnico amplio respecto del límite de tensión.

La Figura 7.4 presenta la comparación de TDD para la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 y para los centros CCM6 y CCM7.



Comparación de TDD en la barra de baja tensión de la SEU N° 22.



Comparación de TDD en CCM6 y CCM7.

Figura 7.4: Comparación de TDD para la evaluación de filtros activos de 270 A.

La comparación de TDD permite observar que el modo automático presenta una mejora importante respecto del caso sin mitigación, pero no logra

cumplir completamente en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 ni en CCM7. Con la configuración final propuesta, la TDD queda bajo el límite aplicable en los tres puntos evaluados.

7.9. Utilización, reserva y holgura de los filtros

Los resultados de la Sección 7.8 muestran que la configuración final cumple los límites aplicables en los tres puntos de evaluación.

7.9.1. Corrientes de compensación sin redondeo

La Tabla 7.8 presenta la corriente de compensación de ambos filtros en la configuración final, sin redondeo. Los valores se obtienen del espectro de corriente del filtro exportado desde ETAP, expresado por el software como porcentaje de la corriente nominal de compensación de 270 A.

Tabla 7.8: Corriente de compensación por orden armónico de ambos filtros en la configuración final

	CCM6 (automático)		**CCM7 (manual selectivo)**	
Orden	I_h **[A]**	**Aporte a** I^2 **[%]**	I_h **[A]**	**Aporte a** I^2 **[%]**
5	199,902	92,88	257,164	90,72
7	41,434	3,99	60,244	4,98
11	27,545	1,76	41,483	2,36
13	24,145	1,35	36,888	1,87
17	2,168	0,01	7,181	0,07
19	—	—	1,972	0,01
I_{APF} **(RSS)**	**207,423**	**100,00**	**269,999**	**100,00**

Nota: Valores obtenidos del espectro de corriente de cada filtro exportado desde ETAP para la configuración final. La corriente total se calcula mediante la Ecuación (7.3)*. El aporte a* I^2 *corresponde a la participación de cada orden en el cuadrado de la corriente total.*

Tabla 7.9: Utilización y reserva de los filtros activos en la configuración final

Filtro	I_{APF} **[A]**	**Utilización [%]**	**Reserva [A]**
CCM6 (automático)	207,423	76,82	62,58
CCM7 (manual selectivo)	269,999	100,00	0,00

Nota: Utilización respecto de la corriente nominal de compensación de 270 A *por equipo. La reserva corresponde a la diferencia aritmética entre la capacidad nominal y la corriente efectivamente utilizada, y no considera capacidad adicional por modo de sobrecarga, cuya disponibilidad se analiza en la Sección 7.9.5.*

Los valores de la Tabla 7.8 corresponden a las corrientes sin redondeo obtenidas del espectro exportado desde ETAP. La suma cuadrática de las corrientes tabuladas con un decimal entrega 270,03 A, diferencia que carece de significado físico y que se origina únicamente en el redondeo de los sumandos. En ambos casos, la interpretación es la misma: el filtro de CCM7 opera exactamente en su capacidad nominal.

7.9.2. El resultado de CCM7 corresponde a una condición de saturación

La coincidencia entre la corriente de compensación y la capacidad nominal no constituye una casualidad numérica, sino una condición de saturación del equipo. Esto se verifica al comparar ambos modos de operación evaluados en CCM7: en modo automático el filtro concentra la totalidad de su capacidad en el quinto armónico, entregando 269,999 A en ese único orden, mientras que en modo manual selectivo distribuye esa misma corriente total entre seis órdenes armónicos.

En ambos casos la corriente total es idéntica. La configuración manual selectiva no incrementa la capacidad disponible del equipo: redistribuye la capacidad existente hacia los órdenes relevantes para el cumplimiento normativo. Esta observación explica el comportamiento descrito en la Sección 7.6, donde el modo automático dejaba los órdenes 11 y 13 sobre sus límites individuales: no se trata de un defecto del algoritmo de control, sino de la consecuencia de que la capacidad del filtro se agota en el quinto armónico.

La consecuencia para el dimensionamiento es directa: el filtro de CCM7 no dispone de reserva de compensación. Ante un aumento de la corriente armónica de la carga, el equipo no puede incrementar su inyección, por lo que el excedente circula íntegramente hacia la red.

7.9.3. Restricción física del alimentador de CCM7

La evaluación de la reserva del filtro debe considerar hasta dónde puede efectivamente crecer la demanda del centro de control de motores. El alimentador de CCM7 corresponde a un conductor de cobre de 500 kcmil, un conductor por fase, instalado en ducto subterráneo, cuya capacidad de conducción fue determinada en ETAP según el estándar IEEE 399.

Tabla 7.10: Capacidad de conducción del alimentador de CCM7 y utilización

Parámetro	**Valor**
Ampacidad base ($T_a = 20\,^{\circ}\mathrm{C}$)	1413 A
Ampacidad desclasificada ($T_a = 35\,^{\circ}\mathrm{C}$)	1252,5 A
Factor de desclasificación térmica	0,886
Corriente de operación, escenario proyectado	1227 A
Utilización del alimentador	97,96 %
Margen disponible	25,5 A (+2,08 %)

Nota: Valores obtenidos del editor de cables de ETAP para el alimentador de CCM7. La desclasificación considera una temperatura ambiente de operación de $35\,^{\circ}\mathrm{C}$ *frente a la temperatura base de* $20\,^{\circ}\mathrm{C}$*, con temperatura del conductor de* $90\,^{\circ}\mathrm{C}$*. El alimentador de CCM6 corresponde al mismo tipo de conductor y presenta idéntica capacidad.*

El escenario proyectado deja al alimentador de CCM7 operando al 97,96 % de su capacidad de conducción desclasificada. En consecuencia, la incorporación de las cargas proyectadas agota prácticamente el margen del alimentador, y cualquier crecimiento adicional de carga en dicho centro requeriría repotenciar la alimentación antes que ampliar la capacidad de filtrado.

Esta restricción tiene una consecuencia relevante sobre la banda normativa aplicable. Según se estableció en la Sección 5.8.3, CCM7 cambiaría de banda si su corriente de demanda alcanzara 1350 A. Dado que la capacidad de conducción del alimentador es de 1252,5 A, la razón mínima físicamente alcanzable resulta

$$\left.\frac{I_{SC}}{I_L}\right|_{\text{mín}} = \frac{27\,\text{kA}}{1252{,}5\,\text{A}} = 21{,}56 > 20 \tag{7.5}$$

El umbral de cambio de banda se sitúa un 7,8 % por sobre la capacidad del alimentador, por lo que la protección del conductor actúa antes de que la razón I_{SC}/I_L pueda descender bajo 20. Se concluye que CCM7 permanece en la banda $20 \leq I_{SC}/I_L < 50$, con límite de TDD de 8 %, bajo cualquier condición de operación físicamente admisible de la instalación.

7.9.4. Caso de sensibilidad: cargas existentes al 100 %

Con el fin de cuantificar el comportamiento del sistema ante una condición más exigente que la modelada, se ejecutó un caso adicional en el cual las cargas existentes se representan al 100 % de su potencia nominal, en lugar del 80 % adoptado según el criterio interno descrito en el Capítulo 5. El resto de las condiciones se mantiene sin modificación, incluyendo la configuración final de los filtros.

Tabla 7.11: Comparación entre el escenario proyectado y el caso de sensibilidad con cargas existentes al 100 %

	Escenario proyectado (80 %)			**Sensibilidad** (100 %)		
Punto	I_L **[A]**	I_H **[A]**	**TDD [%]**	I_L **[A]**	I_H **[A]**	**TDD [%]**
SEU Nº 22 BT	2249	71,70	3,19	2717,0	134,88	4,96
CCM6	1022	30,71	3,00	1151,0	34,62	3,01
CCM7	1227	42,21	3,44	1566,1	108,51	6,93

Nota: La TDD de cada caso se expresa respecto de la corriente de demanda del propio caso. La THD_v resultante en el caso de sensibilidad alcanza 4,52 % en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, 4,66 % en CCM6 y 4,97 % en CCM7, manteniéndose bajo el límite de 8 % en los tres puntos.

Los resultados confirman el comportamiento anticipado a partir de la condición de saturación. En CCM6, donde el filtro dispone de reserva, la utilización asciende de 76,82 % a 85,21 %, alcanzando 230,07 A, y la TDD permanece prácticamente invariante. En CCM7, en cambio, la corriente de compensación se mantiene en 269,998 A, y la corriente armónica residual se multiplica por 2,57 mientras la demanda solo aumenta en un factor 1,28. La distorsión de corriente no compensada crece, por lo tanto, muy por sobre la proporción del incremento de carga.

Corresponde precisar que este caso no representa una condición de operación alcanzable. Con las cargas existentes al 100 %, la corriente de CCM7 alcanza 1566 A, equivalente al 125 % de la capacidad de conducción desclasificada de su alimentador, condición que activaría la protección del conductor. El caso debe interpretarse, en consecuencia, como una verificación del mecanismo que gobierna el comportamiento del sistema en el borde de su capacidad, y no como un escenario operacional.

Considerando la restricción del alimentador, la máxima demanda admisible en CCM7 es de 1252,5 A, apenas un 2,08 % superior a la del escenario

proyectado. En dicha condición límite, y aun considerando el crecimiento no lineal de la corriente armónica residual observado en el caso de sensibilidad, la TDD de CCM7 se mantendría en el entorno de 3,7 %, con holgura respecto del límite de 8 % aplicable.

7.9.5. Desclasificación y sobrecarga del equipo de filtrado

La capacidad nominal de 270 A por armario corresponde a tres módulos de potencia de 90 A cada uno. La documentación del fabricante indica que este tipo de módulo admite un modo de sobrecarga de 111 %, equivalente a 99 A por módulo y 297 A por armario [19]. Sin embargo, dicha capacidad se encuentra sujeta a tres condiciones que deben declararse.

En primer lugar, el modo de sobrecarga requiere la activación de una licencia específica del fabricante, la cual no forma parte del alcance de la oferta recibida. En segundo lugar, la propia documentación establece que la operación en modo de sobrecarga solo es posible con temperatura ambiente de 20 °C. En tercer lugar, el equipo incorpora una limitación automática de corriente de salida por temperatura: al alcanzar el límite térmico de un módulo de potencia, el sistema reduce su corriente de salida para mantenerse bajo dicho límite, y genera una alerta cuando la temperatura ambiente supera los 40 °C en sistemas refrigerados por aire.

Dado que los gabinetes se emplazan en el exterior, en una faena minera, no es posible asumir una temperatura ambiente sostenida de 20 °C. En consecuencia, la capacidad efectivamente disponible para el dimensionamiento corresponde a la capacidad nominal de 270 A, sin considerar aporte alguno por modo de sobrecarga. La verificación de la desclasificación térmica del equipo en las condiciones ambientales del emplazamiento queda condicionada a la ingeniería de detalle y a la confirmación del fabricante.

Cabe señalar que la referencia a una sobrecarga admisible de 120 %, empleada en el Capítulo 8 como antecedente complementario para la selección del interruptor derivado, proviene de la ficha comercial del proveedor y no coincide con el valor de 111 % indicado en el manual del fabricante para el tipo de módulo instalado. La selección del interruptor de 400 A no se ve afectada por esta diferencia, ya que se fundamenta en el régimen de corriente continua equivalente al 125 % de la corriente nominal, criterio independiente de la capacidad de sobrecarga del equipo.

7.9.6. Declaración sobre la holgura del dimensionamiento

A partir de los antecedentes anteriores se declara explícitamente el alcance del resultado obtenido:

- El filtro asociado a CCM6 presenta una reserva de compensación de 62,58 A, equivalente al 23,18 % de su capacidad nominal.
- El filtro asociado a CCM7 opera en su capacidad nominal, sin reserva de compensación demostrada. El resultado corresponde a una condición de saturación del equipo en el escenario simulado.
- No se dispone de capacidad adicional por modo de sobrecarga, por no estar incluida la licencia correspondiente en la oferta y por no ser sostenible la condición de temperatura ambiente que el fabricante exige para su operación.
- El dimensionamiento resulta suficiente para el escenario proyectado tal como fue definido. Su validez está condicionada al factor de carga del 80 % adoptado para las cargas existentes y a la restricción de capacidad del alimentador de CCM7, que limita el crecimiento de la demanda a un 2,08 % adicional.
- La verificación definitiva del desempeño y de la desclasificación térmica del equipo deberá realizarse mediante mediciones posteriores a la implementación y con la confirmación del fabricante.

7.10. Comparación global de resultados

Las Tablas 7.12 y 7.13 resumen la evolución de THD_v y TDD, respectivamente, para las tres condiciones evaluadas.

Tabla 7.12: Comparación global de resultados de THD_v

Punto	**THD_v sin APF [%]**	**THD_v auto [%]**	**THD_v final [%]**
SEU Nº 22 BT	10,08	5,61	3,97
CCM6	10,57	5,77	4,13
CCM7	10,74	6,01	4,17

Tabla 7.13: Comparación global de resultados de TDD

Punto	TDD sin APF [%]	TDD auto [%]	TDD final [%]
SEU Nº 22 BT	20,15	5,53	3,19
CCM6	18,79	2,77	3,00
CCM7	21,28	8,14	3,44

Nota: La condición "auto" considera ambos filtros de 270 A *en modo automático, mientras que la condición "final" considera CCM6 en modo automático y CCM7 en modo manual selectivo.*

Las Tablas 7.12 y 7.13 muestran que la configuración final reduce la THD_v a valores cercanos a 4 % en todos los puntos evaluados. Además, la TDD final queda bajo los límites aplicables, incluso en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, donde el límite es más exigente debido a que la razón I_{SC}/I_L se encuentra bajo 20.

7.11. Verificación de armónicos individuales en la configuración final

Además de la verificación de THD_v y TDD, se revisaron los armónicos individuales de corriente en la configuración final propuesta. Los valores presentados corresponden a la distorsión individual de corriente expresada como porcentaje de la corriente de demanda I_L de cada punto evaluado.

Tabla 7.14: Verificación de armónicos individuales de corriente en la configuración final

Orden	SEU Nº 22 [%]	Lím. SEU [%]	CCM6 [%]	Lím. CCM6 [%]	CCM7 [%]	Lím. CCM7 [%]	Estado
5	1,849	4,0	1,198	7,0	2,392	7,0	Cumple
7	1,094	4,0	1,196	7,0	1,009	7,0	Cumple
11	1,094	2,0	1,196	3,5	1,009	3,5	Cumple
13	1,094	2,0	1,196	3,5	1,009	3,5	Cumple
17	1,094	1,5	1,196	2,5	1,009	2,5	Cumple
19	1,020	1,5	1,033	2,5	1,009	2,5	Cumple
23	0,599	0,6	0,559	1,0	0,632	1,0	Cumple
25	0,442	0,6	0,413	1,0	0,467	1,0	Cumple
29	0,392	0,6	0,366	1,0	0,414	1,0	Cumple
31	0,424	0,6	0,396	1,0	0,447	1,0	Cumple

De acuerdo con la Tabla 7.14, los armónicos individuales evaluados se mantienen bajo los límites aplicables en cada punto. El armónico 23 en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 constituye el caso más ajustado de la Tabla 7.14, con un valor sin redondeo de 0,5985 % frente a un límite de 0,600 %, equivalente a un margen de 0,0015 pp o 0,25 % en términos relativos.

Se declara adicionalmente que los espectros exportados desde ETAP abarcan hasta el orden 31, mientras que el rango normativo se extiende hasta el orden 50, por lo que los valores de TDD reportados constituyen un límite inferior del contenido armónico total.

Se observa además que varios órdenes de la Tabla 7.14 presentan valores muy próximos entre sí, cercanos a 1 % de I_L (por ejemplo, los órdenes 7, 11, 13 y 17 en SEU Nº 22 y CCM6, y 7, 11, 13, 17 y 19 en CCM7). Esta coincidencia no proviene de un error de transcripción de los datos de salida de ETAP, sino que es consistente con el criterio de ponderación relativa homogénea (*Mag (%)* = 1) descrito para la configuración manual selectiva de CCM7 (Figura 7.2). Se plantea como hipótesis que, cuando la capacidad de compensación disponible es suficiente para reducir un conjunto de órdenes armónicos bajo un umbral similar, el modelo genérico del filtro activo distribuye el remanente hacia un nivel de residual comparable entre dichos órdenes, en lugar de reducir cada uno de forma independiente y proporcional a su magnitud original. El hecho de que un patrón similar se observe también en CCM6, que opera en modo automático, sugiere que este comportamiento podría no depender exclusivamente de la configuración manual, sino de un criterio interno del modelo genérico de ETAP. Esta explicación se presenta como hipótesis no verificada de forma independiente en este estudio; su confirmación requeriría revisar el algoritmo de control del filtro genérico, lo cual excede el alcance de esta memoria.

Esta verificación confirma que el cumplimiento de TDD en la configuración final no se obtiene a costa de incumplimientos individuales relevantes, sino mediante una redistribución de la compensación armónica que permite reducir los componentes residuales más críticos.

7.12. Consideraciones para la implementación

Si bien la simulación permite evaluar el desempeño de una configuración distribuida de dos equipos de 270 A, la configuración final debe ser confirmada durante la etapa de ingeniería de detalle y puesta en marcha. Esto es particularmente importante para CCM7, debido a que el resultado depende de la forma en que el equipo distribuya su capacidad de compensación entre los distintos órdenes armónicos.

En consecuencia, se recomienda que la puesta en marcha considere, al menos, los siguientes aspectos:

- verificación de la ubicación de los transformadores de corriente asociados a cada filtro activo;
- confirmación de polaridad, relación de transformación y sentido de medición de los TTCC;
- validación del modo de control del filtro activo en CCM6 y CCM7;
- revisión de la configuración manual selectiva propuesta para CCM7;
- medición posterior de THD_v, TDD y armónicos individuales en SEU Nº 22, CCM6 y CCM7;
- registro de corriente de compensación entregada por cada filtro activo durante operación real.

Estas verificaciones permiten asegurar que el desempeño observado en la simulación se reproduzca adecuadamente en terreno y que la parametrización final del equipo sea consistente con las condiciones reales de operación del sistema.

7.13. Síntesis del capítulo

La evaluación desarrollada en este capítulo permite concluir que la solución distribuida compuesta por dos filtros activos de 270 A, instalados en CCM6 y CCM7, es técnicamente adecuada para mitigar la distorsión armónica del escenario proyectado.

En modo automático, los filtros activos reducen la THD_v bajo el límite de 8 % en los tres puntos evaluados. Sin embargo, la TDD permanece levemente sobre el límite en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 y en CCM7. Por esta razón, se evaluó una configuración final con el filtro de CCM6 en modo automático y el filtro de CCM7 en modo manual selectivo.

La configuración final permite cumplir simultáneamente con los límites de THD_v, TDD y armónicos individuales en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, CCM6 y CCM7. En particular, la TDD final alcanza 3,19 % en SEU Nº 22, 3,00 % en CCM6 y 3,44 % en CCM7, quedando bajo los límites aplicables en cada punto.

Por lo tanto, la solución de dos filtros activos de 270 A alcanza los objetivos de mitigación armónica en el escenario simulado para la SEU Nº 22, con la salvedad de la ausencia de reserva en CCM7 declarada en la Sección 7.9. En el Capítulo 8 se presentan los principales lineamientos para una eventual implementación de la solución, considerando aspectos de conexión, medición,

protecciones, puesta en marcha y verificación en terreno.

Capítulo 8

Lineamientos de implementación

Una vez evaluada técnicamente la solución distribuida de dos filtros activos de 270 A en el Capítulo 7, corresponde establecer los principales lineamientos para su eventual implementación en terreno. El presente capítulo no desarrolla una ingeniería de detalle, sino que reúne los criterios técnicos mínimos que debieran considerarse para materializar la solución propuesta en los centros de control de motores CCM6 y CCM7 de la SEU Nº 22.

La solución considerada corresponde a la instalación de dos filtros activos de potencia conectados en forma distribuida, uno asociado a CCM6 y otro a CCM7. Desde el punto de vista funcional, esta configuración permite compensar las corrientes armónicas cerca de sus principales fuentes de generación, reduciendo la circulación local de armónicos en los alimentadores y barras de ambos centros de control de motores.

8.1. Alcance de los lineamientos de implementación

Los lineamientos presentados en este capítulo consideran la solución distribuida evaluada previamente y abarcan los siguientes aspectos:

- configuración general de la solución propuesta;
- criterios de conexión eléctrica de los filtros activos;
- identificación preliminar de puntos de conexión en CCM6 y CCM7;

- requerimientos de medición y control;
- consideraciones de protección y maniobra;
- consideraciones físicas de instalación;
- lineamientos de puesta en marcha y verificación posterior.

Quedan fuera del alcance del presente capítulo la definición final de canalizaciones, memorias de cálculo de cables, detalles constructivos, diseño mecánico de soportes, planos IFC, ajustes definitivos de protecciones y la programación final del equipo en terreno. Estos aspectos deben ser resueltos en una etapa posterior de ingeniería de detalle, idealmente en conjunto con el proveedor de la solución seleccionada.

8.2. Configuración general de la solución propuesta

La solución propuesta considera dos filtros activos de potencia, cada uno de 270 A de capacidad de compensación nominal, conectados en forma distribuida a CCM6 y CCM7.

Tabla 8.1: Configuración general de la solución propuesta

Ubicación	**Equipo**	**Capacidad nominal**	**Función principal**
CCM6	APF 1	270 A	Compensación armónica distribuida en CCM6
CCM7	APF 2	270 A	Compensación armónica distribuida en CCM7

La corriente nominal indicada para cada filtro corresponde a su capacidad de compensación armónica y no a la corriente total de carga del respectivo centro de control de motores. En consecuencia, el filtro no reemplaza la alimentación principal del CCM, sino que se conecta en paralelo al sistema para inyectar corrientes de compensación que reduzcan la distorsión armónica.

De acuerdo con la evaluación técnica desarrollada en el Capítulo 7, el filtro asociado a CCM6 puede operar adecuadamente en modo automático. En el caso de CCM7, en cambio, la simulación mostró que el mejor desempeño se obtiene con una configuración manual selectiva, por lo que este aspecto deberá ser considerado especialmente durante la puesta en marcha.

8.3. Punto de conexión de los filtros activos

Desde el punto de vista eléctrico, cada filtro activo debe conectarse en paralelo a la barra o alimentador del centro de control de motores correspondiente, de manera que pueda compensar localmente las corrientes armónicas generadas por las cargas no lineales asociadas a cada CCM.

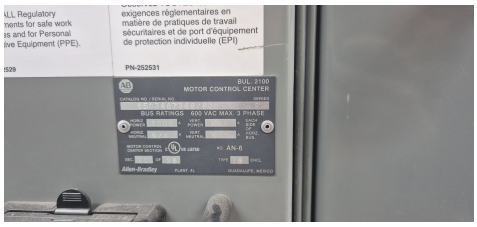
La solución propuesta considera que cada filtro sea alimentado desde una unidad derivada dedicada dentro del respectivo CCM, conectándose luego hacia un gabinete de filtro activo instalado de forma exterior. Esto permite mantener la filosofía distribuida evaluada en ETAP y evita concentrar toda la compensación en la barra común de la SEU N° 22.

En ambos casos, la conexión debe realizarse mediante un alimentador dedicado, protegido por un interruptor adecuado a la corriente nominal del filtro y coordinado con la capacidad de barras del centro de control de motores.

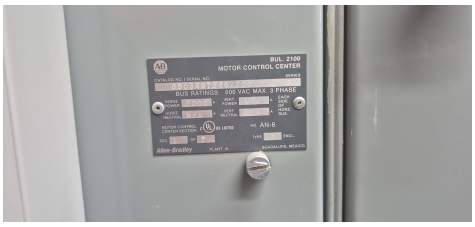
8.4. Identificación preliminar de espacios disponibles en los CCM

Tanto CCM6 como CCM7 corresponden a centros de control de motores Allen-Bradley *CENTERLINE 2100*. En este tipo de CCM, el espacio disponible para unidades se expresa mediante la unidad *Space Factor* (SF), la cual representa un módulo de altura útil dentro de una sección del CCM. Esta unidad se utiliza para definir el tamaño de compartimientos, gavetas, alimentadores, arrancadores u otras unidades derivadas.

Esta identificación fue confirmada en terreno mediante inspección directa de la placa de identificación de ambos equipos (Figura 8.1), la cual indica *Bulletin 2100*, Serie P, fabricado en la planta de Allen-Bradley en Guadalupe, México, para ambos centros de control de motores.



Placa de identificación de CCM6.



Placa de identificación de CCM7.

Figura 8.1: Placas de identificación Allen-Bradley Bulletin 2100 (Serie P) de CCM6 y CCM7, verificadas en terreno.

De acuerdo con la documentación técnica vigente del fabricante, un incremento de 0,5 SF equivale a 6,5 in de altura útil, es decir, 165,1 mm [20, pág. 27]. Esta equivalencia se mantiene sin cambios en la literatura del *Bulletin 2100* publicada entre 2004 y 2025, por lo que resulta aplicable independientemente de la fecha exacta de fabricación, ya identificada como Serie P mediante la placa de la Figura 8.1.

Tabla 8.2: Equivalencia referencial de espacio en CCM Allen-Bradley CENTERLINE 2100

Espacio modular	**Altura equivalente**	**Altura aproximada**
0,5 SF	6,5 in	165 mm
1,0 SF	13 in	330 mm
2,0 SF	26 in	660 mm
2,5 SF	32,5 in	825 mm
3,0 SF	39 in	990 mm

Este criterio resulta útil para evaluar preliminarmente la factibilidad de incorporar nuevas unidades derivadas dentro del CCM. Para efectos de esta memoria, se considera como referencia que un alimentador dedicado para un filtro activo con interruptor de 400 A (marco Frame D) requiere aproximadamente 2 SF [20, pág. 38]. Por lo tanto, los espacios disponibles identificados deben ser contrastados con dicho requerimiento durante la etapa de ingeniería de detalle.

A partir de la revisión de planos disponibles, antecedentes de terreno y notas de levantamiento, se identificaron ubicaciones sugeridas para implementar los alimentadores dedicados de los filtros activos en ambos CCM. Estas ubicaciones se presentan como propuestas preliminares y deben ser

verificadas en terreno antes de su implementación.

8.4.1. Ubicación sugerida en CCM6

Para CCM6 se identificó una ubicación sugerida en la Sección 12 del CCM, específicamente en el espacio comprendido entre las posiciones 12A y 12E. Esta zona se destaca en la Figura 8.2b como espacio propuesto para incorporar el alimentador dedicado del filtro activo asociado a CCM6.

Tabla 8.3: Ubicación sugerida para alimentador de APF en CCM6

CCM	**Sección referencial**	**Espacio estimado**	**Observación**
CCM6	Sección 12, posiciones 12A–12E	≈ 2,5 SF	Espacio sugerido para implementar alimentador dedicado del APF.

El espacio señalado se considera preliminarmente suficiente para alojar una unidad derivada asociada a un interruptor del orden requerido por el filtro activo. No obstante, la disponibilidad efectiva debe confirmarse en terreno y con planos vigentes, debido a que la vista de elevación utilizada corresponde a una distribución referencial intervenida con fines ilustrativos.

8.4.2. Ubicación sugerida en CCM7

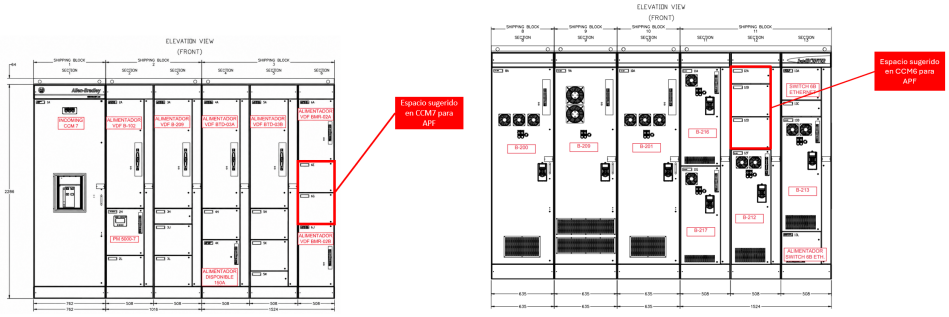
Para CCM7 se identificó una ubicación sugerida en la Sección 6 del CCM, específicamente en el espacio comprendido entre las posiciones 6E y 6I. Esta zona se destaca en la Figura 8.2a como espacio disponible para incorporar el alimentador dedicado del filtro activo asociado a CCM7.

Tabla 8.4: Ubicación sugerida para alimentador de APF en CCM7

CCM	**Sección referencial**	**Espacio estimado**	**Observación**
CCM7	Sección 6, posiciones 6E–6I	≈ 2,5 SF	Espacio disponible para implementar alimentador dedicado del APF.

La ubicación indicada se considera preliminarmente apta para la instalación del alimentador del filtro activo, dado que supera el requerimiento referencial de 2 SF adoptado en esta memoria para una unidad derivada asociada a un interruptor de 400 A. Al igual que en CCM6, esta condición debe ser verificada durante la etapa de ingeniería de detalle y mediante inspección en terreno.

Las ubicaciones sugeridas identificadas para CCM6 y CCM7 se presentan en la Figura 8.2. Estas figuras corresponden a vistas de elevación referenciales intervenidas con fines ilustrativos, en las cuales se destaca el espacio preliminar propuesto para la incorporación del alimentador asociado a cada filtro activo.



Ubicación sugerida en CCM7. Ubicación sugerida en CCM6.

Figura 8.2: Ubicaciones sugeridas para la incorporación de alimentadores dedicados de filtros activos en CCM7 y CCM6. Las figuras corresponden a vistas de elevación referenciales intervenidas con fines ilustrativos.

Las imágenes de la Figura 8.2 corresponden a distribuciones históricas de los CCM y se utilizan únicamente como referencia visual. Por lo tanto, no deben interpretarse como representación exacta de la condición actual de ocupación de cada sección. La disponibilidad real deberá verificarse en terreno y contrastarse con la revisión documental vigente.

Si durante la ingeniería de detalle se identifican restricciones de ocupación, acceso o interferencias no consideradas en esta memoria, podrán evaluarse ubicaciones alternativas dentro del respectivo CCM, siempre que cumplan con los requerimientos eléctricos, espaciales y operacionales del alimentador del filtro activo.

8.5. Conexión eléctrica y alimentadores asociados

Cada filtro activo deberá conectarse mediante un alimentador dedicado desde el CCM correspondiente hasta el gabinete del equipo. En términos generales, la conexión considera:

- una unidad derivada con interruptor dedicada al filtro activo;
- conductores de potencia dimensionados para la corriente nominal del equipo y las condiciones de instalación;
- conductor de protección a tierra;
- eventual canalización entre el CCM y el gabinete del filtro activo.

Dado que cada filtro activo es de 270 A, la corriente de diseño del alimentador dedicado supera el ajuste de 300 A bajo un criterio de régimen continuo: aplicando un factor de 125 % sobre la corriente nominal del equipo se obtienen 337,5 A, valor que ya excede dicho ajuste. Por lo tanto, se adopta como referencia una unidad derivada con interruptor de 400 A, marco Frame D, tipo LSI (Bulletin 2193F, series TKM/TKX/TKU), el cual admite ajustes de disparo de 300 o 400 A sobre el mismo marco físico, manteniendo el mismo *space factor* de 2,0 determinado en la sección anterior [20, pág. 38]; es decir, este cambio de ajuste no modifica el requerimiento de espacio ya verificado. Adicionalmente, la ficha técnica del proveedor indica que el equipo admite una sobrecarga de 120 % sobre su corriente nominal [21], lo que refuerza la conveniencia de mantener el interruptor de 400 A como ajuste de referencia.

No obstante, la corriente nominal definitiva del interruptor, su curva de disparo y su capacidad interruptiva (TKM/TKX/TKU) deberán verificarse durante la ingeniería de detalle, en coordinación con los requerimientos del fabricante del equipo y el nivel de cortocircuito disponible en el punto de conexión. El dimensionamiento del conductor de alimentación y su desclasificación por temperatura ambiente no se abordan en el alcance de esta memoria, al no contarse con la tabla de ampacidad del fabricante del conductor; esta definición queda declarada como pendiente de la ingeniería de detalle, conforme al alcance acordado para esta corrección.

La conexión eléctrica debe realizarse de forma que el filtro quede asociado al centro cuya distorsión armónica se desea mitigar. En consecuencia, el filtro de CCM6 debe conectarse al alimentador o barra del propio CCM6, y el filtro de CCM7 al correspondiente CCM7.

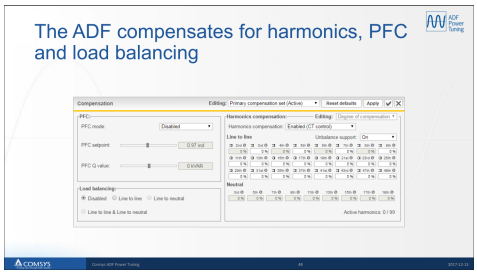
8.6. Requerimientos de medición y control

El desempeño de un filtro activo depende no solo de su capacidad nominal, sino también de la forma en que mide y procesa la corriente a compensar. Por ello, la correcta implementación de las señales de medición constituye un aspecto crítico de la solución.

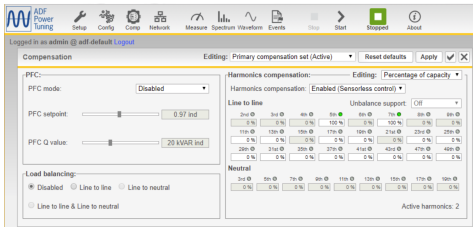
En la puesta en marcha deberán verificarse especialmente los siguientes aspectos:

- ubicación de los transformadores de corriente asociados al filtro activo;
- relación de transformación de los TTCC;
- polaridad y sentido de medición;
- coherencia entre la barra supervisada y la barra donde el equipo se encuentra conectado;
- modo de control seleccionado en el equipo.

Durante el desarrollo del proyecto se revisó que la plataforma del proveedor permite parametrizar la compensación armónica mediante software, incluyendo funciones de habilitación de compensación, selección del modo de control y distribución de capacidad entre distintos órdenes armónicos. Esta funcionalidad es particularmente relevante en el caso de CCM7, ya que en la evaluación técnica se observó que el mejor resultado se obtiene mediante una configuración manual selectiva.



Interfaz general de compensación del software del filtro activo.



Ejemplo de parametrización por órdenes armónicos.

Figura 8.3: Funciones de parametrización del software del filtro activo ofrecido.

La Figura 8.3 muestra, a modo referencial, que la solución ofrecida permite habilitar compensación armónica, así como ajustar la prioridad de com-

pensación entre distintos armónicos. Esta capacidad es coherente con la necesidad identificada en CCM7, donde la configuración final propuesta requiere una distribución más controlada de la corriente de compensación.

8.7. Consideraciones de protección y maniobra

Desde el punto de vista de protección, la incorporación de cada filtro activo requiere al menos una unidad de maniobra y protección dedicada. Esta protección debe permitir:

- seccionar el equipo para mantención o falla;
- proteger el alimentador de conexión al filtro;
- evitar que una falla interna del equipo afecte innecesariamente la continuidad de operación del CCM asociado.

En esta memoria no se desarrollan ajustes detallados de protecciones. Sin embargo, se establecen las siguientes consideraciones generales:

- la protección del filtro activo debe ser coordinada con la barra del CCM y con la capacidad térmica del alimentador;
- la capacidad interruptiva del interruptor debe ser compatible con el nivel de cortocircuito disponible en el punto de conexión;
- la filosofía de operación debe permitir retirar de servicio el filtro activo sin afectar la alimentación de las cargas del centro de control de motores;
- la implementación deberá incluir conexión adecuada a tierra del gabinete y de las masas metálicas del equipo.

Por lo tanto, la incorporación del APF debe entenderse como una carga especial conectada en paralelo, con su propio esquema de protección, y no como una modificación de la protección principal del centro de control de motores.

8.8. Consideraciones físicas de instalación

La solución seleccionada considera la instalación de filtros activos en gabinetes exteriores independientes. En este proyecto, la ubicación física general de los nuevos equipos se encuentra preliminarmente definida, ya que se considera utilizar el espacio actualmente ocupado por los filtros pasivos asociados

a los CCM estudiados, los cuales se encuentran fuera de servicio.

Por lo tanto, la implementación propuesta considera el retiro de los filtros pasivos existentes y su reemplazo por los nuevos gabinetes de filtros activos. Esta condición presenta la ventaja de reutilizar una zona que ya se encontraba destinada a equipos de mitigación armónica, reduciendo la necesidad de habilitar una ubicación completamente nueva dentro del área.

De acuerdo con el plano referencial del equipo ofertado [22], el gabinete del filtro activo considera un módulo principal de aproximadamente 1000 mm y un módulo de control de aproximadamente 600 mm, con una profundidad aproximada de 600 mm, una altura de 2000 mm y un zócalo de 100 mm. Estas dimensiones permiten realizar una comparación preliminar con el espacio disponible en la ubicación de los filtros pasivos existentes.

Tabla 8.5: Dimensiones referenciales del gabinete de filtro activo ofertado

Elemento	**Dimensión referencial**	**Observación**
Módulo principal APF	1000 mm	Ancho frontal del módulo de potencia
Módulo de control	600 mm	Ancho frontal del módulo auxiliar/control
Profundidad del gabinete	600 mm	Dimensión lateral referencial
Altura del gabinete	2000 mm	Sin considerar condiciones de montaje particulares
Zócalo	100 mm	Base indicada en plano referencial

Durante el levantamiento en terreno realizado por MVC se verificó, mediante mediciones directas con huincha, que el espacio actualmente ocupado por el filtro pasivo fuera de servicio presenta dimensiones de aproximadamente 2500 mm de frente por 900 mm de fondo [23]. Al comparar estas dimensiones con la envolvente del equipo proyectado (Tabla 8.5), se obtiene una holgura de aproximadamente 900 mm en el frente y 300 mm en el fondo, por lo que el espacio disponible resulta geométricamente compatible con el filtro activo a instalar. La Tabla 8.6 resume esta verificación e indica los aspectos que, si bien cuentan con antecedentes preliminares, deben confirmarse durante la ingeniería de detalle. Las fotografías de respaldo se presentan en el Anexo D.

Tabla 8.6: Verificación física de espacio exterior para la instalación del filtro activo

Aspecto	**Valor / estado**	**Evidencia**
Envolvente del equipo	1600 mm de frente (módulo principal + módulo de control) × 600 mm de fondo × 2000 mm de altura (más 100 mm de zócalo)	Plano referencial del proveedor [22]
Dimensiones disponibles en terreno	2500 mm de frente × 900 mm de fondo, correspondientes al espacio del filtro pasivo fuera de servicio	Medición con huincha en terreno [23]
Holgura resultante	900 mm de holgura frontal y 300 mm de holgura de fondo	Cálculo a partir de las filas anteriores
Ventilación	Gabinete con cubiertas tipo celosía en el módulo de control; se observaron además rejillas de ventilación tipo persiana en los gabinetes existentes de la misma zona	Plano del proveedor [22]; levantamiento en terreno [23]
Mantenimiento y accesos	Acceso frontal mediante puerta de dos hojas según plano; la holgura frontal disponible (900 mm) permite su apertura, aunque el radio de giro no ha sido verificado en terreno	Plano del proveedor; pendiente de verificación en terreno
Rutas de cables	Se identificó en terreno una canalización de conductores existente tendida entre los gabinetes actuales; su compatibilidad con el nuevo alimentador debe confirmarse en la ingeniería de detalle	Levantamiento en terreno [23]



Figura 8.4: Ubicación exterior de los filtros pasivos existentes asociados a los CCM estudiados. La implementación propuesta considera el retiro de estos equipos fuera de servicio y su reemplazo por gabinetes de filtros activos.

En la Figura 8.4 se observa la ubicación exterior actualmente ocupada por los filtros pasivos. Esta zona se considera referencialmente apta para la instalación de los nuevos filtros activos, debido a que corresponde a un espacio previamente destinado a equipos de compensación y mitigación armónica.

No obstante, la reutilización de este espacio debe ser verificada durante la ingeniería de detalle, considerando las dimensiones finales del equipo suministrado, la disposición definitiva de puertas y accesos, la ventilación requerida, las distancias de seguridad, las canalizaciones existentes, los radios de curvatura de los cables de potencia y la factibilidad de retiro de los filtros pasivos fuera de servicio.

Los aspectos mínimos a revisar en esta etapa son:

- espacio disponible para ubicar los gabinetes de los filtros activos;
- dimensiones finales del equipo suministrado por el proveedor;
- accesibilidad para operación y mantención;
- distancia entre el CCM y los gabinetes de los filtros;
- ventilación y disipación térmica;
- condiciones ambientales del lugar de instalación;
- compatibilidad del grado de protección del gabinete con el ambiente industrial;
- factibilidad de retiro de los filtros pasivos existentes;
- adecuación de canalizaciones, anclajes y recorridos de cables.

8.9. Puesta en marcha y parametrización

La puesta en marcha constituye una etapa crítica, especialmente debido a que la evaluación técnica mostró comportamientos distintos entre CCM6 y CCM7.

En CCM6, el lineamiento general es iniciar la operación del filtro activo en modo automático, verificando que los indicadores de THD_v y TDD se mantengan en niveles coherentes con los resultados de simulación.

En CCM7, en cambio, la evaluación técnica mostró la conveniencia de una configuración manual selectiva. Por ello, durante la puesta en marcha se recomienda:

- iniciar la operación del equipo verificando el modo de control acordado con el proveedor;
- revisar la corriente total de compensación entregada por el equipo;
- verificar la respuesta del filtro frente a los armónicos dominantes del sistema;
- contrastar la medición real de TDD y armónicos individuales con los resultados esperados de la simulación;
- ajustar la priorización armónica si los resultados medidos difieren de forma relevante respecto de lo modelado.

La parametrización definitiva deberá realizarse con apoyo del fabricante o proveedor del equipo, utilizando el software de configuración correspondiente y los resultados reales de medición obtenidos en terreno.

8.10. Verificación posterior a la instalación

Una vez implementada la solución, será necesario verificar su desempeño mediante una campaña de medición posterior a la puesta en servicio. Esta verificación debe considerar, como mínimo, los mismos puntos principales analizados en la memoria:

- barra de baja tensión de la SEU Nº 22;
- CCM6;
- CCM7.

Los indicadores mínimos a revisar son:

- distorsión armónica total de tensión, THD_v;
- distorsión total de demanda, TDD;
- armónicos individuales de corriente;
- corriente de compensación suministrada por cada filtro activo;
- estado operacional y alarmas del equipo.

La Tabla 8.7 resume los principales puntos de verificación posterior.

Tabla 8.7: Verificaciones recomendadas después de la implementación

Aspecto a verificar	**Punto**	**Objetivo**
THD_v	SEU, CCM6 y CCM7	Confirmar cumplimiento del límite de tensión
TDD	SEU, CCM6 y CCM7	Confirmar cumplimiento de los límites de corriente
Armónicos individuales	Principalmente CCM7	Verificar órdenes críticos y ajuste final
Corriente del APF	Cada filtro	Confirmar uso de capacidad de compensación
Alarmas y eventos	Cada filtro	Detectar condiciones anómalas de operación

La medición posterior es especialmente importante porque permitirá confirmar si el comportamiento observado en ETAP se reproduce en la instalación real. En caso de desviaciones significativas, esta verificación servirá como base para ajustes de parametrización, especialmente en el filtro asociado a CCM7.

8.11. Riesgos técnicos y medidas de control

Durante la implementación de la solución propuesta pueden presentarse riesgos técnicos que deben ser considerados preventivamente. Entre los más relevantes se encuentran:

- selección incorrecta del punto de medición o de conexión del filtro activo;
- error en relación o polaridad de los transformadores de corriente;
- incompatibilidad entre la capacidad del interruptor derivado y la unidad disponible del CCM;
- espacio físico insuficiente o restricciones de montaje en terreno;

- parametrización inicial no óptima del filtro, especialmente en CCM7;
- diferencias entre la condición real de carga y la condición modelada.

Para mitigar estos riesgos, se recomienda que la implementación considere al menos:

- levantamiento definitivo en terreno previo a la compra;
- revisión de planos unilineales actualizados y de elevación vigente;
- validación conjunta con el proveedor de la solución;
- puesta en marcha asistida por el fabricante;
- campaña de medición posterior a la instalación.

8.12. Síntesis del capítulo

La solución evaluada técnicamente en la memoria corresponde a la instalación distribuida de dos filtros activos de 270 A, uno asociado a CCM6 y otro a CCM7. Su implementación requiere disponer de alimentadores dedicados en ambos centros de control de motores, asociados a unidades derivadas compatibles con la capacidad requerida por cada equipo.

A partir de los antecedentes revisados, ambos centros de control de motores Allen-Bradley *CENTERLINE 2100* presentan ubicaciones sugeridas para incorporar los alimentadores de los filtros activos. En CCM6 se identifica como referencia un espacio en la Sección 12, entre las posiciones 12A y 12E, con aproximadamente 2,5 SF disponibles. En CCM7 se identifica como referencia un espacio en la Sección 6, entre las posiciones 6E y 6I, con aproximadamente 2,5 SF disponibles. Estas ubicaciones superan el requerimiento referencial de 2 SF considerado para una unidad derivada asociada a un interruptor de 400 A.

Adicionalmente, se ha definido que los filtros activos serán implementados mediante gabinetes exteriores independientes, utilizando como ubicación referencial el espacio actualmente ocupado por los filtros pasivos fuera de servicio. Esta condición entrega una base más concreta para la futura implementación, ya que permite reutilizar una zona previamente destinada a equipos de mitigación armónica. Las dimensiones referenciales del gabinete ofertado son compatibles de forma preliminar con el espacio disponible observado en terreno; sin embargo, la verificación final deberá realizarse durante la ingeniería de detalle, considerando dimensiones definitivas, accesos, ventilación, canalizaciones, anclajes y retiro de los equipos existentes.

Asimismo, se identificó que la implementación no depende únicamente de la conexión eléctrica, sino también de la correcta medición, protección, ubicación física del gabinete y parametrización del equipo. Esto resulta especialmente importante en CCM7, donde la evaluación técnica mostró la conveniencia de una configuración manual selectiva para mejorar el cumplimiento de TDD y armónicos individuales.

En consecuencia, la implementación de la solución debe complementarse con una etapa de ingeniería de detalle, puesta en marcha asistida por el proveedor y verificación posterior mediante mediciones en terreno. En el Capítulo 9 se desarrolla la evaluación técnico-económica de las alternativas comerciales asociadas a esta solución.

Capítulo 9

Evaluación técnico-económica

Una vez definida y evaluada técnicamente una alternativa de mitigación armónica para la SEU Nº 22, corresponde evaluar las ofertas comerciales recibidas durante el desarrollo del proyecto. Esta evaluación no tiene por objetivo seleccionar únicamente la alternativa de menor costo, sino comparar el desempeño técnico, el alcance declarado, la compatibilidad con las condiciones de instalación y el costo relativo de cada solución.

La comparación económica se desarrolla considerando valores netos de las ofertas, capacidad de compensación instalada, alcance de suministro, servicios incluidos y principales exclusiones. De esta forma, se busca evitar una comparación directa incompleta entre alternativas que no consideran exactamente las mismas partidas ni el mismo nivel de definición para su implementación.

9.1. Alcance de la evaluación técnico-económica

La evaluación técnico-económica presentada en este capítulo corresponde a una comparación preliminar de alternativas comerciales para la implementación de filtros activos de potencia en la SEU Nº 22. El análisis considera los antecedentes técnicos desarrollados en los capítulos anteriores, especialmente la conveniencia de una estrategia distribuida y la evaluación técnica de una solución de 270 A por centro.

El análisis considera los siguientes aspectos:

- capacidad nominal de compensación armónica ofertada;
- compatibilidad con el nivel de tensión del sistema;
- configuración propuesta por cada proveedor;
- grado de protección y factibilidad de instalación física;
- alcance técnico declarado y exclusiones relevantes;
- inclusión de transformadores de corriente, repuestos y puesta en marcha;
- costo neto equivalente en dólares estadounidenses;
- riesgo técnico asociado a ubicación, control, revalidación e ingeniería de detalle.

Esta evaluación no reemplaza una ingeniería de detalle ni una evaluación contractual definitiva. Por lo tanto, los valores obtenidos deben entenderse como antecedentes de apoyo para la toma de decisión y para la justificación técnica de la alternativa recomendada.

Dado que los valores presentados en este capítulo corresponden a ofertas comerciales reales entregadas a Minera Valle Central, y con el fin de resguardar la confidencialidad comercial de la información, en el resto del capítulo los proveedores se identifican de forma anónima como Proveedor A, Proveedor B y Proveedor C.

9.2. Limitaciones de la evaluación económica

La evaluación presentada corresponde a una comparación preliminar basada en las ofertas comerciales disponibles, en los antecedentes técnicos desarrollados en la memoria y en una revisión cualitativa de los costos de operación, mantenimiento y beneficios esperados. No obstante, presenta las siguientes limitaciones:

- no considera una ingeniería de detalle final de montaje, canalizaciones y cables;
- no incluye una memoria de cálculo definitiva de alimentadores y protecciones;
- no considera costos de obras civiles, soportes, montaje mecánico o adecuaciones de terreno;
- no incorpora costos asociados a detenciones de planta o interferencias operacionales;
- no considera variaciones futuras de tipo de cambio;

- no desarrolla una evaluación financiera mediante VAN, TIR o periodo de recuperación;
- no valoriza económicamente beneficios indirectos, tales como reducción de riesgo de falla, continuidad operacional o menor estrés térmico en equipos.

En consecuencia, la evaluación debe entenderse como una base técnico-económica para justificar la selección preliminar de alternativa y orientar una futura etapa de ingeniería de detalle y adquisición.

9.3. Alternativas comerciales consideradas

Durante el desarrollo del proyecto se recibieron tres alternativas comerciales principales para la mitigación armónica mediante filtros activos de potencia. Estas corresponden a soluciones ofertadas por Proveedor A, Proveedor B y Proveedor C.

Tabla 9.1: Resumen técnico-comercial de alternativas recibidas

Proveedor	**Capacidad ofertada**	**Observación principal**
Proveedor A	2 armarios de 270 A Total: 540 A	Solución distribuida, con armarios IP65, TTCC considerados, repuesto y puesta en marcha incluida.
Proveedor B	3 equipos de 280 A Total: 840 A	Mayor capacidad total instalada y compatible con 600 V; oferta presentada como suministro de tres paneles, sin distribución por CCM definida y con evaluación adicional por gabinete IP21.
Proveedor C	1 equipo de 100 A Total: 100 A	Capacidad insuficiente y rango de tensión no compatible directamente con el sistema de 600 V.

La alternativa Proveedor A corresponde a dos armarios principales de filtros activos de 270 A, cada uno asociado a un centro de control de motores. Esta alternativa es coherente con la estrategia distribuida analizada previamente y fue posteriormente evaluada mediante simulación armónica en ETAP.

La alternativa Proveedor B considera tres equipos de 280 A, alcanzando una capacidad total instalada de 840 A. Esta solución es compatible con el nivel de tensión del sistema, ya que el equipo ofertado corresponde a una solución para redes de 400–690 V. Sin embargo, la oferta se presenta como el suministro de tres paneles de filtros activos, sin definir explícitamente una distribución por centro de control de motores. Por lo tanto, su desempeño final dependería de la ubicación adoptada durante la ingeniería de detalle.

Si esta alternativa se implementara como una solución centralizada o global aguas arriba de los CCM, podría reducir la corriente armónica vista desde la barra principal de la SEU Nº 22, pero no necesariamente resolvería la circulación local de corrientes armónicas en CCM6 y CCM7, comportamiento observado previamente en las alternativas centralizadas evaluadas en el Capítulo 6. En cambio, si los tres equipos se distribuyeran entre ambos CCM, sería necesario definir la asignación de equipos, puntos de medición, estrategia de control y condiciones de instalación.

Adicionalmente, el grado de protección informado para los gabinetes es IP21, por lo que una instalación exterior requeriría evaluar una envolvente complementaria, sala eléctrica u otra solución equivalente. Por esta razón, Proveedor B se considera una alternativa técnicamente posible, pero con mayor incertidumbre de implementación respecto de la solución Proveedor A, cuya configuración distribuida de un equipo por CCM fue evaluada directamente mediante simulación para el escenario proyectado.

La alternativa Proveedor C considera un único equipo de 100 A. Esta capacidad es significativamente menor respecto de los requerimientos observados en la evaluación técnica, además de no presentar compatibilidad directa con el nivel de tensión de 600 V de la SEU Nº 22. Por esta razón, se considera una alternativa no recomendable desde el punto de vista técnico.

9.4. Criterio de conversión económica

Con el objetivo de comparar las ofertas en una misma moneda, todos los valores fueron expresados en dólares estadounidenses. Para ello se utilizó un tipo de cambio referencial correspondiente al día 05 de agosto de 2026 [24].

Los valores utilizados fueron:

- 1 USD = 914,46 CLP;
- 1 USD = 0,87 EUR.

Cabe señalar que las tres ofertas recibidas establecen explícitamente que el tipo de cambio aplicable a la facturación corresponde al dólar observado vigente al día de la facturación, y no a un valor fijo pactado en la cotización [25], [26], [27]. Por lo tanto, la conversión presentada en esta memoria debe entenderse como una referencia de comparación en una fecha fija, y no como el tipo de cambio contractual efectivo de cada oferta, el cual dependerá de la fecha real de facturación durante la etapa de adquisición.

La Tabla 9.2 presenta la conversión de los valores netos principales de cada oferta.

Tabla 9.2: Conversión referencial de valores netos de ofertas

Proveedor	**Moneda**	**Valor neto original**	**Valor neto equivalente [USD]**
Proveedor A	USD	193.856	193.856
Proveedor B	EUR	126.296	145.168
Proveedor C	CLP	11.041.129	12.075

Nota: Los valores corresponden a montos netos, sin IVA. En el caso de Proveedor B se utiliza el subtotal neto de la partida ofertada, correspondiente a tres equipos de 42.098,7 EUR cada uno.

A partir de la Tabla 9.2, se observa que la oferta del Proveedor A presenta el mayor valor neto global, seguida por la del Proveedor B. No obstante, esta comparación directa no refleja por sí sola el alcance técnico declarado por cada proveedor, ya que las alternativas presentan diferencias en gabinete, servicios, repuestos, configuración propuesta y condiciones de implementación.

Además del valor neto, resulta necesario declarar las condiciones comerciales de cada oferta, ya que estas determinan el alcance real de la comparación económica. La Tabla 9.3 resume la vigencia, forma de pago y tratamiento del flete e IVA informados por cada proveedor.

Tabla 9.3: Condiciones comerciales declaradas por cada oferta

Proveedor	**Vigencia de la oferta**	**Forma de pago**	**Flete e IVA**
Proveedor A	30 días desde la fecha de cada cotización [25], [28]	30 días fecha factura	Despacho declarado solo dentro de Santiago, RM; flete hasta la SEU Nº 22 no incluido. Valores netos, IVA no incluido
Proveedor B	10 días (19 al 29 de mayo de 2026) [26]	No especificada en la cotización	Flete no especificado. Valores netos, IVA no incluido
Proveedor C	5 días (12 al 17 de mayo de 2026) [27]	30 días	Flete no especificado. Valores netos, IVA no incluido

Nota: El IVA aplicable corresponde a la tasa vigente en Chile (19 %); ninguna de las tres ofertas lo incluye en el valor neto informado. El flete hacia la ubicación de la SEU Nº 22 no está incluido ni especificado en ninguna de las tres ofertas revisadas, por lo que se considera una partida pendiente de cotizar en la etapa de adquisición.

Como se observa en la Tabla 9.3, las tres ofertas presentan plazos de vigencia acotados (entre 5 y 30 días), por lo que los valores comparados en esta memoria corresponden a una referencia temporal específica y no a condiciones garantizadas para una eventual adquisición posterior. Asimismo, ninguna oferta incluye el flete hasta la SEU Nº 22, por lo que dicho costo deberá cotizarse de forma independiente durante la etapa de adquisición.

9.5. Desglose del valor de la oferta del Proveedor A y comparación económica

Para interpretar correctamente la diferencia económica entre alternativas, resulta necesario revisar el desglose de la oferta del Proveedor A. Esta oferta presenta un valor neto global que no corresponde únicamente a los dos armarios principales de filtros activos, sino que también incorpora un módulo de repuesto y el servicio de puesta en marcha.

El desglose económico informado para el Proveedor A se presenta en la Tabla 9.4.

Tabla 9.4: Desglose económico de la oferta del Proveedor A [25], [28]

Ítem	**Valor neto [USD]**	**Observación**
Dos armarios principales APF de 270 A	170.736	Equipos principales de compensación
Módulo de repuesto de 90 A	20.080	Repuesto para continuidad operacional
Servicio de puesta en marcha	3.040	Apoyo técnico y comisionamiento
Total neto global	**193.856**	Filtros + repuesto + puesta en marcha

De acuerdo con la Tabla 9.4, si se analiza únicamente el costo de los armarios principales de compensación, el valor del Proveedor A corresponde a USD 170.736. En consecuencia, la diferencia entre el Proveedor A y el Proveedor B no debe interpretarse únicamente como una diferencia de USD 48.688 entre equipos equivalentes. Si se excluyen el módulo de repuesto y la puesta en marcha del Proveedor A para comparar solo el suministro principal de filtros, la diferencia disminuye aproximadamente a USD 25.568.

Esta comparación no busca eliminar del análisis el valor total de la oferta del Proveedor A, ya que el repuesto y la puesta en marcha forman parte del alcance ofertado. Su objetivo es mostrar que las ofertas no son completamente homogéneas y que la diferencia económica debe evaluarse junto con el alcance técnico declarado, las condiciones de instalación y los riesgos pendientes de ingeniería.

Si bien podría calcularse un costo unitario por ampere de compensación, dicho indicador no se utiliza como criterio de selección en esta memoria. En filtros activos, la corriente nominal ofertada no representa por sí sola el desempeño técnico de la solución, ya que este depende de la ubicación eléctrica, la estrategia de control, los puntos de medición, el grado de protección, la configuración de instalación y el alcance declarado por cada proveedor. Por esta razón, la comparación económica se realiza a partir del valor global, el alcance incluido y la adecuación técnica de cada alternativa, evitando una selección basada únicamente en USD/A.

9.6. Análisis de alcance y condiciones de implementación

Además del costo y la capacidad nominal de compensación, se revisó el alcance incluido en cada oferta, con el objetivo de identificar diferencias relevantes para una eventual implementación en terreno. No obstante, debe señalarse que las ofertas no presentan el mismo nivel de detalle respecto de montaje, canalizaciones, protecciones externas, ingeniería de detalle y conexionado. Por esta razón, no resulta conveniente comparar cada una de estas partidas como si todas estuvieran definidas de forma equivalente.

A partir de los antecedentes disponibles, las diferencias más relevantes entre las alternativas se concentran en el grado de protección de los gabinetes, la configuración de instalación, la inclusión de transformadores de corriente, la disponibilidad de repuestos y la puesta en marcha. La Tabla 9.5 resume estos aspectos.

Tabla 9.5: Principales diferenciadores de alcance entre ofertas

Aspecto	**Comparación relevante**
Capacidad ofertada	Proveedor A considera dos armarios de 270 A, con un total de 540 A. Proveedor B considera tres equipos de 280 A, con un total de 840 A. Proveedor C considera un equipo de 100 A.
Compatibilidad con 600 V	Proveedor A y Proveedor B son compatibles con el nivel de tensión del sistema. Proveedor C no presenta compatibilidad directa con una red de 600 V.
Configuración de instalación	Proveedor A se presenta como una solución distribuida de un filtro por CCM. Proveedor B se presenta como suministro de tres paneles, sin definir una distribución específica por CCM. Proveedor C considera un único equipo.
Grado de protección	Proveedor A considera gabinetes IP65, condición más adecuada para la instalación exterior considerada. Proveedor B considera gabinetes IP21, por lo que requiere evaluar una envolvente complementaria, sala eléctrica u otra solución equivalente.
Medición mediante TTCC	Proveedor A considera TTCC para medición del filtro. Proveedor B incluye tres TTCC externos 3000/5 A. En Proveedor C no se identifica este aspecto como parte del alcance revisado.
Repuestos y puesta en marcha	Proveedor A incluye un módulo de repuesto de 90 A y servicio de puesta en marcha. Proveedor B no incluye repuestos, pero considera asistencia remota y un día en sitio. En Proveedor C no se identifica puesta en marcha ni repuestos como parte del alcance revisado.

De acuerdo con la Tabla 9.5, la comparación de alcance no muestra que una oferta incluya la totalidad de las partidas necesarias para dejar el sistema completamente instalado. En todos los casos se requiere una etapa posterior de ingeniería de detalle para definir alimentadores, protecciones, rutas de cables, canalizaciones, montaje y conexionado final.

Sin embargo, sí existen diferencias relevantes. La alternativa Proveedor A considera gabinetes IP65, lo que se ajusta de mejor forma a la instalación exterior definida en el Capítulo 8. Además, incluye un módulo de repuesto y servicio de puesta en marcha. Estos elementos no eliminan la necesidad de

una ingeniería posterior, pero sí forman parte del alcance técnico declarado de la oferta.

Por su parte, Proveedor B presenta una alternativa técnicamente competitiva en términos de tensión y capacidad de compensación. La oferta considera equipos compatibles con redes de 400–690 V, tres unidades de 280 A y transformadores de corriente externos. No obstante, el grado de protección informado es IP21, por lo que su instalación en una zona exterior requeriría una evaluación adicional o una solución de gabinete complementaria. Además, la propia oferta establece que el interruptor externo debe ser suministrado por el cliente y que no se incluyen maniobras de instalación, montaje o conexionado de los equipos.

En consecuencia, la diferencia de costo entre Proveedor A y Proveedor B no debe entenderse únicamente como una diferencia entre equipos equivalentes. Proveedor B presenta menor valor neto equivalente y mayor capacidad nominal instalada, pero su implementación queda sujeta a definir la ubicación final de los tres equipos, la estrategia de control, la adecuación por grado de protección IP21 y las partidas de instalación no incluidas. En cambio, Proveedor A presenta una condición inicial más alineada con el proyecto, principalmente por su configuración distribuida, su grado de protección IP65, el repuesto incluido y la puesta en marcha considerada.

De esta forma, el análisis de alcance no busca afirmar que Proveedor A incluya todos los elementos de instalación del proyecto, sino identificar que presenta menor incertidumbre relativa frente a las condiciones físicas y operacionales definidas para la implementación.

9.7. Criterios de evaluación ponderada

Para complementar el análisis económico, se desarrolló una matriz de evaluación ponderada. Esta matriz no asigna puntaje únicamente por coincidir con la solución de 270 A+270 A evaluada en el Capítulo 7, debido a que dicha evaluación fue realizada precisamente para verificar la factibilidad técnica de una alternativa comercial específica.

Cabe declarar explícitamente una asimetría metodológica entre las tres alternativas evaluadas. La configuración exacta del Proveedor A (dos filtros distribuidos de 270 A, uno por CCM) fue simulada mediante flujo armónico en ETAP, según se presenta en el Capítulo 7, por lo que su puntuación técnica se apoya en resultados cuantitativos de simulación. En cambio, las alternativas de Proveedor B y Proveedor C no fueron simuladas bajo un caso

equivalente: su evaluación técnica se basa en un juicio de ingeniería aplicado a las especificaciones declaradas en sus respectivas ofertas (capacidad nominal, tensión de operación, grado de protección y alcance de suministro), sin verificación mediante simulación del desempeño armónico esperado en CCM6 y CCM7. Esta asimetría no invalida la comparación, pero implica que la incertidumbre asociada a la puntuación técnica de Proveedor B y Proveedor C es mayor que la de Proveedor A, y debería resolverse mediante una simulación específica si alguna de estas alternativas se evaluara formalmente en una etapa posterior.

Por esta razón, la evaluación ponderada considera criterios más generales, tales como adecuación a una estrategia distribuida, capacidad de compensación, compatibilidad con la tensión del sistema, factibilidad de implementación exterior, alcance técnico declarado y riesgo de ingeniería pendiente.

La Tabla 9.6 resume los criterios utilizados.

Tabla 9.6: Criterios utilizados en la matriz de evaluación ponderada

Criterio	**Puntaje máximo**	**Grupo**
Compatibilidad con tensión de 600 V	15	Técnico
Adecuación a estrategia distribuida y flexibilidad de implementación	15	Técnico
Capacidad de compensación y desempeño esperado	15	Técnico
Grado de protección y factibilidad para instalación exterior	10	Técnico
Riesgo de ingeniería y validación pendiente	5	Técnico
Soporte técnico, repuestos y puesta en marcha	10	Técnico-comercial
Costo neto total equivalente	10	Económico-comercial
Plazo de entrega	5	Económico-comercial
Alcance declarado y menor incertidumbre de implementación	15	Económico-comercial
Total	**100**	–

La ponderación asigna mayor peso a los criterios técnicos, debido a que

la finalidad principal del proyecto es asegurar el cumplimiento de los límites de calidad de energía y una implementación viable en la SEU N° 22. Los criterios económicos se utilizan como complemento, pero no reemplazan la evaluación técnica.

Para cada criterio, el puntaje se ancla de forma proporcional al grado de cumplimiento respecto del máximo definido: el puntaje máximo corresponde a un cumplimiento pleno y sin limitaciones conocidas; puntajes intermedios reflejan cumplimiento parcial, condicionado o con incertidumbre adicional de implementación; y un puntaje de cero se reserva para una incompatibilidad técnica directa con los requerimientos del proyecto. La Tabla 9.7 explicita la evidencia utilizada para asignar el puntaje de cada proveedor en los criterios técnicos y técnico-comerciales.

Tabla 9.7: Evidencia utilizada para el anclaje de los puntajes técnicos y técnico-comerciales

Criterio	**Proveedor A**	**Proveedor B**	**Proveedor C**
Compatibilidad con tensión de 600 V (máx. 15)	15: equipo nativo 600 V	15: oferta compatible con redes 400–690 V	0: sin compatibilidad directa con 600 V
Adecuación a estrategia distribuida (máx. 15)	14: dos armarios, uno por CCM, alineado con la estrategia distribuida	12: tres equipos sin distribución definida por CCM	2: equipo único, sin estrategia distribuida
Capacidad de compensación (máx. 15)	15: 540 A totales, evaluado en ETAP	15: 840 A totales, capacidad superior	2: 100 A, muy por debajo de lo requerido
Grado de protección / instalación exterior (máx. 10)	10: gabinete IP65, apto para exterior sin adecuación	3: gabinete IP21, requiere envolvente adicional	2: grado de protección no verificado como suficiente
Riesgo de ingeniería pendiente (máx. 5)	5: configuración evaluada mediante simulación	3: requiere definir ubicación, control y adecuación IP	0: alternativa descartada técnicamente
Soporte técnico, repuestos y puesta en marcha (máx. 10)	10: incluye repuesto de 90 A y puesta en marcha	5: incluye asistencia remota y un día en sitio, sin repuestos	1: sin puesta en marcha ni repuestos identificados en el alcance

9.8. Matriz de evaluación técnico-económica

La Tabla 9.8 presenta la matriz de evaluación técnico-económica de las alternativas comerciales recibidas.

Tabla 9.8: Matriz de evaluación técnico-económica de alternativas

Criterio	Máx.	Proveedor A	Proveedor B	Proveedor C
Compatibilidad con tensión de 600 V	15	15	15	0
Adecuación a estrategia distribuida y flexibilidad de implementación	15	14	12	2
Capacidad de compensación y desempeño esperado	15	15	15	2
Grado de protección y factibilidad para instalación exterior	10	10	3	2
Riesgo de ingeniería y validación pendiente	5	5	3	0
Soporte técnico, repuestos y puesta en marcha	10	10	5	1
Subtotal técnico-comercial	**70**	**69**	**53**	**7**
Costo neto total equivalente	10	5	8	10
Plazo de entrega	5	4	5	0
Alcance declarado y menor incertidumbre de implementación	15	13	7	1
Subtotal económico-comercial	**30**	**22**	**20**	**11**
Puntaje total	**100**	**91**	**73**	**18**

Los resultados muestran que Proveedor A obtiene el mayor puntaje global. Esto no se debe únicamente a que su configuración haya sido evaluada en ETAP, sino a una combinación de factores técnicos y comerciales: compatibilidad con el sistema de 600 V, configuración distribuida, gabinete IP65, transformadores de corriente considerados, módulo de repuesto, puesta en marcha y menor incertidumbre relativa de implementación.

Proveedor B obtiene un puntaje intermedio. Esta alternativa es técnicamente atractiva por su compatibilidad con la tensión del sistema, mayor capacidad instalada y menor valor neto equivalente respecto de Proveedor A. Sin embargo, su puntaje se reduce debido a que la oferta no define una distribución por CCM, requiere definición adicional de ubicación y control,

presenta grado de protección IP21 para una implementación proyectada exterior y excluye partidas relevantes de instalación e ingeniería.

Proveedor C obtiene el menor puntaje. Aunque presenta el menor valor económico, su capacidad de compensación es insuficiente y el rango de tensión ofertado no es compatible directamente con el sistema de 600 V. Por lo tanto, no se considera una alternativa técnicamente viable para la condición estudiada.

9.8.1. Sensibilidad de los resultados a la ponderación adoptada

Dado que la ponderación 70/30 (técnico/económico) adoptada en esta memoria refleja un criterio de diseño y no una regla normativa, se evaluó la sensibilidad del resultado frente a ponderaciones alternativas, manteniendo los subtotales técnico-comercial y económico-comercial de cada proveedor (Tabla 9.8) y reescalándolos a los nuevos pesos. La Tabla 9.9 resume los resultados.

Tabla 9.9: Sensibilidad del puntaje total a distintas ponderaciones técnico/económico

Ponderación técnico/económico	**Proveedor A**	**Proveedor B**	**Proveedor C**
70/30 (caso base, esta memoria)	91	73	18
50/50	86	71	23
30/70 (invertida, caso extremo)	81	69	29

Como se observa en la Tabla 9.9, Proveedor A se mantiene como la alternativa de mayor puntaje bajo las tres ponderaciones evaluadas, incluyendo el caso extremo en que se invierte la relación de pesos a favor de los criterios económicos. La diferencia respecto de Proveedor B se reduce de 18 puntos en el caso base a 12 puntos en la ponderación invertida, pero el orden relativo de las tres alternativas no cambia en ningún escenario. Por lo tanto, la recomendación de Proveedor A no depende críticamente de la ponderación específica adoptada, sino que es robusta frente a variaciones razonables en el peso relativo asignado a los criterios técnicos y económicos.

9.9. Análisis de la alternativa recomendada

A partir de la evaluación desarrollada, se recomienda la alternativa Proveedor A como solución preferente para la mitigación armónica en la SEU Nº 22. Esta recomendación se fundamenta en los siguientes aspectos:

- es compatible con la tensión nominal de 600 V del sistema;
- mantiene una filosofía distribuida, con un filtro asociado a CCM6 y otro a CCM7;
- posee una capacidad total instalada de 540 A, evaluada técnicamente en el Capítulo 7;
- considera gabinetes IP65, adecuados para la implementación exterior definida en el Capítulo 8;
- considera transformadores de corriente para la medición del filtro;
- incluye un módulo de repuesto de 90 A;
- incluye servicio de puesta en marcha y comisionamiento;
- presenta menor incertidumbre relativa respecto de la implementación final, al encontrarse alineada con la configuración distribuida evaluada para el escenario proyectado.

La alternativa Proveedor B se mantiene como una opción técnicamente posible, especialmente por su compatibilidad con el nivel de tensión y su mayor capacidad total instalada. Sin embargo, para ser considerada como alternativa equivalente debería desarrollarse una definición técnica específica de ubicación, asignación de equipos, estrategia de control, puntos de medición y condiciones de instalación. En particular, sería necesario determinar si los tres equipos se implementarían en forma centralizada o distribuida, y verificar su efecto sobre CCM6, CCM7 y la barra de baja tensión de la SEU Nº 22.

Adicionalmente, para comparar Proveedor B en condiciones equivalentes con Proveedor A, sería necesario valorizar partidas no incluidas o no resueltas directamente en su oferta, tales como adecuación para instalación exterior, protecciones externas, montaje, conexionado, canalizaciones, ingeniería eléctrica de detalle y repuestos.

Por lo anterior, aunque Proveedor A no presenta el menor valor neto equivalente, corresponde a la alternativa con mejor equilibrio entre desempeño técnico, alcance técnico declarado y adecuación a las condiciones de implementación consideradas en esta memoria. Esta conclusión no implica que la oferta incluya la totalidad de las partidas de instalación, sino que pre-

senta una menor incertidumbre relativa respecto de las condiciones físicas y operacionales definidas para el proyecto.

9.10. Evaluación preliminar de operación, mantenimiento y beneficios

Además de la inversión inicial, la evaluación de una solución basada en filtros activos debe considerar los costos asociados a su operación durante la vida útil, los requerimientos de mantenimiento y los beneficios técnicos esperados. Debido al nivel de ingeniería conceptual del presente estudio, estos aspectos se evalúan de forma preliminar y principalmente cualitativa.

Los principales componentes que deberán considerarse en una futura estimación de costos de operación y mantenimiento se resumen en la Tabla 9.10.

Tabla 9.10: Aspectos asociados a operación, mantenimiento y beneficios de la solución

Aspecto	**Tratamiento en la presente evaluación**	**Antecedente requerido para ingeniería posterior**
Pérdidas eléctricas y consumo auxiliar	Los filtros activos requieren energía para sus circuitos de potencia, control y ventilación. Las ofertas disponibles no permiten determinar con precisión un costo anual de energía para la condición real de operación.	Curvas de eficiencia, pérdidas en vacío y a carga, perfil anual de compensación, horas de servicio y tarifa interna de energía.
Mantenimiento preventivo	Se considera necesaria la inspección periódica del estado del gabinete, limpieza, revisión de ventilación, conexiones eléctricas, alarmas, registros de operación y condiciones ambientales.	Plan de mantenimiento recomendado por el fabricante, periodicidades, horas-hombre, herramientas y repuestos consumibles.
Mantenimiento correctivo	La solución debe permitir retirar de servicio un filtro sin interrumpir la alimentación de las cargas del CCM. La oferta del Proveedor A considera un módulo de repuesto de 90 A, lo que reduce la incertidumbre asociada al reemplazo de un módulo de potencia.	Procedimiento de reemplazo, tiempo medio de reparación, disponibilidad de soporte local, garantía y plazo de reposición de componentes.
Puesta en marcha y parametrización	La oferta recomendada considera el servicio de puesta en marcha. Este aspecto resulta relevante debido a que CCM7 requiere una configuración selectiva que deberá ajustarse mediante mediciones reales.	Protocolo de pruebas, capacitación, parámetros iniciales, criterios de aceptación y responsabilidades del proveedor.
Verificación periódica de desempeño	Se requiere revisar THDv, TDD, armónicos individuales, corriente de compensación, alarmas y estado de cada equipo.	Frecuencia de campañas de medición, instrumentos disponibles y responsables de analizar los resultados.

Desde el punto de vista de los beneficios, la solución propuesta permite llevar los indicadores THDv y TDD bajo los límites considerados en los tres puntos evaluados. Además, la configuración distribuida reduce la circulación de corrientes armónicas por los alimentadores y barras ubicados aguas arriba de las cargas no lineales.

Esta reducción puede contribuir a disminuir pérdidas adicionales, calentamiento y esfuerzo térmico en transformadores, conductores y equipos asociados. Asimismo, puede reducir la exposición de equipos sensibles a formas de onda distorsionadas y mejorar la confiabilidad general del sistema. Sin embargo, estos efectos corresponden a beneficios técnicos esperados y no se valorizan económicamente en esta etapa, debido a que no se dispone de un historial suficiente de fallas, costos de detención, costos de reposición ni pérdidas eléctricas atribuibles exclusivamente a los armónicos.

En consecuencia, la evaluación económica desarrollada se concentra principalmente en el costo de inversión y en diferencias de alcance entre proveedores. La determinación de un costo anual de operación y mantenimiento, así como la valorización de beneficios por continuidad operacional o extensión de vida útil, deberá desarrollarse durante la ingeniería de detalle utilizando información garantizada por el proveedor y antecedentes económicos de Minera Valle Central.

9.11. Síntesis del capítulo

En este capítulo se compararon las alternativas comerciales recibidas para la mitigación armónica de la SEU N° 22. La evaluación consideró costos netos equivalentes en dólares, capacidad de compensación, alcance técnico declarado, compatibilidad técnica, condiciones de implementación y riesgo de ingeniería pendiente.

La comparación económica directa muestra que Proveedor A presenta el mayor valor neto global, mientras que Proveedor B presenta un menor valor neto equivalente y mayor capacidad nominal instalada. No obstante, al analizar el alcance técnico declarado, se observa que Proveedor A incorpora elementos adicionales relevantes, tales como gabinetes IP65, transformadores de corriente, módulo de repuesto y puesta en marcha. Estos elementos no reemplazan una etapa posterior de ingeniería de detalle, pero sí permiten justificar que la comparación no se base únicamente en el valor neto de suministro.

Proveedor B se considera una alternativa técnicamente posible, ya que

es compatible con el nivel de tensión del sistema y posee una capacidad total instalada superior. Sin embargo, requiere definición técnica adicional para establecer su configuración final, ubicación de equipos, estrategia de control y adecuación a una instalación exterior, especialmente por el grado de protección IP21 y por las partidas excluidas de montaje, conexionado, canalización e ingeniería eléctrica.

Proveedor C se descarta como alternativa recomendada debido a su baja capacidad de compensación y a la falta de compatibilidad directa con el sistema de 600 V.

Finalmente, la alternativa Proveedor A se selecciona como la opción recomendada, no por ser la solución de menor costo, sino por presentar el mejor equilibrio entre cumplimiento técnico, alcance declarado, factibilidad de implementación y reducción de riesgo para la operación de la SEU Nº 22.

Capítulo 10

Conclusiones y recomendaciones

El presente capítulo resume las principales conclusiones obtenidas a partir del diagnóstico armónico, la modelación en ETAP, la evaluación de alternativas de mitigación, la evaluación por simulación de una configuración de filtrado activo de 270 A y la comparación técnico-económica de las ofertas recibidas. Además, se presentan recomendaciones para una futura etapa de ingeniería de detalle, implementación y verificación en terreno.

10.1. Conclusiones generales

La presente memoria permitió evaluar técnica y económicamente una alternativa de mitigación armónica para la SEU N° 22, considerando una instalación industrial real con alta presencia de cargas no lineales asociadas principalmente a variadores de frecuencia.

A partir del diagnóstico inicial, se verificó que la SEU N° 22 presenta una condición armónica relevante. Si bien la barra general de baja tensión se encontraba cercana al límite de distorsión armónica total de tensión en la condición medida, los puntos asociados a CCM6 y CCM7 presentaban incumplimientos de THD_v. Además, los tres puntos evaluados presentaban valores elevados de TDD, evidenciando la presencia significativa de corrientes armónicas en el sistema.

El análisis desarrollado permitió confirmar que la problemática armónica no se encuentra asociada a una única carga puntual, sino a la concentración

de cargas no lineales en los centros de control de motores alimentados por la subestación. En particular, la presencia de variadores de frecuencia de 6 pulsos resulta coherente con la aparición de armónicos característicos de bajo orden, principalmente de orden 5, 7, 11 y 13.

10.2. Conclusiones del diagnóstico y modelación

El contraste de coherencia entre los resultados del modelo y las mediciones disponibles se realizó bajo un criterio de aceptación explícito, orientado al uso comparativo que se le da al modelo en esta memoria. En THD_v, la simulación se mantuvo entre 4,63 % y 11,28 % por sobre los valores medidos. En TDD, en cambio, el modelo subestimó de forma sistemática la condición medida, con errores relativos entre −27,51 % y −29,13 % y una dispersión de solo 2,92 pp entre puntos. El contraste por orden armónico permitió localizar el origen de esta diferencia en el espectro genérico de biblioteca, que asigna al quinto armónico un 23,52 % de la corriente de cada variador frente a valores medidos de entre 31,86 % y 53,88 % en barra.

El modelo reprodujo la jerarquía de criticidad entre puntos y presentó un sesgo sistemático y no errático, condición bajo la cual resulta adecuado para comparar alternativas de mitigación sobre una base común. No obstante, y a diferencia de lo que suele suponerse de un modelo de este tipo, el sesgo no es conservador en corriente: la capacidad de compensación requerida en terreno podría superar la determinada por simulación. Considerando que el equipo asociado a CCM7 resulta dimensionado en su capacidad nominal sin reserva demostrada, este antecedente refuerza la necesidad de verificar el desempeño mediante mediciones posteriores a la implementación.

La diferenciación entre la condición medida en 2024, la condición base actualizada y el escenario proyectado permitió ordenar el análisis y evitar que los resultados históricos fueran confundidos con escenarios modelados directamente. En particular, se incorporaron antecedentes posteriores a la medición, tales como la bomba B102 de 500 HP, además de cargas proyectadas y redistribuciones de carga consideradas para el análisis futuro.

En el escenario proyectado sin mitigación, los resultados mostraron incumplimiento simultáneo de THD_v y TDD en los tres puntos de evaluación. La THD_v alcanzó valores de 10,08 % en la barra de baja tensión de la SEU N° 22, 10,57 % en CCM6 y 10,74 % en CCM7, superando el límite de 8 %. Asimismo, la TDD alcanzó 20,15 % en la barra de baja tensión, 18,79 % en CCM6 y 21,28 % en CCM7, todos por sobre los límites aplicables definidos

según la relación I_{SC}/I_L.

Estos resultados permitieron concluir que, bajo la condición proyectada, la operación sin mitigación no resulta aceptable desde el punto de vista de calidad de energía, por lo que se justifica técnicamente la incorporación de una solución de filtrado activo.

10.3. Conclusiones de las alternativas de mitigación

La comparación de alternativas de mitigación permitió identificar diferencias relevantes entre una solución centralizada y una solución distribuida. Las alternativas centralizadas permiten reducir la distorsión armónica vista desde la barra principal de baja tensión de la SEU Nº 22, especialmente cuando se considera una capacidad del orden de 500 A. Sin embargo, esta configuración no reduce de forma suficiente la TDD local en CCM6 y CCM7, debido a que las corrientes armónicas siguen circulando por los alimentadores y barras de los centros de control de motores antes de ser compensadas en el punto común.

Por otra parte, la alternativa distribuida permite compensar las corrientes armónicas más cerca de las cargas que las generan. La configuración de 250 A en CCM6 y 300 A en CCM7 presentó un mejor desempeño técnico global, logrando cumplir simultáneamente los límites de THD_v y TDD en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, CCM6 y CCM7.

A partir de estos resultados, se concluye que la estrategia distribuida es más adecuada para la SEU Nº 22, debido a que permite reducir tanto la distorsión vista desde la subestación como la circulación local de corrientes armónicas en los centros de control de motores.

10.4. Conclusiones de la evaluación por simulación de la configuración de 270 A

La evaluación por simulación de una configuración compuesta por dos equipos de filtrado activo de 270 A, uno conectado en CCM6 y otro en CCM7, permitió verificar la suficiencia de dicha capacidad de compensación dentro del escenario proyectado. Se trata de una configuración genérica de capacidad nominal equivalente a la alternativa seleccionada, y no de un modelo del control específico del equipo comercial ofertado.

En una primera condición, ambos filtros fueron evaluados en modo automático. Bajo esta configuración, la THD_v se redujo bajo el límite de 8 % en todos los puntos evaluados. Sin embargo, la TDD permaneció levemente sobre el límite en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 y en CCM7, alcanzando 5,53 % y 8,14 %, respectivamente.

Debido a lo anterior, se evaluó una configuración final manteniendo el filtro de CCM6 en modo automático y configurando el filtro de CCM7 en modo manual selectivo. Esta configuración permitió redistribuir la capacidad de compensación del filtro de CCM7 hacia los armónicos más relevantes para el cumplimiento normativo.

Con la configuración final propuesta, la THD_v se redujo a 3,97 % en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, 4,13 % en CCM6 y 4,17 % en CCM7. A su vez, la TDD disminuyó a 3,19 % en la barra de baja tensión, 3,00 % en CCM6 y 3,44 % en CCM7, cumpliendo con los límites aplicables en todos los puntos evaluados.

Además, la revisión de armónicos individuales confirmó que la configuración final no genera incumplimientos particulares por orden armónico. El caso más ajustado corresponde al armónico 23 en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, con un valor sin redondeo de 0,5985 % frente a un límite de 0,600 %, equivalente a un margen de 0,25 % en términos relativos.

El análisis de utilización de los equipos mostró que ambos filtros operan en condiciones marcadamente distintas. El filtro asociado a CCM6 utiliza 207,42 A de su capacidad, conservando una reserva de 62,58 A. El filtro asociado a CCM7, en cambio, opera en su capacidad nominal de 270 A sin reserva demostrada, en una condición de saturación que se verifica al constatar que los modos automático y manual selectivo emplean idéntica corriente total y difieren únicamente en su distribución entre órdenes armónicos.

Esta condición acota el alcance del resultado. Un caso de sensibilidad con las cargas existentes al 100 % de su potencia nominal mostró que, al saturarse el filtro, la corriente armónica residual de CCM7 crece muy por sobre la proporción del incremento de demanda. No obstante, dicha condición no resulta alcanzable: el alimentador de CCM7 opera al 97,96 % de su capacidad de conducción desclasificada en el escenario proyectado, de modo que la demanda no puede crecer más de un 2,08 % adicional sin repotenciar la alimentación.

Corresponde señalar, adicionalmente, que el dimensionamiento obtenido no incorpora un margen frente a la incertidumbre del espectro armónico

adoptado. El contraste con las mediciones de terreno desarrollado en el Capítulo 6 indica que los accionamientos instalados presentan un contenido armónico superior al del espectro genérico empleado en la simulación, de modo que la capacidad de compensación requerida en terreno podría resultar mayor que la determinada en este estudio. Esta condición, unida a la ausencia de reserva del equipo asociado a CCM7, define el principal riesgo técnico de la solución evaluada y deberá ser abordada durante la puesta en marcha.

En consecuencia, se concluye que la configuración distribuida de dos equipos de filtrado activo de 270 A resulta técnicamente adecuada para mitigar la distorsión armónica del escenario simulado, en el entendido de que el equipo asociado a CCM7 queda dimensionado en su valor nominal y sin holgura demostrada, y que su desempeño deberá ser verificado y ajustado durante la puesta en marcha. Todo crecimiento posterior de carga en CCM7 requerirá evaluar conjuntamente la repotenciación del alimentador y la ampliación de la capacidad de filtrado.

10.5. Conclusiones de implementación

Desde el punto de vista de implementación, la solución propuesta requiere la instalación de un filtro activo asociado a CCM6 y otro asociado a CCM7, conectados mediante alimentadores dedicados desde cada centro de control de motores hacia gabinetes exteriores.

La revisión preliminar de espacios disponibles en los CCM permitió identificar ubicaciones referenciales para incorporar unidades derivadas asociadas a los alimentadores de los filtros. En CCM6 se identificó una alternativa en la Sección 12, posiciones 12A–12E, con aproximadamente 2,5 SF disponibles. En CCM7 se identificó una alternativa en la Sección 6, posiciones 6E–6I, con aproximadamente 2,5 SF disponibles. Estas ubicaciones se consideran preliminares y deberán ser confirmadas en terreno y con planos vigentes durante la ingeniería de detalle.

Respecto de la ubicación física de los gabinetes, se considera referencialmente la zona donde actualmente se encuentran los filtros pasivos fuera de servicio. Esta alternativa resulta razonable debido a que corresponde a un espacio previamente destinado a equipos de compensación y mitigación armónica. No obstante, su reutilización deberá verificarse considerando dimensiones finales, accesibilidad, ventilación, disipación térmica, canalizaciones, distancias de seguridad y factibilidad de retiro de los equipos existentes.

También se concluye que la correcta ubicación, polaridad y relación de transformación de los transformadores de corriente será crítica para el desempeño de la solución. Errores en estos aspectos podrían afectar la compensación del filtro activo y provocar diferencias entre el comportamiento simulado y el comportamiento real en terreno.

10.6. Conclusiones técnico-económicas

La evaluación técnico-económica permitió comparar las alternativas comerciales recibidas considerando no solo el valor neto de suministro, sino también la compatibilidad técnica, el alcance declarado, las condiciones de implementación y el riesgo de ingeniería pendiente.

La alternativa Proveedor A presenta el mayor valor neto global entre las ofertas evaluadas. Sin embargo, corresponde a una solución distribuida de dos armarios de 270 A, compatible con la tensión de 600 V, evaluada mediante simulación en ETAP para el escenario proyectado y alineada con la estrategia de compensación seleccionada. Además, considera gabinetes IP65, transformadores de corriente, módulo de repuesto y servicio de puesta en marcha.

La alternativa Proveedor B presenta una capacidad total instalada superior, igual a 840 A, y compatibilidad con el nivel de tensión del sistema. No obstante, su oferta se presenta como suministro de tres paneles, sin definir explícitamente una distribución por CCM. Además, considera gabinetes IP21, por lo que una instalación exterior requeriría una evaluación adicional o una solución complementaria de envolvente, sala eléctrica o adecuación equivalente.

La alternativa Proveedor C se descarta como solución recomendada, debido a que considera solo 100 A de compensación y no presenta compatibilidad directa con el sistema de 600 V.

A partir de la matriz de evaluación ponderada, la alternativa Proveedor A obtiene el mayor puntaje global, debido a su equilibrio entre desempeño técnico, compatibilidad con la instalación, alcance técnico declarado y menor incertidumbre relativa para una eventual implementación. Por lo tanto, se recomienda esta alternativa como solución preferente para la mitigación armónica de la SEU N° 22.

10.7. Cumplimiento de los objetivos de la memoria

A partir de los resultados obtenidos, se considera que el objetivo general y los objetivos específicos definidos para la memoria fueron abordados dentro del alcance de una evaluación técnico-económica preliminar. La Tabla 10.1 relaciona cada objetivo específico con los principales resultados desarrollados.

Tabla 10.1: Síntesis del cumplimiento de los objetivos específicos

Objetivo específico	**Resultado desarrollado**
Analizar los resultados del estudio de calidad de energía e identificar condiciones relevantes de operación.	Se revisaron las mediciones de Tecnored en la barra de baja tensión de la SEU N° 22, CCM6 y CCM7, identificándose niveles relevantes de THDv, TDD y armónicos individuales.
Caracterizar el perfil armónico e identificar las principales fuentes de distorsión.	Se identificó la alta presencia de variadores de frecuencia de 6 pulsos y el predominio de armónicos característicos de bajo orden, especialmente el quinto armónico.
Evaluar técnicamente una alternativa de filtrado activo mediante ETAP.	Se utilizó el modelo eléctrico existente de MVC, se incorporaron actualizaciones y cargas proyectadas, y se evaluaron escenarios sin mitigación y con filtros activos.
Determinar preliminarmente la capacidad de compensación requerida y su distribución.	Se compararon alternativas centralizadas y distribuidas de distintas capacidades, concluyéndose que una solución distribuida del orden de 270 A por CCM resulta técnicamente adecuada para el escenario proyectado.
Evaluar el impacto de la solución sobre TDD y THDv.	La configuración final redujo la THDv a 3,97 %, 4,13 % y 4,17 %, y la TDD a 3,19 %, 3,00 % y 3,44 % en la SEU N° 22, CCM6 y CCM7, respectivamente.
Comparar técnica y comercialmente alternativas de filtrado activo, cuantificando la inversión inicial y evaluando cualitativamente operación, mantenimiento, implementación y beneficios.	Se compararon tres ofertas comerciales cuantificando la inversión inicial y evaluando de forma cualitativa capacidad, tensión, configuración, grado de protección, repuestos, puesta en marcha, mantenimiento, riesgo de implementación y beneficios técnicos esperados. La alternativa Proveedor A presentó el mejor equilibrio técnico-comercial dentro del alcance evaluado, el cual no incluye flujos de operación ni indicadores de rentabilidad.

El objetivo general se cumple al integrar el diagnóstico de calidad de energía, la modelación armónica, el dimensionamiento y la evaluación por simulación de la solución, los lineamientos de implementación y la evaluación técnico-económica. Los resultados constituyen antecedentes de ingenie-

ría conceptual para apoyar una futura decisión de implementación en la SEU Nº 22.

10.8. Recomendaciones

Para una futura etapa de ingeniería de detalle e implementación, se recomienda considerar los siguientes aspectos:

- validar con el proveedor seleccionado la configuración final de los filtros activos, especialmente el modo manual selectivo propuesto para CCM7;
- verificar mediante medición el espectro armónico real de los accionamientos instalados, con el fin de contrastarlo con el espectro genérico empleado en la simulación y confirmar la suficiencia de la capacidad de compensación adoptada;
- verificar en terreno la disponibilidad real de espacio en CCM6 y CCM7 para instalar las unidades derivadas asociadas a los alimentadores de los filtros;
- confirmar la capacidad de barras, capacidad interruptiva, coordinación de protecciones y características finales de los interruptores dedicados;
- desarrollar la memoria de cálculo definitiva de alimentadores de potencia, canalizaciones, protecciones y puesta a tierra;
- verificar la factibilidad de retirar los filtros pasivos existentes y reutilizar el espacio físico disponible para los nuevos gabinetes;
- revisar las condiciones ambientales de la zona de instalación, incluyendo temperatura, polvo, humedad, exposición solar, ventilación y corrosión;
- confirmar la ubicación, relación y polaridad de los transformadores de corriente asociados a cada filtro activo;
- realizar la puesta en marcha con apoyo del proveedor o fabricante del equipo;
- efectuar una campaña de medición posterior a la implementación, considerando THD_v, TDD, armónicos individuales, corriente de compensación del APF, alarmas y eventos del equipo.

En particular, se recomienda dar especial atención al filtro asociado a CCM7, debido a que la simulación mostró que su desempeño depende de una distribución adecuada de la corriente de compensación entre los distintos órdenes armónicos.

10.9. Trabajos futuros

Como trabajos futuros, se propone desarrollar una ingeniería de detalle de la solución seleccionada, incorporando planos constructivos, rutas definitivas de cables, especificación de protecciones, canalizaciones, montaje, puesta a tierra y criterios de mantenimiento.

Asimismo, sería recomendable complementar el estudio con una campaña de medición posterior a la instalación, con el objetivo de comparar los resultados reales con los obtenidos en ETAP y ajustar la parametrización de los filtros si fuese necesario.

También se propone evaluar periódicamente el comportamiento armónico de la SEU Nº 22 frente a futuros cambios de carga, incorporación de nuevos variadores de frecuencia o modificaciones operacionales del proceso. Esto permitiría mantener actualizada la configuración de compensación y asegurar que la solución continúe cumpliendo con los criterios de calidad de energía definidos.

Anexo A

Resultados de respaldo de ETAP

En este anexo se presentan las capturas de respaldo del modelo ETAP utilizadas para obtener las corrientes de demanda y las corrientes de corto-circuito consideradas en la evaluación normativa del escenario proyectado.

A.1. Flujo de carga del escenario proyectado

La Figura A.1 presenta el flujo de carga del escenario proyectado utilizado para obtener las corrientes de demanda I_L en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, en CCM6 y en CCM7.

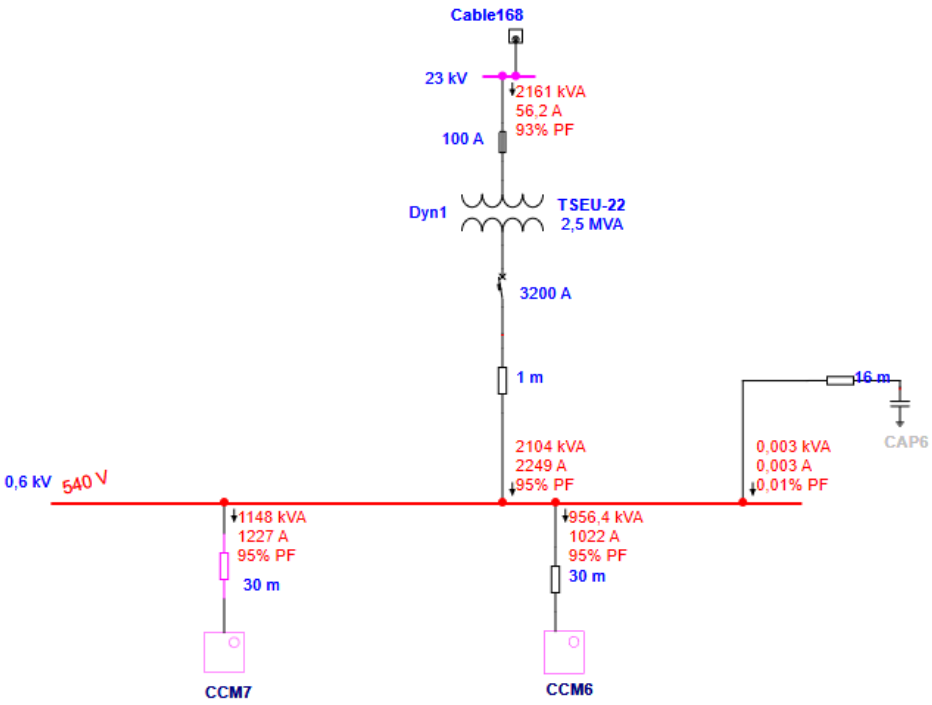


Figura A.1: Flujo de carga del escenario proyectado en ETAP.

A.2. Cortocircuito en barra de baja tensión de la SEU Nº 22

La Figura A.2 presenta el resultado del estudio de cortocircuito en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22, utilizado para obtener la corriente I_{SC} considerada en la evaluación normativa.

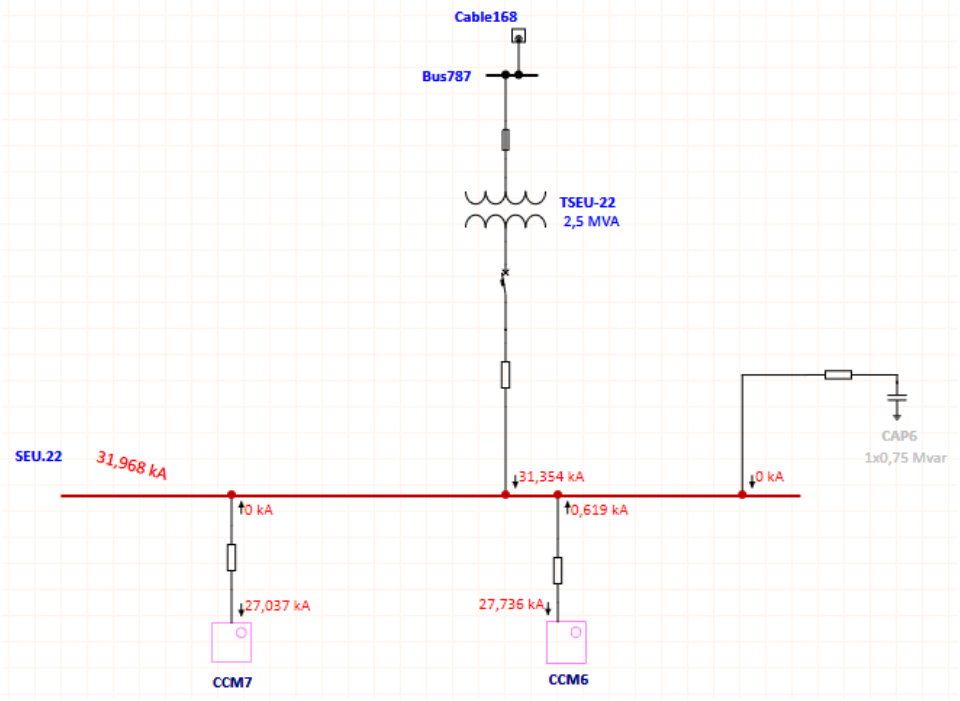


Figura A.2: Resultado de cortocircuito en barra de baja tensión de la SEU Nº 22.

A.3. Cortocircuito en CCM6

La Figura A.3 presenta el resultado del estudio de cortocircuito en CCM6, utilizado para obtener la corriente I_{SC} correspondiente a dicho punto de evaluación.

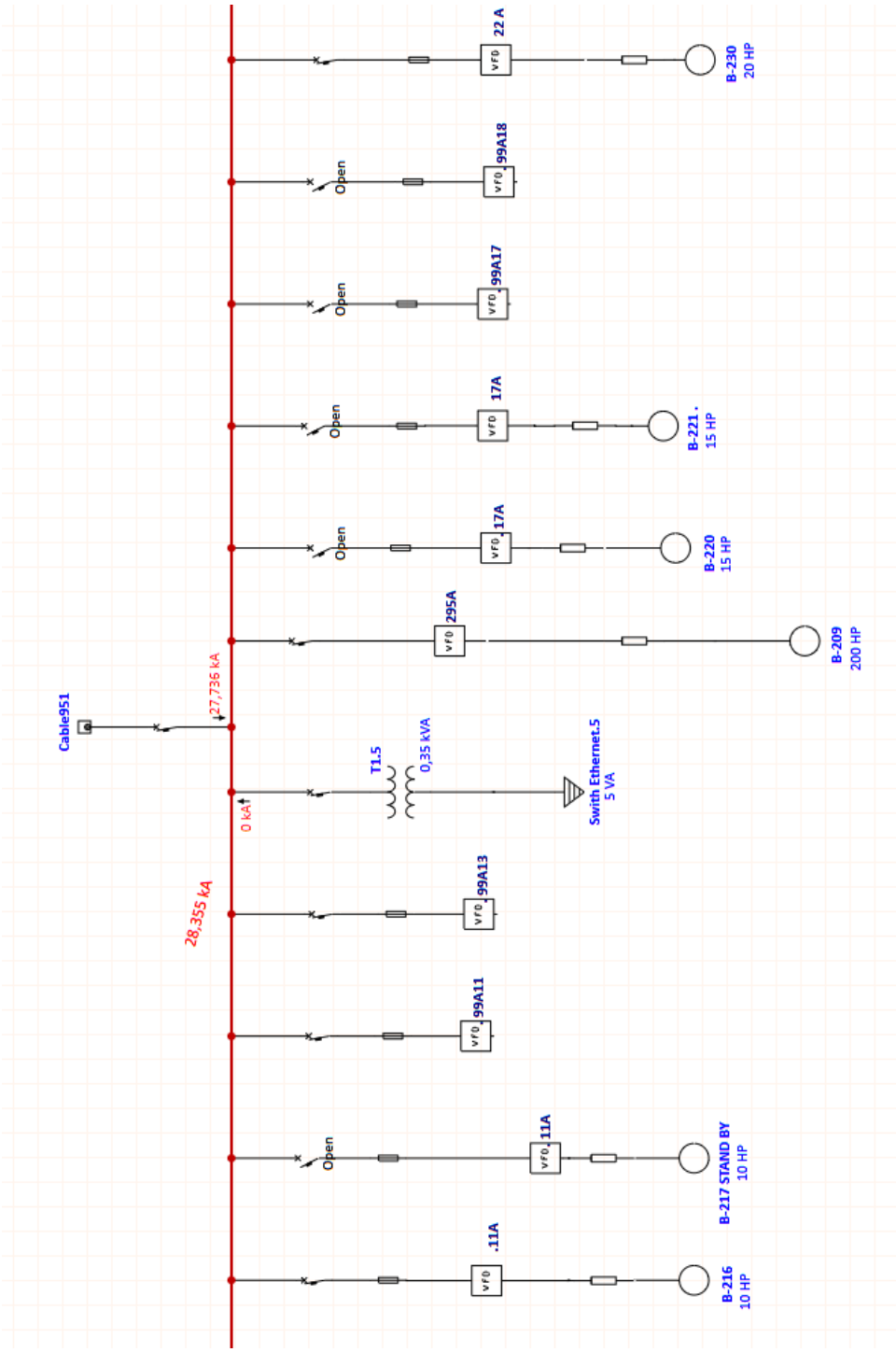


Figura A.3: Resultado de cortocircuito en CCM6.

A.4. Cortocircuito en CCM7

La Figura A.4 presenta el resultado del estudio de cortocircuito en CCM7, utilizado para obtener la corriente I_{SC} correspondiente a dicho punto de evaluación.

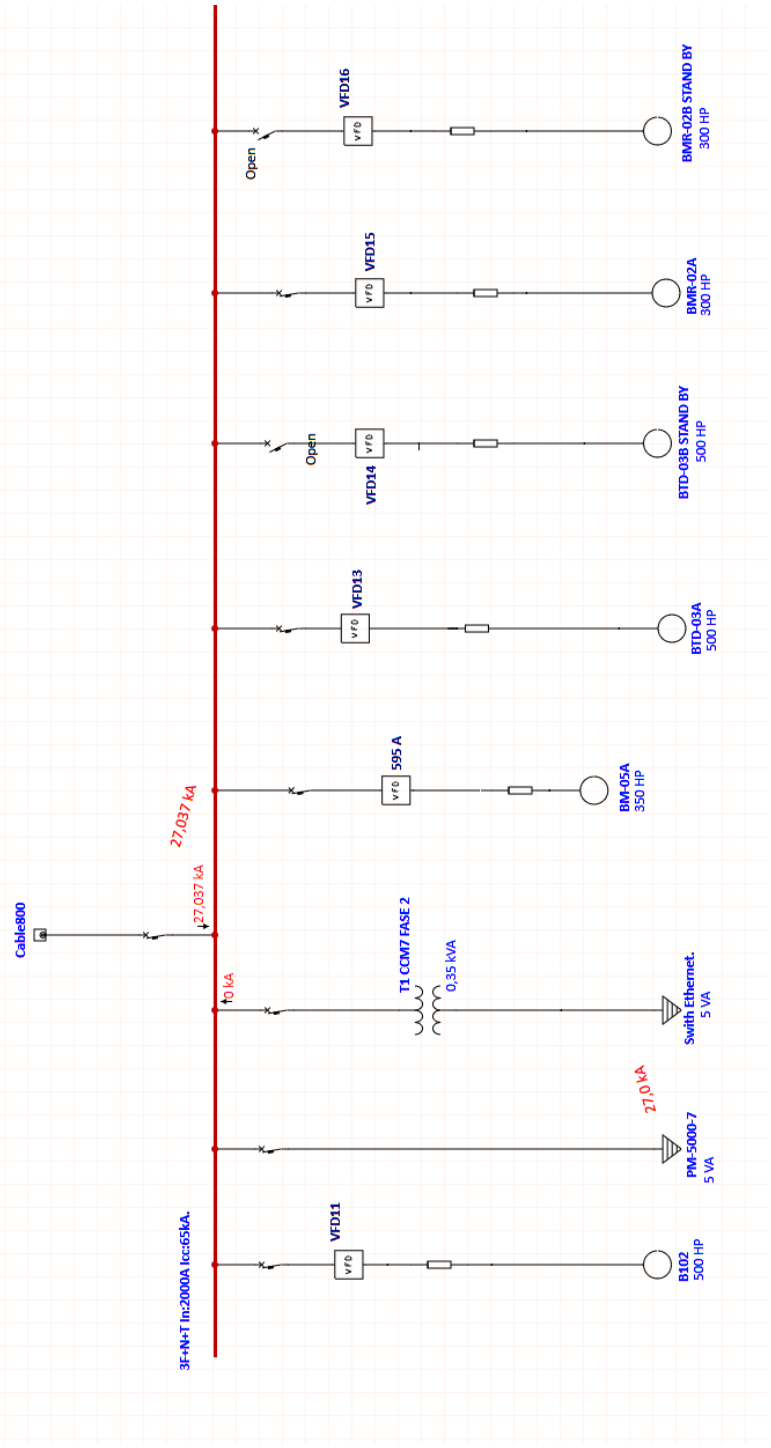


Figura A.4: Resultado de cortocircuito en CCM7.

Anexo B

Resultados de simulación de alternativas de mitigación

En este anexo se presentan las capturas y reportes de respaldo obtenidos desde ETAP para las alternativas de mitigación armónica evaluadas en el Capítulo 6. Las figuras permiten respaldar los resultados de THD_v y TDD utilizados en la comparación técnica de alternativas.

B.1. Alertas del análisis armónico

Unbalanced Harmonic Load Flow Analysis Alert View - Output Report: Harmonicos flujo SEU22

Study Case: MemoriaSEU22 | Data Revision: | Filter: Zone | Area | Region 1
Configuration: | Date: 04-08-2026

Critical

Device ID	Type	Condition	Rating/Limit A	Rating/Limit B	Rating/Limit C	Operating A	Operating B	Operating C	%Op. A	%Op. B	%Op. C	Harmonic
Barra principal CCM6	Bus IHD	Exceeds Limit	5	5	5	7.78	7.78	7.77	155.54	155.53	155.47	5.000000
Barra principal CCM6	Bus THD	Exceeds Limit	8	8	8	10.51	10.51	10.5	131.33	131.33	131.27	Total
Barra principal CCM7	Bus IHD	Exceeds Limit	5	5	5	7.78	7.78	7.78	155.63	155.62	155.55	5.000000
Barra principal CCM7	Bus THD	Exceeds Limit	8	8	8	10.51	10.51	10.51	131.39	131.4	131.34	Total
CCM6_B203_TERM	Bus IHD	Exceeds Limit	5	5	5	7.78	7.78	7.77	155.54	155.53	155.47	5.000000
CCM6_B203_TERM	Bus THD	Exceeds Limit	8	8	8	10.51	10.51	10.5	131.33	131.33	131.27	Total
CCM6_SWITH_ETHERN...	Bus IHD	Exceeds Limit	5	5	5	7.77	7.78	7.77	155.5	155.56	155.49	5.000000
CCM6_SWITH_ETHERN...	Bus THD	Exceeds Limit	8	8	8	10.47	10.47	10.47	130.82	130.88	130.82	Total
CCM6_SWITH_ETHERN...	Bus IHD	Exceeds Limit	5	5	5	7.77	7.78	7.77	155.5	155.56	155.49	5.000000
CCM6_SWITH_ETHERN...	Bus THD	Exceeds Limit	8	8	8	10.47	10.47	10.47	130.82	130.88	130.82	Total
CCM6_SWITH_ETHERN...	Bus IHD	Exceeds Limit	5	5	5	7.78	7.78	7.78	155.58	155.65	155.57	5.000000
CCM6_SWITH_ETHERN...	Bus THD	Exceeds Limit	8	8	8	10.47	10.48	10.47	130.88	130.94	130.88	Total
CCM7_SWITCH_ETHER...	Bus IHD	Exceeds Limit	5	5	5	7.39	7.39	7.38	147.72	147.71	147.64	5.000000
CCM7_SWITCH_ETHER...	Bus THD	Exceeds Limit	8	8	8	10.01	10.02	10.01	125.19	125.19	125.13	Total
SEU.22	Bus IHD	Exceeds Limit	5	5	5	7.39	7.39	7.38	147.72	147.71	147.64	5.000000
SEU.22	Bus THD	Exceeds Limit	8	8	8	10.01	10.02	10.01	125.19	125.19	125.13	Total
SEU22_BCO.COND_TE...	Bus IHD	Exceeds Limit	5	5	5	7.39	7.39	7.38	147.72	147.71	147.64	5.000000
SEU22_BCO.COND_TE...	Bus THD	Exceeds Limit	8	8	8	10.01	10.02	10.01	125.19	125.19	125.13	Total

Figura B.1: Vista de alertas del análisis de flujo armónico en ETAP para el escenario proyectado.

B.2. Escenario proyectado sin filtro activo

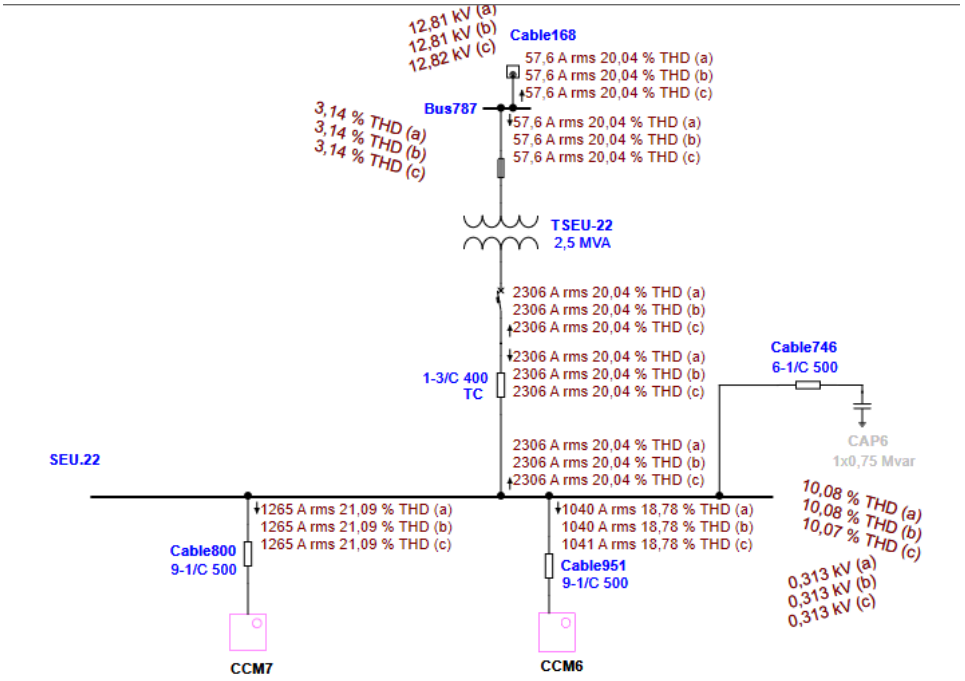


Figura B.2: Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU N° 22 para el escenario proyectado sin filtro activo.

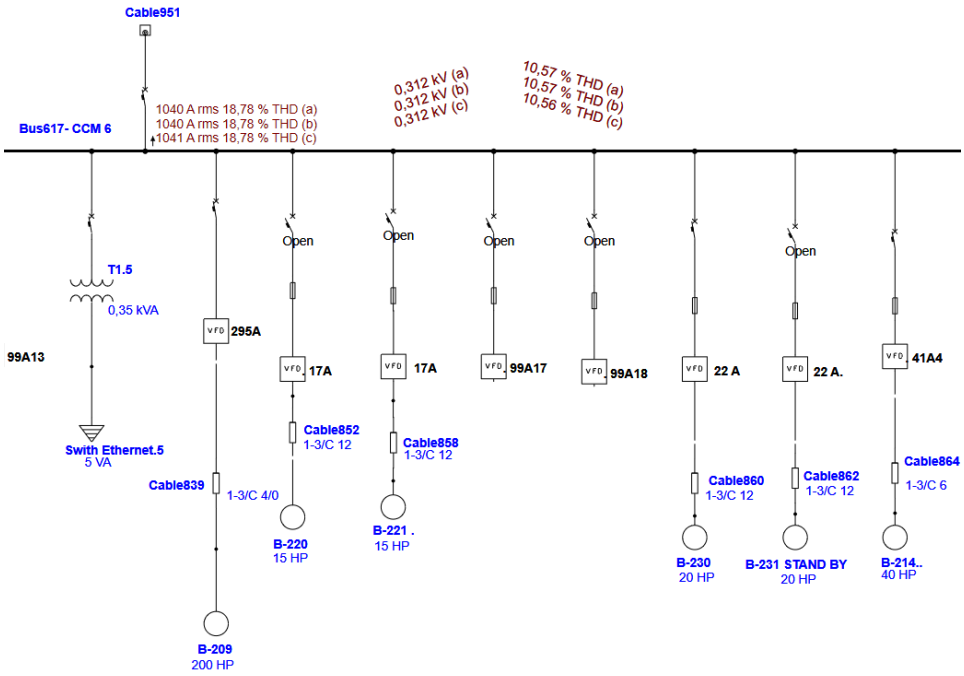


Figura B.3: Resultados de flujo armónico en CCM6 para el escenario proyectado sin filtro activo.

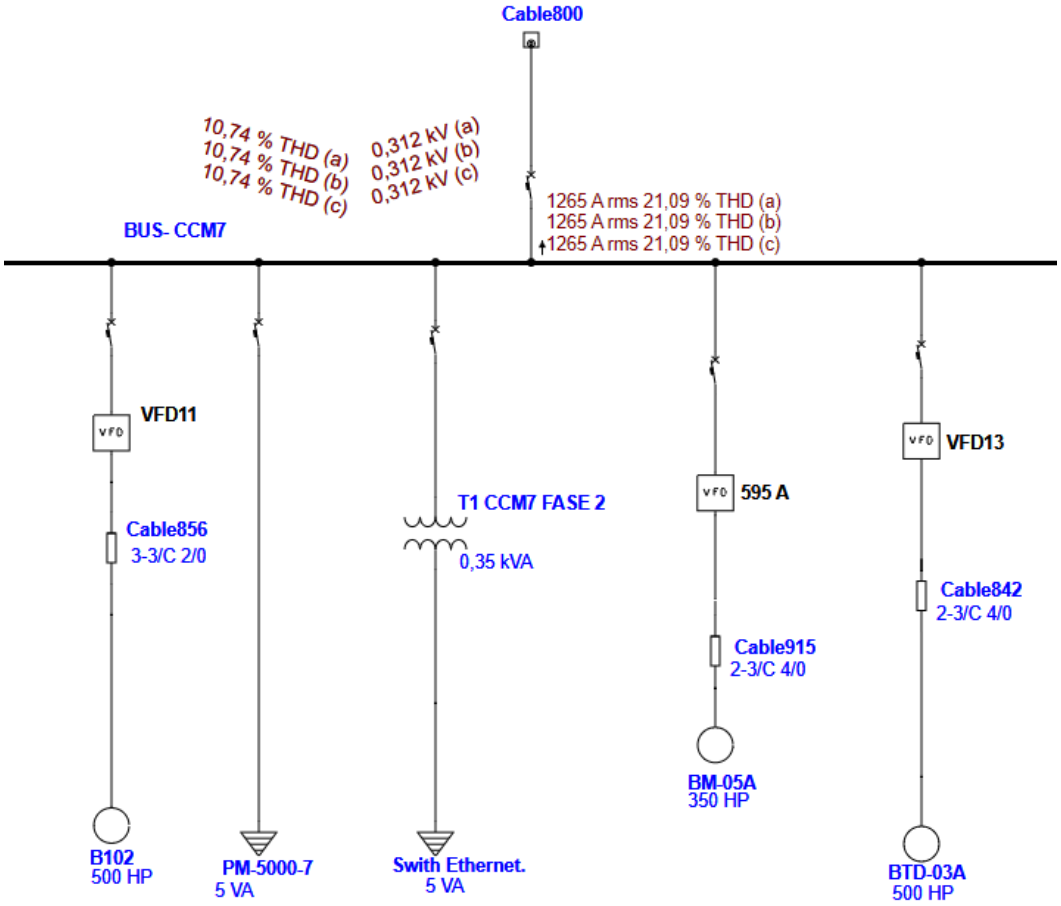


Figura B.4: Resultados de flujo armónico en CCM7 para el escenario proyectado sin filtro activo.

B.3. Filtro activo centralizado de 400 A

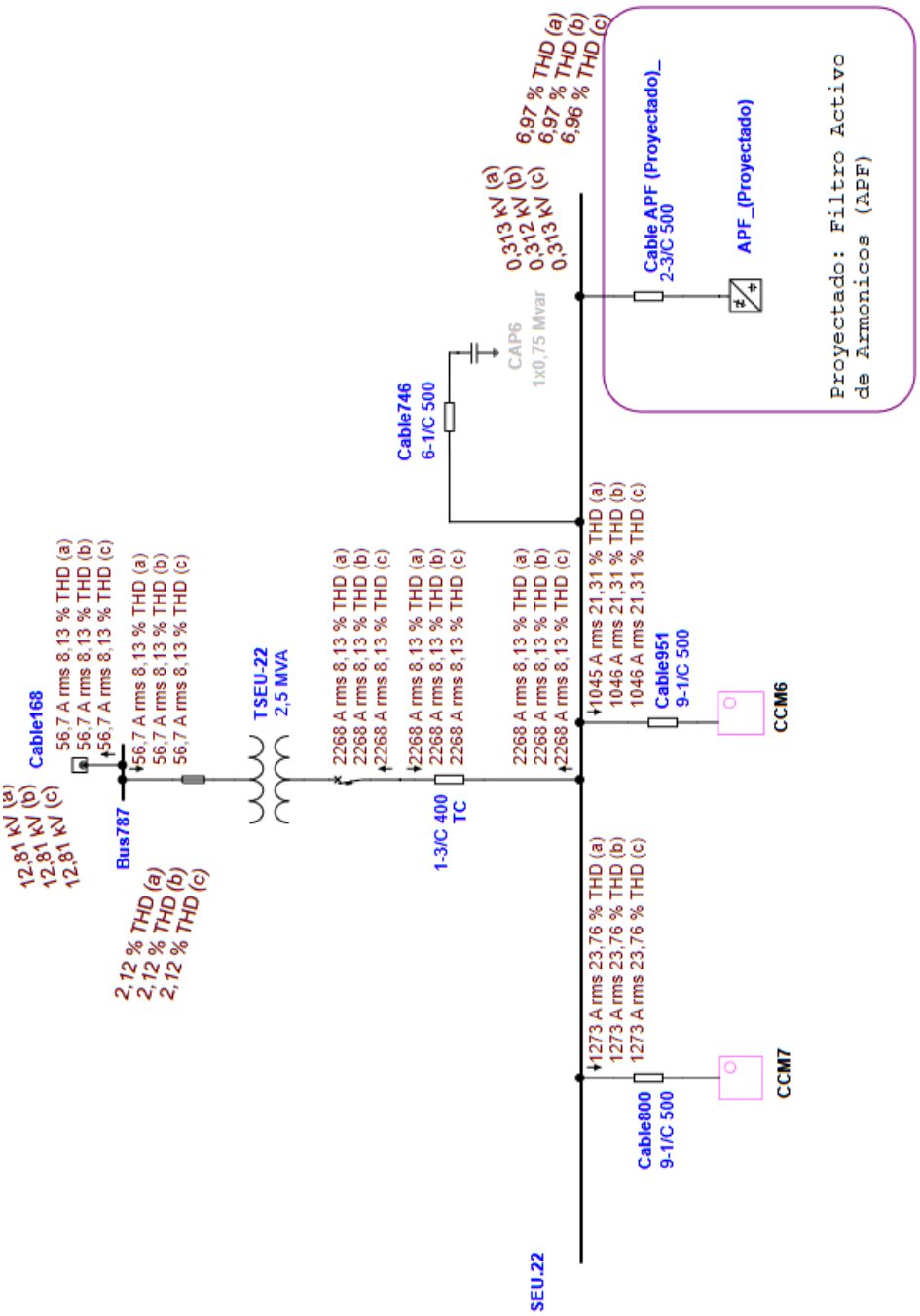


Figura B.5: Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU N° 22 para filtro activo centralizado de 400 A.

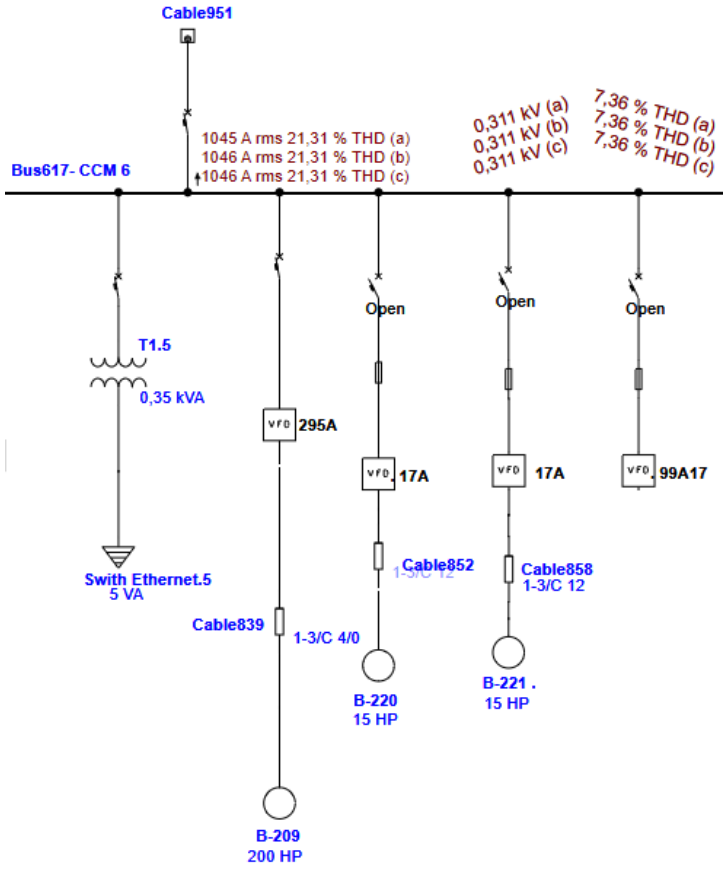


Figura B.6: Resultados de flujo armónico en CCM6 para filtro activo centralizado de 400 A.

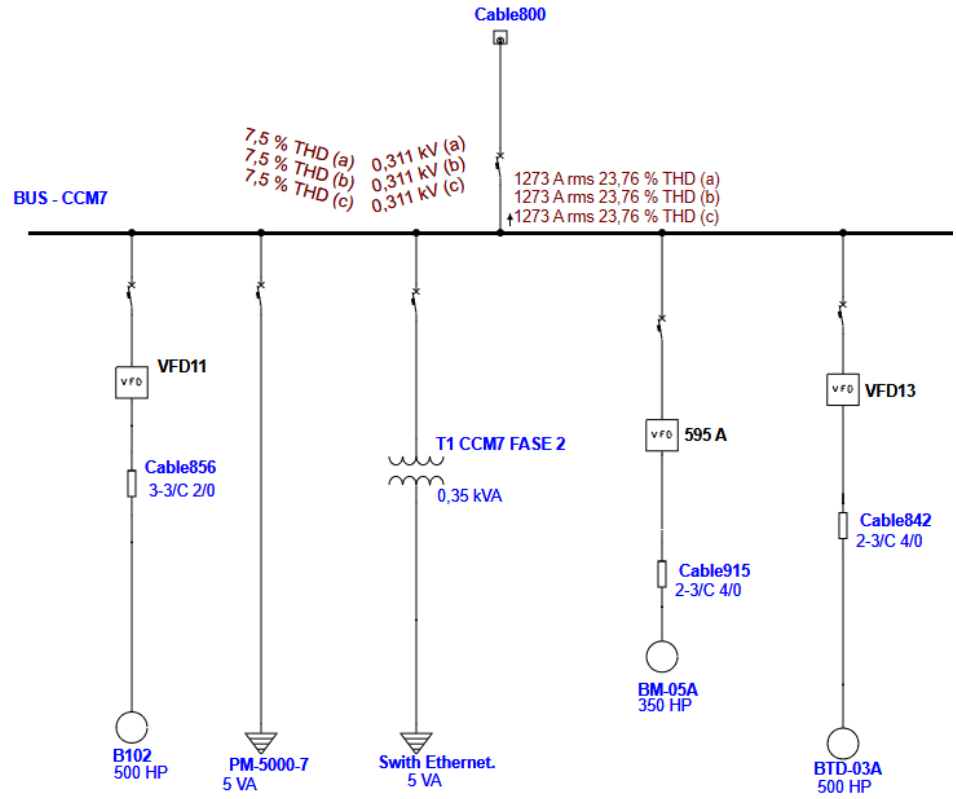


Figura B.7: Resultados de flujo armónico en CCM7 para filtro activo centralizado de 400 A.

B.4. Filtro activo centralizado de 500 A

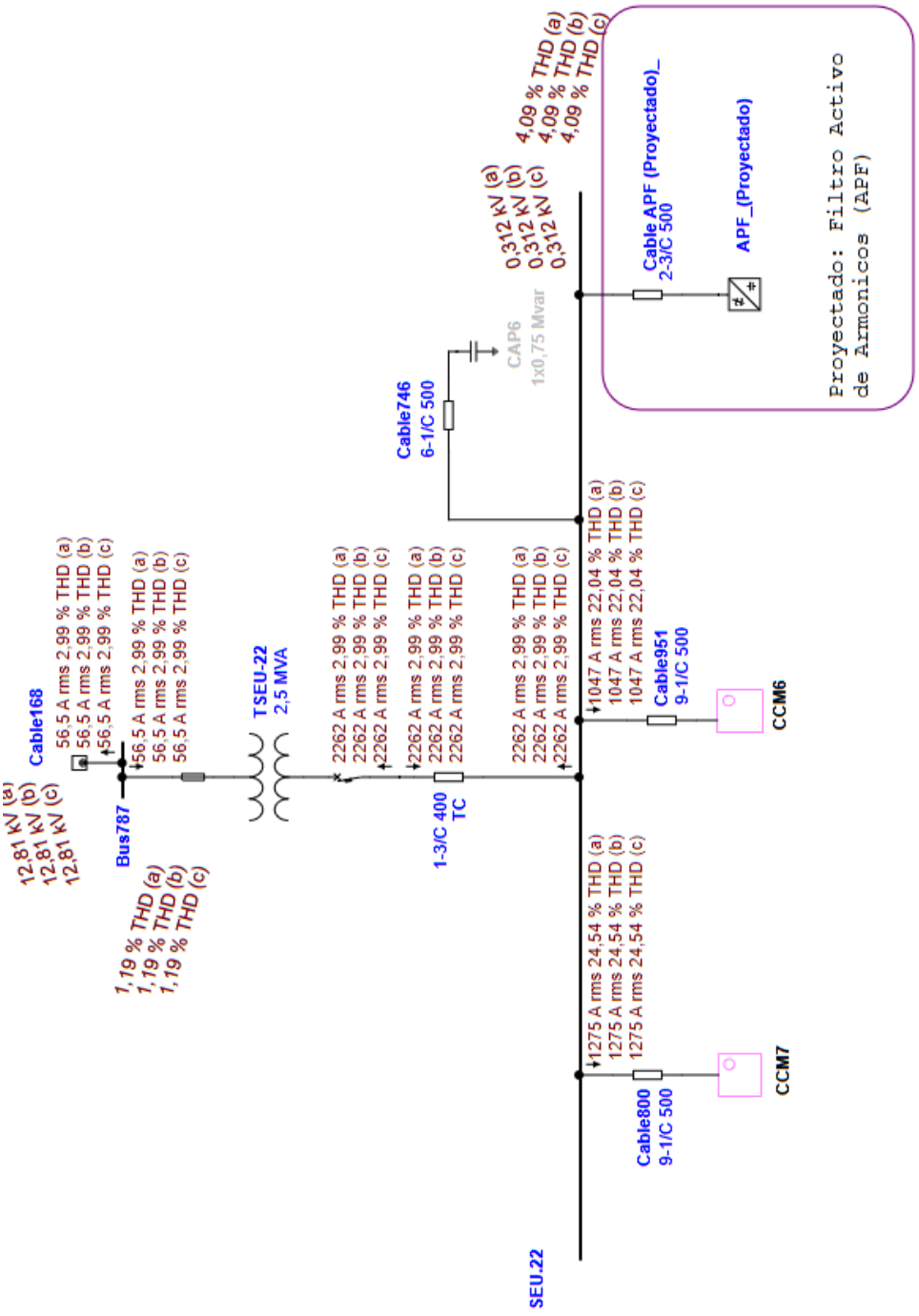


Figura B.8: Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU N° 22 para filtro activo centralizado de 500 A.

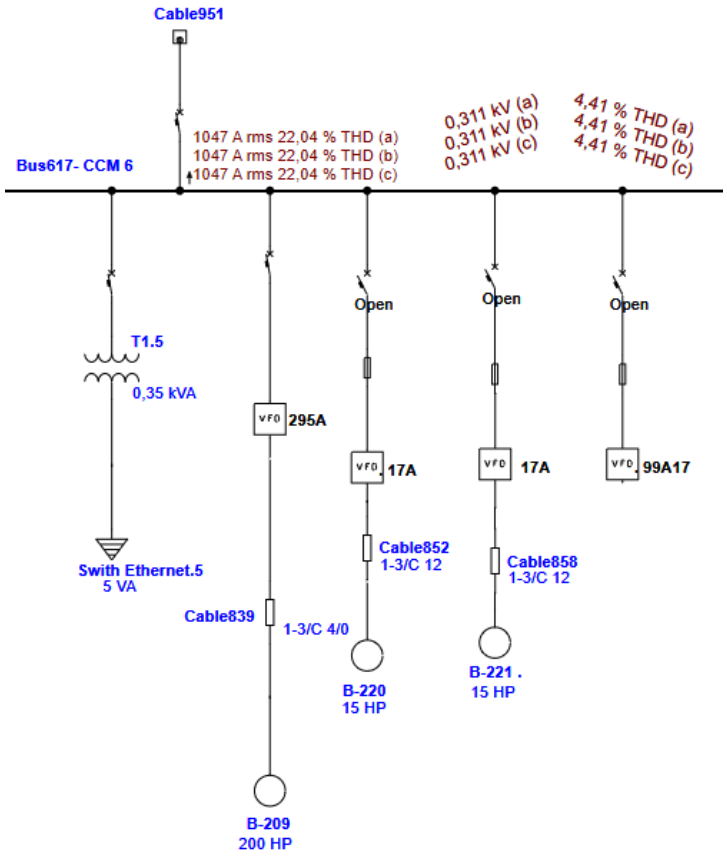


Figura B.9: Resultados de flujo armónico en CCM6 para filtro activo centralizado de 500 A.

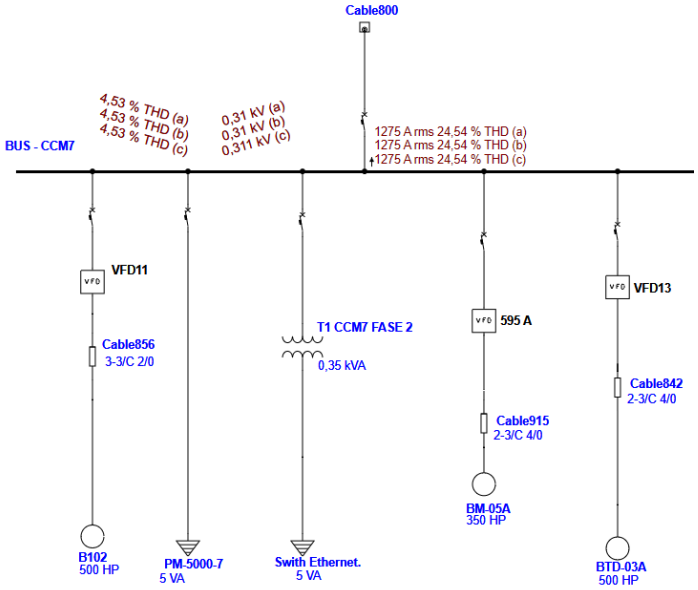


Figura B.10: Resultados de flujo armónico en CCM7 para filtro activo centralizado de 500 A.

B.5. Filtro activo centralizado de 600 A

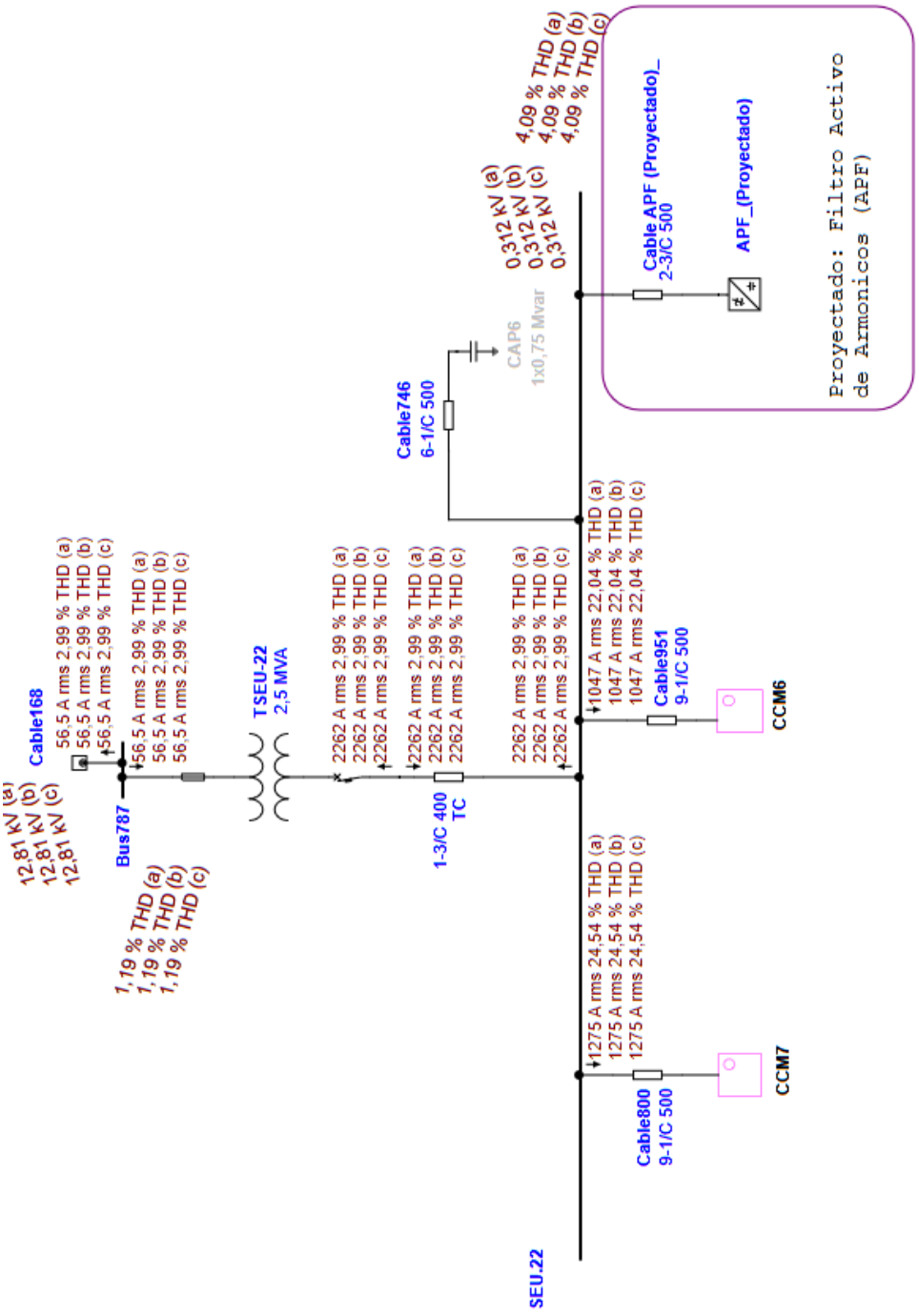


Figura B.11: Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU N° 22 para filtro activo centralizado de 600 A.

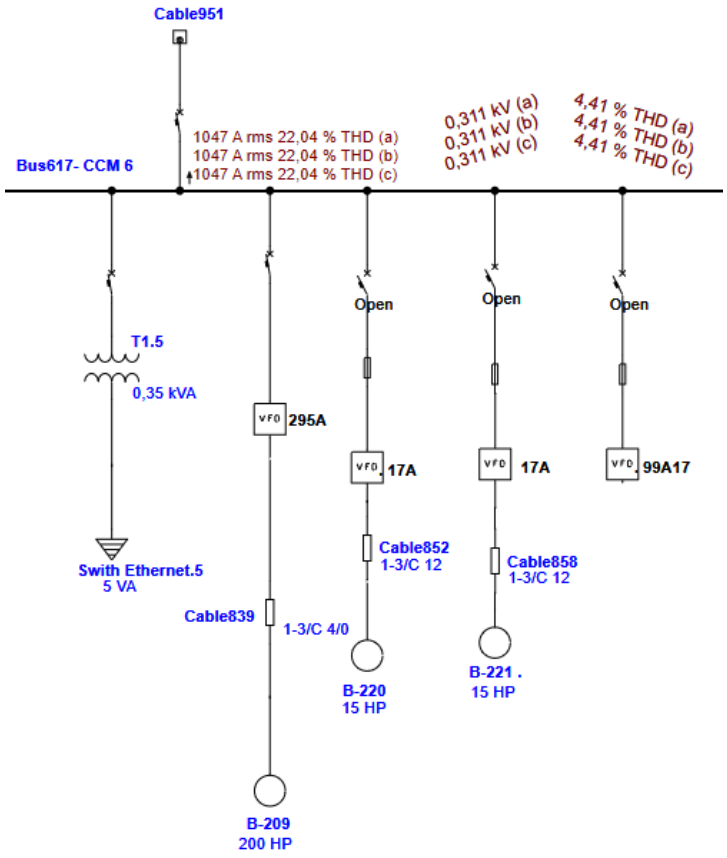


Figura B.12: Resultados de flujo armónico en CCM6 para filtro activo centralizado de 600 A.

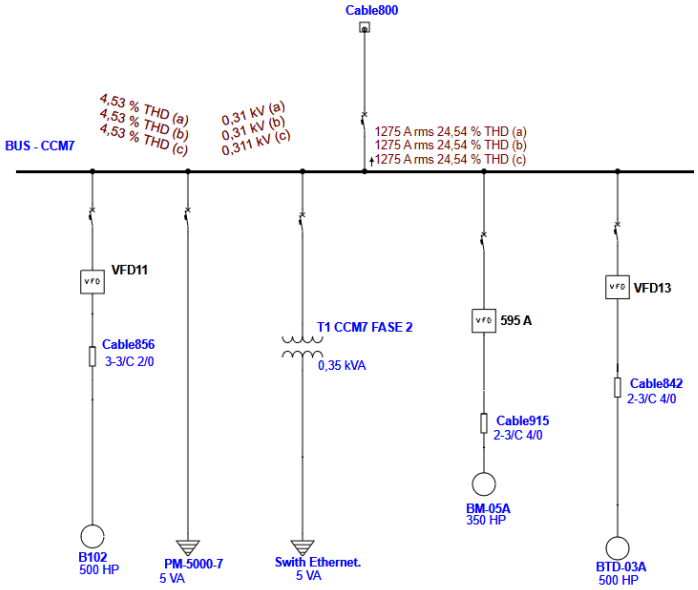


Figura B.13: Resultados de flujo armónico en CCM7 para filtro activo centralizado de 600 A.

B.6. Filtro activo distribuido 250 A + 300 A

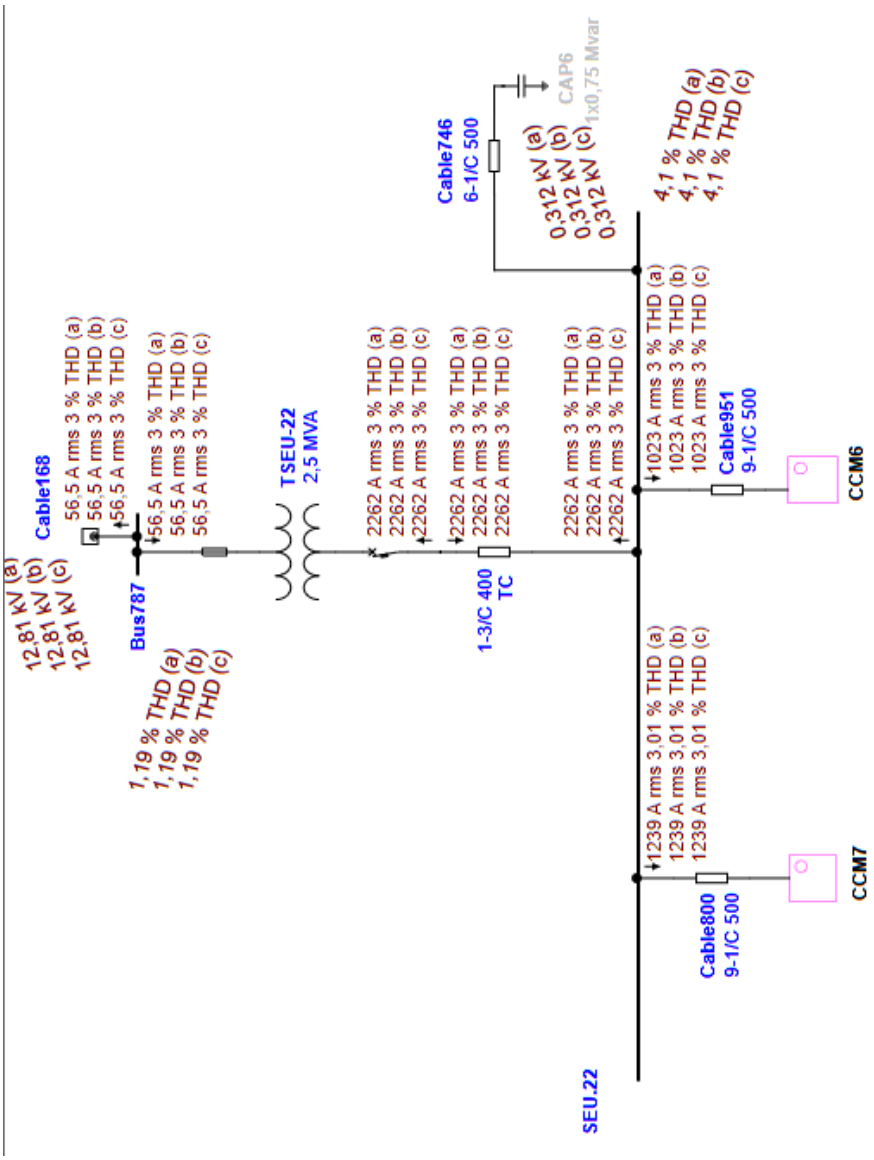


Figura B.14: Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU Nº 22 para filtros activos distribuidos de 250 A en CCM6 y 300 A en CCM7.

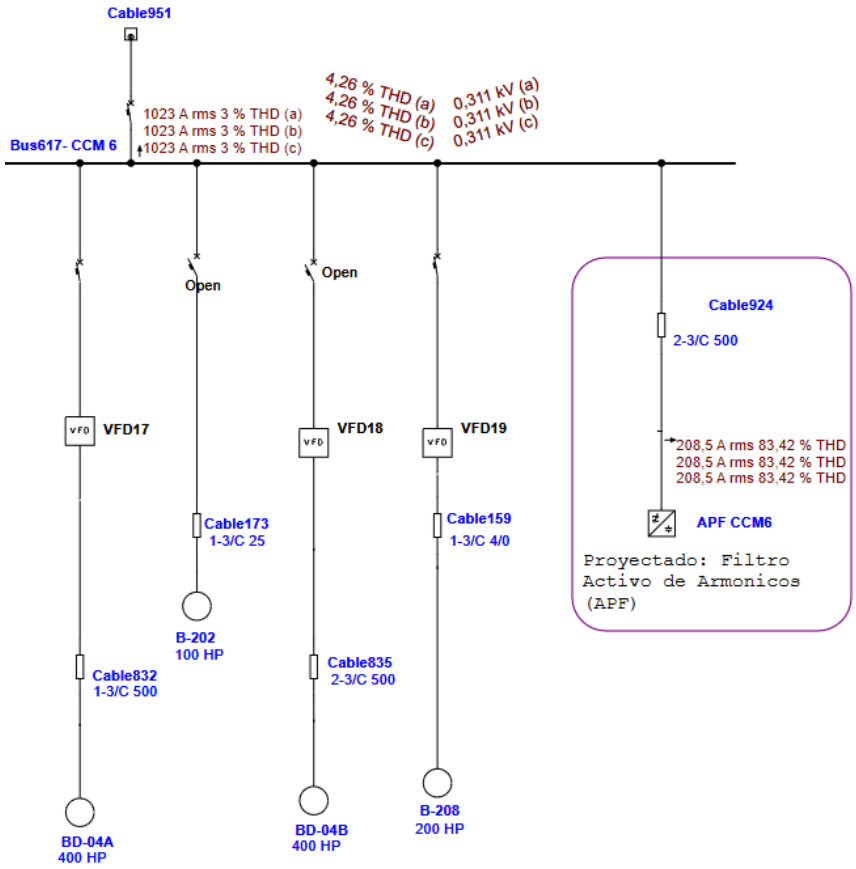


Figura B.15: Resultados de flujo armónico en CCM6 para filtro activo distribuido de 250 A.

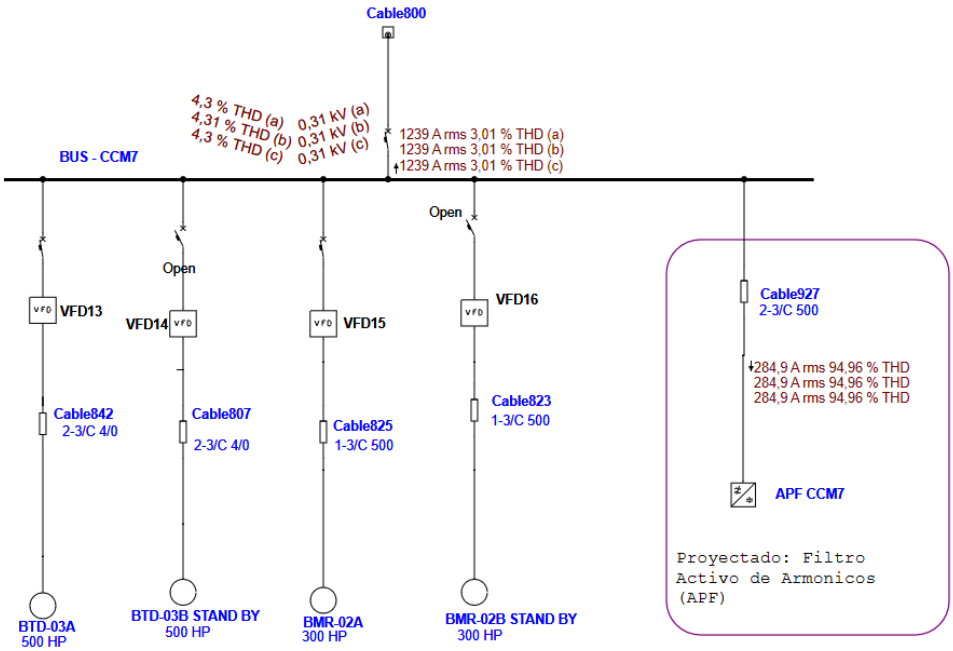


Figura B.16: Resultados de flujo armónico en CCM7 para filtro activo distribuido de 300 A.

Anexo C

Resultados de simulación de la evaluación de filtros activos de 270 A

En este anexo se presentan las capturas de respaldo obtenidas desde ETAP para la evaluación por simulación de la solución compuesta por dos filtros activos de 270 A, instalados de forma distribuida en CCM6 y CCM7. Las figuras complementan los resultados presentados en el Capítulo 7.

C.1. Resultados con filtros activos de 270 A en modo automático

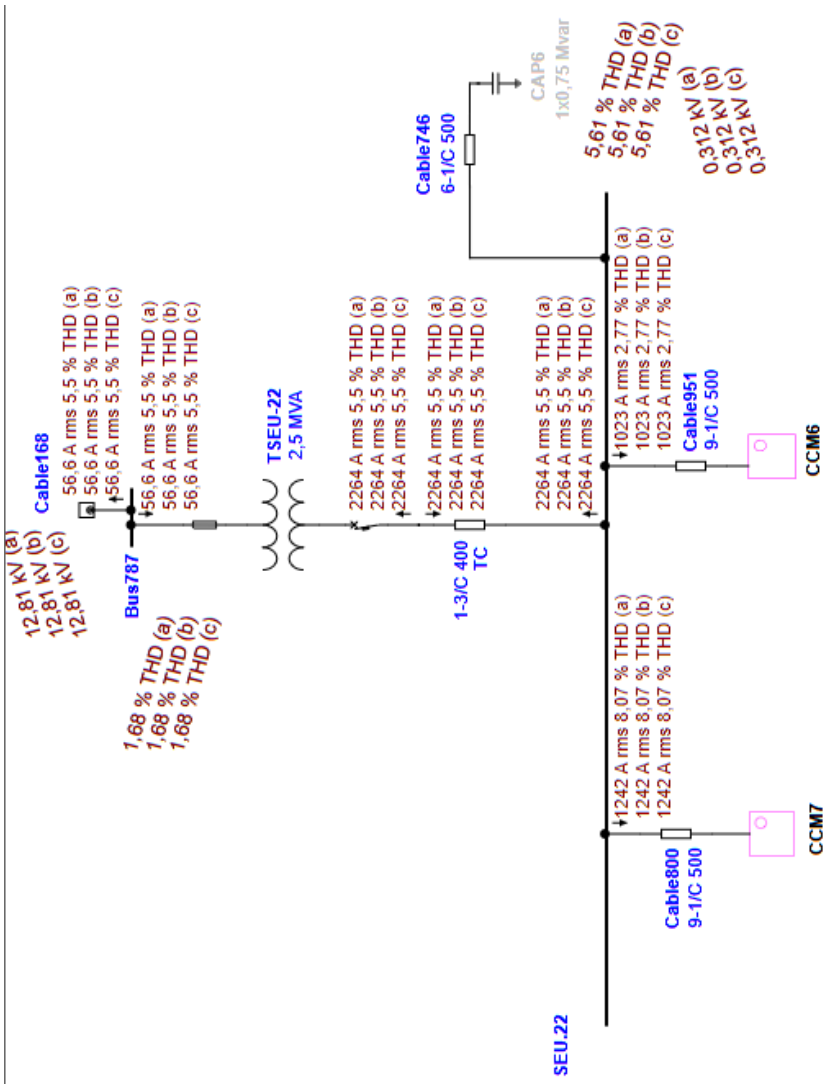


Figura C.1: Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU N° 22 con filtros activos de 270 A en modo automático.

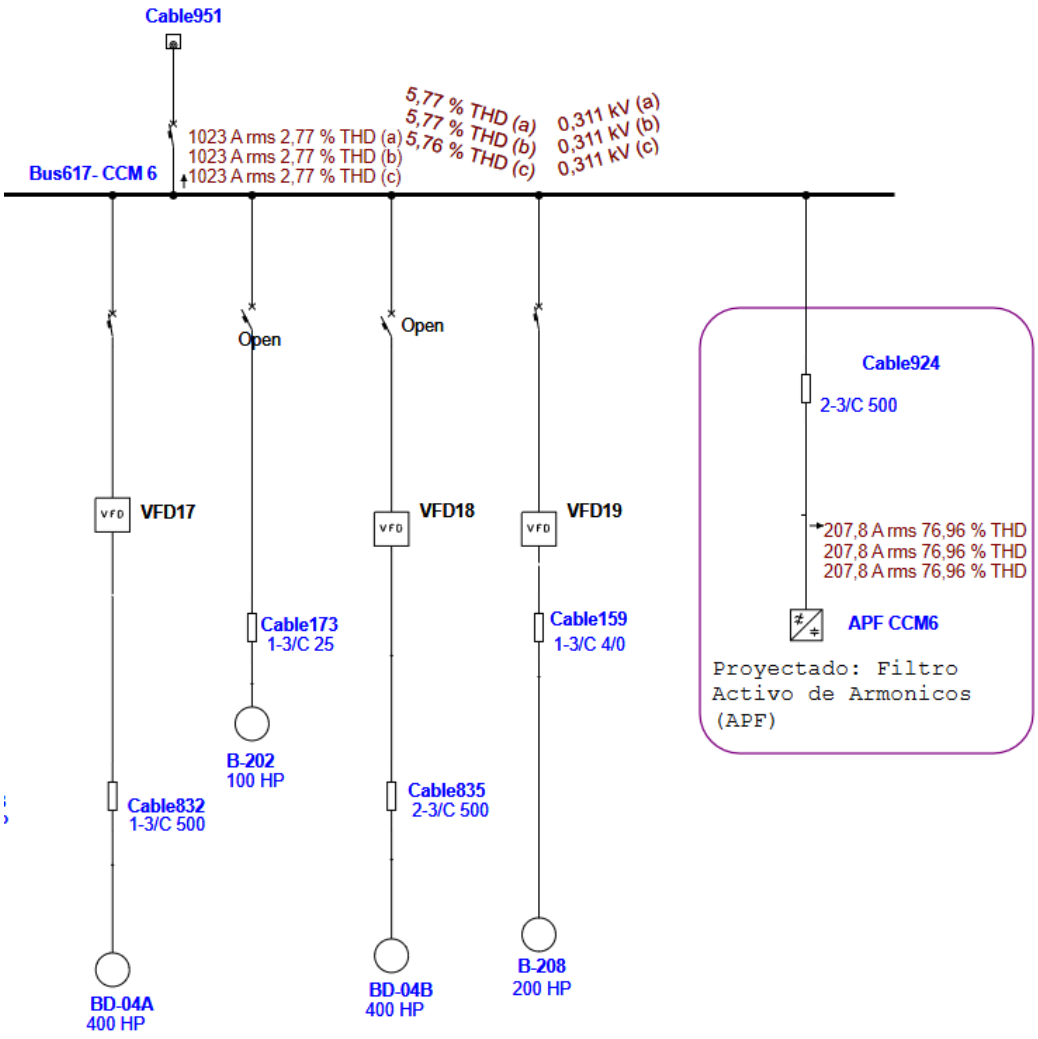


Figura C.2: Resultados de flujo armónico en CCM6 con filtros activos de 270 A en modo automático.

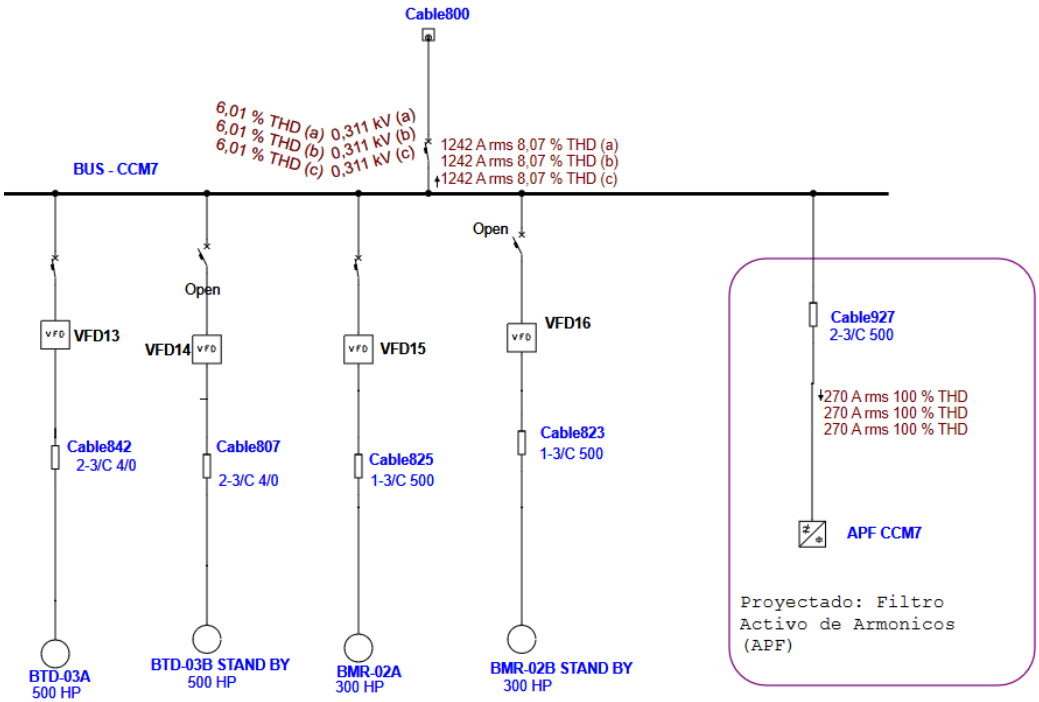


Figura C.3: Resultados de flujo armónico en CCM7 con filtros activos de 270 A en modo automático.

C.2. Resultados con configuración final propuesta

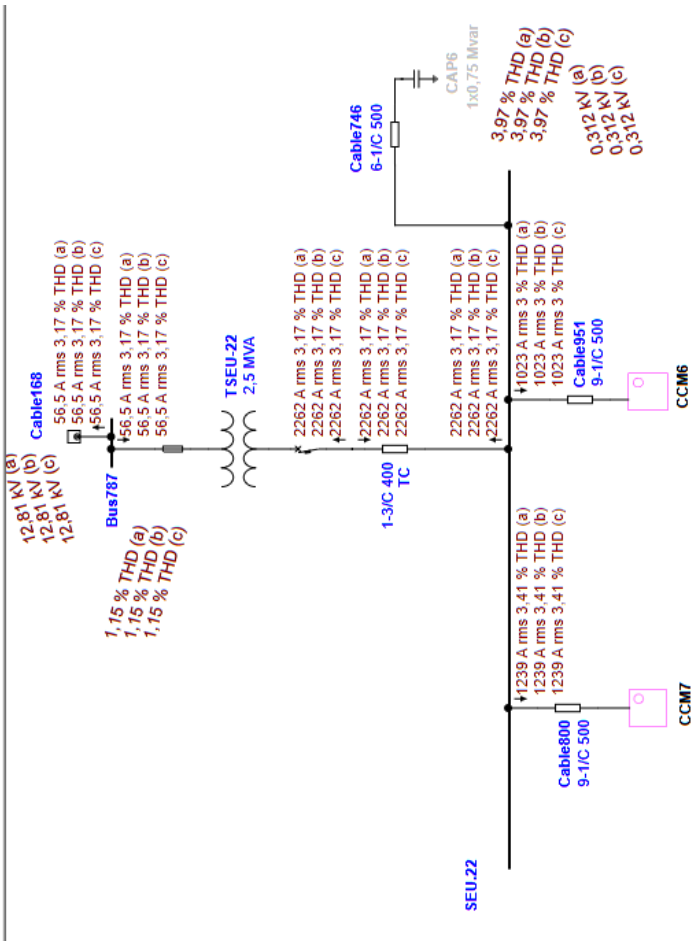


Figura C.4: Resultados de flujo armónico en la barra de baja tensión de la SEU N° 22 con la configuración final de filtros activos de 270 A.

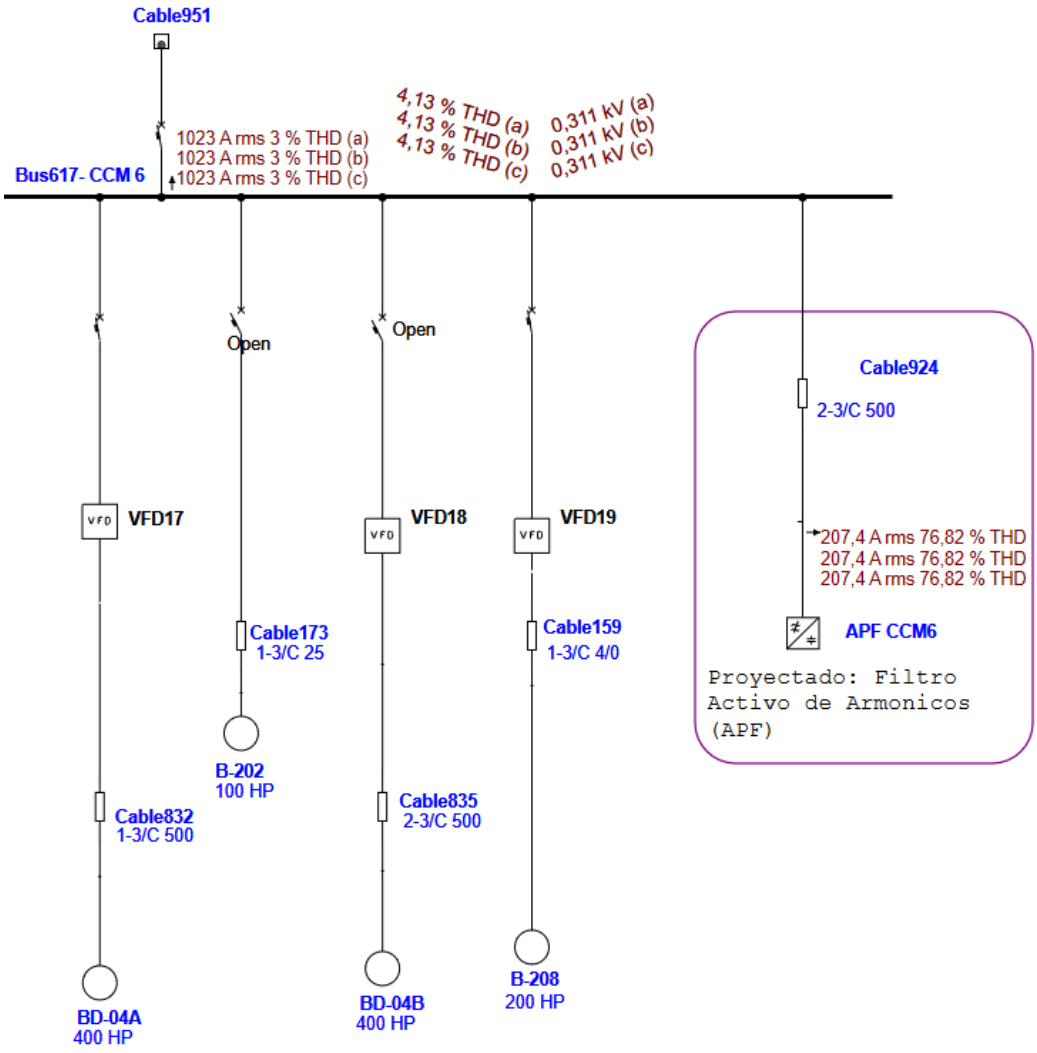


Figura C.5: Resultados de flujo armónico en CCM6 con la configuración final de filtros activos de 270 A.

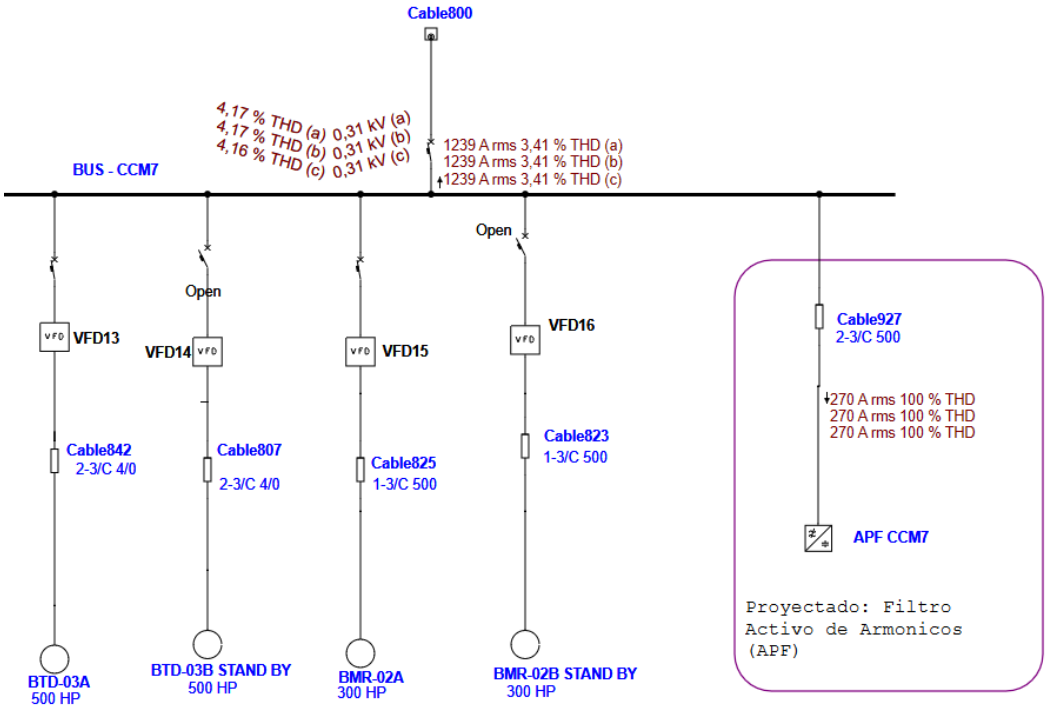


Figura C.6: Resultados de flujo armónico en CCM7 con la configuración final de filtros activos de 270 A.

Anexo D

Antecedentes de implementación de filtros activos

En este anexo se presentan antecedentes gráficos de apoyo para la implementación preliminar de la solución distribuida de filtros activos en CCM6 y CCM7.

D.1. Ubicaciones referenciales en los CCM

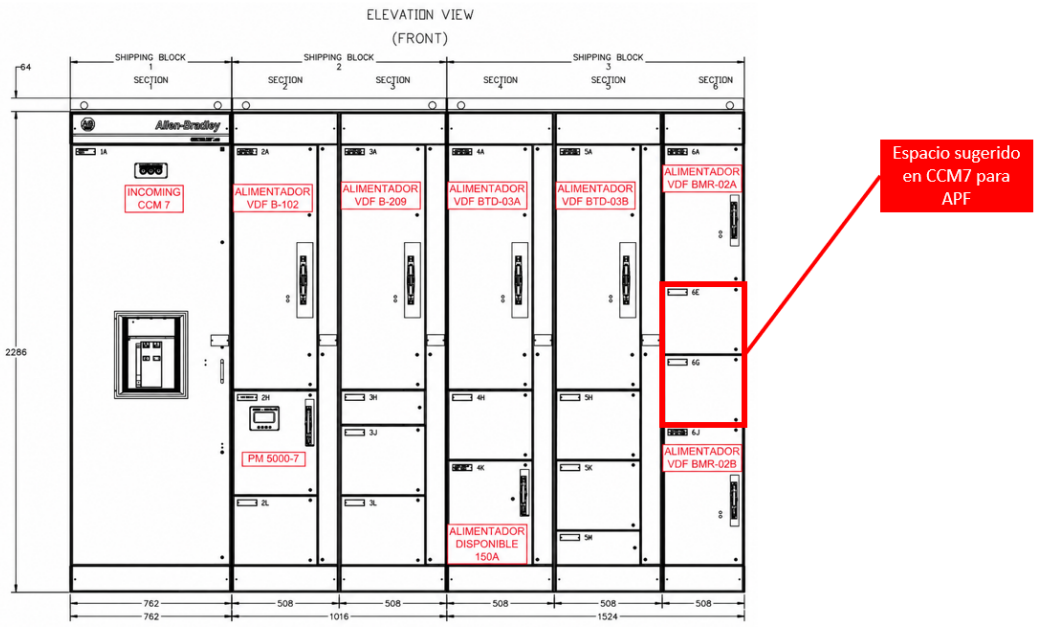


Figura D.1: Vista referencial de elevación de CCM7 con alternativa preliminar de conexión para filtro activo.

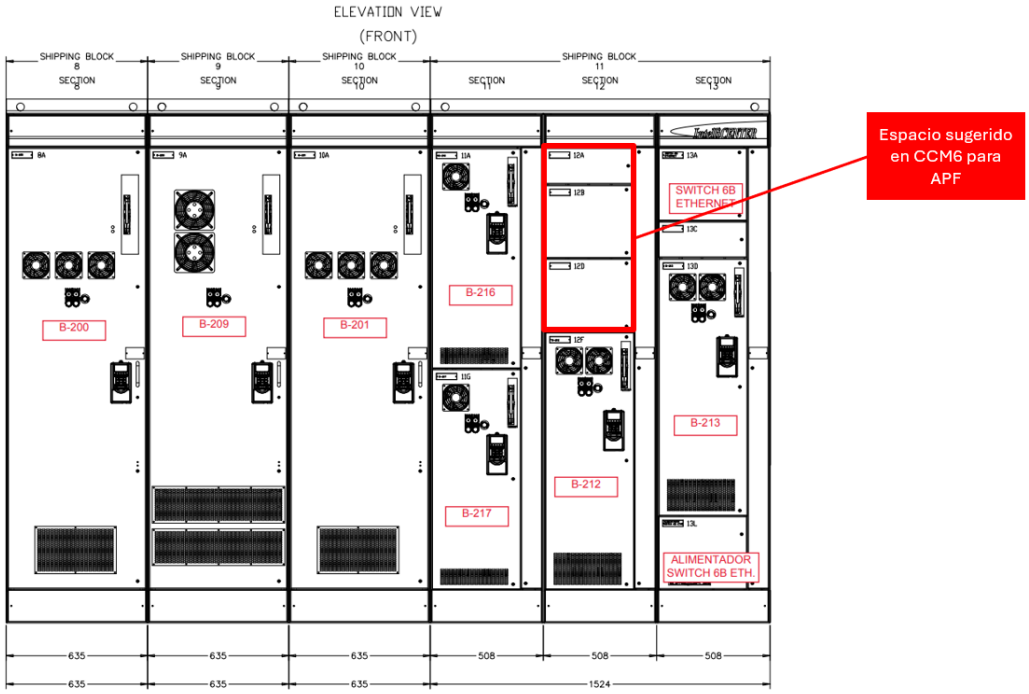
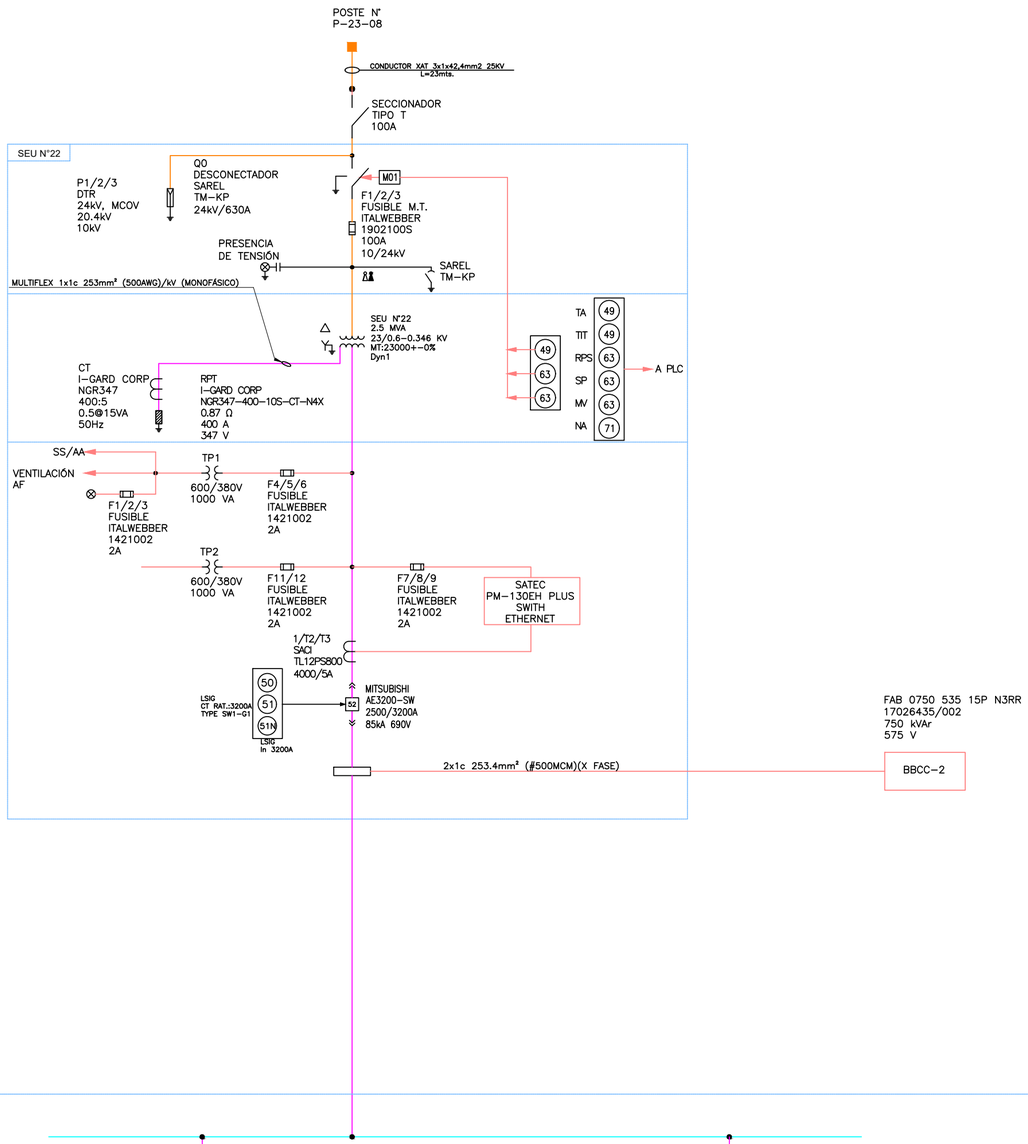


Figura D.2: Vista referencial de elevación de CCM6 con alternativas preliminares de conexión para filtro activo.

D.2. Unilineales de referencia

En esta sección se incorporan los diagramas unilineales utilizados como respaldo para la ubicación referencial de los filtros activos en CCM6 y CCM7. Los documentos se presentan como antecedentes gráficos de apoyo para la etapa de implementación preliminar.

D.2.1. Unilineal actual con incorporación referencial de APF



REVISIONES							REFERENCIAS			
A	EMITIDO PARA REVISIÓN Y COMENTARIOS	R.B.F.	C.M.P.	F.E.M.	04/26		.	.		
NÚMERO	DESCRIPCIÓN	DIBJ.	REV.	APRB.	FECHA		N° PLANO	DENOMINACIÓN	NOTAS	

	NOMBRE	FECHA
PROYECTÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
DIBUJÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
REVISÓ	CLAUDIO MARCET P.	21/04/26
APROBÓ	FABIAN ESPINOZA M.	21/04/26
APROBÓ	JUAN GONZALEZ N.	21/04/26

UNID. MÉTRICA: MILÍMETRO | ESCALA: INDICADA | FORMATO: A3

MINERA VALLE CENTRAL S.A.

SUBGERENCIA DE INGENIERÍA Y DESARROLLO

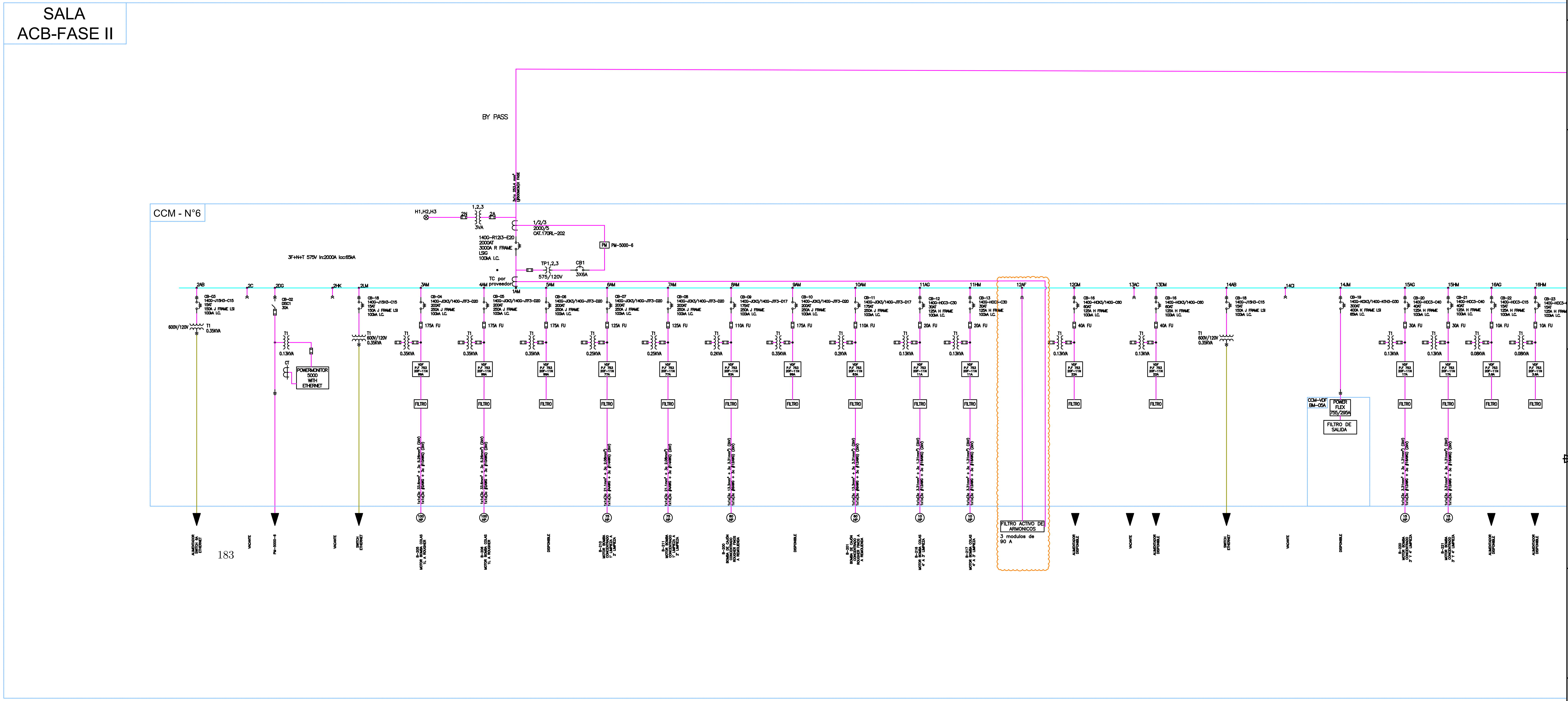
DENOMINACIÓN

PROYECTO MVC-PY
FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS

PLANO DIAGRAMA DE BLOQUES

PLANO N°	REVISIÓN	LÁMINA N°
MVC-PY	0	1/1

Nota: La información proporcionada en este plano, es de propiedad intelectual de "MVC" y debe ser tratada en forma confidencial. Dicha información no puede ser transmitida a terceros, por lo tanto, no podrá ser usada para otro propósito que el expresamente estipulado por "MVC".



183

REVISIONES					
A	EMITIDO PARA REVISIÓN Y COMENTARIOS	R.B.F.	C.M.P.	F.E.M.	04/26
NÚMERO	DESCRIPCIÓN	DIBJ.	REV.	APRB.	FECHA

REFERENCIAS	
.	.
N° PLANO	DENOMINACIÓN

NOTAS

UNID. MÉTRICA: MILÍMETRO
ESCALA: INDICADA
FORMATO: A3

SUBGERENCIA DE INGENIERÍA Y DESARROLLO

	NOMBRE	FECHA
PROYECTÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
DIBUJÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
REVISÓ	CLAUDIO MARCET P.	21/04/26
APROBÓ	FABIAN ESPINOZA M.	21/04/26
APROBÓ	JUAN GONZALEZ N.	21/04/26

MINERA VALLE CENTRAL S.A.

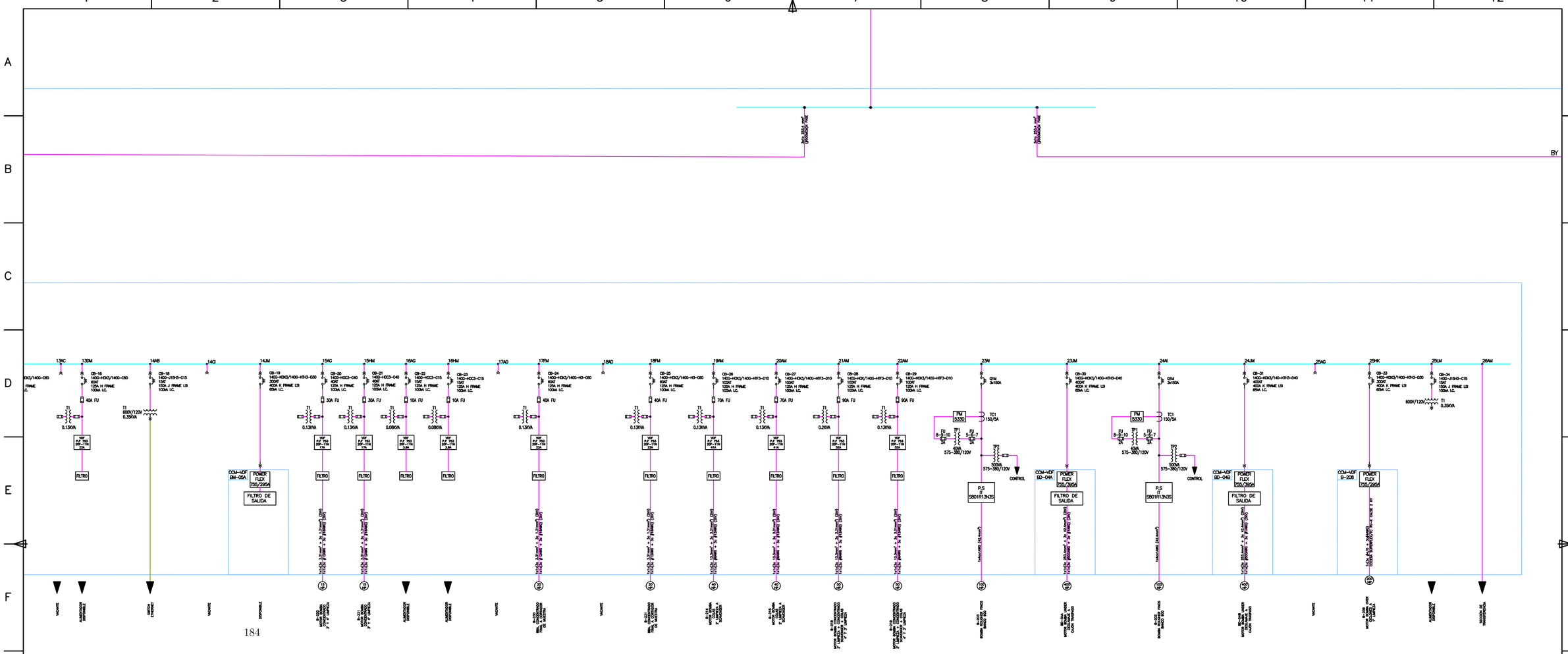
DENOMINACIÓN

PROYECTO MVC-PY
FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS

PLANO DIAGRAMA DE BLOQUES

PLANO N°: MVC-PY
REVISIÓN: 0
LÁMINA N°: 1/1

Nota: La información proporcionada en este plano, es de propiedad intelectual de "MVC" y debe ser tratada en forma confidencial. Dicha información no puede ser transmitida a terceros, por lo tanto, no podrá ser usada para otro propósito que el expresamente estipulado por "MVC".



UNID. MÉTRICA	MILÍMETRO	ESCALA	INDICADA	FORMATO	A3	SUBGERENCIA DE INGENIERÍA Y DESARROLLO				
	NOMBRE	FECHA				DENOMINACIÓN				
PROYECTÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26				PROYECTO MVC–PY FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PLANO DIAGRAMA DE BLOQUES				
DIBUJÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26								
REVISÓ	CLAUDIO MARCET P.	21/04/26								
APROBÓ	FABIAN ESPINOZA M.	21/04/26				PLANO N°	REVISIÓN	LÁMINA N°		
APROBÓ	JUAN GONZALEZ N.	21/04/26	MINERA VALLE CENTRAL S.A.			MVC–PY	0	1/1		

REVISIONES

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	DIBJ.	REV.	APRB.	FECHA
A	EMITIDO PARA REVISIÓN Y COMENTARIOS	R.B.F.	C.M.P.	F.E.M.	04/26

REFERENCIAS

N° PLANO	DENOMINACIÓN	NOTAS
.	.	

Nota: La información proporcionada en este plano, es de propiedad intelectual de "MVC" y debe ser tratada en forma confidencial. Dicha información no puede ser transmitida a terceros, por lo tanto, no podrá ser usada para otro propósito que el expresamente estipulado por "MVC".

PASS

3x1c 253.4 mm² (#500MCM)X FASE

CCM - N°7

H1, H2, H3 — 2N — 1, 2, 3 — 2A — 3VA

3x1c 253.4 mm² (#500MCM)X FASE

1/2/3
2000/5
CAT.170RL-202

140G-R12L3-E20
2000AT
3000A R FRAME
LSIG
100kA I.C.

2H

DISC1
30A

T1 0.13 KVA

POWERMONITOR
PM-5000-7

TC por proveedor

1AM

3F+N+T 575V In:2000A Icc:65kA

2AH	2IK	2LM	3AH	3IK	3LM	4AH	4IJ	4KM	5AH	4IM	6AD	6F1	6JM
CB-01 140G-NOH3-E12 800AT 1200 N FRAME LSI 65kA	CB-02 DISC1 30A	CB-18 140G-J15H3-C15 15AT 150A J FRAME LSI 100kA I.C.	CB-03 140G-NOH3-E12 1200AT 1200 N FRAME LSI 65kA			CB-04 140G-NOH3-E12 1200AT 1200 N FRAME LSI 65kA		CB-05 140G-J15H3-C15 15AT 150A J FRAME LSI 100kA I.C.	CB-06 140G-NOH3-E12 1200AT 1200 N FRAME LSI 65kA		CB-07 140G-KTH3-D40 400AT 400 K FRAME LSI 65kA		CB-08 140-KTH3-D40 400AT 400 K FRAME LSI 65kA I.C.
CCM-VDF B-102	T1 0.13KVA	T1 600V/120V 0.35KVA	CCM-VDF B-209			CCM-VDF BTD-03A			CCM-VDF BTD-03B		POWER FLEX 755/355J		POWER FLEX 755/355J
POWER FLEX 755/595A	CT		POWER FLEX 755/595A			POWER FLEX 755/595A			POWER FLEX 755/595A				
FILTRO DE SALIDA	POWERMONITOR 5000 WITH ETHERNET		FILTRO DE SALIDA			FILTRO DE SALIDA			FILTRO DE SALIDA				
DUT-0600-6-0-P 600A DANFOSS													
3x(3c #2/0 + 3c#6AWG) SUPERFLEX VDF 28V 200m	185		1x(3c #4/0 + 3c#4AWG) CODESA SUPERFLEX/75 RV-K CAUSE 2 KV			2x1x(3c #4/0 + 3c#4AWG) 2x1x(3c 107.2 mm² + 3c 21.2 mm²)			2x1x(3c #4/0 + 3c#4AWG) 2x1x(3c 107.2 mm² + 3c 21.2 mm²)		1x1x(3c #500MCM + 3c#1AWG) 1x1x(3c 253.4 mm² + 3c 42.4 mm²)		1x1x(3c #500MCM + 3c#1AWG) 1x1x(3c 253.4 mm² + 3c 42.4 mm²)
500 HP			200 HP			500 HP			500 HP		300 HP		300 HP
B102 MOTOR ALIMENTACIÓN HIDROCICLON HGR01	PM-5000-7	SWITCH ETHERNET	B-209 MOTOR BOMBA OVER CICLONES A T. LIMPIEZA	VACANTE	B.C.C	BTD-03A MOTOR CALÓN INTERMEDIO A HGS5	VACANTE	DISPONIBLE 150A	BTD-03B MOTOR CALÓN INTERMEDIO A HGS5	FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS 3 modulos de 90 A	BMR-02A MOTOR BOMBA DE ALIMENTACIÓN CICLONES DE REMOLIENDA	VACANTE	BMR-02B MOTOR BOMBA DE ALIMENTACIÓN CICLONES DE REMOLIENDA

REVISIONES							REFERENCIAS			
A	EMITIDO PARA REVISIÓN Y COMENTARIOS	R.B.F.	C.M.P.	F.E.M.	04/26		.	.		
NÚMERO	DESCRIPCIÓN	DIBJ.	REV.	APRB.	FECHA		N° PLANO	DENOMINACIÓN	NOTAS	

UNID. MÉTRICA	MILÍMETRO	ESCALA	INDICADA	FORMATO	A3	SUBGERENCIA DE INGENIERÍA Y DESARROLLO

	NOMBRE	FECHA
PROYECTÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
DIBUJÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
REVISÓ	CLAUDIO MARCET P.	21/04/26
APROBÓ	FABIAN ESPINOZA M.	21/04/26
APROBÓ	JUAN GONZALEZ N.	21/04/26

MINERA VALLE CENTRAL S.A.

DENOMINACIÓN

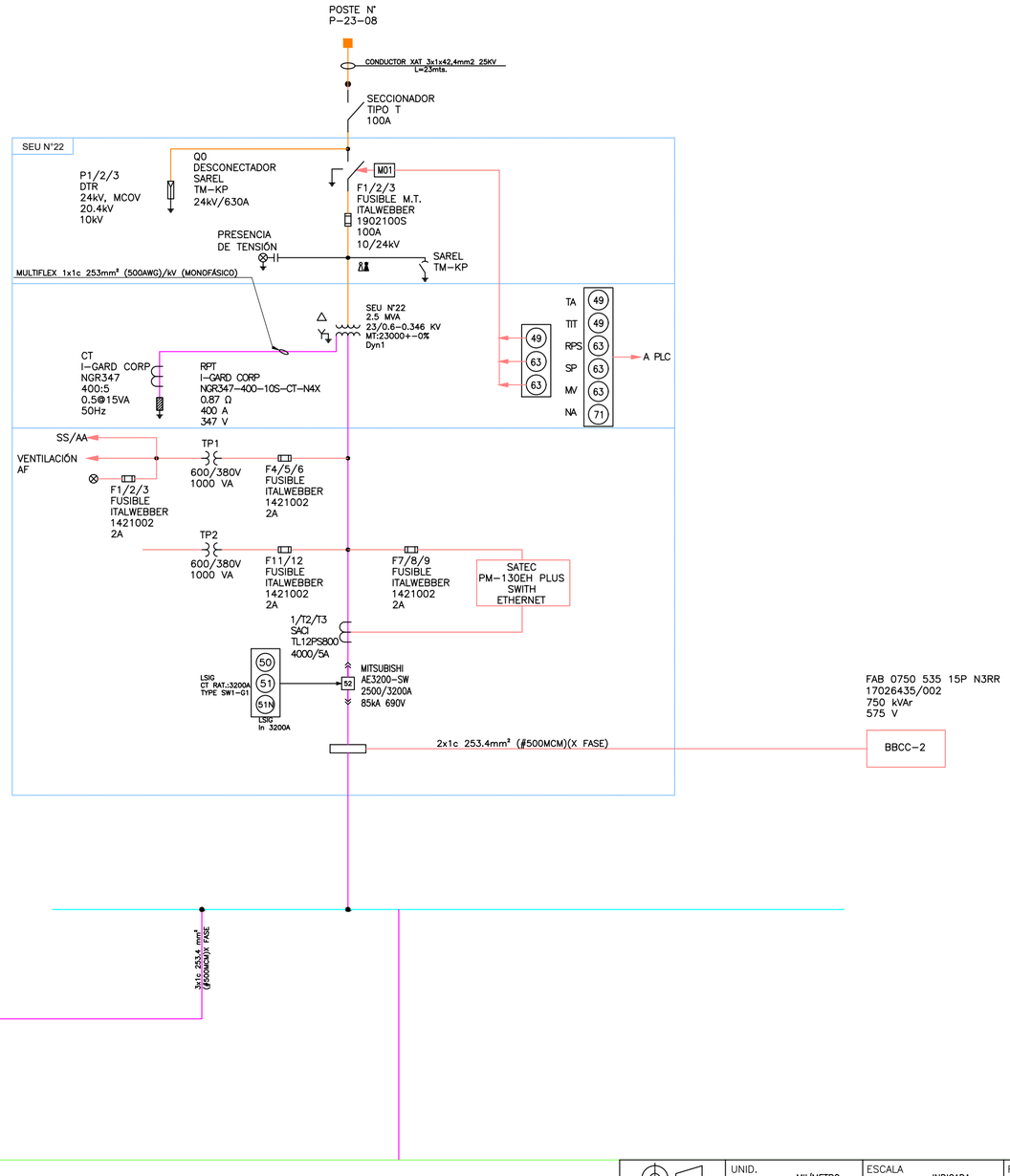
PROYECTO MVC-PY
FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS

PLANO DIAGRAMA DE BLOQUES

PLANO N°	REVISIÓN	LÁMINA N°
MVC-PY	0	1/1

Nota: La información proporcionada en este plano, es de propiedad intelectual de "MVC" y debe ser tratada en forma confidencial. Dicha información no puede ser transmitida a terceros, por lo tanto, no podrá ser usada para otro propósito que el expresamente estipulado por "MVC".

D.2.2. Unilineal proyectado con incorporación referencial de APF



REVISIONES							REFERENCIAS			NOTAS
A	EMITIDO PARA REVISIÓN Y COMENTARIOS	R.B.F.	C.M.P.	F.E.M.	04/26		.	.		
NÚMERO	DESCRIPCIÓN	DIBJ.	REV.	APRB.	FECHA		N° PLANO	DENOMINACIÓN		

	NOMBRE	FECHA
PROYECTÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
DIBUJÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
REVISÓ	CLAUDIO MARCET P.	21/04/26
APROBÓ	FABIAN ESPINOZA M.	21/04/26
APROBÓ	JUAN GONZALEZ N.	21/04/26

UNID. MÉTRICA: MILÍMETRO | ESCALA: INDICADA | FORMATO: A3

MINERA VALLE CENTRAL S.A.

SUBGERENCIA DE INGENIERÍA Y DESARROLLO

DENOMINACIÓN

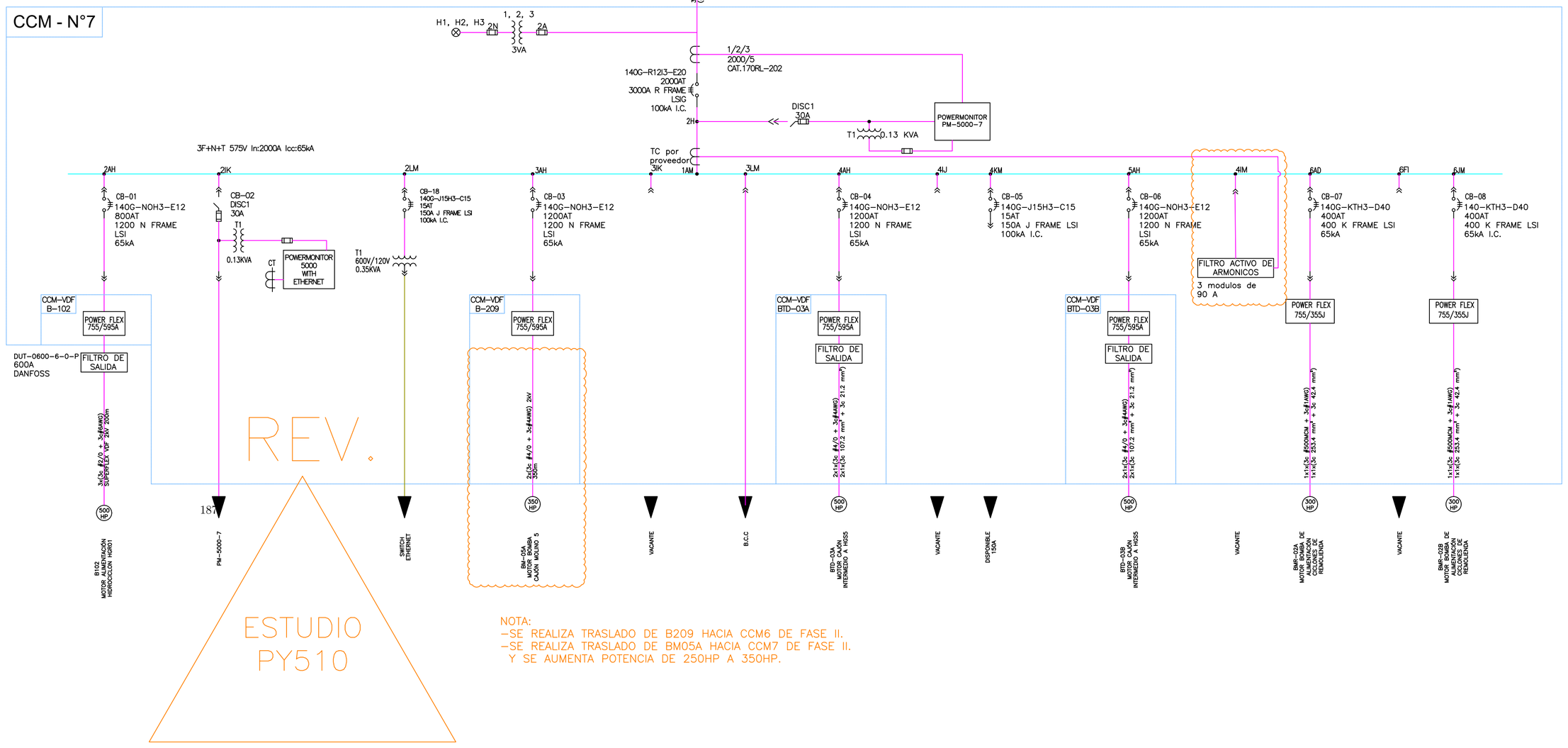
PROYECTO MVC-PY
FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS

PLANO DIAGRAMA DE BLOQUES

PLANO N°	REVISIÓN	LÁMINA N°
MVC-PY	0	1/1

Nota: La información proporcionada en este plano, es de propiedad intelectual de "MVC" y debe ser tratada en forma confidencial. Dicha información no puede ser transmitida a terceros, por lo tanto, no podrá ser usada para otro propósito que el expresamente estipulado por "MVC".

CCM - N°7



REV.

ESTUDIO
PY510

NOTA:
- SE REALIZA TRASLADO DE B209 HACIA CCM6 DE FASE II.
- SE REALIZA TRASLADO DE BM05A HACIA CCM7 DE FASE II. Y SE AUMENTA POTENCIA DE 250HP A 350HP.

REVISIONES							REFERENCIAS			
A	EMITIDO PARA REVISIÓN Y COMENTARIOS	R.B.F.	C.M.P.	F.E.M.	04/26		.	.		
NÚMERO	DESCRIPCIÓN	DIBJ.	REV.	APRB.	FECHA		N° PLANO	DENOMINACIÓN	NOTAS	

UNID. MÉTRICA	MILÍMETRO	ESCALA	INDICADA
FORMATO	A3		

	NOMBRE	FECHA
PROYECTÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
DIBUJÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
REVISÓ	CLAUDIO MARCET P.	21/04/26
APROBÓ	FABIAN ESPINOZA M.	21/04/26
APROBÓ	JUAN GONZALEZ N.	21/04/26

MINERA VALLE CENTRAL S.A.

SUBGERENCIA DE INGENIERÍA Y DESARROLLO

DENOMINACIÓN

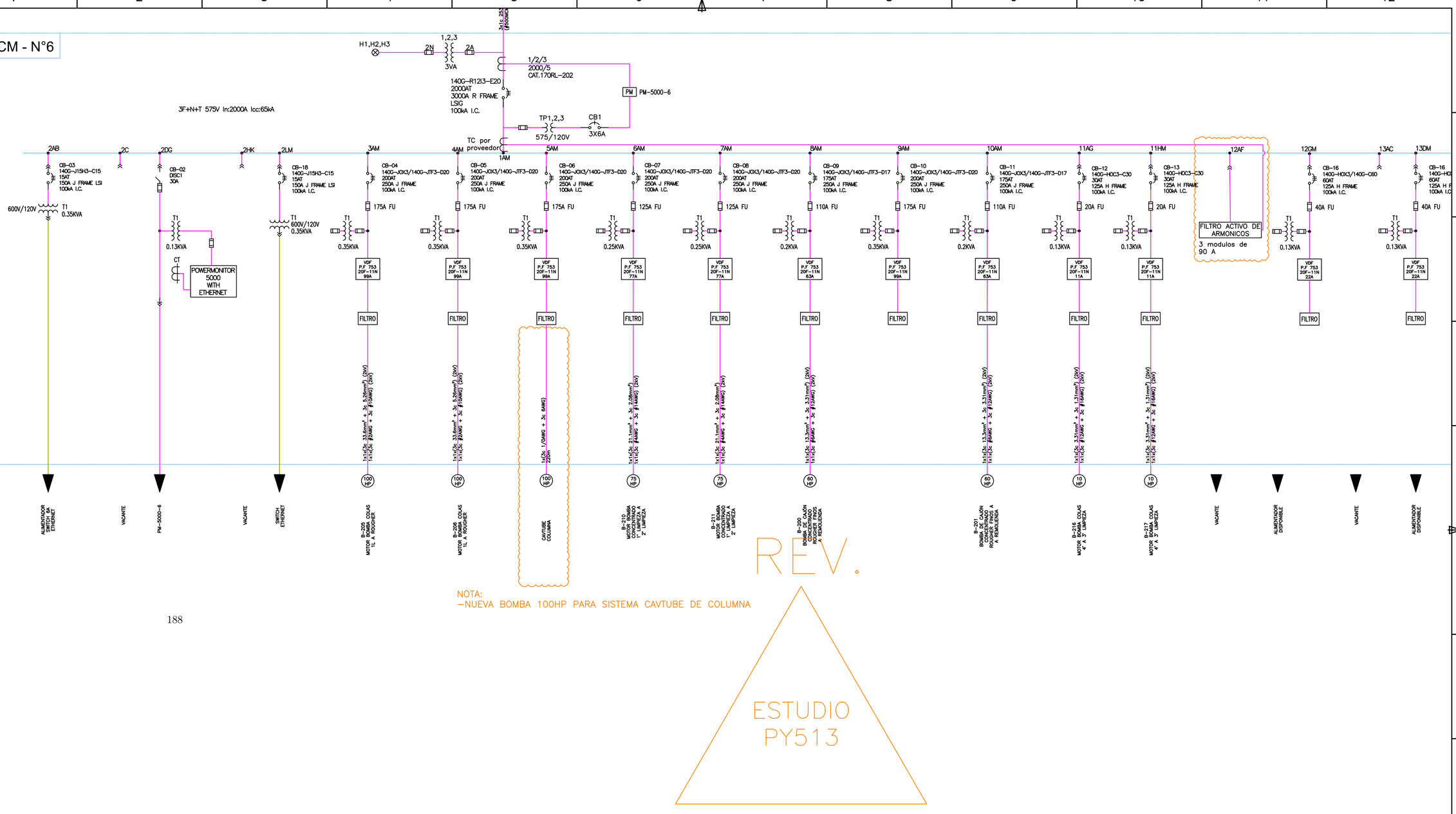
PROYECTO MVC-PY
FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS

PLANO DIAGRAMA DE BLOQUES

PLANO N°	REVISIÓN	LÁMINA N°
MVC-PY	0	1/1

Nota: La información proporcionada en este plano, es de propiedad intelectual de "MVC" y debe ser tratada en forma confidencial. Dicha información no puede ser transmitida a terceros, por lo tanto, no podrá ser usada para otro propósito que el expresamente estipulado por "MVC".

CCM - N°6



NOTA:
-NUEVA BOMBA 100HP PARA SISTEMA CAVTUBE DE COLUMNA

REV.

ESTUDIO PY513

REVISIONES							REFERENCIAS			
A	EMITIDO PARA REVISIÓN Y COMENTARIOS	R.B.F.	C.M.P.	F.E.M.	04/26		.	.		
NÚMERO	DESCRIPCIÓN	DIBJ.	REV.	APRB.	FECHA		N° PLANO	DENOMINACIÓN	NOTAS	

	NOMBRE	FECHA
PROYECTÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
DIBUJÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
REVISÓ	CLAUDIO MARCET P.	21/04/26
APROBÓ	FABIAN ESPINOZA M.	21/04/26
APROBÓ	JUAN GONZALEZ N.	21/04/26

MINERA VALLE CENTRAL S.A.

UNID. MÉTRICA	ESCALA	FORMATO
MILÍMETRO	INDICADA	A3

SUBGERENCIA DE INGENIERÍA Y DESARROLLO

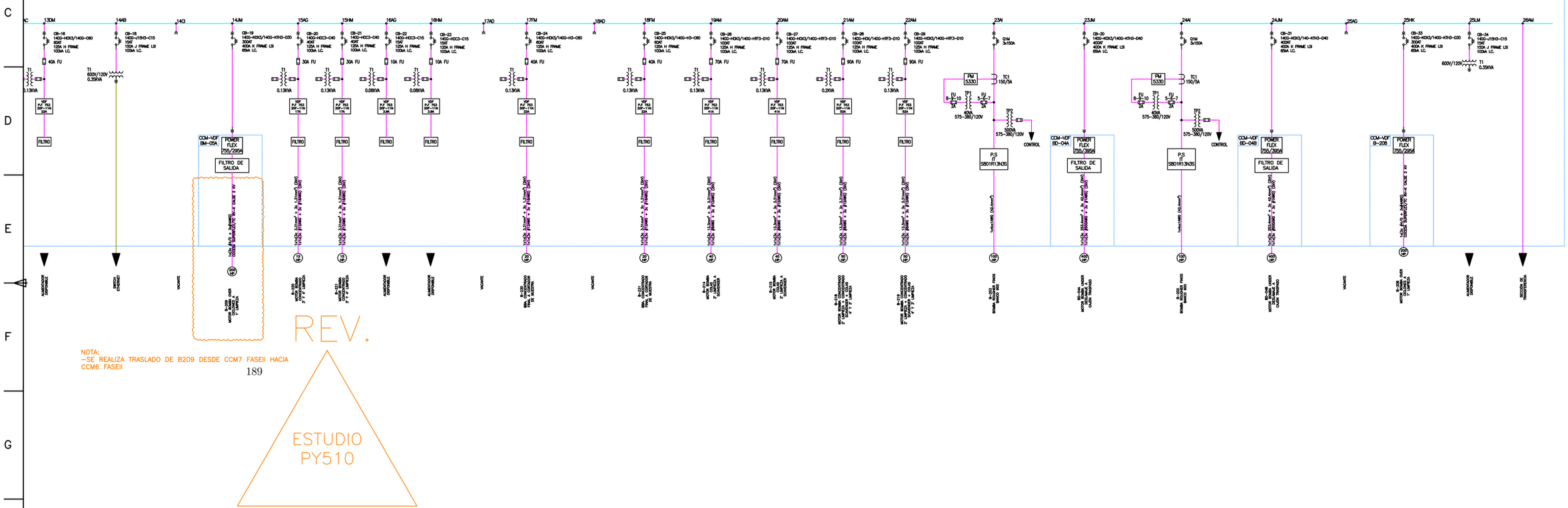
DENOMINACIÓN

PROYECTO MVC-PY
FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS

PLANO DIAGRAMA DE BLOQUES

PLANO N°	REVISIÓN	LÁMINA N°
MVC-PY	0	1/1

Nota: La información proporcionada en este plano, es de propiedad intelectual de "MVC" y debe ser tratada en forma confidencial. Dicha información no puede ser transmitida a terceros, por lo tanto, no podrá ser usada para otro propósito que el expresamente estipulado por "MVC".



NOTA:
-SE REALIZA TRASLADO DE B209 DESDE CCM7 FASEII HACIA CCM6 FASEII

189

REV.

REVISIONES							REFERENCIAS			
NÚMERO	DESCRIPCIÓN	DIBJ.	REV.	APRB.	FECHA		Nº PLANO	DENOMINACIÓN	NOTAS	
A	EMITIDO PARA REVISIÓN Y COMENTARIOS	R.B.F.	C.M.P.	F.E.M.	04/26		.	.		

	NOMBRE	FECHA
PROYECTÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
DIBUJÓ	RODRIGO BURGOS F.	21/04/26
REVISÓ	CLAUDIO MARCET P.	21/04/26
APROBÓ	FABIAN ESPINOZA M.	21/04/26
APROBÓ	JUAN GONZALEZ N.	21/04/26

UNID. MÉTRICA: MILÍMETRO | ESCALA: INDICADA | FORMATO: A3

MINERA VALLE CENTRAL S.A.

SUBGERENCIA DE INGENIERÍA Y DESARROLLO

DENOMINACIÓN

PROYECTO MVC-PY
FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS

PLANO DIAGRAMA DE BLOQUES

PLANO Nº	REVISIÓN	LÁMINA Nº
MVC-PY	0	1/1

Nota: La información proporcionada en este plano, es de propiedad intelectual de "MVC" y debe ser tratada en forma confidencial. Dicha información no puede ser transmitida a terceros, por lo tanto, no podrá ser usada para otro propósito que el expresamente estipulado por "MVC".

D.3. Software de configuración del filtro activo

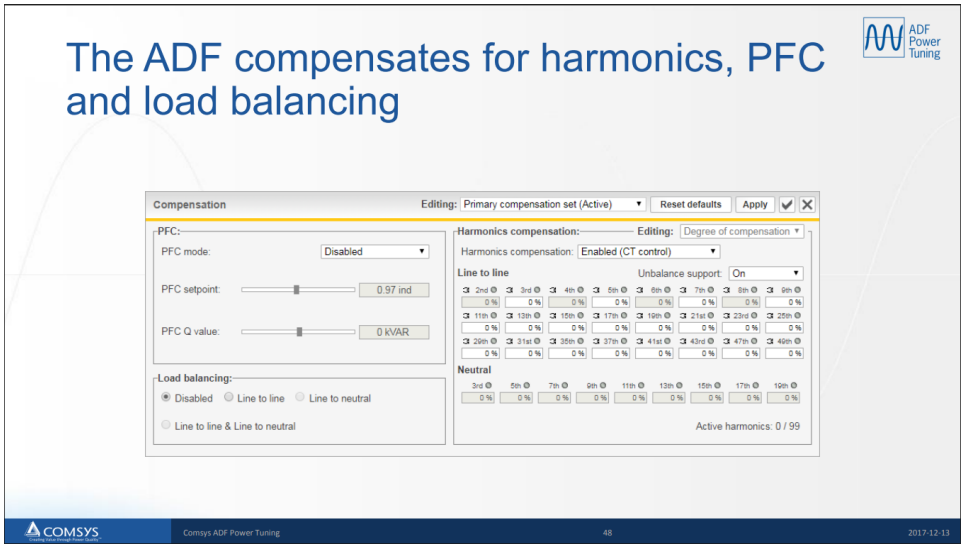


Figura D.3: Interfaz general del software de configuración del filtro activo.

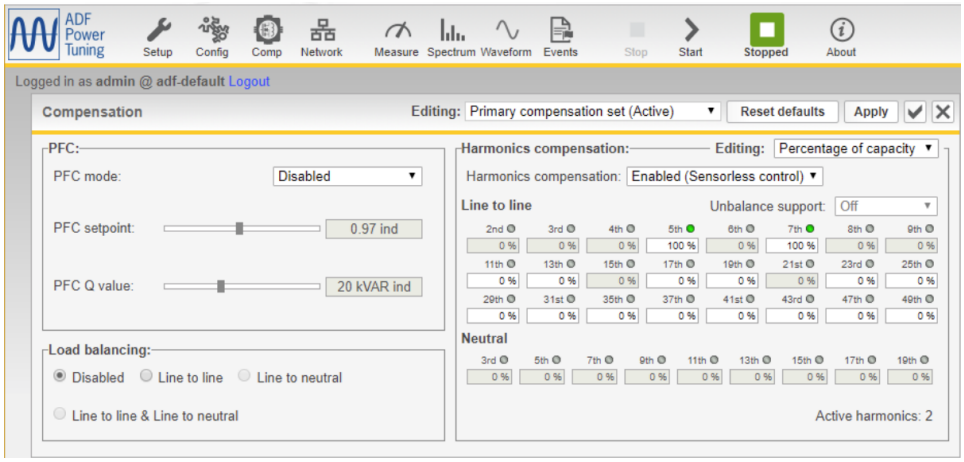


Figura D.4: Ejemplo de parametrización de compensación armónica por órdenes.

D.4. Ubicación física referencial de los filtros activos



Figura D.5: Ubicación actual de filtros pasivos fuera de servicio. El espacio se considera referencialmente para la instalación de los nuevos filtros activos.

D.5. Mediciones referenciales de espacio disponible

En esta sección se presentan fotografías de respaldo del levantamiento preliminar de espacio disponible en la ubicación de los filtros pasivos existentes. Estas mediciones se utilizan como antecedente referencial para evaluar la factibilidad física de reemplazar dichos equipos por los nuevos gabinetes de filtros activos.



Figura D.6: Medición referencial de espacio disponible en la ubicación de los filtros pasivos existentes.



Figura D.7: Medición referencial de longitud disponible para instalación de gabinete de filtro activo.



Figura D.8: Detalle de medición referencial de espacio disponible en terreno.



Figura D.9: Medición referencial de profundidad o distancia disponible en la zona de instalación.

Referencias

[1] N. Mohan, T. M. Undeland y W. P. Robbins, *Electrónica de Potencia: Convertidores, Aplicaciones y Diseño*, 3.ª ed. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2009.

[2] J. Arrillaga y N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2.ª ed. Wiley, 2003.

[3] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan y H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2.ª ed. McGraw-Hill, 2004.

[4] *IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Standards Association, 2022. DOI: 10.1109/IEEESTD.2022.9848440.

[5] H. Akagi, "Active Harmonic Filters," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, n.º 12, págs. 2128-2141, 2005. DOI: 10.1109/JPROC.2005.859603.

[6] H. Akagi, E. H. Watanabe y M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. IEEE Press, 2007.

[7] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. IEEE Press, 2000.

[8] I. Diahovchenko y S. Serhiienko, "Harmonic Mitigation Solutions for Industrial Connections with Variable Frequency Drives," en *2024 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Trento, Italia, sep. de 2024, págs. 1-6, ISBN: 978-88-87237-62-7. DOI: 10.23919/AEIT63317.2024.10736817. dirección: https://doi.org/10.23919/AEIT63317.2024.10736817.

[9] S. K. Chauhan y V. S. Chauhan, "A Comprehensive Review on Power Quality Issues and Disturbances Mitigation Through Shunt Active Power Filters," *International Journal of Applied Power Engineering*, vol. 13, n.º 4, págs. 844-852, 2024.

[10] S. Vig, R. D. Shukla, Rahul y A. Barwal, "Techniques for Power Quality Improvement: A Comparison of Three Approaches," en *2025 Artificial Intelligence and Smart Technologies for Sustainability Conference (AISTS)*, IEEE, 2025, págs. 1-6, ISBN: 979-8-3315-9852-5. DOI: 10.1109/AISTS66100.2025.11232754. dirección: https://doi.org/10.1109/AISTS66100.2025.11232754.

[11] B. Singh, K. Al-Haddad y A. Chandra, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, n.º 5, págs. 960-971, 1999. DOI: 10.1109/41.793345.

[12] H. Akagi, "The State-of-the-Art of Active Filters for Power Conditioning," en *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Dresden, Alemania, 2005.

[13] A.-S. Es'haghi, A. Pasban-Gajan y M. Fotuhi-Firuzabad, "Design and Simulation of an Akagi-Based Harmonic Compensator for Power Quality Improvement," en *2025 15th Smart Grid Conference (SGC)*, IEEE, 2025, págs. 1-7, ISBN: 979-8-3315-8119-0. DOI: 10.1109/SGC69320.2025.11372407. dirección: https://doi.org/10.1109/SGC69320.2025.11372407.

[14] Tecnored S.A., "Análisis de Calidad de Energía MVC Rev. 2," Minera Valle Central S.A., inf. téc., 2024.

[15] *ETAP: Electrical Power System Analysis Software, versión 24.0.1*, Operation Technology, Inc. (ETAP), Irvine, CA, EE.UU., 2024.

[16] *ETAP User Guide: Harmonic Analysis*, versión 24.0.1, Librerías de fuentes armónicas de variadores de frecuencia y de filtros activos genéricos, Operation Technology, Inc. (ETAP), 2024.

[17] Minera Valle Central, *Registro histórico de mediciones eléctricas, plataforma Vantage*, Documento interno, confidencial. Exportación del registro de corriente, tensión y potencia de la SEU N.º 22, CCM6 y CCM7, 2026.

[18] International Electrotechnical Commission, *IEC 60909-0: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems — Part 0: Calculation of currents*, Geneva, Switzerland: IEC, 2016.

[19] *ADF P100/P300 User Manual 2.0.0*, Documento del fabricante del equipo ofertado por el Proveedor A, ref. 1 199 172 REV21. Tabla de tipos de módulo de potencia y condiciones de operación en modo de sobrecarga, Fabricante del filtro activo, 2018.

[20] *CENTERLINE 2100 Motor Control Centers Selection Guide*, Publication 2100-SG003G-EN-P, Bulletin 2100. Referencia para equivalencia de *space factors*, dimensiones de secciones e interruptores derivados (Bulletin 2193F), Rockwell Automation, jul. de 2025.

[21] Proveedor A, *Ficha técnica del filtro activo ofertado*, Documento interno de Minera Valle Central S.A. Confidencial; no se reproduce. Indica una sobrecarga admisible de 120 % sobre la corriente nominal, sin especificar régimen (continuo o temporal), 2026.

[22] Proveedor A, *Diseño mecánico – Filtro armónico 270A/600V, Proyecto Integración MVC*, Plano N.º BT.–260105–REV0, referencial para efectos de cotización. Documento propietario del proveedor; su reproducción está expresamente prohibida y no se incluye en esta memoria. Se cita como referencia interna; las dimensiones se presentan en tablas originales (Tabla 8.5), 2026.

[23] Minera Valle Central S.A., *Verificación de espacio exterior para instalación del filtro activo – levantamiento en terreno*, Documento interno; registro fotográfico y mediciones con huincha del espacio ocupado por los filtros pasivos fuera de servicio, 2026.

[24] Banco Central de Chile, *Dólar observado*, Valor citado como referencia de comparación en una fecha fija (914,46 CLP el 5 de agosto de 2026); el tipo de cambio efectivo de facturación de cada oferta corresponde al dólar observado del día de facturación, según se declara en las condiciones comerciales de los tres proveedores, 2026. visitado 5 de ago. de 2026. dirección: `https://mindicador.cl/api/dolar`.

[25] Proveedor A, *Cotización N.º FIL-20052026 – Filtro activo de armónicos*, Documento interno de Minera Valle Central S.A. Confidencial; no se reproduce. Cotización de fecha 20 de mayo de 2026; validez de la oferta: 30 días, mayo de 2026.

[26] Proveedor B, *Oferta técnico-comercial para solución de filtrado activo, SEU Nº 22*, Documento interno de Minera Valle Central S.A. Confidencial; no se reproduce. Cotización N.º 120007927, de fecha 19 de mayo de 2026, vigente hasta el 29 de mayo de 2026, 2026.

[27] Proveedor C, *Oferta técnico-comercial para solución de filtrado activo, SEU Nº 22*, Documento interno de Minera Valle Central S.A. Confidencial; no se reproduce. Cotización N.º 236166, de fecha 12 de mayo de 2026, vigente hasta el 17 de mayo de 2026, 2026.

[28] Proveedor A, *Cotización N.º 19062026 – Módulo de repuesto y servicio de puesta en marcha*, Documento interno de Minera Valle Central S.A. Confidencial; no se reproduce. Cotización de fecha 19 de junio de 2026; validez de la oferta: 30 días, jun. de 2026.