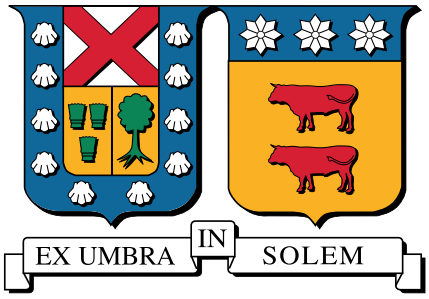
Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Electricidad
Valparaíso, Chile



"MODELAMIENTO, VALIDACIÓN Y ESTUDIO DE PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE MINERA LOS COLORADOS, UTILIZANDO ETAP"

Sebastián Rurico Cruz Cisternas

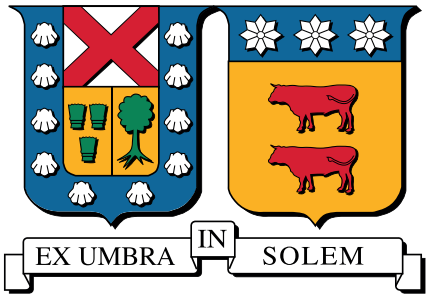
2017

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesores Guía:
SR. NELSON LEIVA BLANCO.
SR. VICTOR HINOJOSA MATTEUS.
SR. JOHNY MONTAÑA CHAPARRO.

Valparaíso, Enero de 2017.

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Electricidad
Valparaíso, Chile



"MODELAMIENTO, VALIDACIÓN Y ESTUDIO DE PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE MINERA LOS COLORADOS, UTILIZANDO ETAP"

Sebastián Cruz Cisternas

2017

"Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la institución".

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres por la oportunidad de haber estudiado en una de las mejores universadades del país; además de apoyarme en todo momento especialmente cuando me convertí en padre. No puedo dejar de mencionar a mi tía Magda, que siempre me ha apoyado en todo paso que he dado en mi vida. A mis dos abuelitas y tía Marianela que están en el cielo, y que se que me están guiando en este camino que decidí tomar. A Camila por acompañarme y apoyarme en este proceso, a mis dos hijas que han sido la motivación para seguir avanzando. A mi hermano por el apoyo dado en este proceso. No puedo dejar de mencionar a mi amigo Juanito, al cual recurrí siempre que tenía un problema o alegría. Al Andrés que me apoyo en esta última etapa. Y a mis amigos de Valparaíso: Muro, Poroto, Nico, Pantera, Janito, Iturra, Deni, Chelero, Hugo, Miguel, Robocop, JP, etc; que siempre estuvieron para apoyar.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos I

Índice de Figuras III

Índice de Tablas VI

1. Introducción **3**
1.1. Objetivos de la memoria . . . 3
1.1.1. Resumen de objetivos . . . 3
1.1.2. Estructura del trabajo . . . 4

2. Descripción mina Los Colorados **5**
2.1. Proceso productivo . . . 6
2.2. Sistema eléctrico de potencia de la mina Los Colorados . . . 7
2.2.1. Equipos eléctricos de la faena . . . 8

3. Modelación en ETAP **13**
3.1. Recopilación de datos técnicos . . . 13
3.2. Modelación del sistema eléctrico de potencia en ETAP . . . 14
3.3. Verificación de datos . . . 22

4. Estudios con ETAP **26**
4.1. Flujo de potencia . . . 26
4.1.1. Porcentaje de carga de los transformadores del sistema . . . 26
4.1.2. Perfil de tensión . . . 27
4.2. Corrientes de cortocircuito . . . 28
4.2.1. Capacidad interruptiva de los interruptores . . . 29
4.3. Ajuste y coordinación de protecciones . . . 31
4.3.1. Alimentador 3A . . . 31
4.3.2. Alimentadores 5A y 5B . . . 63
4.3.3. Alimentador 1B . . . 65
4.3.4. Alimentador 1A . . . 71
4.3.5. Alimentador 4A . . . 88

4.3.6. Alimentador 3B . . . 101
4.3.7. Alimentadores 6A-6B . . . 106
4.3.8. Transformador S/E principal . . . 113
4.4. Ampliación futura . . . 118
4.4.1. Perfil de tensión con expansión . . . 119
4.4.2. Cargabilidad de transformadores . . . 120
4.4.3. Ajuste de protecciones expansión futura . . . 120

5. Resumen final y conclusiones 122

Apéndices 122

A. Diagramas unilineales 123
A.1. Diagrama unilineal SIC, sector Punta de Toro . . . 123
A.2. Diagrama unilineal inicial mina Los Colorados . . . 123
A.3. Diagrama unilineal actualizado mina Los Colorados . . . 129

B. Instalaciones eléctricas minera Los Colorados 134

C. Cálculo de corrientes de cortocircuito 137
C.1. Supuestos y simplificaciones . . . 137
C.1.1. Condiciones de aplicación . . . 138

D. Protecciones de sobrecorriente 139
D.1. Relés de sobrecorriente de tiempo inverso . . . 139
D.2. Procedimiento de ajuste de relé de sobrecorriente de fase de tiempo inverso 141
D.3. Coordinación de relés de sobrecorriente de secciones vecinas . . . 142
D.4. Selección de fusibles . . . 143
D.4.1. Criterios de ajuste para protección de transformador mediante fusibles 143
D.4.2. Coordinación entre fusibles . . . 144
D.4.3. Coordinación de fusibles con transformador intermedio . . . 145
D.4.4. Coordinación entre fusible e interruptor automático . . . 145
D.4.5. Protección de banco de condensadores . . . 145
D.4.6. Protección de motores con fusible . . . 146

Bibliografía 148

Índice de Figuras

2.1. Ubicación geográfica mina Los Colorados. 5
2.2. Rajo mina Los Colorados. 6
2.3. Proceso productivo de la mina Los Colorados. 7
2.4. S/E Principal 1 de 2 8
2.5. S/E Principal 2 de 2 8
2.6. Prensa de rodillos 9
2.7. Área 51 10
2.8. Pala eléctrica 1 de 2 11
2.9. Pala eléctrica 2 de 2 11
2.10. Banco de condensadores 5A 12

3.1. Creación nuevo proyecto ETAP 14
3.2. Barra de herramientas 14
3.3. Pestaña “Info” elemento “Power Grid” 15
3.4. Pestaña “Rating” elemento “Power Grid” 16
3.5. Pestaña “Short Circuit” elemento “Power Grid” 17
3.6. Pestaña “Info” elemento “Bus” 18
3.7. Pestaña “Info” de elemento transformador 19
3.8. Pestaña “Rating” de elemento transformador 20
3.9. Pestaña “Grounding” de elemento transformador 21
3.10. Pestaña “Protection” de elemento transformador 22
3.11. Mediciones de corriente S/E principal (2A) 23
3.12. Mediciones de corriente alimentador 3A 24

4.1. Diagrama unilineal del CCM-52-8603MC 32
4.2. Motor 2709M 33
4.3. Motor 2702M 34
4.4. Motor 2402M1 35
4.5. Motor 2706M 37
4.6. Motor 2708M 38
4.7. Motor 2740M 39
4.8. Motor 2741M 41
4.9. Motor 2718M 42

4.10. Protecciones eléctricas transformador 8104XF . . . 43
4.11. 51F del secundario del transformador 8104XF . . . 46
4.12. 51N del secundario del transformador 8104XF . . . 48
4.13. Coordinación de protecciones del T-8104XF . . . 51
4.14. Protección eléctrica transformador 8105XF . . . 52
4.15. Ajuste de protecciones del transformador 8105XF . . . 54
4.16. Protecciones eléctricas del transformador 8106XF . . . 55
4.17. Ajuste de protecciones del transformador 8106XF . . . 57
4.18. Diagrama unilineal prensa de rodillos . . . 58
4.19. 51F-50F prensa de rodillos . . . 60
4.20. Protecciones eléctricas cabecera 3A . . . 61
4.21. 51F-50F prensa de rodillos . . . 63
4.22. Diagrama unilineal alimentadores: 5A y 5B . . . 64
4.23. 51F cabecera alimentador 5B . . . 65
4.24. Diagrama unilineal alimentador 1B . . . 66
4.25. 51F-50F del secundario del transformador nivel 475 . . . 68
4.26. 51F-50F cabecera alimentador 1B . . . 71
4.27. Diagrama unilineal alimentador 1A . . . 72
4.28. Ajuste de protecciones del motor 2701M . . . 74
4.29. Ajuste de fusible 51-8102 . . . 75
4.30. Ajuste de relé de protección del primario del transformador 8102XF . . . 77
4.31. Fusible filtro 51-2401 . . . 79
4.32. Fusible del primario del transformador 8602 . . . 80
4.33. Ajuste de protecciones motor 51-2401 . . . 82
4.34. Ajuste 51F del secundario del transformador 8101XF . . . 84
4.35. Ajuste del relé de protección del primario del transformador 8101XF . . . 86
4.36. Ajuste de protecciones 51F-50F de la cabecera del alimentador 1A . . . 88
4.37. Diagrama unilineal alimentador 4A . . . 89
4.38. Ajuste de protecciones del motor 2412M . . . 91
4.39. Fusible del primario del transformador T4 . . . 92
4.40. Fusible del primario de la S/E producción . . . 93
4.41. Fusible del primario de la S/E producción . . . 95
4.42. Fusible del primario del transformador de la torre de carguío . . . 96
4.43. Fusible de derivación . . . 97
4.44. Fusible del primario del transformador de la S/E de Derivación . . . 98
4.45. Fusible del primario del transformador de la S/E rechazos 2 . . . 99
4.46. Ajuste de protecciones 51F-50F de la cabecera del alimentador 4A . . . 101
4.47. Diagrama unilineal alimentador 3B . . . 102
4.48. Fusible del primario del transformador 59-8110 . . . 103
4.49. Fusible del primario del transformador T1 . . . 104
4.50. 51F-50F cabecera alimentador 3B . . . 106
4.51. Diagrama unilineal alimentadores: 6A y 6B . . . 107
4.52. Fusible del primario del transformador 6A . . . 108
4.53. Ajuste de protecciones 51F-50F de la cabecera del alimentador 6A . . . 110
4.54. Fusible del primario de la planta de rechazos (6B) . . . 111
4.55. Ajuste de protecciones 51F-50F de la cabecera del alimentador 6B . . . 113
4.56. Diagrama unilineal S/E principal . . . 114
4.57. Ajuste de protección del 51F del secundario de la S/E principal . . . 116

4.58. 51F-50F primario del transformador de la S/E principal 118
4.59. Diagrama unilineal expansión futura 119
4.60. 51F-50F expansión futura 121

A.1. Diagrama unilineal SIC. Punta de Toro 123
A.2. Diagrama unilineal inicial 1 de 5 124
A.3. Diagrama unilineal inicial 2 de 5 125
A.4. Diagrama unilineal inicial 3 de 5 126
A.5. Diagrama unilineal inicial 4 de 5 127
A.6. Diagrama unilineal inicial 5 de 5 128
A.7. Diagrama unilineal S/E principal 129
A.8. Diagrama unilineal alimentadores: 5A, 5B, 1A y 1B 130
A.9. Diagrama unilineal alimentador 3A 131
A.10. Diagrama unilineal alimentadores: 3B y 4A 132
A.11. Diagrama unilineal alimentadores: 6A y 6B 133

D.1. Selección del “lever” 142
D.2. Coordinación de relés de sobrecorriente 142
D.3. Coordinación de fusibles vecinos 144

Índice de Tablas

3.1. Tensiones en las barras más importantes del SEP local 24

4.1. Porcentaje de carga de los transformadores 27
4.2. Tensiones en las barras del SEP (máxima demanda) 28
4.3. Corrientes de cortocircuito "tap-off" Punta de Toro 29
4.4. Impedancias de cortocircuito barra Punta de Toro 29
4.5. Capacidad interruptiva interruptores (falla 3ϕ) 30
4.6. Capacidad interruptiva asimétrica interruptores 31
4.7. Corrientes motor 2709M 32
4.8. Corrientes motor 2702M 33
4.9. Corrientes motor 2402M1 34
4.10. Corrientes motor 2706M 36
4.11. Corrientes motor 2708M 37
4.12. Corrientes motor 2740M 38
4.13. Corrientes motor 2741M 40
4.14. Corrientes motor 2718 41
4.15. Corrientes para el ajuste de protección del secundario del transformador 8104XF 44
4.16. Corrientes para ajuste de 50F 8603 sec. 45
4.17. Corrientes para el ajuste de protección del primario del transformador 8104XF 48
4.18. Corrientes de cortocircuito en la barra 8603 Sec. 49
4.19. Corriente para ajuste de la función 50F 8603 pri. 50
4.20. Corrientes para el ajuste de protección del primario del transformador 8105XF 52
4.21. Corriente para ajuste de 50F 8105XF pri. 53
4.22. Corrientes para el ajuste de protección del primario del 8106XF 55
4.23. Corriente para ajuste de 50F 8106XF pri. 56
4.24. Corrientes para el ajuste de protección de la prensa de rodillos 58
4.25. Corriente para ajuste de 50F 2501XF pri. 59
4.26. Corrientes para el ajuste de protecciones de la cabecera del alimentador 3A 61
4.27. Corrientes para ajuste de 50F de la cabecera del alimentador 5B 65
4.28. Corrientes de interés del secundario del transformador nivel 475 66

4.29. Corrientes de interés del primario del transformador nivel 475 68
4.30. Fusible nivel 475 pri. 69
4.31. Corrientes de ajuste protección cabecera alimentador 1B 69
4.32. Corrientes de motor 2701M1 73
4.33. Corrientes para el ajuste del fusible 51-8102 74
4.34. Fusible 51-8102 75
4.35. Corrientes del primario del transformador 8101XF 76
4.36. Corrientes de cortocircuito en la barra 51-8102 sec. 76
4.37. Corrientes para el ajuste del fusible 51-2401 78
4.38. Corrientes de interés primario del transformador 51-8602 79
4.39. Fusible del primario del transformador 8602 80
4.40. Corrientes del motor 51-2401 81
4.41. Corrientes de interés del secundario del transformador 8101XF 83
4.42. Corrientes para el ajuste de 50F 8101XF sec. 83
4.43. Corrientes de interés del primario del transformador 8101XF 84
4.44. Corrientes de cortocircuito para falla en la barra 8101 sec. 85
4.45. Corrientes de interés para el ajuste de protección de la cabecera 1A . . . 86
4.46. Corrientes del motor 2411M 89
4.47. Corrientes del motor 2412M 90
4.48. Corrientes para el ajuste de protección del primario del T4 91
4.49. Fusible del primario del transformador T4 93
4.50. Fusible del primario de la S/E producción 94
4.51. Corrientes de interés para el ajuste del fusible de traspaso 94
4.52. Fusible de traspaso 95
4.53. Fusible del primario del transformador de la torre de carguío 96
4.54. Corrientes de interés para el ajuste de fusible de derivación 97
4.55. Fusible del primario del transformador de la torre de carguío 98
4.56. Fusible del primario del transformador de la S/E de derivación 99
4.57. Fusible del primario del transformador de la S/E rechazos 2 100
4.58. Corrientes de interés para el ajuste de la protección de la cabecera 4A . . 100
4.59. Fusible del primario del transformador 59-8110 103
4.60. Fusible del primario del transformador T1 104
4.61. Corrientes para el ajuste de la protección de la cabecera 3B 105
4.62. Fusible del primario del transformador 6A 108
4.63. Corrientes de interés para el ajuste de la protección de la cabecera 6A . . 109
4.64. Fusible del primario del transformador 6B 111
4.65. Corrientes de interés para el ajuste de la protección de la cabecera 6BA . 112
4.66. Corrientes para el ajuste de protección del secundario de la S/E principal 114
4.67. Corriente para el ajuste de protección del primario de la S/E principal . . 116
4.68. Falla en la barra S/E principal 117
4.69. Tensiones en las barras afectadas por la expansión futura 119
4.70. Cargabilidad transformadores 120
4.71. Corrientes para el ajuste de protecciones motores expansión futura 120

B.1. Relés y fusibles 134
B.2. Motores de media y baja tensión 135
B.3. Interruptores de alta y media tensión 135
B.4. Datos de placa de transformadores 136

C.1. Factor C 138

D.1. Máximo valores de corriente de cortocircuito, según norma ASA-NEMA para falla 3ϕ 144
D.2. Relación entre corrientes de fase en pu de un transformador 145
D.3. Corriente nominal de fusibles tipo R 147

Glosario

AT:	Alta Tensión.
ANSI:	"American National Standard Institute". (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares).
ASA:	"American Standard Association". (Asociación de Estándares Estadounidenses).
BT:	Baja Tensión.
CB:	"Circuit Breaker" (Interruptor).
CCM:	Centro de Control de Motores.
FC:	Porcentaje de carga en condiciones normales de trabajo del motor.
FLA:	Corriente a plena carga del motor.
FP:	Factor de potencia de motor y cargas estáticas.
Fuse:	Fusible.
HP:	"Horse Power" (caballos de fuerza).
I_b:	Corriente de cortocircuito simétrica de interrupción.
I_{bAsy}:	Corriente de cortocircuito asimétrica de interrupción.
IEEE:	"Institute of Electrical and Electronics Engineers"
I_{inrush} :	Corriente transitoria de magnetización de un equipo eléctrico.
I_k:	Corriente de cortocircuito permanente.
I''_k:	Corriente de cortocircuito simétrica inicial.
I_n:	Corriente nominal de elementos de potencia.
i_p:	Máxima corriente instantánea asimétrica de cortocircuito.
I^*_p:	Máxima corriente asimétrica de cortocircuito soportada por un interruptor.
I_{pri}:	Corriente lado primario de un transformador.
I_{pri}:	Corriente lado primario de un transformador.
I^*_{pri}:	Corriente refleja al lado secundario del transformador.
I_{ps}:	Corriente de rotor bloqueado de un motor.
I_r:	Corriente medida con instrumento, FLUKE 8335.
I_{rb}:	Corriente de rotor bloqueado de un motor.
I_s:	Corriente simulada en ETAP.
I_{sc}:	Corriente de cortocircuito de interrupción nominal del interruptor.
I_{sec}:	Corriente lado secundario de un transformador.
I^*_{sec}:	Corriente refleja al lado primario del transformador.

η:	Eficiencia de motor.
MT:	Media Tensión.
n:	Velocidad nominal del motor.
NEMA:	"National Electrical Manufacturers Association". (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos).
P:	Potencia activa nominal de elementos de potencia.
S:	Potencia aparente nominal de elementos de potencia.
S/E:	Subestación eléctrica.
SEP:	Sistema eléctrico de potencia.
SEU:	Subestación eléctrica unitaria.
SIC:	Sistema Interconectado Central.
SW:	"Switchgear".
Tag:	Identificación interna de los componentes del sistema eléctrico.
TC:	Transformador de corriente.
μ:	Factor para calcular I_b a partir de I''_k.
U_n:	Tensión línea a línea nominal de elementos de potencia.
U_s:	Tensión simulada en ETAP.
Z_f:	Impedancia de falla a tierra.
Z_t:	Impedancia de un transformador.

Resumen

En el presente documento se realiza el modelamiento, validación y estudio de protecciones del sistema eléctrico de potencia (SEP) de la mina Los Colorados, propiedad de la Compañía de Acero del Pacífico (CAP). Para la modelación se utilizó el "software" "Electrical Transient Analyzer Program" (ETAP) y como referencia el diagrama unilineal entregado por el Departamento de Potencia de la mina. Cabe mencionar que la última revisión del diagrama unilineal data del año 2010, y a partir de esa fecha ocurrieron importantes modificaciones como repotenciamiento de motores y cambios en la topología de la red. Es por esto, que este diagrama se actualizó con visitas a terreno a las instalaciones eléctricas de la mina. El modelo se realizó para el escenario de máxima demanda y se validó obteniendo el flujo potencia, donde sus resultados de tensión y corriente (de las barras más importantes) se contrastaron con mediciones reales. Se realizaron los estudios de análisis de carga de transformadores, perfil de tensión, cálculo de corrientes de cortocircuito y ajuste de protecciones de sobrecorriente. Del análisis de carga de transformadores se obtuvieron resultados positivos, dado que existe un solo transformador con una carga sobre el 90 % de su capacidad nominal, y este transformador no tiene gran relevancia en expansiones futuras. Del perfil de tensión se infiere que las tensiones de barra del SEP están dentro del rango $\pm 7\,\%$, porcentaje estipulado por la norma técnica de seguridad y calidad de servicio (NTSyCS). El estudio de cálculo de corriente de cortocircuito entregó como resultado las corrientes de cortocircuito máxima y mínima de todas las barras del SEP. Esta información se utilizó para estudiar las capacidades de cortocircuito de los interruptores de donde se concluye que ninguno de ellos corre riesgo de que sean superadas sus capacidades ante corrientes de cortocircuito. El estudio de protecciones de sobrecorriente permitió actualizar los ajustes existentes protegiendo los equipos y asegurando la coordinación en todo momento. Por último se estudió la expansión proyectada para el año 2017, la cual consiste en una correa transportadora que posee dos motores de 200 [HP]. De los resultados obtenidos se infiere que no se deben realizar modificaciones de instalaciones actuales.

Abstract

This document comprehend the modeling, validation and protections study of the electric power system (SEP) at Los Colorados mine, owned by Compañía de Acero del Pacífico (CAP). The Electrical Transient Analyzer Program software (ETAP) was used for modeling process and unilinear diagram provided by mine's Power Department served as a reference. It should be noted that the final review of the diagram dates from 2010, and after this date, important events such as engines re-empowerment and modification on network topology occurred. This is the reason why this diagram was upgraded by means of field visits carried out at mines electrical facilities. The modeling process was performed to cover the maximum demand setting, and it was validated by obtaining the power flow, where its voltage and current results (from most important buses) were compared with real measurements. Transformers loading analysis, voltage profile, short circuit currents calculation and over-current protections adjustments studies were also conducted. Promising results were obtained from transformers loading analysis, since there is only one transformer having a charge superior to the 90 % of nominal capacity, and such transformer does not represent a major relevance regarding future expansions. From voltage profile, all buses in the SEP should be within ± 7 % range, according to the Chilean technical safety standard and quality service (NTSyCS). The short circuit current calculation resulted in maximum and minimum short circuit currents for all SEP buses. This information was useful to study short circuit probabilities on switches, concluding that neither are at risk to be overcome by short circuit currents. Over-current protection study enabled existing adjustments to be updated, protecting equipment, and ensuring coordination at all times. Finally, future expansion projected for 2017 was considered, which consists into a conveyor belt that has two 200 [HP] engines. From results obtained, it follows that no modifications to existing facilities should be performed.

CAPÍTULO 1

Introducción

Las modelaciones de los sistemas eléctricos en programas de computación (como ETAP) se han convertido en un aspecto esencial dado que a partir de los estudios que se pueden realizar (flujo de potencia, análisis de cortocircuito, ajuste de protecciones, etc) se puede lograr operar el sistema de forma óptima, mejorar los distintos procesos, realizar mantenimiento, etc. llevando a obtener beneficios económicos a la empresa. El flujo de potencia permite visualizar la situación actual del sistema eléctrico de potencia (tensiones de barras, porcentaje de carga de los transformadores, etc), además de entregar importante información para ampliaciones futuras y ejecución de mantenimiento. El estudio de cortocircuito entrega los valores de corriente que deben soportar los diversos equipos eléctricos, además de los valores mínimos de corrientes para los cuales deben ser sensibles las protecciones eléctricas. El estudio de ajuste y coordinación de protecciones permite que el sistema eléctrico esté protegido correctamente al suceder un cortocircuito. Un buen sistema de protecciones permite que la vida útil de los equipos no se vea acortado o en el peor de los casos no haya algún daño o pérdida total, todo esto redunda en que la empresa obtenga adecuados beneficios económicos de manera de recuperar la inversión realizada en equipos eléctricos.

1.1. Objetivos de la memoria

El objetivo principal de la memoria es crear un modelo del SEP de la Minera Los Colorados, el cual permitirá realizar diversos estudios.

1.1.1. Resumen de objetivos

- Modelar el sistema eléctrico de la minera "Los Colorados", utilizando el "software ETAP", considerando ampliaciones futuras.
- Validar la modelación determinando los niveles de tensión de barras principales y el flujo en las líneas en condición normal.
- Aplicar el modelo obtenido al estudio del comportamiento y ajuste del sistema de protecciones.
- Estudiar los niveles de cortocircuito para determinar puntos críticos del sistema.

1.1.2. Estructura del trabajo

- Capítulo N°1. Introducción. En este capítulo se justifica el tema de la memoria, presentando objetivos y alcance.
- Capítulo N°2. Descripción de la mina Los Colorados. Se realiza la descripción de la ubicación, proceso productivo y el sistema eléctrico de la mina Los Colorados.
- Capítulo N°3. Modelación en ETAP. Inicialmente se realiza una descripción de sus módulos, para luego mostrar los hitos más importantes de esta etapa y por último se realiza la validación; determinando los niveles de tensión de barras principales y el flujo de carga en los alimentadores principales.
- Capítulo N°4. Simulaciones y estudios realizados con el modelo. En este capítulo se ejecutan las simulaciones para calcular el flujo de potencia de donde se obtienen los porcentajes de carga de los transformadores, y el perfil de tensión para todas las barras del sistema. Luego de realiza el calculo de las corrientes de cortocircuito en los escenarios de máxima y mínima demanda del sistema. Con estos resultados se realizan los estudios de análisis de cortocircuito y ajuste de protecciones eléctricas. Por último se modela la expansión futura proyectada para el 2017 la cual consiste en la instalación de dos motores de 200 HP de 4,16 [kV]. Se realizaron nuevamente los estudios de cargabilidad de los transformadores, perfil de tensión y ajuste de protecciones de sobrecorriente, del resultado de estos se infiere que no existen imposibilidades técnicas para realizar la expansión proyectada.
- Capítulo N°5. Conclusiones y comentarios. Se dan a conocer las principales conclusiones y recomendaciones que se originan de este estudio.

CAPÍTULO 2

Descripción mina Los Colorados

El yacimiento Los Colorados se encuentra aproximadamente a 30 kilómetros en línea recta al noroeste de Vallenar, región de Atacama. En el recuadro rojo del mapa minero de la Figura 2.1 se observa la ubicación geográfica de la mina.



Figura 2.1: Ubicación geográfica mina Los Colorados.

Esta mina es del tipo rajo abierto (cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie del terreno) siendo su principal objetivo abastecer de preconcentrado de hierro a Planta de Pellets[1], ubicada en Huasco. Su producción anual es de diez millones cincuenta mil

[1]Planta donde el preconcentrado de hierro es transformado en pellets (bolas de hierro comprimido de distintos diámetros).

toneladas, siendo la mina más importante del grupo CAP. En la Figura 2.2 se observa una imagen panorámica del rajo de la mina.



Figura 2.2: Rajo mina Los Colorados.

2.1. Proceso productivo

El proceso productivo de la mina Los Colorados [1] comienza con la etapa de perforación y tronadura de donde se obtienen rocas con alto contenido de fierro, las que son cargadas en camiones de alto tonelaje a través de dos palas hidraúlicas y una pala eléctrica. Este material es transportado al área de chancado primario donde se recepciona el mineral en un buzón de 300 toneladas de capacidad el cual alimenta a un chancador giratorio. El producto chancado es depositado en una pila intermedia para luego someterse a un primer proceso de harneado mediante dos harneros. Luego de ello, el material es extraído por medio de 6 alimentadores electromecánicos los cuales abastecen al chancador secundario cuya función es reducir el tamaño del material. En una tercera etapa, el mineral es sometido nuevamente a una disminución de tamaño mediante una prensa de rodillos de alta presión. Posteriormente es clasificado según su tamaño por cinco harneros, los cuales alimentan a un sistema de concentración en seco. Este sistema se realiza con 12 tambores magnéticos de alta velocidad, cuya función es diferenciar el preconcentrado de hierro del material estéril. El producto final, denominado preconcentrado de hierro, es almacenado en una cancha de acopio de donde se extrae por medio de 11 alimentadores vibratorios que abastecen a correas transportadoras las cuales llevan el material hacia una torre de carguío de trenes. Desde este lugar se transporta el material hacia la Planta de Pellets. En la Figura 2.3 se observa el diagrama de flujo del proceso de obtención del preconcentrado de hierro.

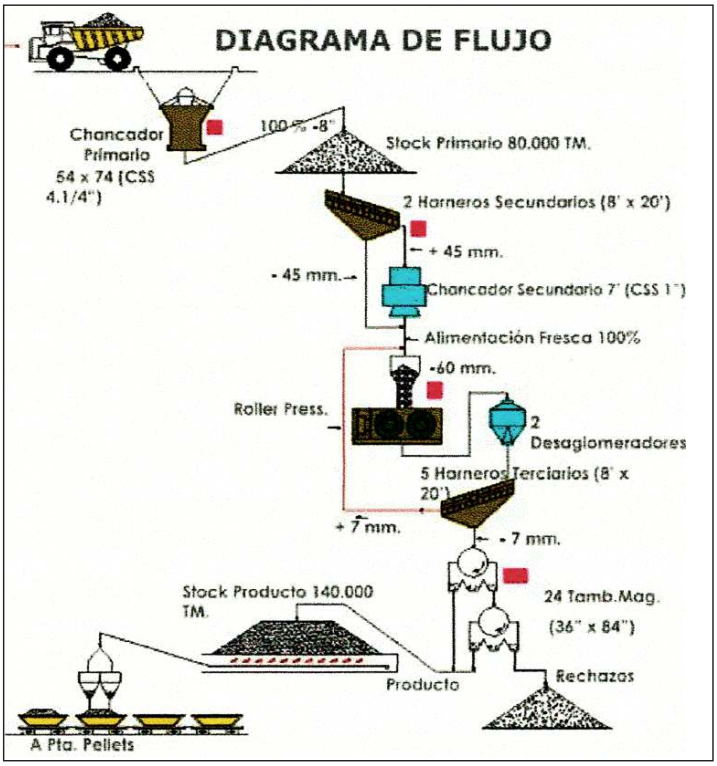


Figura 2.3: Proceso productivo de la mina Los Colorados.

2.2. Sistema eléctrico de potencia de la mina Los Colorados

La mina Los Colorados se conecta eléctricamente al Sistema Interconectado Central (SIC) a través del "tap-off"Punta de Toro (110 kV.) el cual se ubica entra la S/E Maintencillo (provincia del Huasco) y la S/E Cardones (provincia de Copiapó). En la Figura A.7, Anexo A se observa su diagrama unilineal. Desde Punta de Toro se alimenta la S/E Principal de la mina Los Colorados a través de una línea de 110 kV la cual recorre aproximadamente 13 kilómetros. En este lugar se reduce la tensión a 13,2 kV, y es donde se distribuye la energía a los diversos sectores de la mina, lo cual se realiza a través de 9 alimentadores (1A, 1B, 3A, 3B, 4A, 5A, 5B 6A, 6B) todos en 13,2 kV, En la Figura 2.4y Figura 2.5 se observan imágenes de este sector y en la Figura A.7, Anexo A se muestra su diagrama unilineal.



Figura 2.4: S/E Principal 1 de 2



Figura 2.5: S/E Principal 2 de 2

2.2.1. Equipos eléctricos de la faena

A continuación se describen los principales equipos eléctricos de la mina:

- **Prensa de rodillos (FS-2501):** las prensas son máquinas para la trituración de

materias semiduras y duras. La existente en la faena es una prensa horizontal con alimentación gravimétrica, es decir, los rodillos están alojados horizontalmente uno al lado del otro dentro del bastidor, y el material cae desde una correa sobre la prensa. Cada uno de los rodillos tiene un motor de 2500 HP, siendo los equipos con mayor potencia instalada del SEP local. Estos equipos se conectan electricamente a través de su respectivo variador de frecuencia a la barra 52-8103 del alimentador 3A (ver diagrama unilineal de la Figura A.9, Anexo A). En la Figura 2.6 se muestra una imagen de este equipo.



Figura 2.6: Prensa de rodillos

- **Chancador primario (51-2401):** cuenta con un motor de 600 [HP] el cual se conecta al centro de control de motores 1-8601MC (CCM-1-8601MC) del alimentador 1A, en la Figura A.8 del Anexo A se observa su diagrama unilineal y en la Figura 2.7 se muestra una imagen panorámica del edificio de este equipo.



Figura 2.7: Área 51

- **Correa transportadora (51-2701):** en la Figura 2.7 se observa la correa transportadora conectada al centro de control de motores 8102 del área 51, la cual se alimenta a partir del alimentador 1A (ver diagrama unilineal de la Figura A.8 del Anexo A).
- **Pala eléctrica 201:** en la Figura 2.8 y Figura 2.9 se observa la pala eléctrica Bucyrus. Electricamente se conecta a la barra nivel 475 del alimentador 1B. En el diagrama unilineal de la Figura A.8 , Anexo A se observa este sector.



Figura 2.8: Pala eléctrica 1 de 2



Figura 2.9: Pala eléctrica 2 de 2

- **Banco de condensadores:** en la Figura 2.10 se observa el banco de condensadores conectado al alimentador 5A (ver diagrama unilineal de la Figura A.8 del Anexo A).



Figura 2.10: Banco de condensadores 5A

CAPÍTULO 3

Modelación en ETAP

ETAP es una herramienta utilizada para el diseño, análisis, mantenimiento, y operación de los SEP [2]. En CAP este programa es el de elección, ya que la minera cuenta con licencia para ejecutarlo. Los módulos empleados son "load flow analysis", "short circuit analisys" y "star-protective device coordination". El primero de ellos se emplea para realizar el flujo de potencia; sus resultados sirven para validar la modelación, comprobar que las capacidades nominales de los dispositivos eléctricos no sean superada y para observar si el perfil de tensión -de las barras principales del sistema- cumple con la norma técnica de calidad de servicio chilena [3]. El módulo "short-circuit analisys" se utiliza para calcular las corrientes de cortocircuito -máximas y mínimas- en todas las barras del sistema; las cuales se emplean para comprobar las capacidades de cortocircuito de los dispositivos eléctricos y para ajustar las protecciones eléctricas. Con el módulo "start-protective device coordination" se verifican si los ajustes de protecciones propuestos cumplen con un ajuste confiable.

3.1. Recopilación de datos técnicos

Para iniciar la recopilación de datos técnicos se utiliza como referencia el diagrama unilineal inicial del SEP local [2], el cual se puede observar en la Sección A.2 del Anexo A. Este sirvió para reconocer los elementos más importantes de la red. Cabe mencionar que este diagrama unilineal se realizó antes de un cambio importante de repotenciamiento de motores, es por esto que luego de creado el modelo se realizaron periódicamente visitas a terreno donde se extrajeron datos de los motores e información que no se incluía inicialmente. En las Tablas del Anexo B se describen las características de los dispositivos eléctricos (actualizados o validados con las visitas a terreno). El diagrama unilineal actualizado con los datos recopilados en terreno se observa en la Sección A.3 del Anexo A. Este diagrama unilineal y la información detallada de las instalaciones eléctricas (Anexo B) son la base de la modelación en ETAP.

[2]Facilitado por departamento de potencia de minera Los Colorados

3.2. Modelación del sistema eléctrico de potencia en ETAP

A continuación se realiza un resumen de los pasos que se deben realizar para modelar un SEP en ETAP. Cabe mencionar que una descripción más detallada (de otros componentes eléctricos) se pueden encontrar en la "power guide" 12.0 de ETAP [4].

- **Creación del proyecto:** para comenzar el proceso de modelación es necesario crear un nuevo proyecto en el programa seleccionando en el menú "File" la opción "New proyect". En la Figura 3.1 se muestra la pantalla donde se ingresa la identificación del proyecto y el formato de la hoja de dibujo. Al finalizar la creación del nuevo proyecto el programa genera una hoja de dibujo donde se van colocando los elementos del sistema de potencia que se desea modelar. El ingreso de dichos elementos es realizado mediante la selección de alguno de los iconos disponibles en la barra de herramientas que se observa en la Figura 3.2.

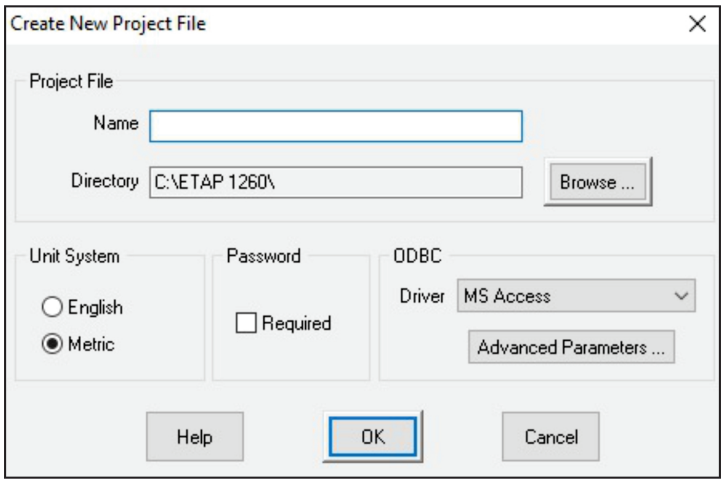


Figura 3.1: Creación nuevo proyecto ETAP

En la Figura 3.2 se muestra la barra de herramientas donde estan todos los dispositivos eléctricos disponibles del programa.

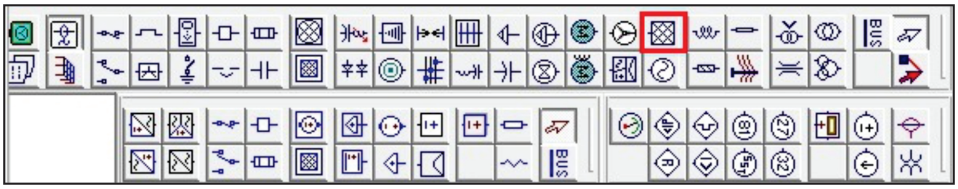


Figura 3.2: Barra de herramientas

- **Sistema equivalente:** para comenzar la modelación del sistema equivalente, se debe seleccionar el elemento "power grid" de la barra de elementos (encerrado en color rojo en la Figura 3.2), y establecer los parámetros en el menú de edición del elemento iniciando por la pestaña de "Info" que se muestra en la Figura 3.3.

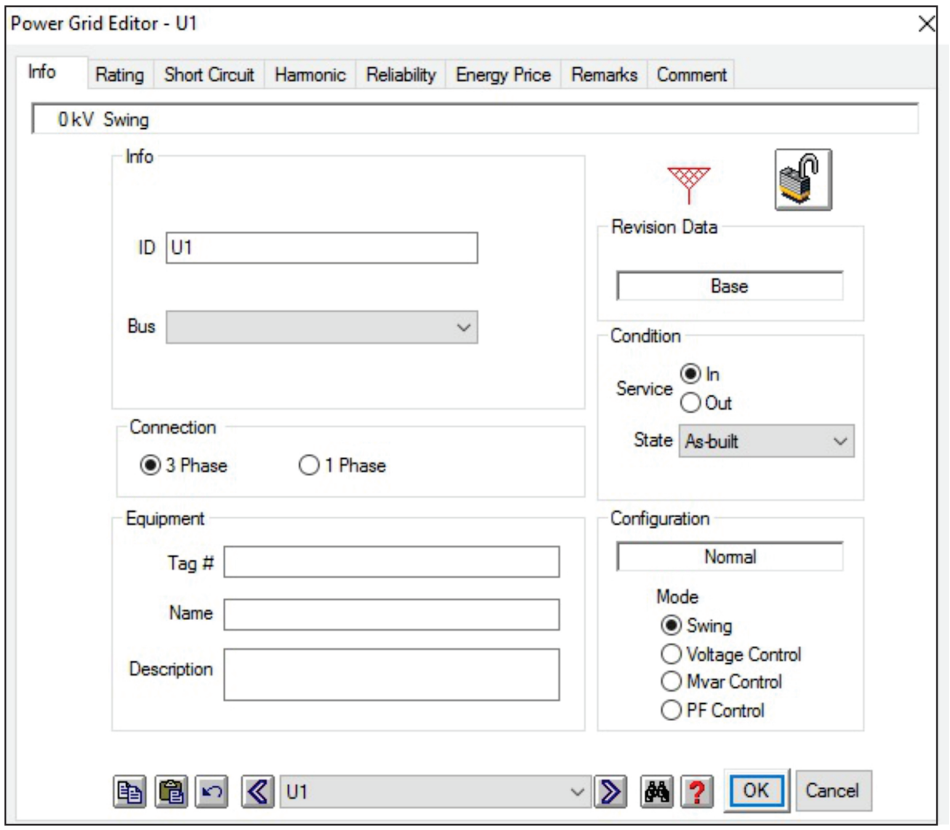


Figura 3.3: Pestaña "Info" elemento "Power Grid"

Los parámetros de operación se ingresan en la pestaña del menú de edición "Rating" y "Short Circuit", ver Figura 3.4 y Figura 3.5 respectivamente. En estas pestañas se ingresan los datos de: tensión nominal, conexionado de la fuente bien sea estrella o delta, MVAsc de cortocircuito y la relación X/R (para cortocircuitos trifásico y monofásico). A partir de esto el programa calcula los valores de impedancia para las distintas secuencias. En primer lugar calcula la corriente de cortocircuito, utilizando la fórmula de la ecuación eq:kasc.

$$kAsc = \frac{Mvasc}{\sqrt{3} \cdot U_n} \tag{3.1}$$

Donde:

- kAsc: Corriente de cortocircuito [kA], para fallas 3ϕ y $1\phi - t$
- Mvasc: Potencia de cortocircuito [MVA], para fallas 3ϕ y $1\phi - t$.
- U_n: Tensión nominal línea a línea de la barra en cortocircuito [kV].

El programa asume que las impedancias para secuencia positiva y negativa son iguales. De la aplicación de la fórmula anterior, con la relación X/R en la barra en estudio y la información de potencia de cortocircuito -para falla trifásica y monofásica a tierra- se obtienen los valores de resistencia y reactancia de secuencia positiva, negativa y cero.

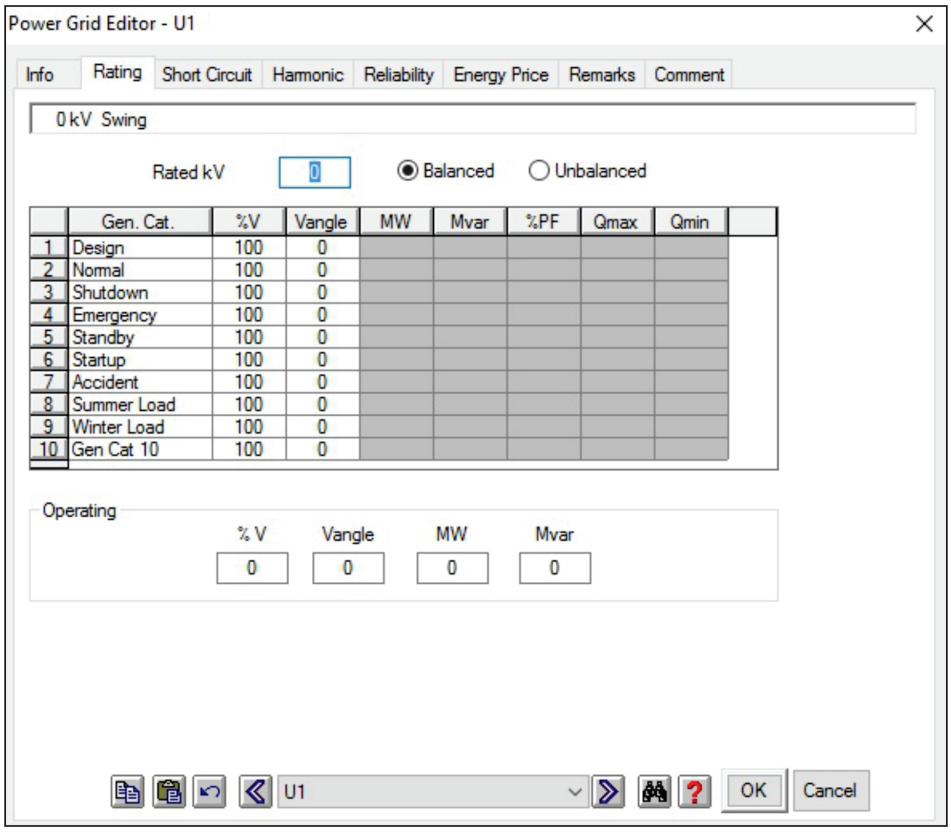


Figura 3.4: Pestaña “Rating” elemento “Power Grid”

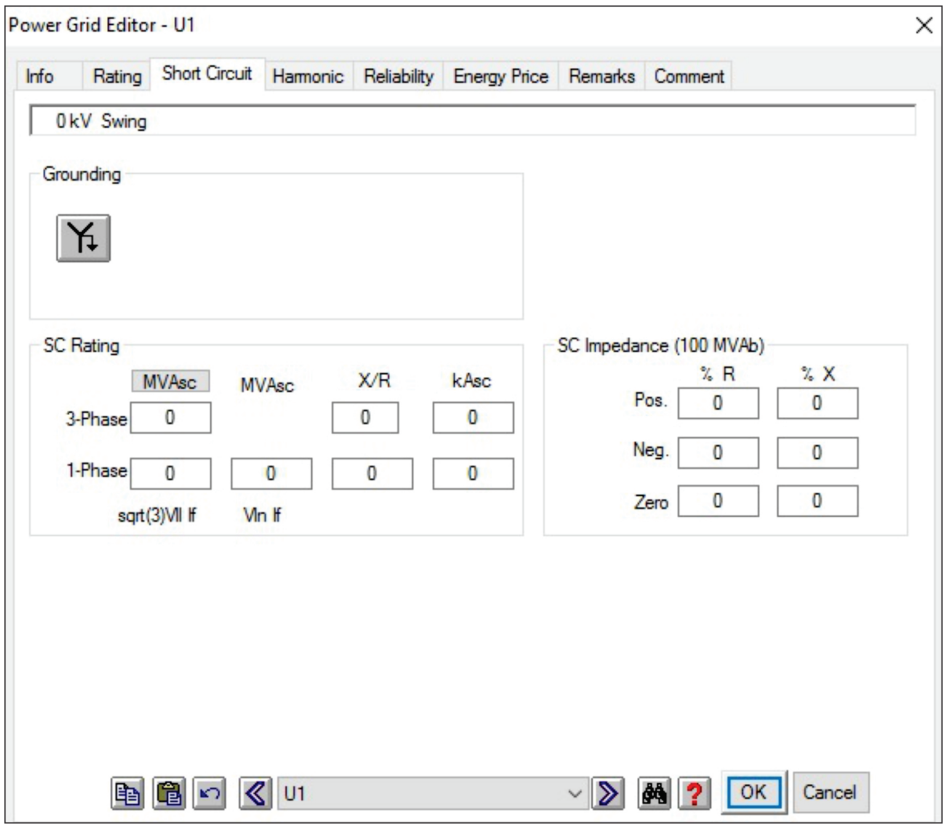


Figura 3.5: Pestaña "Short Circuit" elemento "Power Grid"

- **Barras o alimentadores:** para simular las barras se debe seleccionar el elemento "Bus" de la barra de elementos, luego se establecen los parámetros de tensión en el menú de edición del elemento que se muestra en la Figura 3.6.

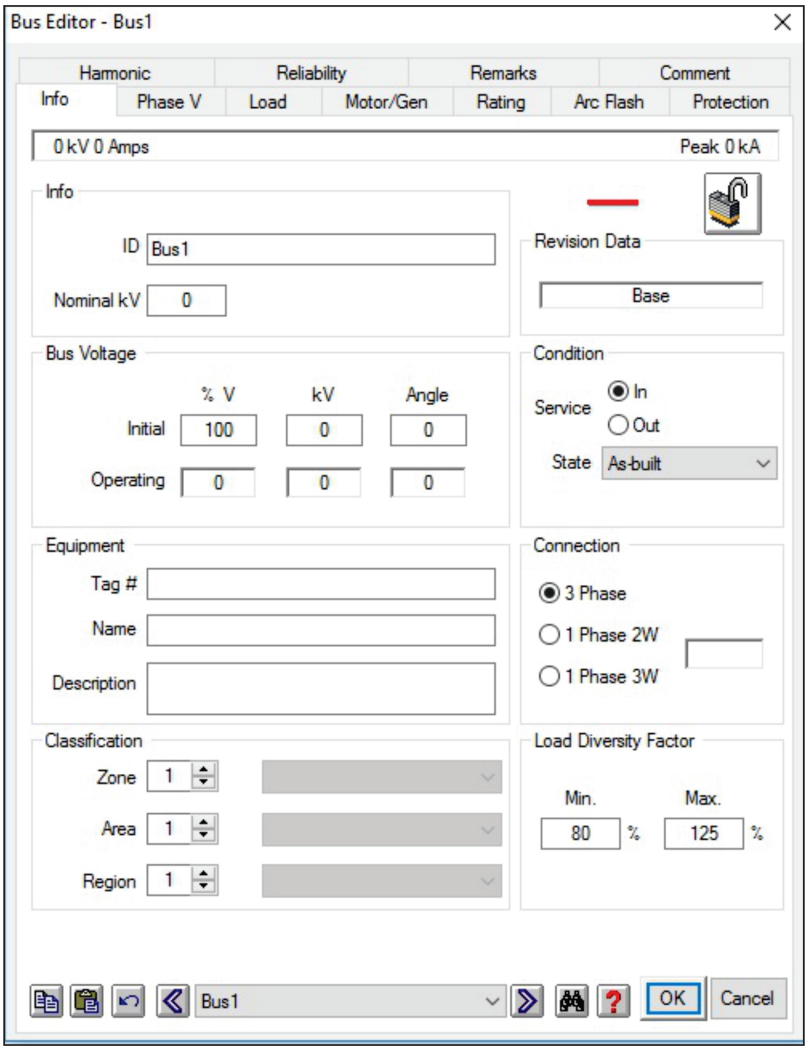


Figura 3.6: Pestaña “Info” elemento “Bus”

- **Transformadores de potencia:** se selecciona el elemento transformador de la barra de elementos, luego se procede a conectar sus terminales a las barras que se desea. De esta manera se establece automáticamente los niveles de tensión del transformador. Luego se ingresa el resto de los datos del equipo en el menú de edición. En la pestaña “Info” (ver Figura 3.7), se ingresa la identificación del dispositivo, las barras a las que está asociado en su lado primario y secundario, se establece su estado (en servicio o fuera de servicio), su conexión (monofásica o trifásica) y el estándar por el cual se regirá su modelado; en este caso IEC.

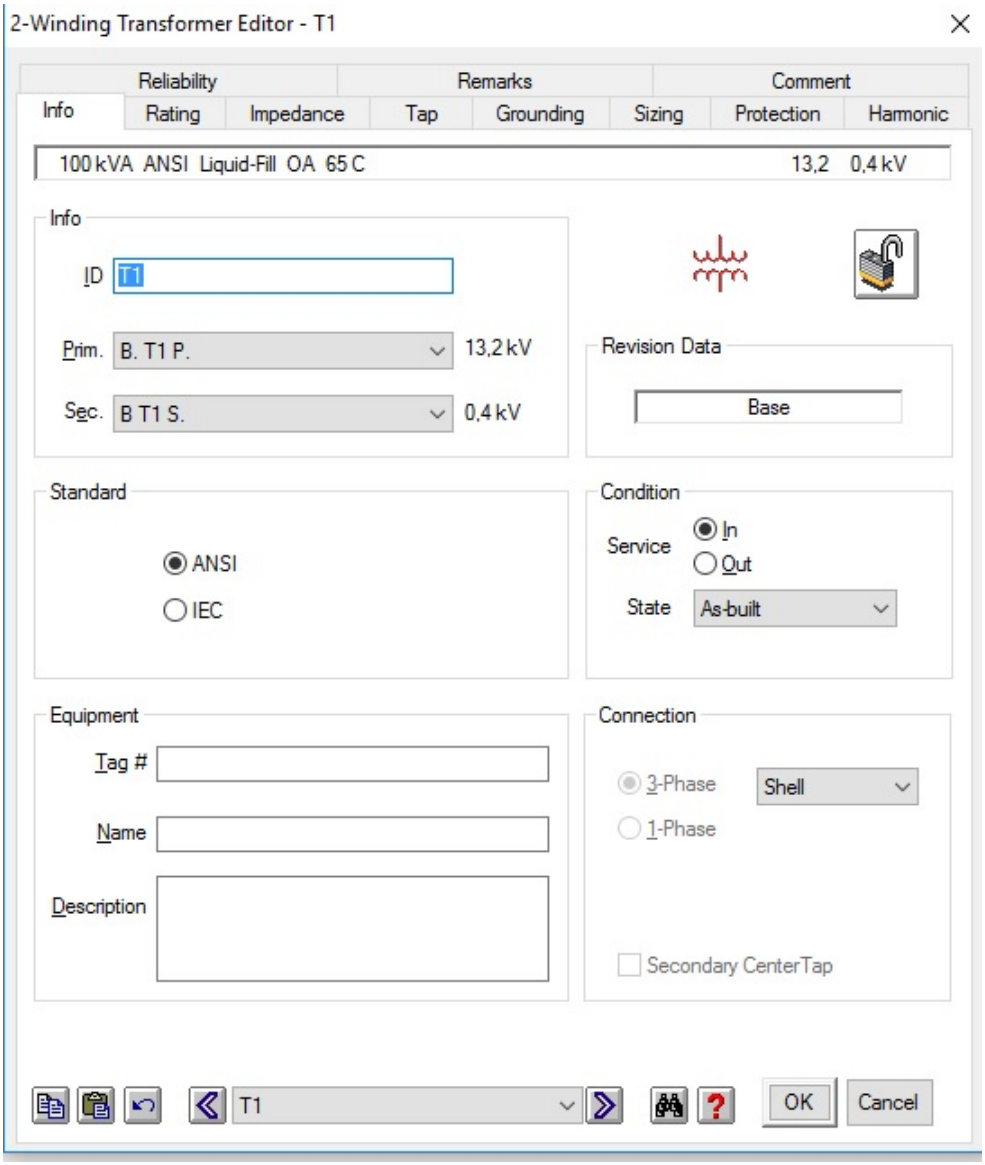


Figura 3.7: Pestaña "Info" de elemento transformador

En la pestaña "Rating" (ver Figura 3.8) se define la potencia nominal del transformador, valores de $\%Z$ (impedancia de cortocircuito en base nominal del transformador) y relación X/R para secuencia positiva y cero. "FLA[3]" es calculado directamente por el programa.

[3]Corriente a plena carga

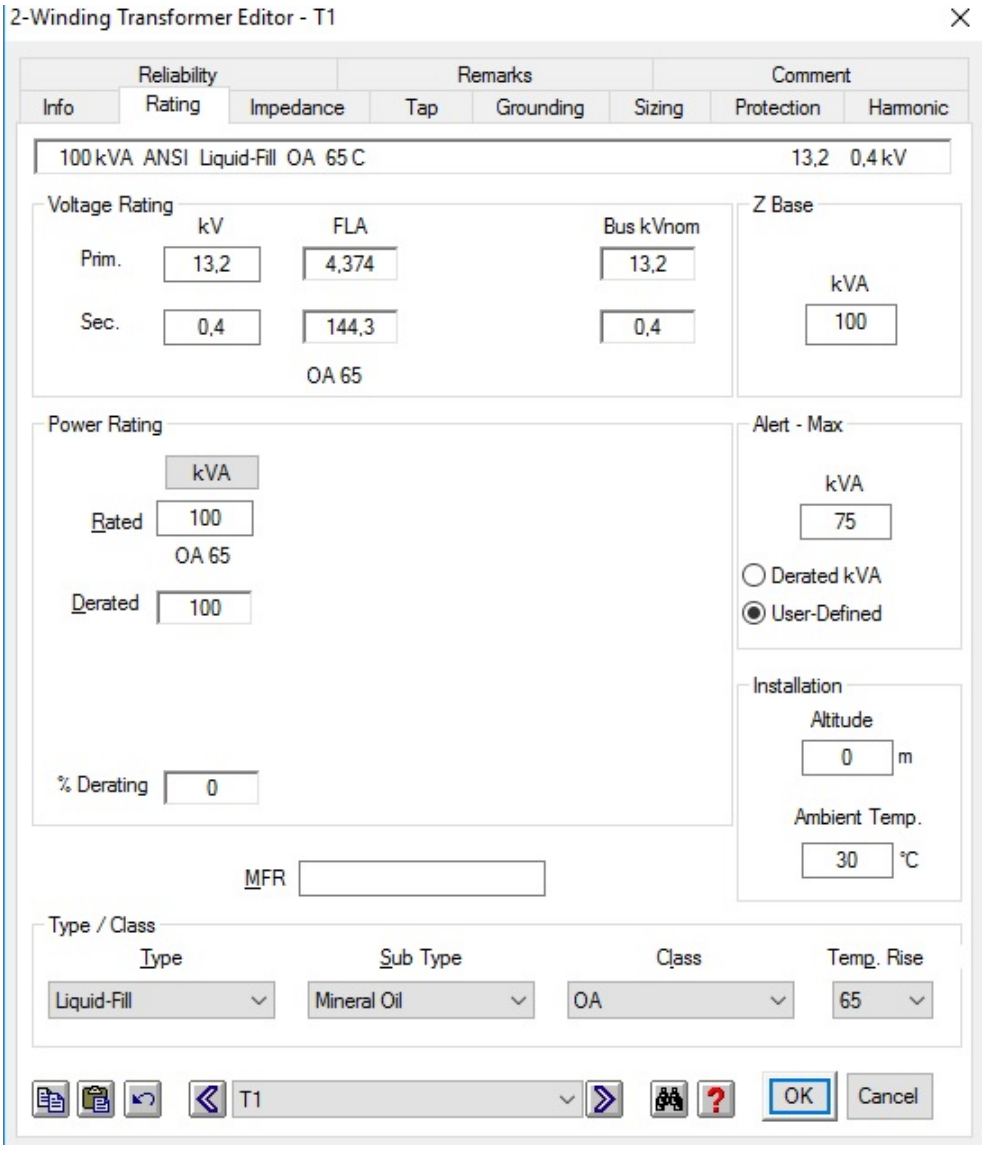


Figura 3.8: Pestaña “Rating” de elemento transformador

En la Figura 3.9 se muestra la pestaña “Grounding” donde se ingresa la conexión de los devanados del transformador, y además se modela la impedancia de la malla de puesta a tierra.

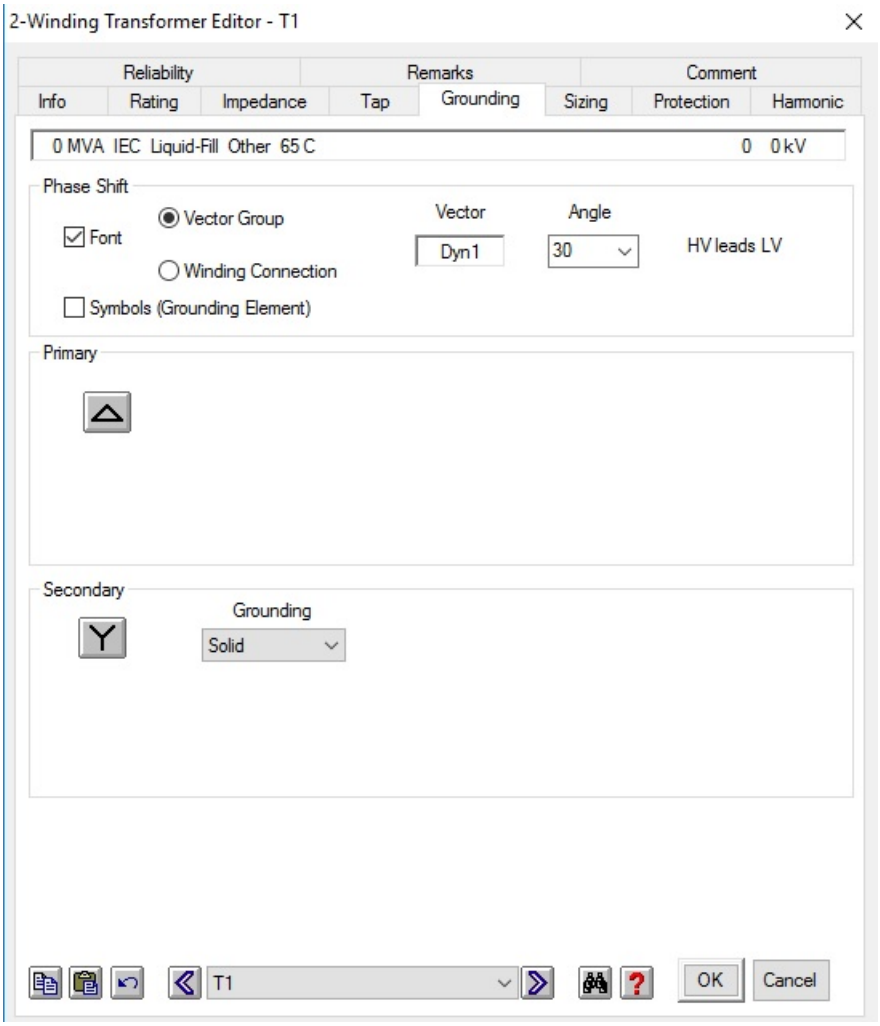


Figura 3.9: Pestaña “Grounding” de elemento transformador

En la Figura 3.10 se observa la pestaña “Protection” donde se define la curva de daño del transformador, y la corriente “Inrush” del transformador.

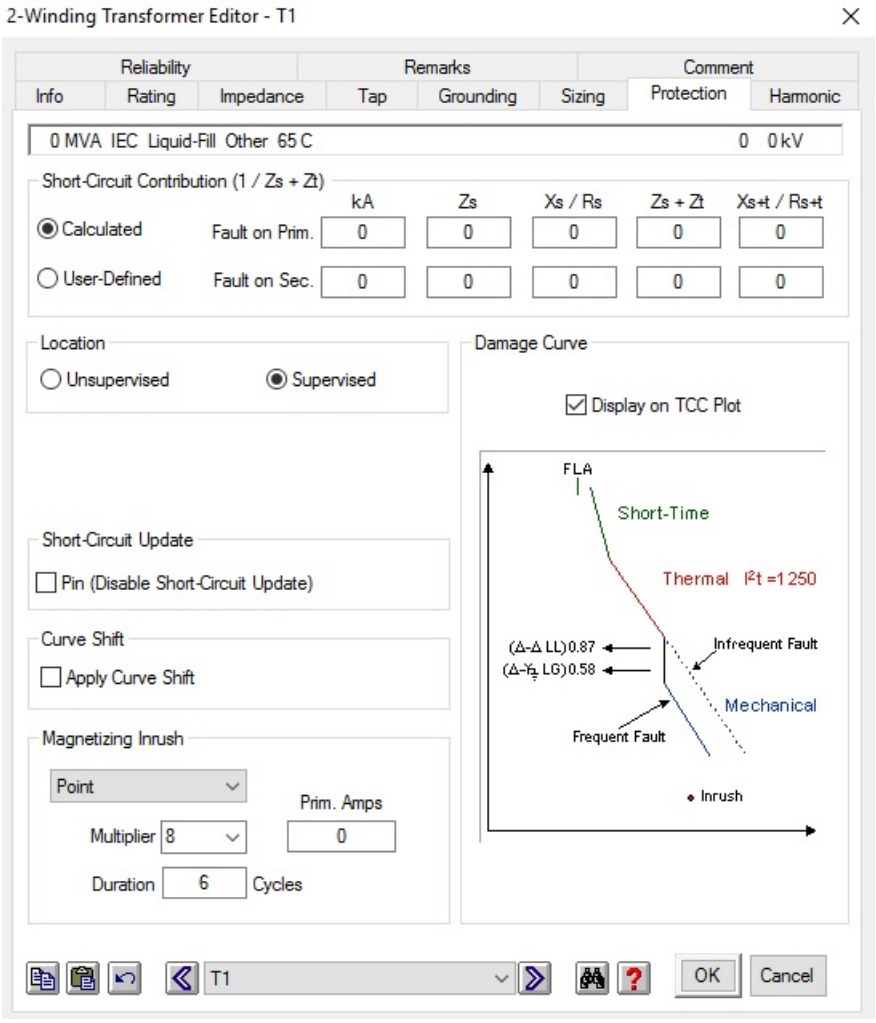


Figura 3.10: Pestaña "Protection" de elemento transformador

En la información ingresada a ETAP se definió la configuración del sistema, ubicación y tamaño de las cargas. El modelamiento de los motores consideró el factor de carga de diseño[4] de cada uno de ellos (ver Tabla B.2del Anexo B). La modelación del SEP de mina Los Colorados se adjunta en disco compacto (carpeta: apéndices/modelación en ETAP).

3.3. Verificación de datos

Antes de hacer estudios más complejos con el modelo es necesario saber si la modelación permite obtener los resultados del flujo de potencia real, en otras palabras se necesita saber si el modelo es fidedigno, ya que su precisión determina la eficacia de las posibles medidas correctivas (cambio de calibre de conductor, cambio de transformador, derivación de cargas a otro alimentador, etc.). Para esto se realizan mediciones de corriente en los alimentadores más importantes de la subestación principal (2A y 3A), los cuales se pueden comparan con el flujo de potencia para esos puntos y se realiza la medición de tensión en las barras más

[4]Factor entregado por Departamento de Potencia

importantes del SEP.

- **Medición de corriente en los alimentadores principales:** en la Figura 3.11 se observan las mediciones del alimentador 2A (diagrama unilineal se observa en la Figura), el cual es el que alimenta a todos los alimentadores del SEP (Figura A.7). En la Figura 3.12 se observan los resultados de la medición del alimentador 3A (diagrama unilineal se observa en la Figura), el cual posee la mayor carga. Cabe mencionar que las mediciones se realizaron cada 10 minutos por un total de 24 horas, pero los resultados se muestran desde las 08:00 hasta las 19:00 horas debido a que es cuando existe la máxima demanda en la mina. Cabe señalar que en ETAP se modela solo un valor (demanda máxima de la mina) dado que es el escenario que se utilizará para realizar los estudios de flujo de carga, análisis de cortocircuito y ajuste de protecciones.

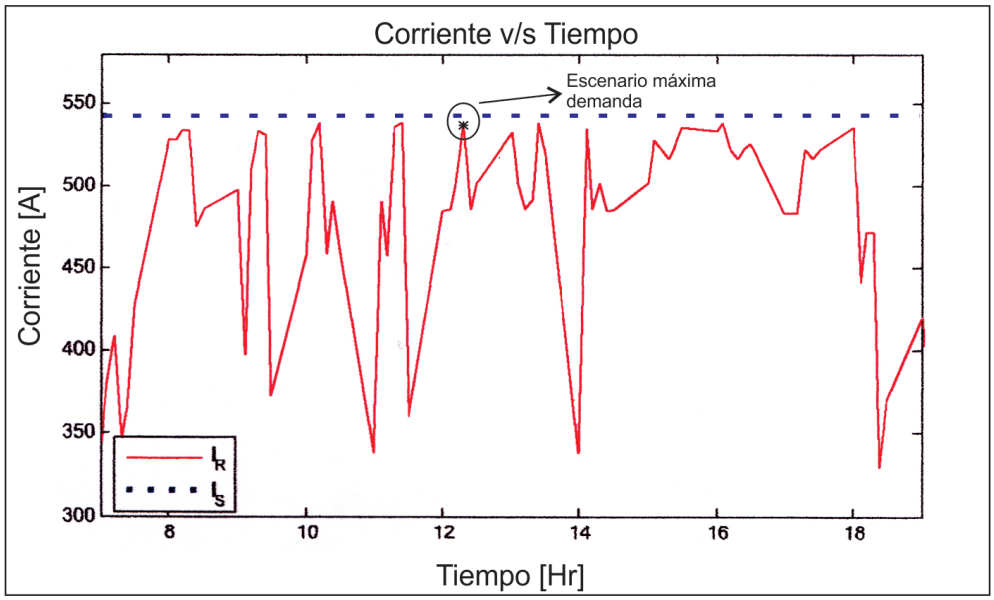


Figura 3.11: Mediciones de corriente S/E principal (2A)

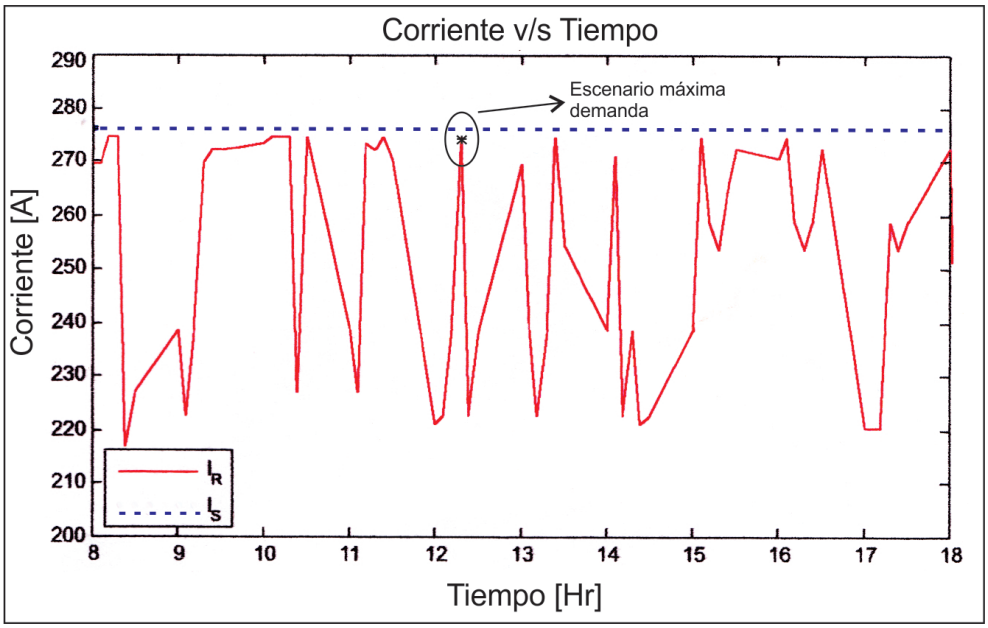


Figura 3.12: Mediciones de corriente alimentador 3A

Los gráficos de la Figura 3.11 y 3.12 entregan como resultado que las mediciones (I_R) en ningún caso superan los valores (I_S) arrojados por ETAP para el escenario de máxima demanda. Existen "Peak" en las mediciones de corriente que son muy similares a los valores simulados.

- **Contrastación de las tensiones en las barras principales:** en la Tabla 3.1 se muestran los valores de tensión (real y simulada) para las barras más importantes del SEP. Se realizaron estas mediciones en el horario de máxima demanda (08:00 a 19:00 horas), y se registraron los menores valores de tensión, ya que estos representan el escenario de máxima demanda.

Tabla 3.1: Tensiones en las barras más importantes del SEP local

Barra	U_S	U_R	Error [%]
Barra 110 kV	0,999	0,994	0,50
Barra 13,2 kV	0,986	0,979	0,72
Celda A.T. 52.8103CB	0,986	0,983	0,31
Lab. Químico	0,98	0,973	0,72
CCM 51-8601 MC	0,967	0,959	0,83
CCM-51-8102	0,975	0,971	0,41
CCM-52-8603 MC	0,961	0,953	0,84
NIVEL 475	0,975	0,962	1,35
Bus 6B	0,986	0,974	1,23

A partir de la Tabla 3.1 se infiere que el mayor error entre la simulación y las mediciones se da en la barra Nivel 475 con un error de $1,35\,\%$.

Dado los resultados de la contrastación (corriente y tensión) se concluye que el modelo es válido para representar el escenario de máxima demanda, se adjunta modelación en

ETAP del sistema en apéndice digital. Es por esto que se pueden utilizar los resultados obtenidos del ETAP para dimensionar los diversos equipos eléctricos, calcular las corrientes de cortocircuito y ajustar las protecciones eléctricas.

CAPÍTULO 4

Estudios con ETAP

Los estudios realizados son: flujo de potencia, estudios de cortocircuito, y ajuste de protecciones de sobrecorriente.

4.1. Flujo de potencia

El flujo de potencia se realiza utilizando el método iterativo de Newton-Raphson (tradicional). A continuación se detallan los resultados de este estudio.

4.1.1. Porcentaje de carga de los transformadores del sistema

En la Tabla 4.1 se observan los porcentajes de carga de los transformadores del SEP, obtenidos para el escenario de máxima demanda (todos los motores funcionando y con su factor de carga nominal). Se observa que el transformador de la S/E principal tiene una capacidad disponible del 28 %. Este resultado es importante, ya que permite realizar expansiones futuras sin tener que cambiar este equipo por uno de mayor capacidad. En lo que respecta a los transformadores de 13,2/4,16 [kV], todos tienen disponibilidad de capacidad de potencia por sobre el 20 %; siendo un excelente resultado, ya que la política de la empresa es cambiar los motores de 0,4 [kV] a motor de 4,16 [kV]. En los transformadores de 13,2/0,38 [kV] existe un solo caso crítico, el transformador 8104XF el cual se encuentra cargado a un 94,8 % de su capacidad, por lo que se recomienda no instalar cargas futuras aguas abajo de este transformador.

Tabla 4.1: Porcentaje de carga de los transformadores

Transformador	Carga [%]
51-8101XF	60,1
S/E Derivación	18,9
S/E Principal	72
S/E Producción	12,1
S/E Rechazos 1	43,4
S/E Rechazos 2	12,1
S/E Unitaria 51-8102	31,8
T1	54,3
T4	73,2
T 6A	64,2
T 51-8602	61,1
T 59-8210	25,3
T 2501M1	65,8
T 2501M2	65,8
T 8104XF	94,8
T 8105XF	38,7
T 8106XF	50,9
T Carguio	59,9
T Nivel 475	35,6

4.1.2. Perfil de tensión

En la Tabla 4.2 se muestran las tensiones en todas las barras del sistema para el escenario de máxima demanda (factor de carga de diseño y todos los motores funcionando normalmente). Se observa que los valores de tensión en todas las barras se mantienen dentro del rango aceptable (±7 %) cumpliendo con la NTSyCS.

Tabla 4.2: Tensiones en las barras del SEP (máxima demanda)

Barra	U_S [pu]	Barra	U_S [pu]	Barra	U_S [pu]
51-8101	0,986	51-2401.2	0,967	8603 Sec.	0,961
51-8102	0,986	235	0,972	Banco Capac. 5A	0,986
51-8102 Sec.	0,975	258	0,982	Banco Capac. 5B	0,986
51-8602	0,971	810X	0,985	Banco Capac. 6A	0,973
8101 pri.	0,986	2402M1	0,96	Banco Capac. Prim	0,986
B. 2411	0,984	2501M1	0,989	Banco Capac. Sec	0,98
B. 2412	0,984	2501M2	0,989	Carguio S	0,968
Barra 110 kV	0,999	2701M1	0,975	CCM-51-8102.2	0,975
Barra Princ.	0,986	2701M2	0,975	Nivel 475 Prim.	0,982
Pta. Toro	1	2702M	0,96	Nivel 475 Sec.	0,97
1 A.2	0,986	2706M	0,96	Producción	0,98
1B	0,986	2708M	0,96	Pta Rechazos	0,97
1B.2	0,986	2709M	0,959	S/E Bodega	0,974
2	0,985	2718M	0,96	CCM 51-8601MC	0,967
2.1	0,985	2740M	0,96	CCM-51-8102	0,975
3B	0,986	2741M1	0,96	CCM-52-8603MC	0,961
3B.1	0,986	8101 Sec.	0,968	Celda A.T.	
3B.2	0,981	8103CB.2	0,985	52-8103CB	0,986
4A.2	0,986	8105XF Prim.	0,994	Lab. Quimico	0,98
6B	0,986	8105XF Sec.	0,986	Nivel 475	0,975
11	0,984	8106XF Prim.	0,985	S/E N°2	0,984
13	0,986	8106XF Sec.	0,994	S/E N°3	0,985
24XX	0,984	8110 P.	0,986	S/E Rechazos 2 P.	0,986
512401	0,967	8603 Prim.	0,985	S/E Rechazos 2 Sec.	0,981

Los valores que se muestran en la Tabla 4.2 son valores simultanéos para el escenario de máxima demanda de la faena.

4.2. Corrientes de cortocircuito

Este estudio se realiza con la finalidad de determinar los valores de las corrientes de cortocircuito en todas las barras del SEP. Las corrientes calculadas se utilizán para verificar la capacidad de los interruptores de potencia (AT y MT), y además para la realización del ajuste y coordinación de protecciones. Primero que todo se calcula el aporte que realiza el SIC a los cortocircuitos, para esto se utiliza la modelación en DigSilent; publicado en página del CDEC-SIC [5]. Se realizan cortocircuitos trifásico y monofásico en la barra del tap-off Punta de Toro (110 kV.); escenarios de alta y baja demanda. A continuación en la Tabla 4.3 se observan las corrientes de cortocircuito calculadas con el modelo DigSilent.

Tabla 4.3: Corrientes de cortocircuito "tap-off" Punta de Toro

Tipo de Cortocircuito	Alta Dda. $I''_{K\ máx}$ [kA]	Baja Dda. $I''_{K\ mín}$ [kA]	X/R
3ϕ	3,247	3,073	2,31
$1\phi - t$	2,628	2,528	4,31

En la Tabla 4.4 se presentan los valores de resistencia e impedancia -secuencia positica, negativa y cero- del sistema equivalente en la barra de Punta de Toro.

Tabla 4.4: Impedancias de cortocircuito barra Punta de Toro

	Alta Dda.		Baja Dda.	
Secuencia	R Ω	X Ω	R Ω	X Ω
Positiva	13,459	31,089	14,221	32,85
Negativa	13,459	31,089	14,221	32,85
Cero	13,183	56,817	13,442	57,937

Para las corrientes mínimas de cortocircuito se considera una impedancia de falla a tierra (Z_F) igual a 15 [Ω][5].

4.2.1. Capacidad interruptiva de los interruptores

En este estudio se compara la capacidad de interrupción (I_{sc}) y la capacidad de soportar cortocircuitos ($I^*_{p\ máx}$) de cada interruptor con las corrientes de cortocircuito $I_{b\ máx}$ e $i_{p\ máx}$ respectivamente. En la Tabla 4.5 se muestran estas variables, como además la falla que genera los mayores valores de corriente de cortocircuito. De esta Tabla se infiere que en ninguno de los interruptores se sobrepasan sus capacidades de cortocircuito. En general las corrientes de cortocircuito no superan el 40 % de las capacidades de los interruptores (salvo el caso del interruptor CB 2501M1-2 en color rojo, el cual se encuentra correctamente dimensionado).

[5]Valor establecido por el Departamento de Potencia de Mina Los Colorados.

Tabla 4.5: Capacidad interruptiva interruptores (falla 3ϕ)

Interruptor	I_{sc} [kA]	I_b [kA]	$\frac{I_b}{I_{sc}} \cdot 100$ [%]	I_p^* [kA]	i_p [kA]	$\frac{i_p}{I_p^*} \cdot 100$ [%]	Barra
CB Punta Toro	40	3,25	8	85	8,775	10	Pta. Toro
CB 2A pri.	31,5	3,01	10	85	8,127	10	110 kV.
CB 2A sec.	63	6,43	10	286,8	17,361	6	Principal
CB 5B	63	6,43	10	286,8	17,361	6	5B.2
CB 5A	63	6,43	10	286,8	17,361	6	5A.2
CB 1B	63	6,43	10	286,8	17,361	6	1B.2
CB 1A	63	6,43	10	286,8	17,361	6	1A.2
CB 3A	63	6,43	10	286,8	17,361	6	3A.2
CB 3B	63	6,43	10	286,8	17,361	6	3B.2
CB 4A	63	6,43	10	286,8	17,361	6	4A.2
CB 6A	37	6,43	17	129,6	17,361	13	6A.2
CB 6B	37	6,43	17	129,6	17,361	13	6B.2
CB Nivel 475	31,5	3,12	10	80	8,424	11	Nivel 475 sec.
CB 51-8101 prim.	20	7,8	39	80	21,06	26	8101 pri.
CB 51-8101 sec.	31,5	4,25	13	80	11,475	14	8101 sec.
CB 51-8102	31,5	7,8	25	80	21,06	26	51-8102
CB 2501M1-2	12,5	8,22	66	31,5	22,194	70	2501XF pri.
CB 8104XF AT	31,5	6,64	21	80	17,928	22	8603 pri.
CB 8104XF BT	16	5,997	37	161	16,192	10	8603 sec.
CB 8105 AT	31,5	7,69	24	80	20,763	26	8105XF pri.
CB 8106 AT	31,5	7,53	24	80	20,331	25	8106XF pri.

La norma IEC 62271-100 [6] menciona de los interruptores que si la componente de corriente continua no excede el 20 [%] de la componente alterna, la corriente de interrupción nominal del interruptor es caracterizada por el valor r.m.s de la componente de corriente alterna. El cual es el caso de los interruptores del SEP local, esto quiere decir que en la placa de los interruptores está especificada la corriente de cortocircuito de interrupción nominal del interruptor (I_{sc}), la cual incorpora la componente continua. Por ende este valor anterior debe ser comparado con la corriente de cortocircuito asimétrica de interrupción (I_{bAsy}), entregada por ETAP. En la Tabla 4.6 se comparan estos valores donde se muestra que en ninguno de los casos se sobrepasa su capacidad de interrupción.

Tabla 4.6: Capacidad interruptiva asimétrica interruptores

Interruptor	I_{sc} [kA]	I_{bAsy} [kA]	$\frac{I_{bAsy}}{I_{sc}} \cdot 100[\%]$
CB Punta Toro	40	4,6	12
CB 2A pri.	31,5	4,26	14
CB 2A sec.	63	9,09	14
CB 5B	63	9,09	14
CB 5A	63	9,09	14
CB 1B	63	9,09	14
CB 1A	63	9,09	14
CB 3A	63	9,09	14
CB 3B	63	9,09	14
CB 4A	63	9,09	14
CB 6A	37	9,09	25
CB 6B	37	9,09	25
CB Nivel 475	31,5	4,41	14
CB 51-8101 prim.	20	11,03	55
CB 51-8101 sec.	31,5	6,01	19
CB 51-8102	31,5	11,03	35
CB 2501M1-2	12,5	11,62	93
CB 8104XF AT	31,5	9,39	30
CB 8104XF BT	16	8,48	53
CB 8105 AT	31,5	10,88	35
CB 8106 AT	31,5	10,65	34

4.3. Ajuste y coordinación de protecciones

En esta sección se realiza el ajuste de protecciones de sobrecorriente de todos los alimentadores del SEP. A continuación se describen las consideraciones para realizar el ajuste.

- La función 51N solo se activará cuando 51F no detecte la falla mínima del sector [6].
- En las funciones 51F se consideran las curvas de ajuste extremadamente inversa (EI).
- Cuando las protección de cortocircuito de un motor se realice mediante un fusible, se utilizarán del tipo R marca Gould Shawmut, dado que existen como item de stock en bodega de Mina Los Colorados.
- La impedancia de falla a tierra se considera igual a 15 Ω para las corrientes de cortocircuito mínimo.

4.3.1. Alimentador 3A

El diagrama unilineal de este alimentador se observa en la Figura A.9, Anexo A. A continuación se presentán cada uno de los ajustes de las protecciones de este alimentador.

[6] Criterio Departamento de Potencia Los Colorados.

- **CCM-52-8603MC**
  Este sector está compuesto por ocho motores de 4,16 [kV]. La protección de cada uno de ellos se realiza mediante un fusible tipo R (protección contra cortocircuitos) y un relé de sobrecarga[7], el cual acciona un contactor (protección contra sobrecarga). El diagrama unilineal de este sector se observa en la Figura 4.1.

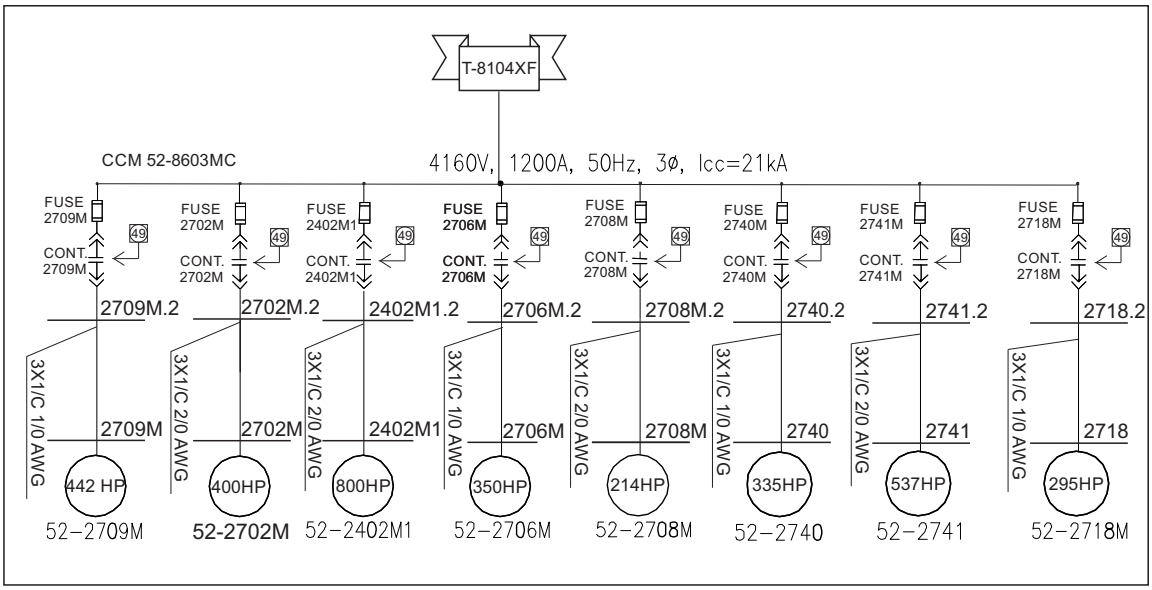


Figura 4.1: Diagrama unilineal del CCM-52-8603MC

- **Motor 2709M**
  En la Tabla 4.7 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del motor.

Tabla 4.7: Corrientes motor 2709M

Corriente	Magnitud [A]
I_n	53,42
I_{rb}	320,52

  - **Ajuste de fusible tipo *R***
    En la ecuación (4.1) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R del fusible.

$$n = \frac{320,23}{100} = 3,20 \rightarrow 4 \tag{4.1}$$

  - **Ajuste de protección de sobrecarga**
    En la ecuación (4.2) se calcula la corriente "pick-up"del relé de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 53,42 = 56,091\ [A] \tag{4.2}$$

    La curva seleccionada es la N°5.

  En la Figura 4.2 se observa el ajuste de protecciones para el motor, permitiendo que el motor arranque sin problemas y a la vez esté protegido de sobrecargas

[7]GE Multilin 269

y cortocircuitos. Además se protege el conductor que alimenta al motor, dado que su curva de daño queda detrás de las curvas de ajuste del relé y el fusible.

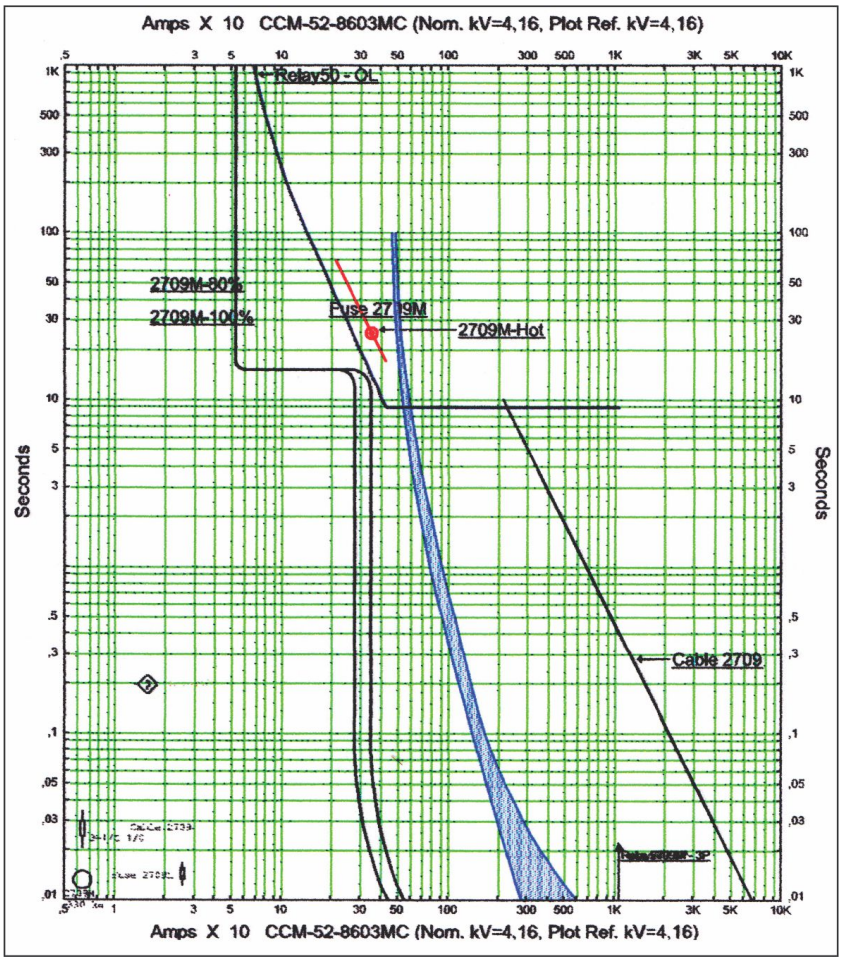


Figura 4.2: Motor 2709M

- **Motor 2702M**
  En la Tabla 4.8 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del motor.

Tabla 4.8: Corrientes motor 2702M

Corriente	Magnitud [A]
I_n	43,88
I_{rb}	263,28

  - **Ajuste de fusible tipo *R***
    En la ecuación (4.3) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R del fusible.

$$n = \frac{263,28}{100} = 2,63 \rightarrow 3 \tag{4.3}$$

  - **Ajuste de protección de sobrecarga**

En la ecuación (4.4) se calcula la corriente “pick-up"del relé de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 43,88 = 46,074\ [A] \tag{4.4}$$

La curva seleccionada es la N°5.

En la Figura 4.3 se observa el ajuste de protecciones para el motor, permitiendo que el motor arranque sin problemas y a la vez esté protegido de sobrecargas y cortocircuitos. Además se protege el conductor que alimenta al motor, dado que su curva de daño queda detrás de las curvas de ajuste del relé y el fusible.

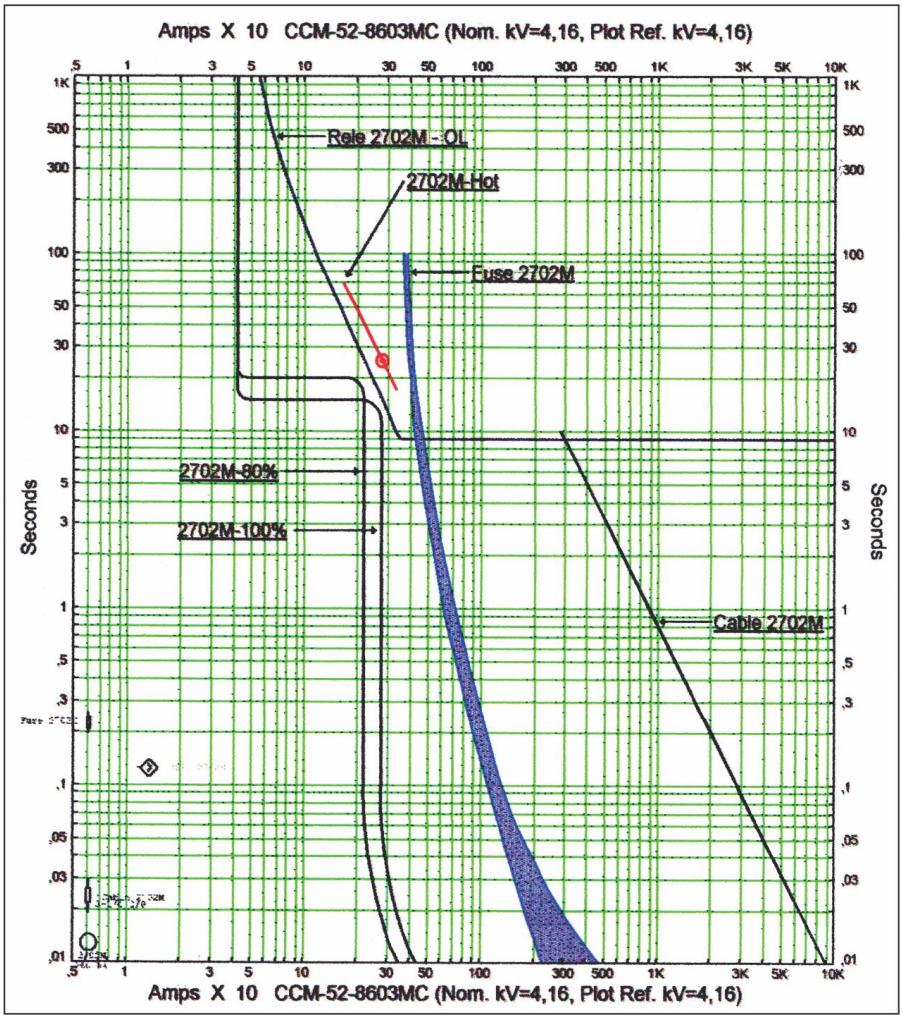


Figura 4.3: Motor 2702M

- **Motor 2402M1**
  En la Tabla 4.9 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del motor.

Tabla 4.9: Corrientes motor 2402M1

Corriente	Magnitud [A]
I_n	97,09
I_{rb}	582,54

- **Ajuste de fusible tipo *R***
  En la ecuación (4.5) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R del fusible.

$$n = \frac{582,54}{100} = 5,825 \rightarrow 6 \tag{4.5}$$

- **Ajuste de protección de sobrecarga**
  En la ecuación (4.6) se calcula la corriente "pick-up"del relé de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 97,09 = 101,945\ [A] \tag{4.6}$$

  La curva seleccionada es la N°5.

En la Figura 4.4 se observa el ajuste de protecciones para el motor, permitiendo que el motor arranque sin problemas y a la vez esté protegido de sobrecargas y cortocircuitos. Además se protege el conductor que alimenta al motor, dado que su curva de daño queda detrás de las curvas de ajuste del relé y el fusible.

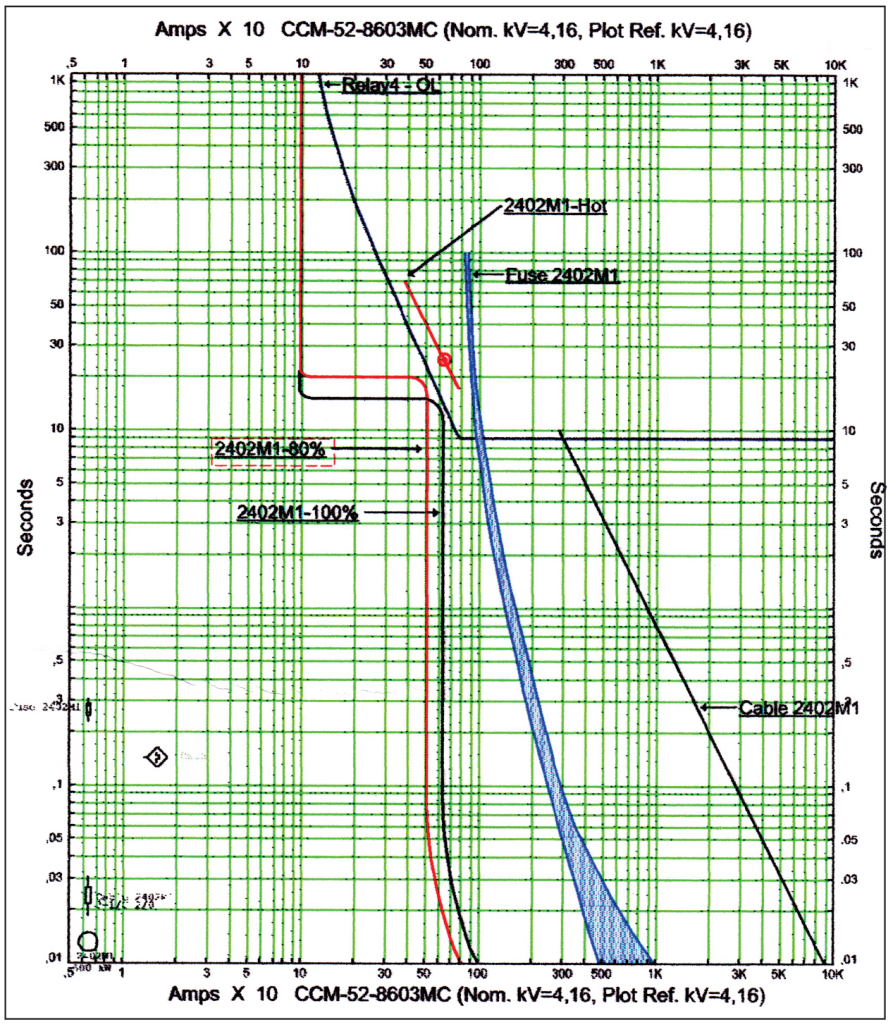


Figura 4.4: Motor 2402M1

- **Motor 2706M**
  En la Tabla 4.10 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del motor.

Tabla 4.10: Corrientes motor 2706M

Corriente	Magnitud [A]
I_n	42,19
I_{rb}	244,702

- **Ajuste de fusible tipo *R***
  En la ecuación (4.7) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R del fusible.
  $$n = \frac{244,702}{100} = 2,447 \rightarrow 3 \tag{4.7}$$
- **Ajuste de protección de sobrecarga**
  En la ecuación (4.8) se calcula la corriente “pick-up"del relé de sobrecarga.
  $$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 42,19 = 44,30\ [A] \tag{4.8}$$
  La curva seleccionada es la N°5.

En la Figura 4.5 se observa el ajuste de protecciones para el motor, permitiendo que el motor arranque sin problemas y a la vez esté protegido de sobrecargas y cortocircuitos. Además se protege el conductor que alimenta al motor, dado que su curva de daño queda detrás de las curvas de ajuste del relé y el fusible.

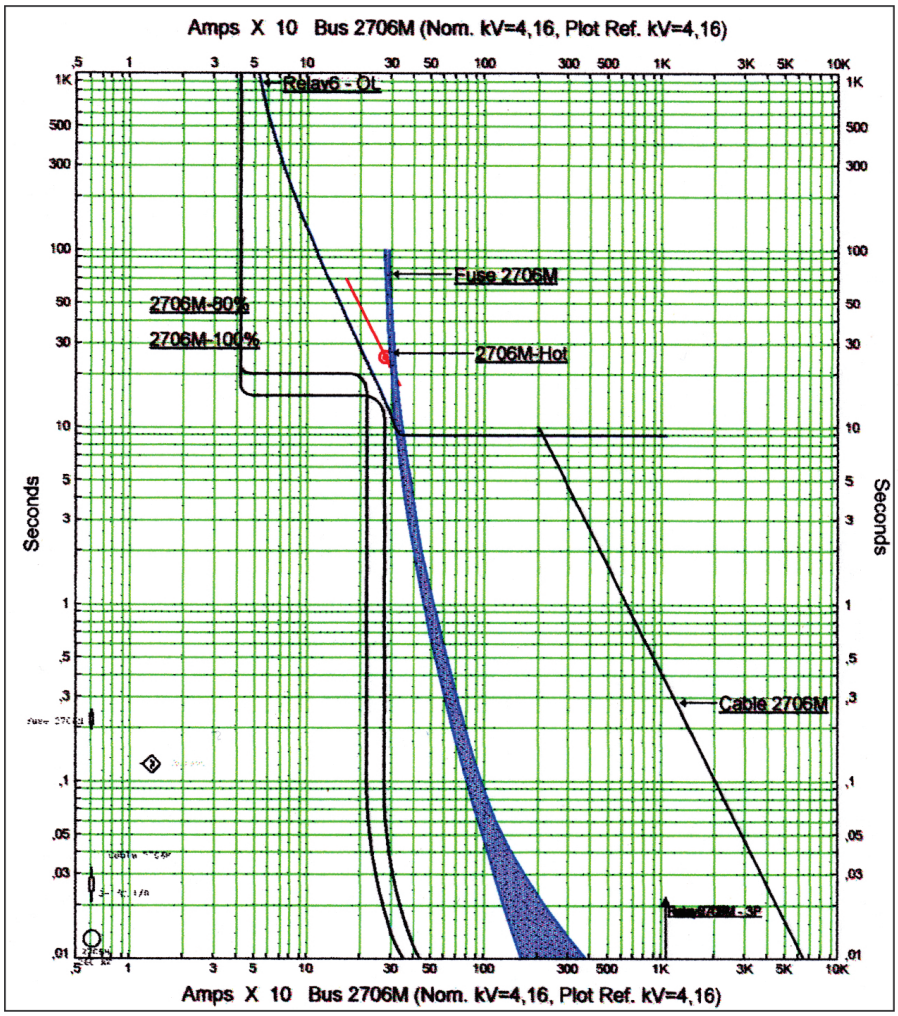


Figura 4.5: Motor 2706M

- **Motor 2708M**
  En la Tabla 4.11 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del motor.

Tabla 4.11: Corrientes motor 2708M

Corriente	Magnitud [A]
I_n	27,20
I_{rb}	171,36

  - **Ajuste de fusible tipo *R***
    En la ecuación (4.9) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R del fusible.

$$n = \frac{171,36}{100} = 1,713 \rightarrow 2 \tag{4.9}$$

  - **Ajuste de protección de sobrecarga**
    En la ecuación (4.10) se calcula la corriente “pick-up"del relé de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 27,20 = 28,56\ [A] \tag{4.10}$$

La curva seleccionada es la N°5.

En la Figura 4.6 se observa el ajuste de protecciones para el motor, permitiendo que el motor arranque sin problemas y a la vez esté protegido de sobrecargas y cortocircuitos. Además se protege el conductor que alimenta al motor, dado que su curva de daño queda detrás de las curvas de ajuste del relé y el fusible.

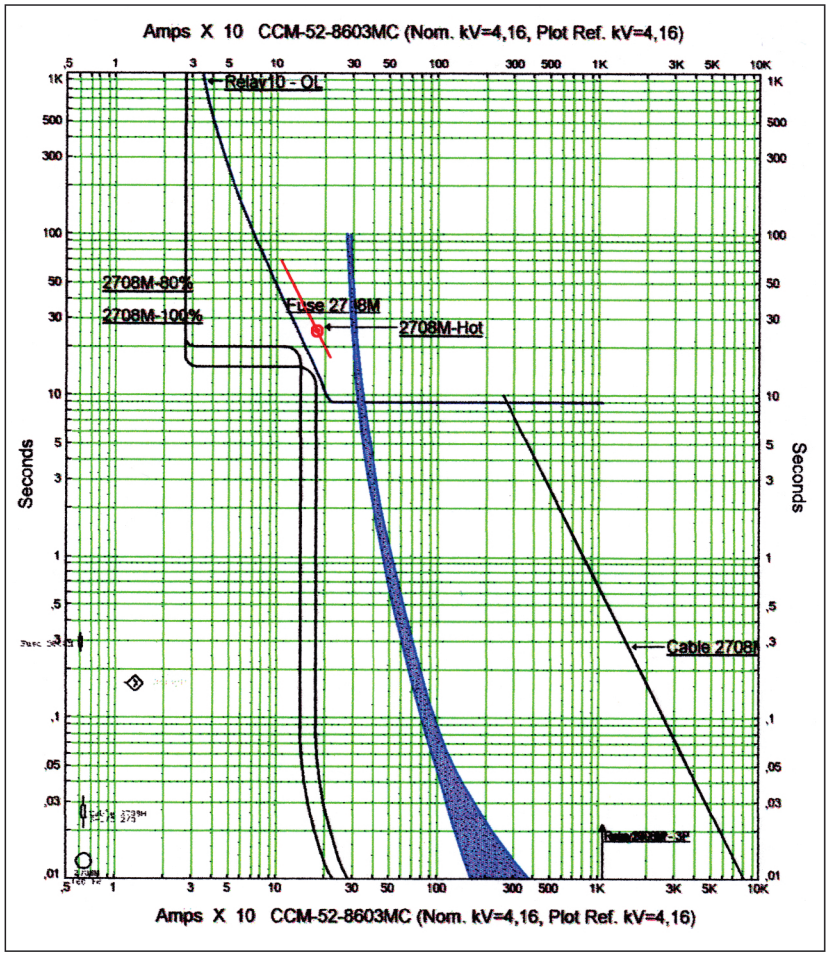


Figura 4.6: Motor 2708M

- **Motor 2740M**
  En la Tabla 4.12 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del motor.

Tabla 4.12: Corrientes motor 2740M

Corriente	Magnitud [A]
I_n	42,4
I_{rb}	254,4

- **Ajuste de fusible tipo *R***
  En la ecuación (4.11) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R del fusible.

$$n = \frac{254,4}{100} = 2,54 \rightarrow 3 \tag{4.11}$$

- **Ajuste de protección de sobrecarga**
  En la ecuación (4.12) se calcula la corriente "pick-up"del relé de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 42,4 = 44,52\ [A] \tag{4.12}$$

  La curva seleccionada es la N°5.

En la Figura 4.7 se observa el ajuste de protecciones para el motor, permitiendo que el motor arranque sin problemas y a la vez esté protegido de sobrecargas y cortocircuitos. Además se protege el conductor que alimenta al motor, dado que su curva de daño queda detrás de las curvas de ajuste del relé y el fusible.

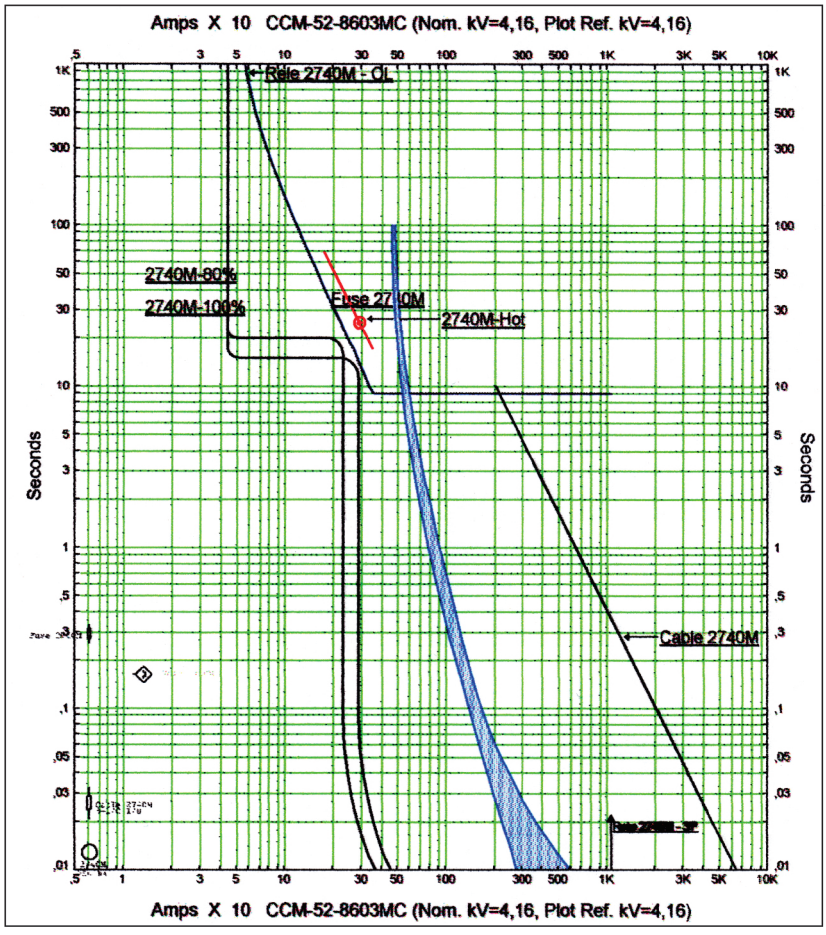


Figura 4.7: Motor 2740M

- **Motor 2741M**
  En la Tabla 4.13 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del motor.

Tabla 4.13: Corrientes motor 2741M

Corriente	Magnitud [A]
I_n	70,03
I_{rb}	420,18

- **Ajuste de fusible tipo *R***
  En la ecuación (4.13) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R del fusible.
  $$n = \frac{420,18}{100} = 4,201 \rightarrow 5 \tag{4.13}$$
- **Ajuste de protección de sobrecarga**
  En la ecuación (4.14) se calcula la corriente “pick-up"del relé de sobrecarga.
  $$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 70,03 = 73,532\ [A] \tag{4.14}$$
  La curva seleccionada es la N°5.

En la Figura 4.8 se observa el ajuste de protecciones para el motor, permitiendo que el motor arranque sin problemas y a la vez esté protegido de sobrecargas y cortocircuitos. Además se protege el conductor que alimenta al motor, dado que su curva de daño queda detrás de las curvas de ajuste del relé y el fusible.

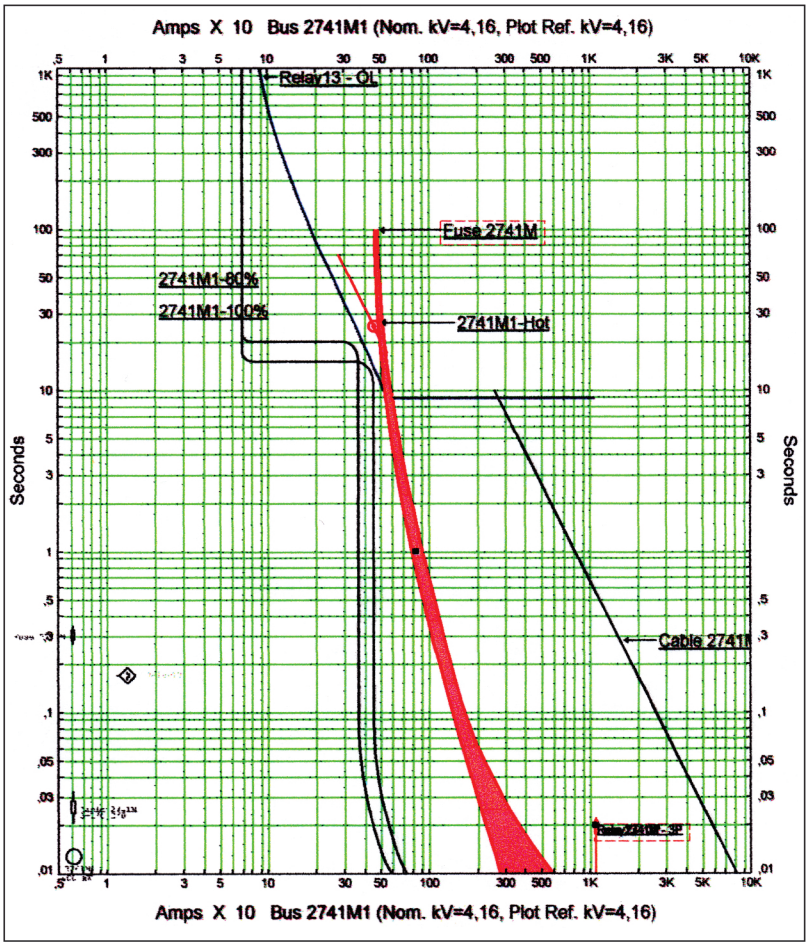


Figura 4.8: Motor 2741M

- **Motor 2718**
  En la Tabla 4.14 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del motor.

Tabla 4.14: Corrientes motor 2718

Corriente	Magnitud [A]
I_n	35,7
I_{rb}	221,34

  - **Ajuste de fusible tipo *R***
    En la ecuación (4.15) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R del fusible.

$$n = \frac{221,34}{100} = 2,21 \rightarrow 3 \tag{4.15}$$

  - **Ajuste de protección de sobrecarga**
    En la ecuación (4.16) se calcula la corriente "pick-up"del relé de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 35,7 = 37,485\ [A] \tag{4.16}$$

La curva seleccionada es la N°5.

En la Figura 4.9 se observa el ajuste de protecciones para el motor, permitiendo que el motor arranque sin problemas y a la vez esté protegido de sobrecargas y cortocircuitos. Además se protege el conductor que alimenta al motor, dado que su curva de daño queda detrás de las curvas de ajuste del relé y el fusible.

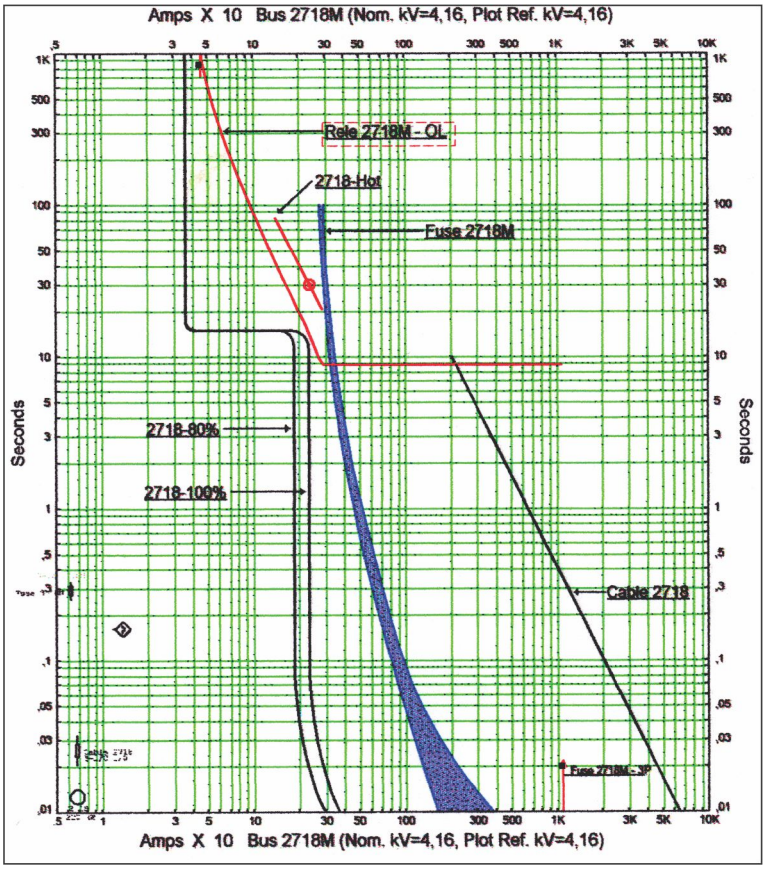


Figura 4.9: Motor 2718M

- **Transformador 8104XF**
  Las protecciones eléctricas del transformador 8104XF consisten en sendos relés de sobrecorriente (Schneider Power Logic), para el primario y el secundario, los cuales rigen la operación de sus respectivos interruptores. Las protecciones descritas se observan en la Figura 4.10.

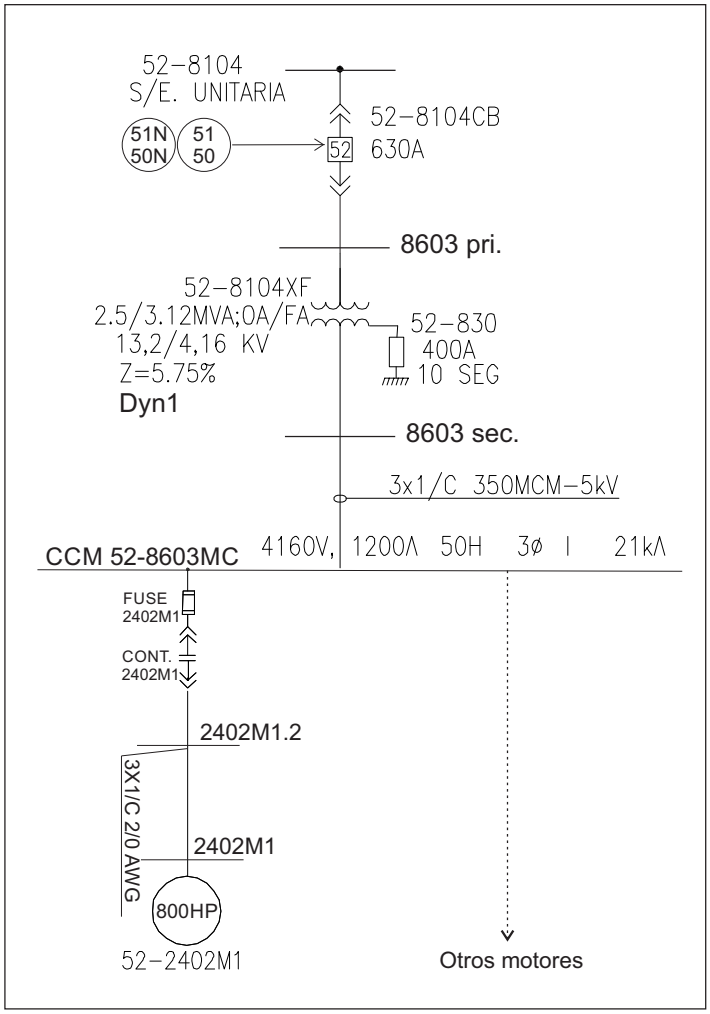


Figura 4.10: Protecciones eléctricas transformador 8104XF

- **Secundario**
  Los relés de protección del secundario del transformador deben coordinarse con el fusible del motor 2402M1 (dado que es la protección más lenta aguas abajo). Las corrientes de interés para este ajuste se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15: Corrientes para el ajuste de protección del secundario del transformador 8104XF

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de falla
$I_{f_{máx\ fase}}$	CCM-52-8603MC	6,54	$1\phi - t$
$I_{f_{máx\ fase}}$	2402M1.2	8,45	$1\phi - t$
$I_{f_{mín\ fase\ 1}}$	2402M1	0,159	$1\phi - t$
$I_{f_{mín\ fase\ 2}}$	2402M1	4,24	$2\phi - t$
$I_{f_{máx\ residual}}$	8603 Sec.	7,99	$2\phi - t$
$I_{f_{mín\ residual\ 1}}$	2402M1	0,027	$2\phi - t$
$I_{f_{mín\ residual\ 2}}$	2402M1	0,053	$1\phi - t$

Las relaciones de transformación de los transformadores de corriente de fase y residual son 500/5 y 200/5 respectivamente.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** el ajuste de esta protección se realiza utilizando el procedimiento descrito en el Anexo D, Sección D.1. La corriente “pick-up"se selecciona de tal manera que el relé respalde correctamente a las protecciones aguas abajo, y proteja en todo momento al conductor asociado. Por estos motivos se selecciona una corriente “pick-up"de 650 [A] referidos al primario del transformador de corriente asociado. En la ecuación (4.17) se muestra el cálculo de la corriente “pick-up"del relé referida al secundario del transformador de corriente.

$$I_{pick-up\ 51F} = 650 \cdot \frac{5}{500} = 6,5\ [As] \tag{4.17}$$

Este relé debe proporcionar respaldo al fusible que protege al motor 2402M1 por ende debe ser sensible a la falla mínima que ocurre en la barra de este motor (0,159 [kA] para falla $1\phi - t$ con $Z_f = 15\ [\Omega]$). En la ecuación (4.22) se muestra el cálculo de N.

$$N = \frac{159 \cdot \frac{5}{500}}{6,5} = 0,245 < 1,5 \tag{4.18}$$

Debido a N es menor a 1,5, el relé no es sensible para la falla monofásica mínima en la barra 2402M1 (debido a que la impedancia de falla de 15 [Ω] lo cual afecta drásticamente a la corriente monofásica)[8]. Por lo que debe ser a la siguiente corriente de cortocircuito mínima (en este caso falla $2\phi - t$ la cual tiene un valor de 4,2 [kA]). El calculo de N para este valor se observa en la ecuación (4.23).

$$N = \frac{4200 \cdot \frac{5}{500}}{6,5} = 6,461 > 1,5 \tag{4.19}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El “lever"del relé se selecciona de tal manera

[8] El 51N entregará respaldo para esta falla

que el tiempo mínimo de operación de la unidad de sobrecorriente sea como mínimo 1,33 veces mayor que el tiempo máximo de aclaramiento del fusible para la falla máxima en la barra 2402M1.2 (8,45 [kA] visto por el fusible y 6,54 [kA] visto por el relé para falla $1\phi - t$). El tiempo máximo de fusión del fusible para este nivel de corriente es de 0,0104 [s]. El mínimo tiempo de operación del relé se calcula en la ecuación (4.20)

$$t_{op\,51} = 1,33 \cdot 0,0104 = 0,014\ [s] \tag{4.20}$$

El “lever"que cumple con el tiempo de la ecuación (4.20) es de 0,07.

◇ **Sobrecorriente instantáneo (50F):** para el cálculo de la corriente “pick-up"se debe considerar las corrientes máxima de cortocircuito (ver Tabla 4.16) en las barras que delimitan el sector que debe proteger.

Tabla 4.16: Corrientes para ajuste de 50F 8603 sec.

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx}$	8603 sec.	6,72	$1\phi - t$
$I_{f\ máx}$	CCM 52-8603MC	6,54	3ϕ

Dada la pequeña diferencia entre las corrientes calculadas en la Tabla 4.16 se desactiva esta función.
En la Figura 4.11 se observa el ajuste de las protecciones de sobrecorriente de fase.

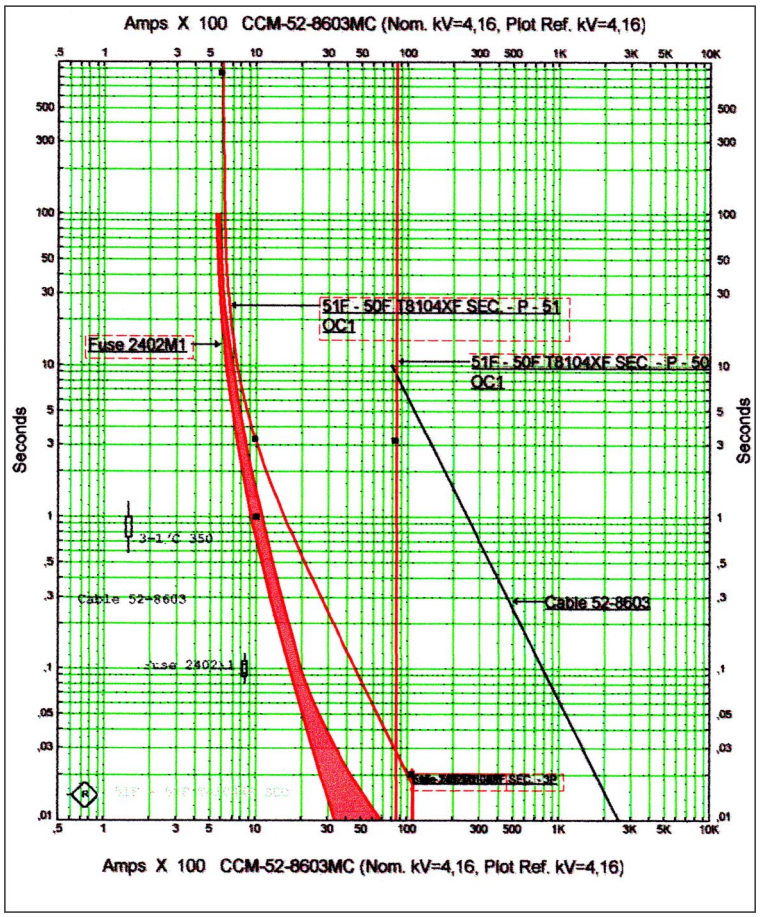


Figura 4.11: 51F del secundario del transformador 8104XF

- **Protecciones de sobrecorriente residual**
  - **Protecciones de tiempo inverso inverso (51N):** el ajuste de esta protección se realiza con el procedimiento descrito en la Sección D.2. En la ecuación (4.21) se muestra el cálculo de la corriente "pick-up" de este relé.

$$I_{pick-up\,51N} = \frac{0,15 \cdot 650 \cdot 5}{200} = 1,624\ [As] \tag{4.21}$$

Esta protección debe ser capaz de activarse para la falla mínima a tierra en la barra 2402M1. Se debe poner especial atención con la falla monofásica, ya que el relé de fase no es capaz de detectar esta corriente. La corriente residual menor es provocada por la falla bifásica a tierra con un valor de 0,027 [kA]. En la ecuación (4.22) se observa el cálculo de N para este valor de corriente.

$$N = \frac{27 \cdot \frac{5}{500}}{1,624} = 0,416 < 1,5 \tag{4.22}$$

Se observa que este relé no es capaz de detectar esta falla por ende se determina que la falla $2\phi - t$ será respaldada solamente por el relé de sobrecorriente de fase. La segunda corriente mínima es producida por el cortocircuito monofásico a tierra (0,053 [kA]). En la ecuación (4.23)

se observa el cálculo de N para esta corriente.

$$N = \frac{53 \cdot \frac{5}{200}}{1,624} = 0,816 < 1,5 \tag{4.23}$$

Este valor es menor a 1,5 es por esto que se reajusta la corriente "pick-up" a un 10 % de la corriente nominal[9]. En la ecuación (4.24) se observa el cálculo de la nueva corriente "pick-up".

$$I_{pick-up\ 51N} = \frac{0,1 \cdot 347 \cdot 5}{200} = 0,868\ [As] \tag{4.24}$$

El valor de N para este ajuste se observa en la ecuación (4.25).

$$N = \frac{53 \cdot \frac{5}{200}}{0,868} = 1,527 > 1,5 \tag{4.25}$$

Con este ajuste el relé es sensible para la falla monofásica en la barra. El "lever" se ajusta para que la falla residual máxima (7,99 [kA] para la falla $2\phi - t$ en la barra CCM-52-8603) sea detectada en 0,16 [s]. En este caso se selecciona la curva de tiempo extremadamente inverso del relé de protección. El ajuste gráfico se puede observar en la Figura 4.12.

[9] Aprobado por CAP

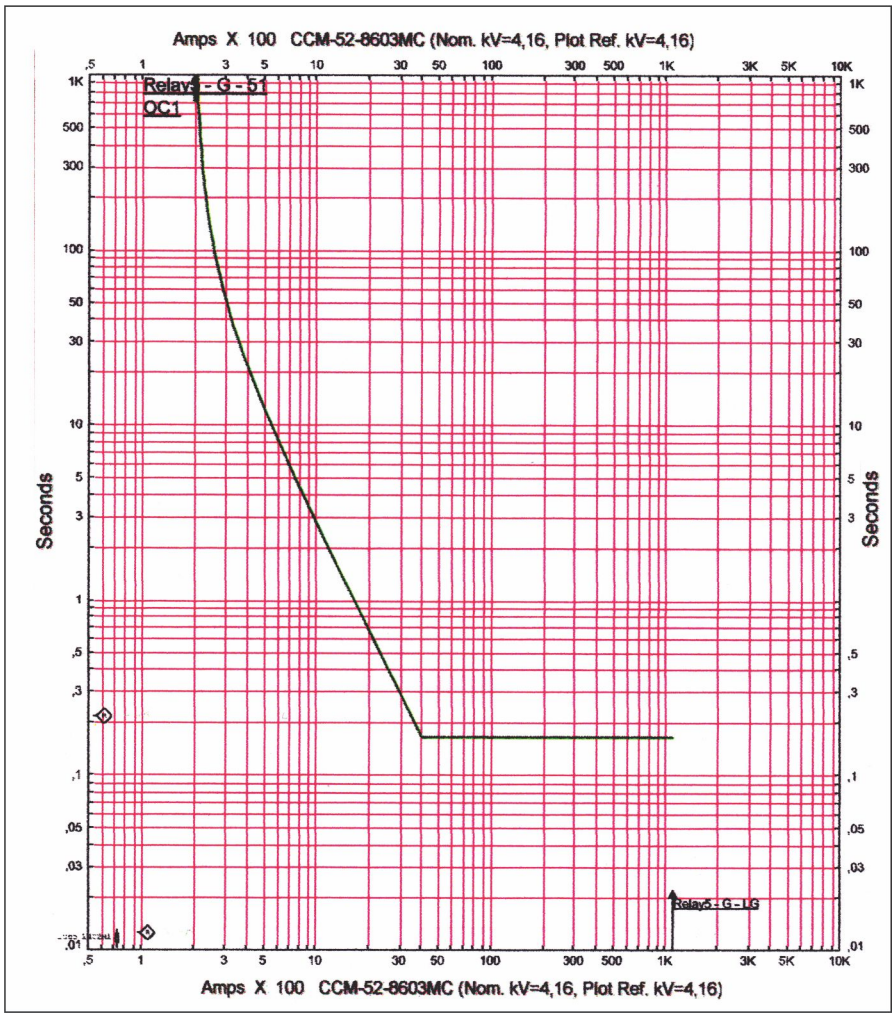


Figura 4.12: 51N del secundario del transformador 8104XF

- **Transformador 8105XF**
  - **Primario**
    Las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del primaro del transformador se muestra en la Tabla 4.20.

Tabla 4.17: Corrientes para el ajuste de protección del primario del transformador 8104XF

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	8603 sec.	1,89	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase\ 1}$	CCM 52-8603MC	0,029	$1\phi - t$
$I_{f\ mín\ fase\ 2}$	CCM 52-8603MC	1,61	$2\phi - t$

La relación de transformación del transformador de corriente es de 150/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** esta protección debe proteger al transformador por ende su corriente "pick-up" se calcula a partir de la co-

rriente nominal del transformador (se considera un 30 [%] de sobrecarga para que se pueda coordinar con la protección aguas abajo). En la ecuación (4.26) se calcula la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 51F} = 1,3 \cdot 136,5 \cdot \frac{5}{150} = 5,915\ [As] \tag{4.26}$$

Debe proporcionar respaldo al relé de sobrecorriente del secundario del transformador por ende debe ser sensible a cortocircuitos provocados en el CCM-52-8603MC. En la ecuación (4.27) se calcula la sensibilidad para la falla monofásica.

$$N = \frac{29 \cdot \frac{5}{150}}{5,915} = 0,163 < 1,5 \tag{4.27}$$

El resultado anterior muestra que el relé no detecta la falla monofásica, dado que la corriente de cortocircuito es muy pequeña[10](debido a la impedancia de falla de 15 [Ω]). Por consiguiente el relé deberá detectar la siguiente mínima corriente de cortocircuito, en este caso falla bifásica a tierra la cual tiene un valor de 1,61 [kA] reflejada en el lado primario del transformador. En la ecuación (4.28) se calcula N para este valor de corriente.

$$N = \frac{1610 \cdot \frac{5}{150}}{5,915} = 9,073 > 1,5 \tag{4.28}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé en este caso entrega respaldo. La selección del "lever" debe considerar el tipo de conexión del transformador. En la Tabla 4.18 se resume el efecto en los tiempos de operación de los relés involucrados.

Tabla 4.18: Corrientes de cortocircuito en la barra 8603 Sec.

Falla	8603 Sec.		8603 Pri.			Δt
	I_{sec} [kA]	t_{op} [s]	I_{pri} [kA]	I^*_{pri} [kA]	t_{op} [s]	
3ϕ	5,99	0,059	1,89	5,997	0,426	0,367
$2\phi - t$	6,4	0,05	1,89	5,997	0,426	0,376
2ϕ	5,21	0,075	1,89	5,997	0,426	0,351
$1\phi - t$	6,64	0,046	1,15	3,649	1,17	1,124

De la Tabla 4.18 se observa que el mínimo intervalo de tiempo de operación entre los relés ocurre para la falla bifásica, es por esto que la coordinación se realiza para esta condición. En la ecuación (4.29)se calcula el tiempo de operación del relé en estudio.

$$t_{51-8603\ Pri.} = 0,075 + 0,3 = 0,375\ [s] \tag{4.29}$$

El "lever" que cumple con el tiempo calculado en la ecuación (4.29) es de 0,5.

[10]Debido a que en el primario no existe 51N, se propone instalar protección residual redundante en el secundario del transformador 8104-XF.

◇ **Sobrecorriente instantáneo (50F):** la corriente "pick-up" debe estar entre los cortocircuitos máximos en las barras 8603 pri. y 8603 sec. En la Tabla 4.19 se muestra los valores de corriente de cortocircuito para estas dos barras (referidos al primario del transformador).

Tabla 4.19: Corriente para ajuste de la función 50F 8603 pri.

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx}$	8603 pri.	6,64	$1\phi - t$
$I_{f\ máx}$	8603 sec.	1,89	3ϕ

De los anteriores resultados se puede concluir que si la corriente de falla está entre 1,89 y 6,64 [kA], es posible que la falla sea en el transformador, por lo tanto ajustamos la unidad instantánea con la menor corriente. En la ecuación (4.30) se calcula la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 1890 \cdot \frac{5}{150} = 81,9\ [As] \tag{4.30}$$

En la Figura 4.13 se observa la coordinación de protecciones del transformador 8104-XF. El relé del primario protege al transformador y permite su energización.

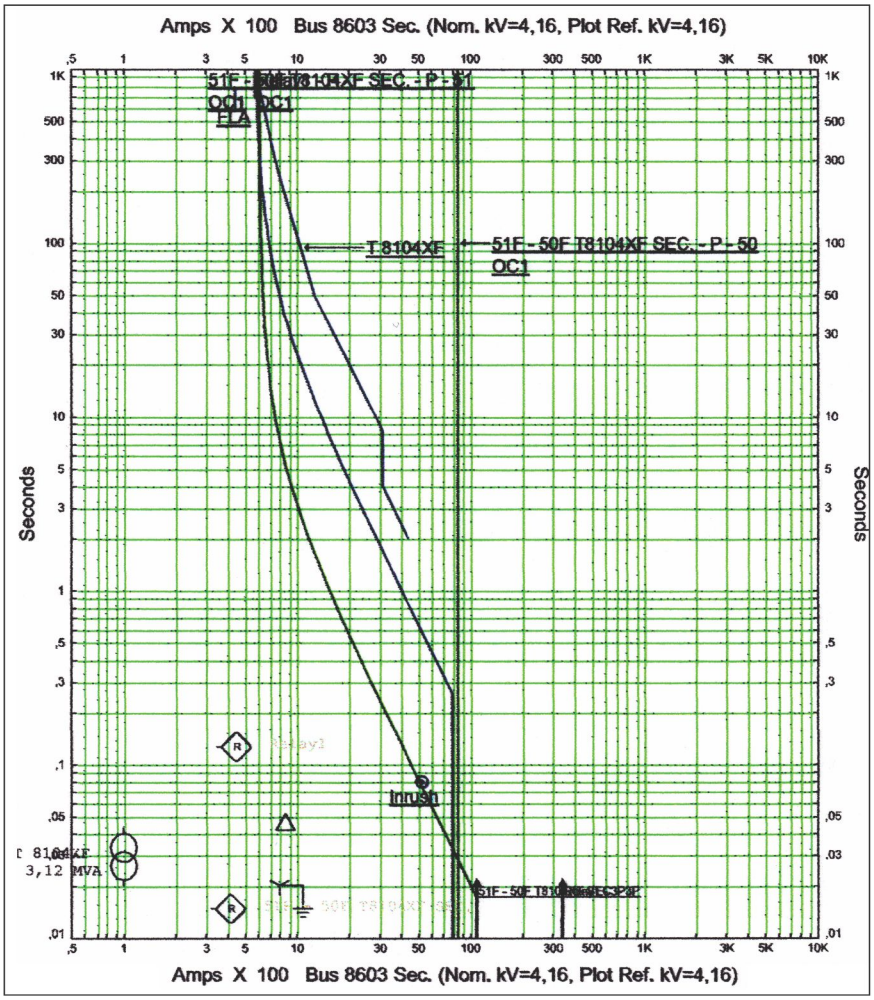


Figura 4.13: Coordinación de protecciones del T-8104XF

- **Transformador 8105XF**
  La protección eléctrica del transformador 8105XF consiste en un relé de marca Schneider Power Logic el cual rige la operación de su respectivo interruptor. Las protecciones descritas se observan en la Figura 4.14.

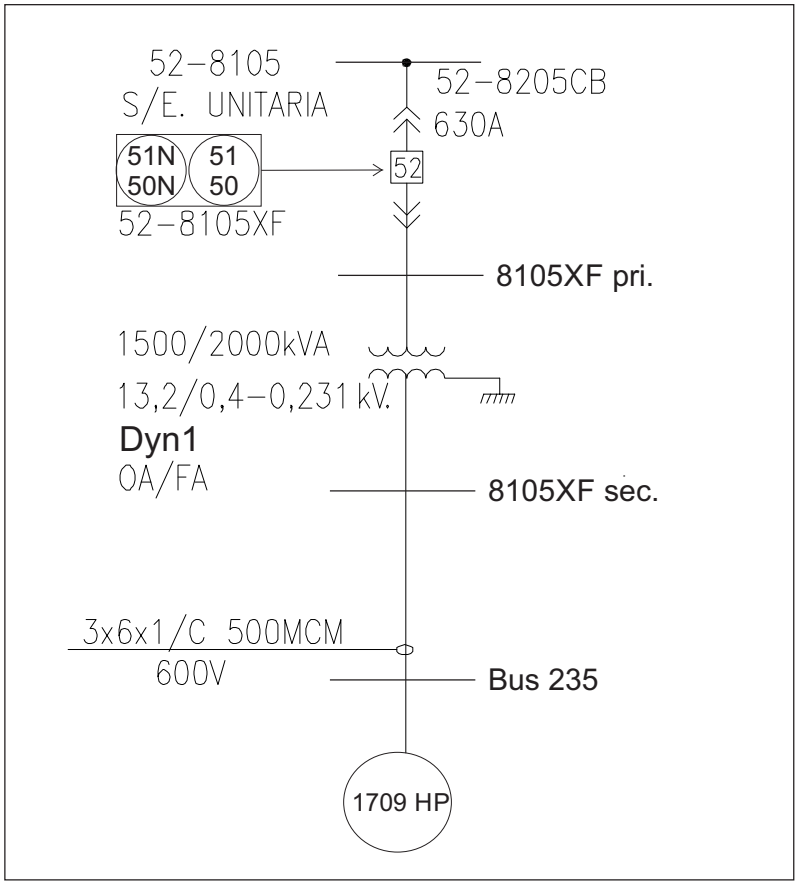


Figura 4.14: Protección eléctrica transformador 8105XF

- **Primario**
  Las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones se muestra en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20: Corrientes para el ajuste de protección del primario del transformador 8105XF

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	8105XF pri.	1,89	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	235	0,168	$1\phi - t$

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 500/5.

  - **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
    - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente nominal del primario del transformador es 87,48 [kA]. En la ecuación (4.31) se muestra el cálculo de la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 51F} = 1,10 \cdot 87,48 \cdot \frac{5}{500} = 0,962\ [As] \qquad (4.31)$$

Este relé debe ser sensible a cortocircuitos provocados en la barra 235. En la ecuación (4.32) se muestra el resultado de esto.

$$N = \frac{168 \cdot \frac{5}{500}}{0,962} = 1,746 > 1,5 \tag{4.32}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. La selección del "lever"debe detectar la falla máxima (7,69 para falla 3ϕ) en la barra 8105XF pri. en 0,16 [s]. El "lever" seleccionado es 0,8.

◇ **Sobrecorriente instatáneo (50F):** la corriente de referencia para calcular la corriente "pick-up" debe estar entre los cortocircuitos máximos en las barras 8105XF pri. y 8105XF sec. En la Tabla 4.21 se muestra los valores de corriente de cortocircuito para estas dos barras (referidos al primario del transformador).

Tabla 4.21: Corriente para ajuste de 50F 8105XF pri.

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx}$	8105XF pri.	7,69	3ϕ
$I_{f\ máx}$	8105XF pri.	1,04	$1\phi - t$

De los anteriores resultados se puede concluir que si la corriente de falla está entre 1,04 y 7,69 [kA], es una falla que ocurre entre el secundario y primario del transformador. El ajuste se realiza considerando el valor de 1,04 [kA] ya que de esa manera la función 50F será sensible a cortocircuitos hasta el secundario del transformador. En la ecuación (4.33) se calcula la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 1040 \cdot \frac{5}{500} = 13,52\ [As] \tag{4.33}$$

En la Figura 4.15 se observan las funciones 50F-51F del primario del transformador 8105XF. Se observa que el transformador está protegido en todo momento y además se permite su energización.

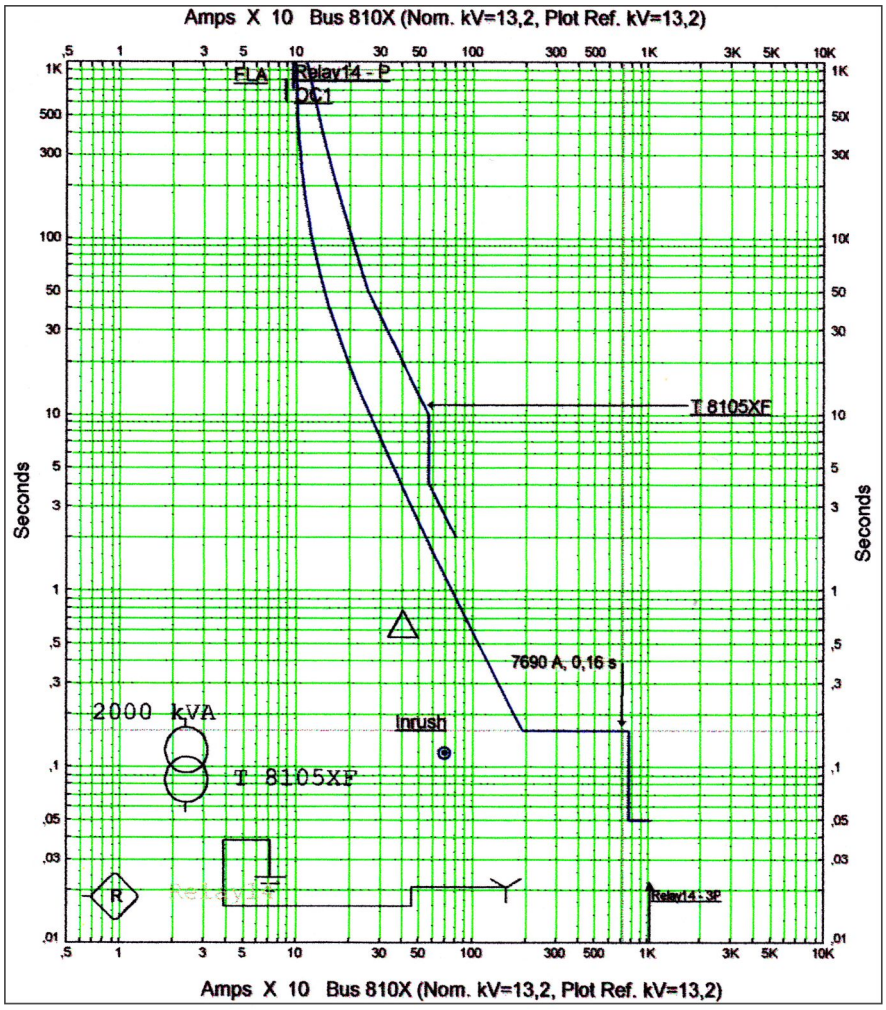


Figura 4.15: Ajuste de protecciones del transformador 8105XF

- **Transformador 8106XF**
  La protección eléctrica del transformador 8106XF consiste en un relé de marca Schneider Power Logic el cual rige la operación de su respectivo interruptor. La protección descrita se observa en la Figura 4.16.

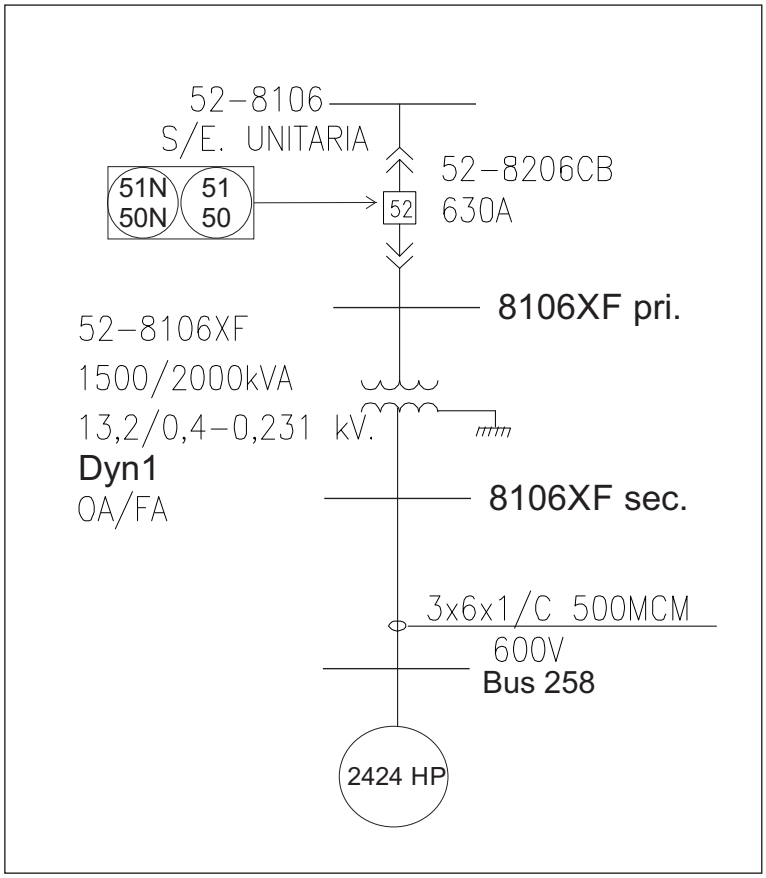


Figura 4.16: Protecciones eléctricas del transformador 8106XF

- **Primario**
  Las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones se muestra en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22: Corrientes para el ajuste de protección del primario del 8106XF

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	8106 pri.	7,53	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	258	0,208	$1\phi - t$

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 500/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente nominal del primario del transformador es 87,48 [kA]. En la ecuación (4.34) se muestra el cálculo de la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 51F} = 1,10 \cdot 87,48 \cdot \frac{5}{500} = 0,962\ [As] \tag{4.34}$$

Este relé debe ser sensible a cortocircuitos provocados en la barra 258. En la ecuación (4.35) se muestra el resultado de esto.

$$N = \frac{208 \cdot \frac{5}{500}}{0,962} = 2,162 > 1,5 \tag{4.35}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. La falla máxima (7,53 para falla 3ϕ en la barra 8106 pri.) debe ser detectada en 0,16 [s]; el "lever" que cumple con este valor es 0,79.

◇ **Sobrecorriente instantáneo (50F):** el valor de corriente "pick-up" debe estar entre los cortocircuitos máximos en las barras 8106XF pri. y 8106XF sec. En la Tabla 4.23 se muestra los valores de corriente de cortocircuito para estas dos barras (referidos al primario del transformador).

Tabla 4.23: Corriente para ajuste de 50F 8106XF pri.

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx}$	8106XF pri.	7,53	3ϕ
$I_{f\ máx}$	8106XF pri.	1,32	3ϕ

De los anteriores resultados se puede concluir que si la corriente de falla está entre 1,32 y 7,53 [kA], es una falla que ocurre entre el secundario y primario del transformador. El ajuste se realiza considerando el valor de 1,32 [kA] ya que de esa manera la función 50F será sensible a cortocircuitos hasta el secundario del transformador. En la ecuación (4.36) se calcula la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 1320 \cdot \frac{5}{500} = 17,16\ [As] \tag{4.36}$$

En la Figura 4.17 se observan las funciones 50F-51F del primario del transformador 8106XF. Se observa que el transformador está protegido en todo momento y además se permite su energización.

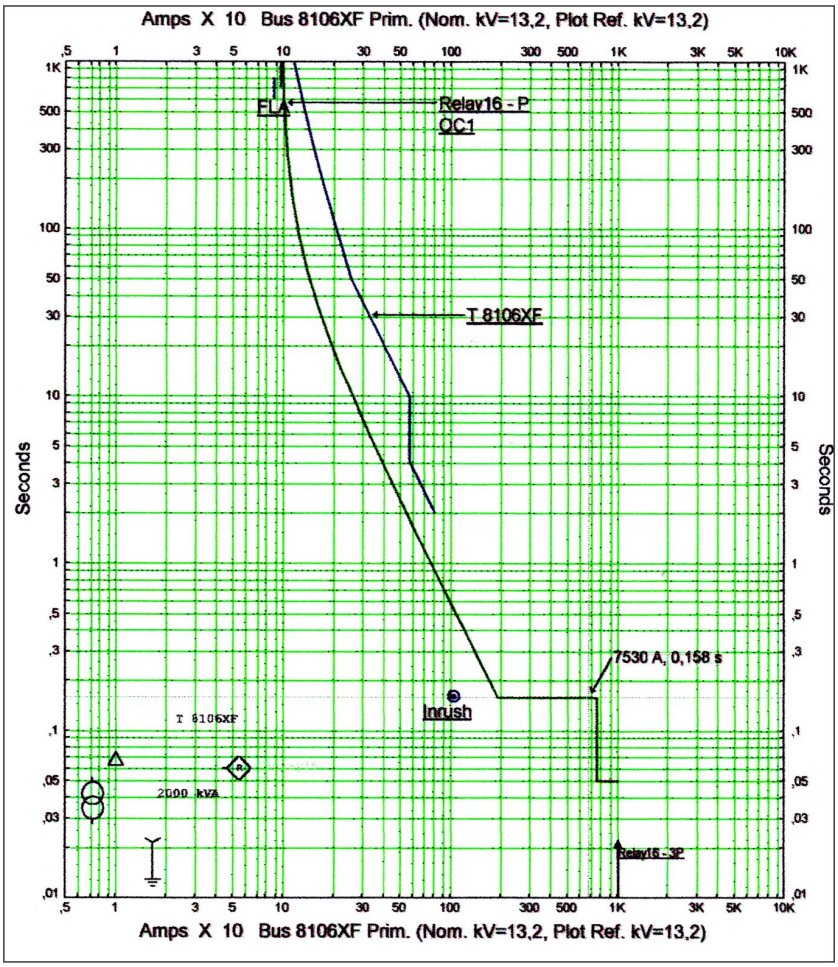


Figura 4.17: Ajuste de protecciones del transformador 8106XF

- **Prensa de rodillos**

  La prensa de rodillos está compuesta por dos motores de 2500 [HP] (ajuste de protección idéntico). Cada protección consiste de un relé multifunción de marca Schneider Power Logic el cual rige la operación de su respectivo interruptor. El diagrama unilineal de este sector se observa en la Figura 4.18.

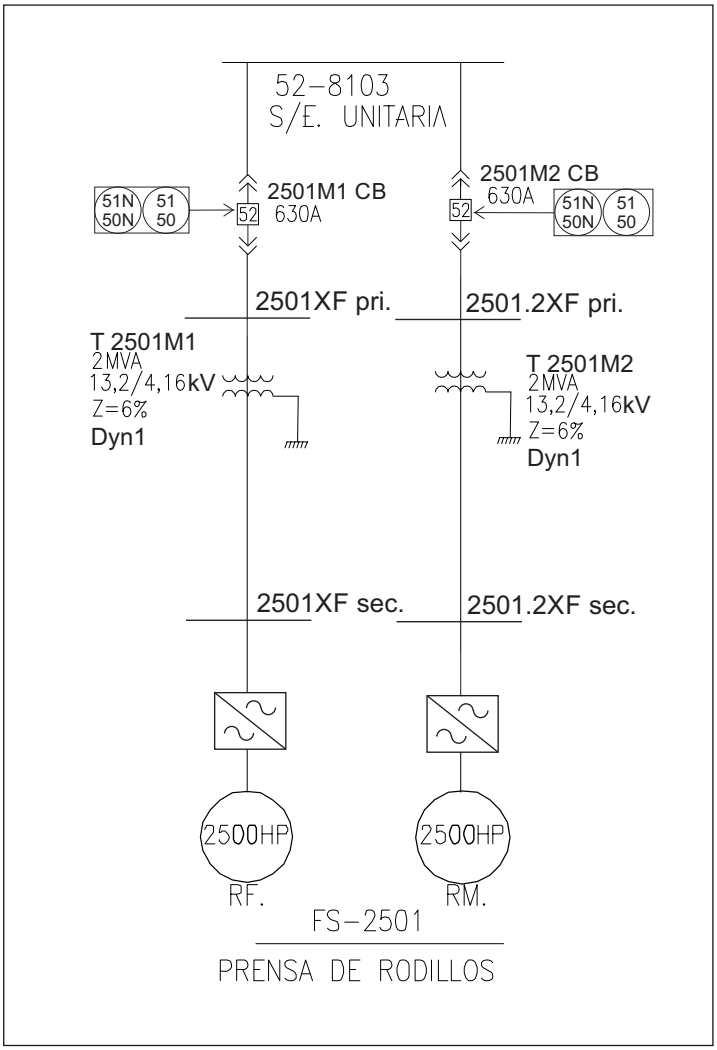


Figura 4.18: Diagrama unilineal prensa de rodillos

El relé debe proteger a los variadores de frecuencia ante cortocircuitos. En la Tabla 4.24 se muestran las corrientes de interés para esta parte del análisis, referidas al primario.

Tabla 4.24: Corrientes para el ajuste de protección de la prensa de rodillos

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx}$	2501XF pri.	8,22	3ϕ
$I_{f\ mín}$	2501 XF sec.	0,714	$1\phi - t$

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 500/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**

- **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente nominal del primario del transformador es 87,48 [kA]. En la ecuación (4.37) se muestra el cálculo de la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 51F} = 1,10 \cdot 87,48 \cdot \frac{5}{500} = 0,962\ [As] \tag{4.37}$$

Este relé debe ser sensible a la falla mínima en la barra 2501M1. En la ecuación (4.38) se muestra el resultado de esto.

$$N = \frac{714 \cdot \frac{5}{500}}{0,962} = 7,422 > 1,5 \tag{4.38}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé es sensible para este nivel de corriente. El "lever" del relé se selecciona de tal forma de detectar la falla máxima (8,22 [kA] para falla 3ϕ) en la barra 2501M1.2 en un tiempo mínimo de 0,16 [s]. El "lever" seleccionado es de 4,16 [s].

- **Sobrecorriente instantáneo (50F):** la corriente de referencia para calcular la corriente "pick-up" debe estar entre los cortocircuitos máximos en las barras 2501XF pri. y 2501XF sec. En la Tabla 4.25 se muestra los valores de corriente de cortocircuito para estas dos barras (referidos al primario del transformador).

Tabla 4.25: Corriente para ajuste de 50F 2501XF pri.

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx}$	2501XF pri.	8,22	3ϕ
$I_{f\ máx}$	2501XF pri.	1,33	3ϕ

De los anteriores resultados se puede concluir que si la corriente de falla está entre 1,33 y 8,22 [kA] es posible que la falla sea en el transformador, por lo tanto se ajusta la unidad instantánea con la menor corriente. En la ecuación (4.39) se calcula la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 1330 \cdot \frac{5}{500} = 17,29\ [As] \tag{4.39}$$

En la Figura 4.21 se observa el ajuste de las funciones 50F-51F del primario del transformador 8106XF. Motor y su cable de alimentación quedan protegidos, además se permite correctamente su arranque.

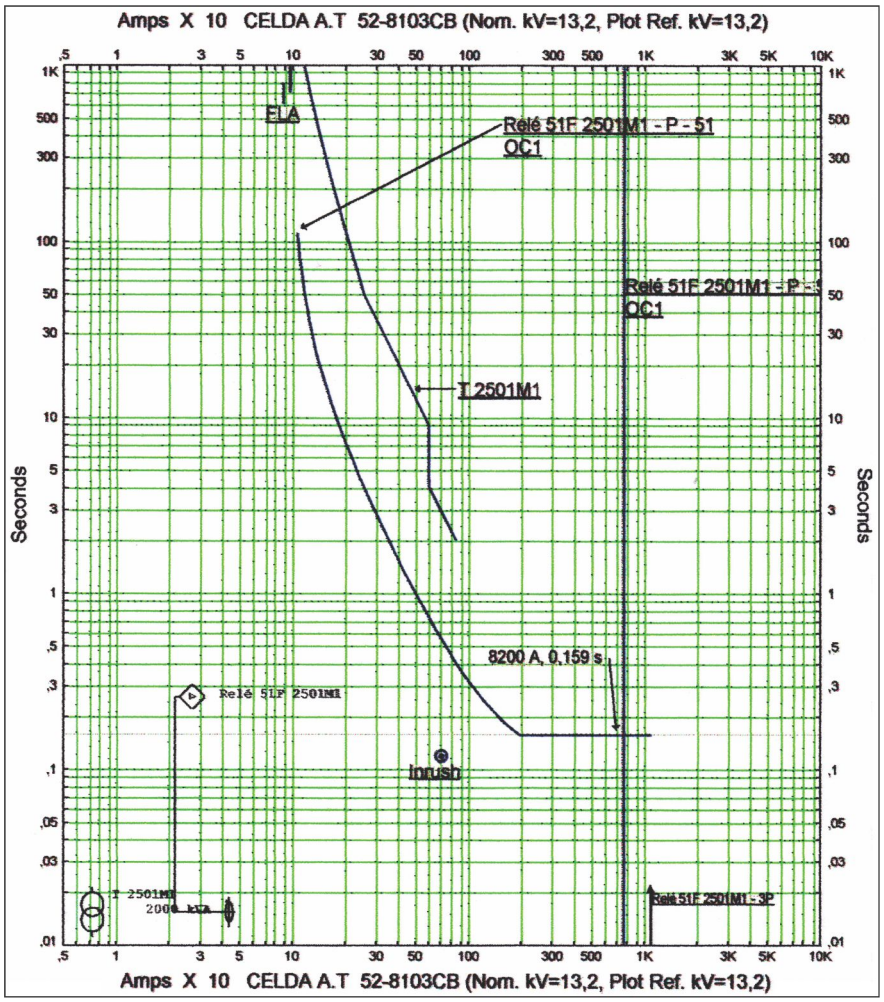


Figura 4.19: 51F-50F prensa de rodillos

- **Protecciones cabecera alimentador 3A**
  La protección eléctrica de la cabecera del alimentador 3A consiste en un relé Multilin 750R el cual rige la operación de su respectivo interruptor. Las protecciones descritas se observan en la Figura 4.20.

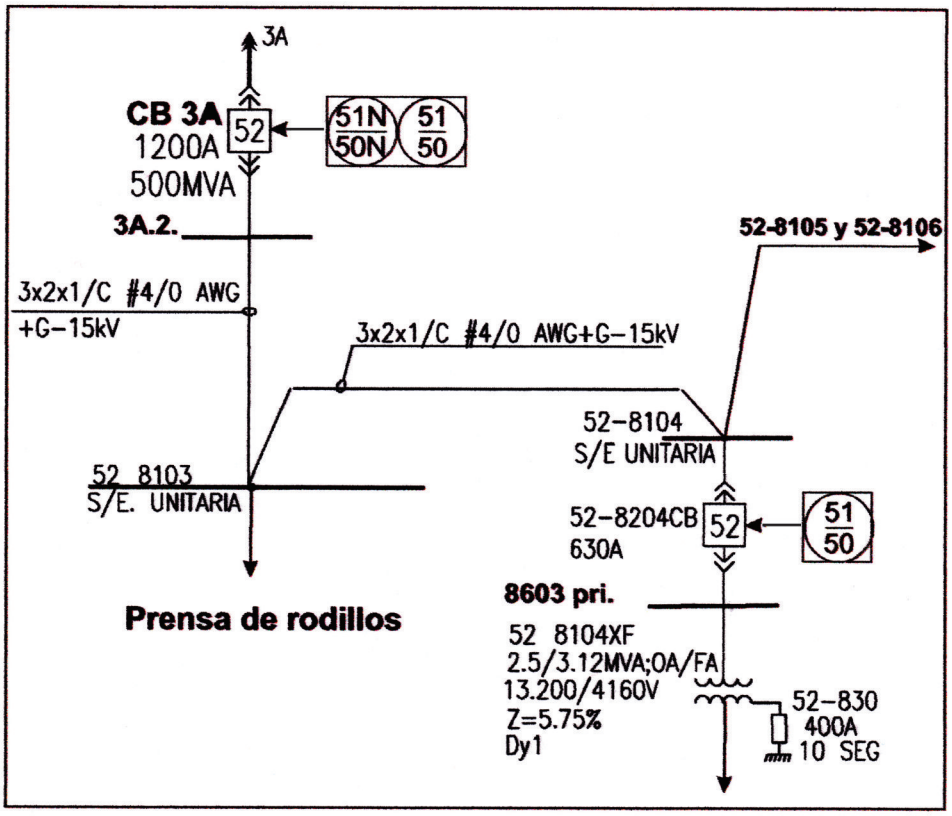


Figura 4.20: Protecciones eléctricas cabecera 3A

Las corrientes de interés para el ajuste de esta protección se muestran en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26: Corrientes para el ajuste de protecciones de la cabecera del alimentador 3A

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de falla	Vista por
$I_{f\ máx\ fase}$	8603 pri.	7,47	3ϕ	Relé T8104XF prim.
$I_{f\ máx\ fase}$	8603 pri.	6,71	3ϕ	Relé 3A
$I_{f\ mín\ fase}$	8603 sec.	1,05	$1\phi - t$	Relé T8104XF prim.

Se selecciona la barra 8603 sec. dado que la protección más lenta es la ubicada en esta barra. La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 400/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente "pick-up" se selecciona de tal forma que se pueda coordinar con las protecciones aguas abajo, detecte la corriente mínima de su sector y proteja a los conductores aguas abajo. En la ecuación (4.40) se muestra el cálculo de la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up} = 510 \cdot \frac{5}{400} = 5,375\ [As] \tag{4.40}$$

Este relé debe proporcionar respaldo al relé de sobrecorriente de tiempo inverso del primario del transformador 8104XF (protección aguas abajo más lenta). El relé debe ser sensible a la falla mínima en la barra 8603 sec. En la ecuación (4.41) se muestra el resultado del cálculo de la corriente "pick-up".

$$N = \frac{1050 \cdot \frac{5}{400}}{5,375} = 2,442 > 1,5 \tag{4.41}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El tiempo de operación se calcula para la falla máxima (7,47 [kA] para falla 3ϕ) en la barra 8603 prim. En primer lugar se calcula el tiempo de operación para el relé del primario del transformador 8104XF, en este caso 0,117 [s]. En la ecuación (4.42) se observa el cálculo del tiempo mínimo de operación del 51F de la cabecera 3A.

$$t_{op\ 51\ 3A} = t_{op\ 51\ 8104XF\ Pri.} + 0,3 = 0,117 + 0,3 = 0,417\ [s] \tag{4.42}$$

El "time dial" que cumple con la ecuación anterior es 5,45.

- **Sobrecorriente instatáneo (50F):** esta función se ajusta para la falla máxima en la barra 8603 prim. (6,71 [kA] para falla 3ϕ). En la ecuación (4.43) se calcula su corriente "pick-up".

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 1330 \cdot \frac{5}{500} = 17,29\ [As] \tag{4.43}$$

En la Figura 4.21se observa el ajuste de las protecciones de sobrecorriente de fase.

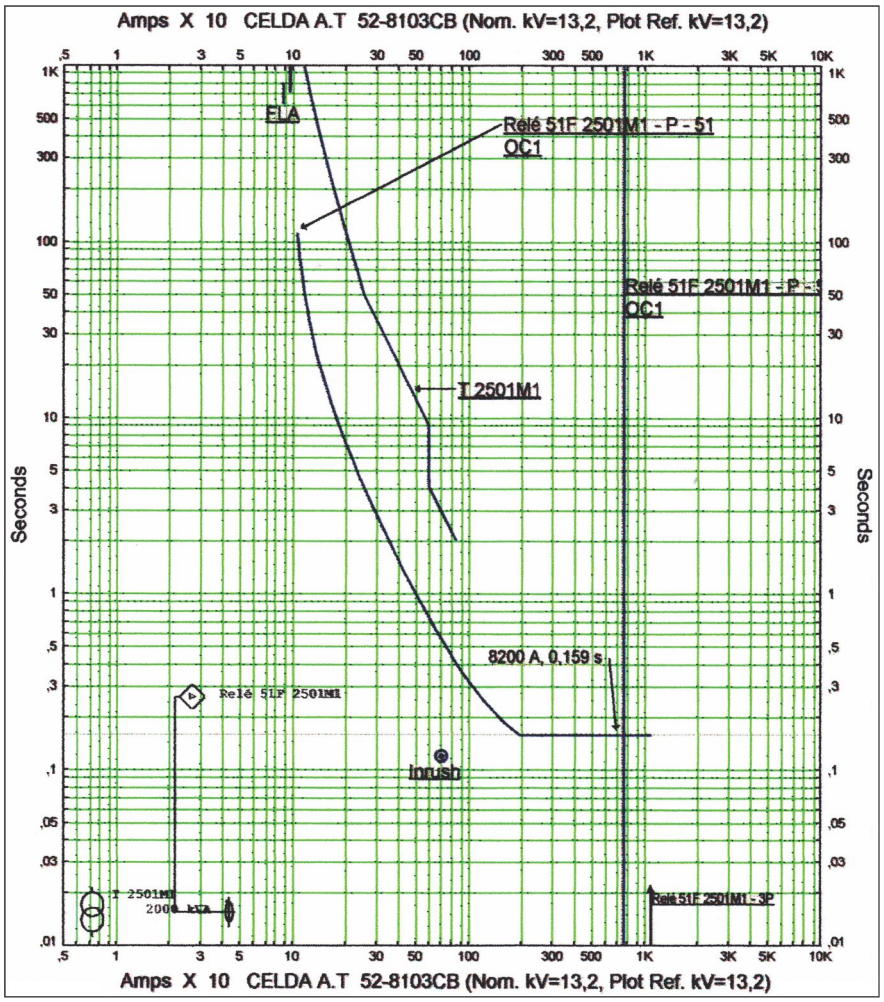


Figura 4.21: 51F-50F prensa de rodillos

4.3.2. Alimentadores 5A y 5B

Cada uno de estos alimentadores tiene conectado un banco de condensadores. El diagrama unilineal de este sector se observa en la Figura 4.22. Los bancos de condensadores se encuentran protegidos por su respectivo relé Multilin 750R. El ajuste de los relés de cada uno de los alimentadores es idéntico, ya que las cargas asociadas tienen las mismas características. El transformador de corriente tiene una relación de 50/5.

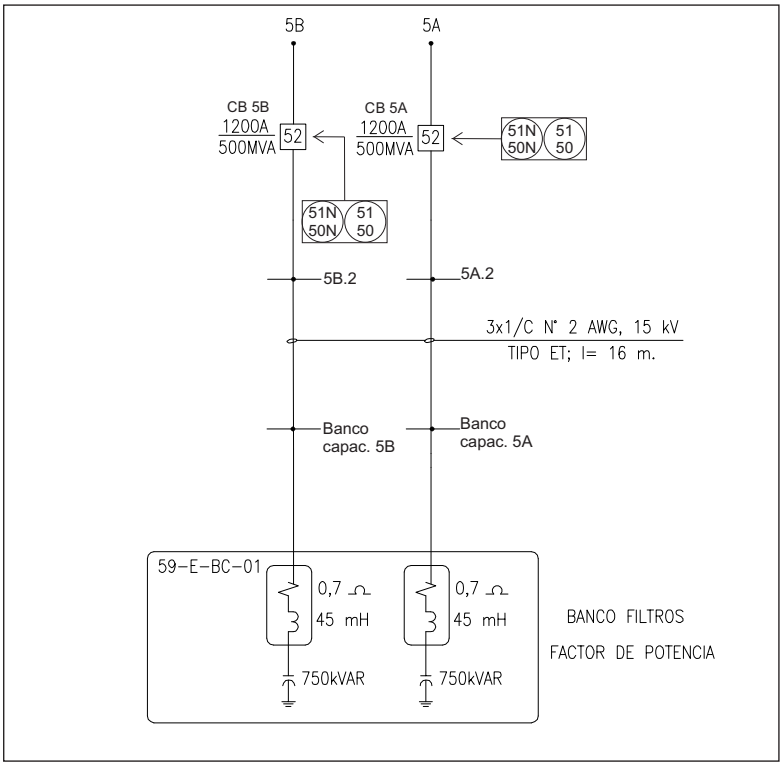


Figura 4.22: Diagrama unilineal alimentadores: 5A y 5B

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**

  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente "pick-up" se calcula como un porcentaje (125 %) de la corriente nominal del banco de condensadores (32,8 [A]). En la ecuación (4.44) se calcula la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 51F} = 1,25 \cdot 32,8 \cdot \frac{5}{50} = 4,1\ [As] \tag{4.44}$$

    Este relé debe proteger al banco de condensador aguas abajo, como además al conductor que alimenta electricamente al banco de condensador. Por ende debe ser sensible a la falla mínima en la barra Banco Capac. 5B. (0,501 [kA] para falla $1\phi - t$). En la ecuación se calcula N para la corriente de falla mínima.

$$N = \frac{501 \cdot \frac{5}{50}}{4,1} = 12,22 > 1,5 \tag{4.45}$$

    N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El "lever" se selecciona para que la falla máxima en la barra 5B.2 (8,3 [kA] para falla $2\phi - t$) sea detectada en 0,05 [s]. Se selecciona la curva extremadamente inversa y un "time dial" de 1,25.

  - **Sobrecorriente instantánea (50F):** para el cálculo de la corriente "pick-up" se consideran las corrientes de cortocircuito máxima (ver Tabla 4.27) en ambos extremos del sector que debe proteger esta función.

Tabla 4.27: Corrientes para ajuste de 50F de la cabecera del alimentador 5B

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx}$	Banco capac. 5B	8,2	$2\phi - t$
$I_{f\ máx}$	5B.2	8,3	$2\phi - t$

Dada la pequeña diferencia entre las corrientes que se observan en la Tabla 4.27 se desactiva esta función.

En la Figura 4.23 se observa el ajuste de protección de la función 51F del alimentador 5B (idéntico para alimentador 5A).

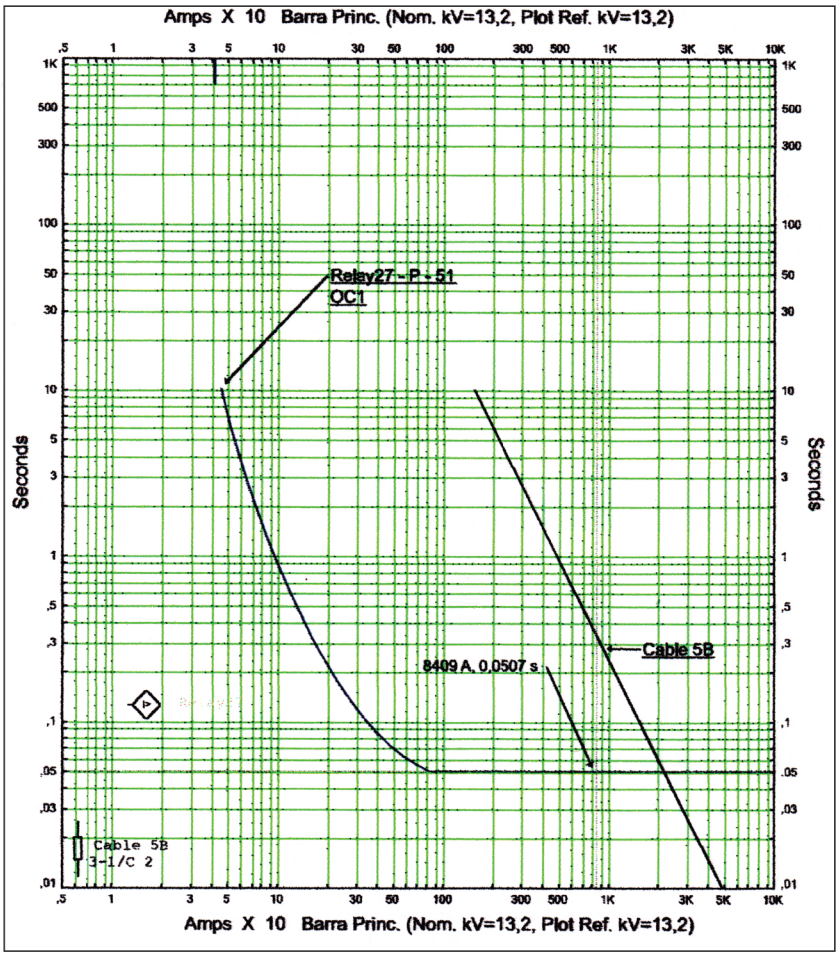


Figura 4.23: 51F cabecera alimentador 5B

4.3.3. Alimentador 1B

Este alimentador tiene como carga a la pala eléctrica, la cual se alimenta a través de una S/E que posee un transformador de 3 MVA con relación de transformación de 13,2/7,2 [kV]. El diagrama unilineal de este sector se observa en la Figura 4.24. En el secundario del transformador se tiene un relé GE MUltilin 565 el cual actúa sobre su respectivo

interruptor. En el primario del transformador se tiene instalado un fusible el cual debe proteger al transformador y además respaldar al relé del secundario. El transformador de corriente de fase es de relación 250/5.

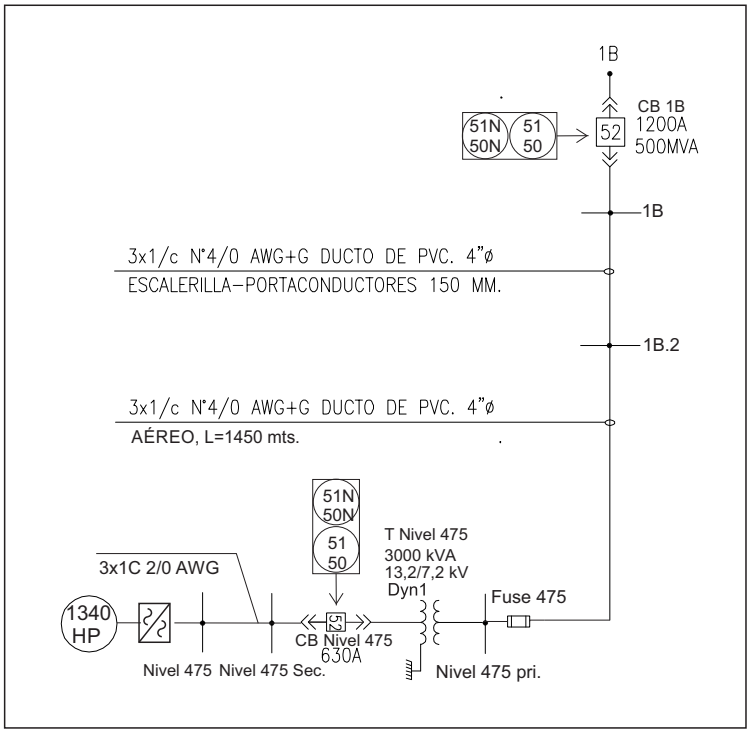


Figura 4.24: Diagrama unilineal alimentador 1B

1. **Secundario transformador nivel 475**
   En la Tabla 4.28 se observan las corrientes de interés para el ajuste de sus protecciones.

Tabla 4.28: Corrientes de interés del secundario del transformador nivel 475

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx}$	Nivel 475 Sec.	3,122	$1\phi - t$
$I_{f\ máx}$	Nivel 475	3,01	$1\phi - t$
$I_{f\ mín}$	Nivel 475	0,399	$1\phi - t$

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Relé sobrecorriente inverso (51F):** la corriente nominal del secundario del transformador es de 240,6 [A]. En la ecuación (4.46) se calcula la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 51F} = 1,10 \cdot 240,6 \cdot \frac{5}{250} = 5,293\ [As] \tag{4.46}$$

Este relé debe proteger al motor aguas abajo por ende debe ser sensible a la falla mínima de este equipo. En la ecuación (4.47) se calcula N para la corriente de falla mínima.

$$N = \frac{399 \cdot \frac{5}{250}}{5,293} = 1,508 > 1,5 \tag{4.47}$$

N en este es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El "lever" del relé se selecciona de tal forma que la falla máxima (3,122 [kA] para falla $1\phi - t$) en la barra nivel 475 sec. sea detectada por el relé en 0,16 [s]. El "lever" seleccionado es igual a 6.

- **Sobrecorriente instantáneo (50F):** para el cálculo de la corriente "pick-up" (ecuación (4.48)) se considera la corriente de rotor bloqueado (604,565 [A]).

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,25 \cdot 604,565 \cdot \frac{5}{250} = 15,114\ [As] \tag{4.48}$$

En la Figura 4.25 se observa las curvas de ajuste del relé (funciones 51F y 50F). De la Figura se infiere que el motor de la pala eléctrica y su cable de alimentación quedan protegidos, y además se permite el arranque del motor sin que opere el relé.

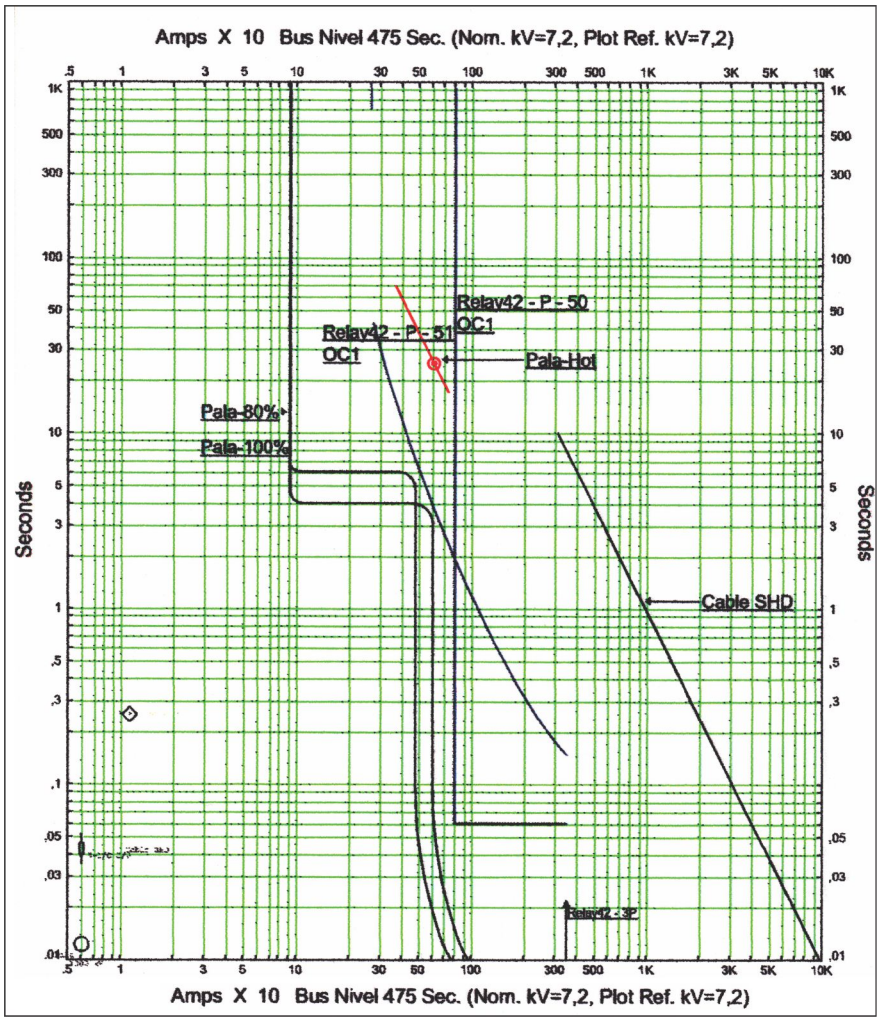


Figura 4.25: 51F-50F del secundario del transformador nivel 475

2. **Transformador primario nivel 475**
En la Tabla 4.29 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de esta protección.

Tabla 4.29: Corrientes de interés del primario del transformador nivel 475

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla	Referida a:
$I_{f\ máx\ fase}$	Nivel 475 Sec.	3,12	$1\phi - t$	Nivel 475 Sec.
$I^*_{f\ máx\ fase}$	Nivel 475 Sec.	0,982	$1\phi - t$	Nivel 475 Pri.

La corriente nominal del primario del transformador es 131,2 [A]. El ajuste del fusible debe considerar debe considerar los siguientes puntos:

- No debe dañarse con:
  - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 131,2 = 196,8\ [A]$ para $t \to \infty$
  - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 131,2 = 1574,4\ [A]$ durante 0,10 [s]

- Debe fundirse con:
  - $6 \cdot 131,2 = 787,2$ $[A]$ para $t < 300$ [s].
  - Punto ANSI=$\dfrac{1}{0,067} \cdot 0,58 \cdot 131,2 = 1135,761$ $[A]$ para $t \leq 4$ $[s]$.
- La curva de tiempo mínimo de fusión del fusible ajustada debe encontrarse para corrientes de hasta 0,982 [kA] por encima de la curva del tiempo total del aclaramiento del interruptor CB nivel 475. Este interruptor abre sus contactos en 0,16 [s] y el relé respectivo en 0,168 [s] para la falla máxima (3,12 [kA] para falla $1\phi - t$ en la barra nivel 475 sec). En la ecuación (4.49) se observa el mínimo tiempo de fusión que debe tener el fusible para la falla máxima.

$$t\ mín\ fusión > 1,33 \cdot (0,168 + 0,16) = 0,436\ [s] \tag{4.49}$$

En la Figura se observan el fusible seleccionado (Siba 200 [A]) y el cumplimiento de los puntos descritos anteriormente. Cabe mencionar que para la falla máxima (3,12 [kA] para cortocircuito $1\phi - t$) el fusible se funde en 3 [s] siendo mayor este tiempo al calculado en la ecuación (4.49).

En la Tabla 4.30 se describe las características del fusible.

Tabla 4.30: Fusible nivel 475 pri.

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
Siba	Very Fast Speed	200	40	17,5

3. **Cabecera alimentador 1B**
La protección eléctrica de este sector consiste en un relé Multilin 750R el cual rige la operación de su respectivo interruptor. Esta protección debe proteger los cables de alimentación de la S/E Nivel 475, como además respaldar el actuar del fusible aguas abajo. Las corrientes de interés para el ajuste de esta protección se muestran en la Tabla 4.31.

Tabla 4.31: Corrientes de ajuste protección cabecera alimentador 1B

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	Nivel 475 pri.	5,33	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	Nivel 475 sec.	0,774	$1\phi - t$

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 200/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente "pick-up" se selecciona de tal forma que el relé pueda coordinar en todo momento con el fusible 475, pueda proteger al conductor aguas abajo y sea sensible a la mínima corriente. En la ecuación (4.50) se muestra el cálculo de la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 51F} = 400\frac{5}{2000} = 10\ [As] \tag{4.50}$$

El relé debe ser sensible a la falla mínima (0,774 [kA] para falla $1\phi - t$) que ocurre en la barra nivel 475 sec. En la ecuación (4.51) se muestra el resultado de esto.

$$N = \frac{774 \cdot \frac{5}{200}}{10} = 1,935 > 1,5 \tag{4.51}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El "lever" del relé se selecciona de tal manera que el tiempo mínimo de operación de la unidad de sobrecorriente sea como mínimo 1,33 veces mayor que el tiempo máximo de fusión del fusible (0,0175 [s]) para la falla máxima en la barra nivel 475 pri. (5,33 [kA] para falla 3ϕ). En la ecuación (4.52) se muestra el resultado de esto.

$$t_{51\ op} = 1,33 \cdot 0,0175 = 0,023\ [s] \tag{4.52}$$

El valor del "lever" que cumple con el tiempo de la ecuación (4.52) es de 7.

- **Sobrecorriente instantáneo (50F):** esta función se ajusta para el 130 % de la corriente para la falla máxima en la barra nivel 475 pri. (5,33 [kA] para falla 3ϕ). En la ecuación (4.53) se calcula su ajuste.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 5330 \cdot \frac{5}{500} = 69,29\ [As] \tag{4.53}$$

En la Figura 4.26 se observa el ajuste de la protección de sobrecorriente (51F-50F) del alimentador 1B. Esta protección cumple con la coordinación con la protección aguas abajo, como además de proteger a los conductores de su sector.

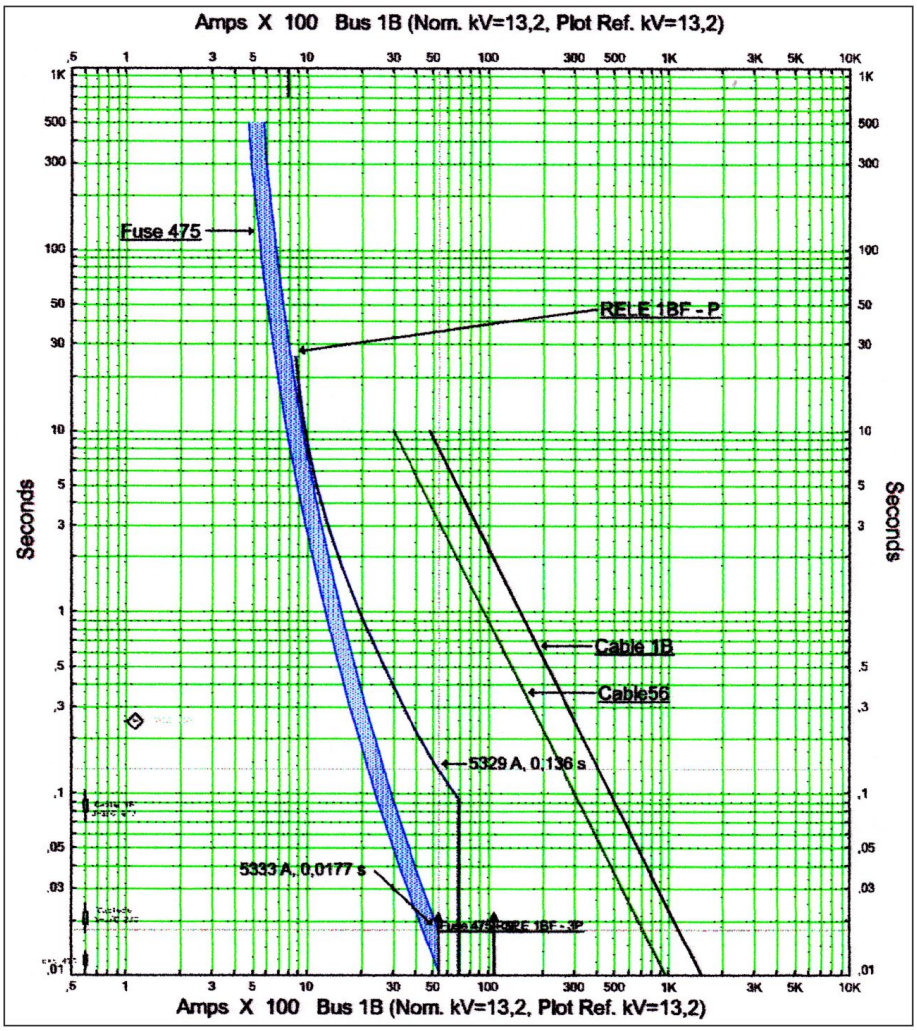


Figura 4.26: 51F-50F cabecera alimentador 1B

4.3.4. Alimentador 1A

En la Figura 4.27 se observa el diagrama unilineal del alimentador 1A.

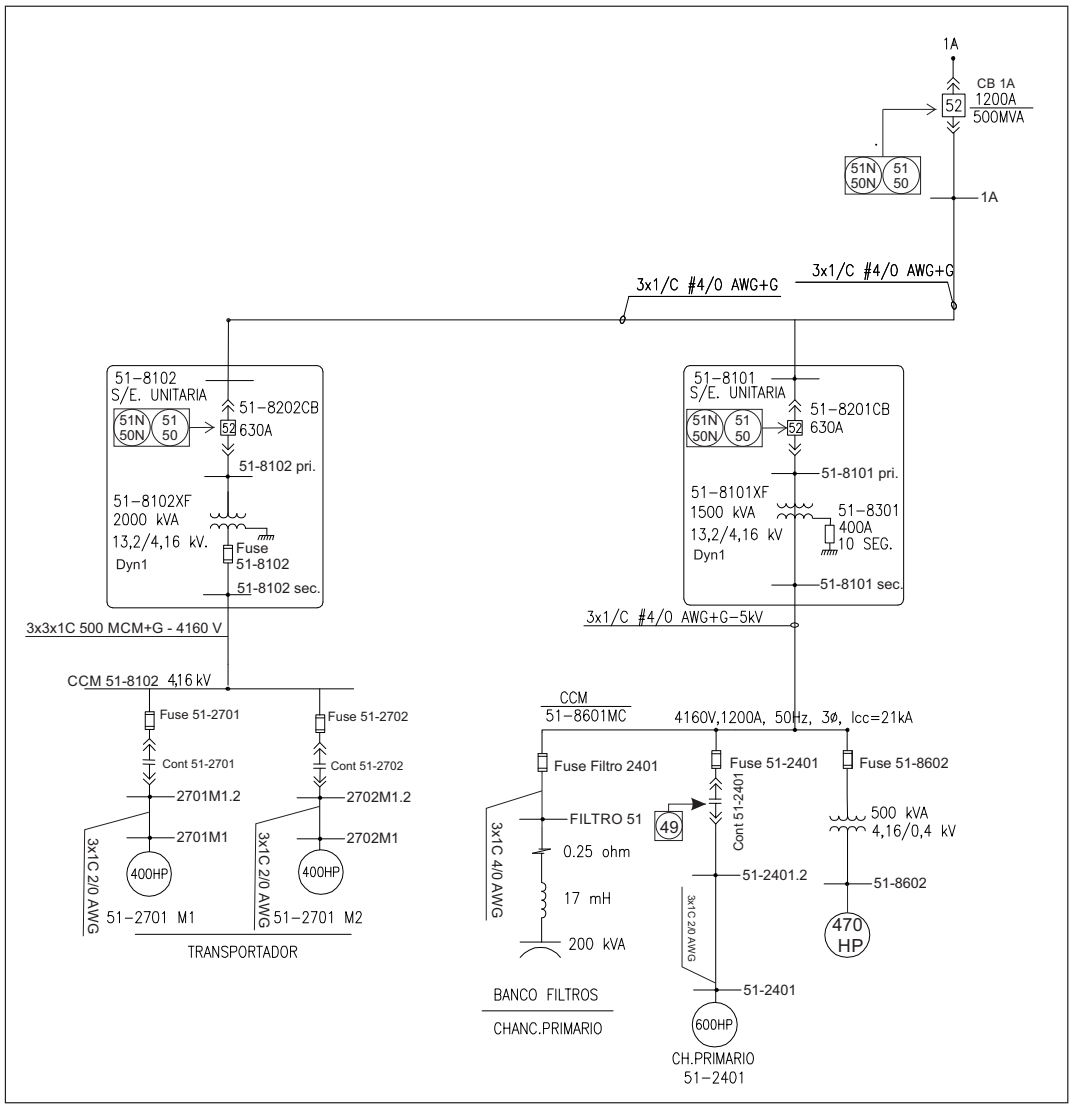


Figura 4.27: Diagrama unilineal alimentador 1A

1. **CCM-51-8102**
   Este sector está compuesto por dos motores de media tensión (4,16 kV), la protección de cada uno de ellos se realiza mediante un fusible tipo R (protección contra cortocircuitos) y un relé de sobrecarga el cual acciona a su respectivo contactor (protección contra sobrecarga).

   - **Motor 2701M1**

     En la Tabla 4.32 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de protecciones del motor.

Tabla 4.32: Corrientes de motor 2701M1

Corriente	Magnitud [A]
I_n	50,27
I_{rb}	301,62

- **Ajuste de fusible tipo *R***
  En la ecuación (4.54) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R. Se selecciona un valor de 3 para este coeficiente, lo cual se confirma graficamente (ver Figura 4.28).

$$n = \frac{301,620}{100} = 3,016 \approx 3 \tag{4.54}$$

- **Ajuste protección de sobrecarga**
  En la ecuación (4.55) se calcula la corriente "pick-up" del relé de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 50,270 = 52,784\ [A] \tag{4.55}$$

  El "lever" seleccionado es 7. Con este "lever" se entrega protección al motor y además se permite su arranque.

En la Figura 4.28 se observa el ajuste de protecciones para el motor 2701M1, donde se observa su curva de arranque (para 80 % y 100 % de la tensión nominal). Las protecciones permiten el arranque del motor y además queda protegido contra sobrecargas y cortocircuitos. El fusible se funde en 0,05 segundos para la falla máxima en la barra 2701M1.2 (4,66 [kA] para la falla 3ϕ).

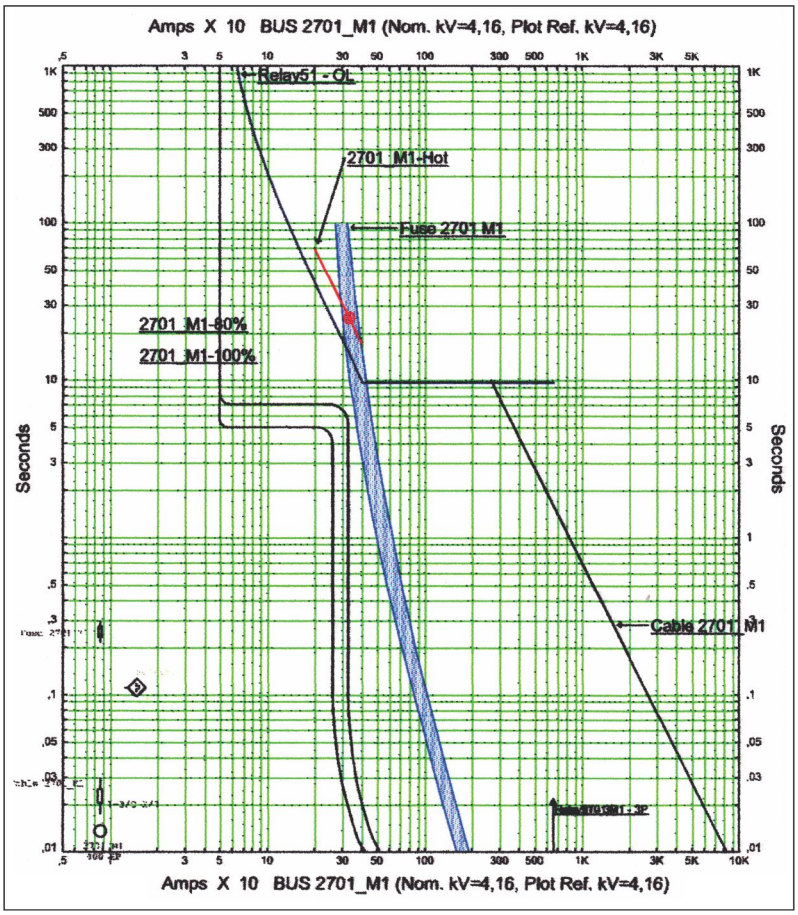


Figura 4.28: Ajuste de protecciones del motor 2701M

2. **Subestación unitaria 8102**
   Las protecciones eléctricas del transformador de la subestación unitaria 8102 consisten en un relé multifunción para el primario y un fusible de media tensión para el secundario. Este sector se observa en el diagrama unilineal de la Figura 4.27.

   - **Fusible 51-8102**
     El fusible 51-8102 debe respaldar al fusible 2701M1. En la Tabla 4.33 se observan las corrientes necesarias para el ajuste del fusible.

Tabla 4.33: Corrientes para el ajuste del fusible 51-8102

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]		Tipo de Falla
		Vista por:		
		Fusible 51-8102	Fusible 2701	
$I_{f\ máx\ fase}$	2701M1.2	4,28	4,66	3ϕ

El tiempo de máxima fusión del fusible 2701M1 para la falla máxima en la barra 2701M1.2 (4,66 [kA] para la falla 3ϕ) es de 0,0101 [s]. En la ecuación (4.56) se

calcula el tiempo de mínima fusión del fusible 51-8102.

$$t_{mín\ fusión} = 1,33 \cdot 0,0101 = 0,0134\ [s] \tag{4.56}$$

El fusible seleccionado tiene un tiempo de mínima fusión de 0,0138 [s], siendo mayor al tiempo calculado en la ecuación (4.56). Las curvas de ajuste se muestran en la Figura 4.29.

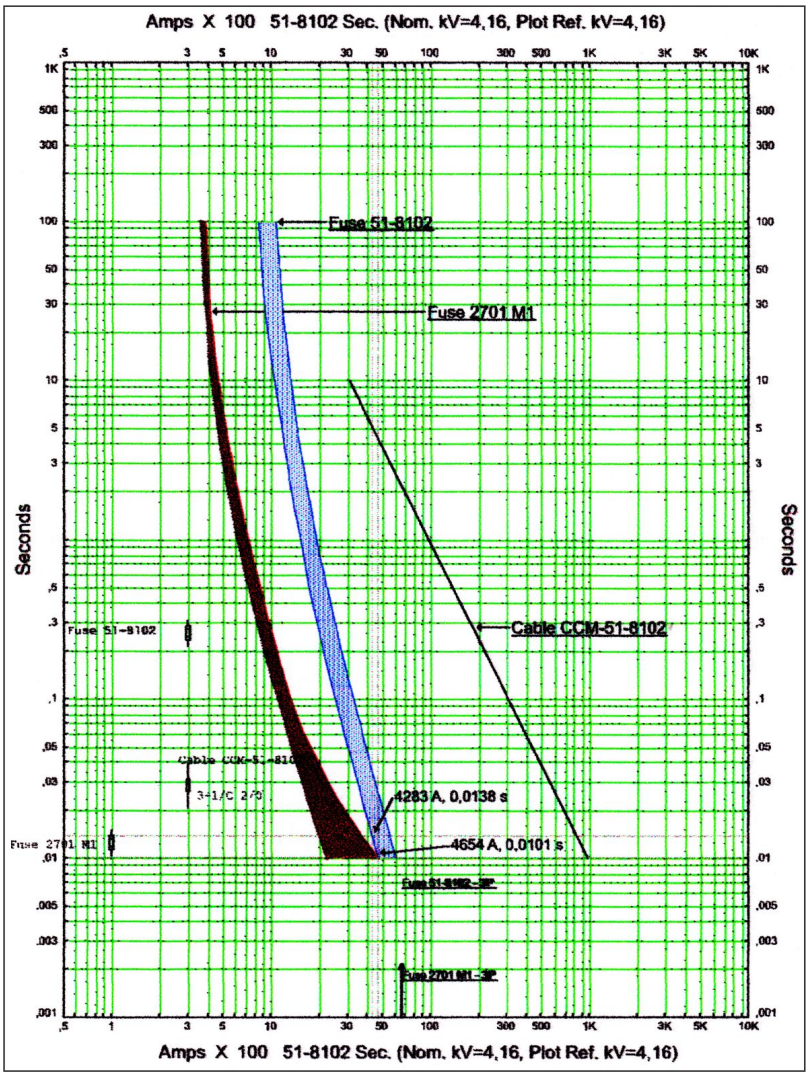


Figura 4.29: Ajuste de fusible 51-8102

En la Tabla 4.34 se describe las características del dispositivo seleccionado.

Tabla 4.34: Fusible 51-8102

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocicuito [kA]	U_n [kV]
General Electric	9F60 EJ-2	170	50	5,08

- **Primario**

Este sector está protegido por un relé multifunción marca "Square D Power Logic". Las corrientes de interés para el ajuste de protecciones se muestran en la Tabla 4.35.

Tabla 4.35: Corrientes del primario del transformador 8101XF

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	51-8102 sec.	1,36	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	CCM 51-8102	0,164	$1\phi - t$

La relación de transformación del transformador de corriente es de 75/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente nominal del primario del transformador es 87,48 [A]. En la ecuación (4.57) se calcula la corriente "pick-up" del relé. Se considera un 30 % de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,3 \cdot 87,48 \cdot \frac{5}{75} = 7,582\ [As] \tag{4.57}$$

Debe proporcionar respaldo al fusible 51-8102 por lo tanto debe ser sensible a la corriente mínima provocado por un cortocircuito en el CCM-518102 (0,164 [kA] para falla $1\phi - t$). En la ecuación (4.58) se calcula N para este nivel de corriente.

$$N = \frac{164 \cdot \frac{5}{75}}{7,582} = 1,759 > 1,5 \tag{4.58}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. La selección del "lever" debe considerar el tipo de conexión del transformador. En la Tabla 4.36 se resume el efecto en los tiempos de operación de los relés de sobrecorriente involucrados.

Tabla 4.36: Corrientes de cortocircuito en la barra 51-8102 sec.

Falla	8102 pri.		8102 sec.			$\Delta\ t$ [s]
	I_{pri} [kA]	t_{op} [s]	I_{sec} [kA]	I^*_{sec} [kA]	t_{op} [s]	
3ϕ	1,36	1,25	4,31	1,36	0,01	1,24
$1\phi - t$	0,248	66,4	0,961	0,303	8,19	58,21
2ϕ	1,35	1,26	3,73	1,176	0,0153	1,2447
$2\phi - t$	1,35	1,26	3,82	1,204	0,0138	1,2462

De la Tabla 4.36 se observa que el delta de tiempo menor se origina para la falla trifásica, es por esto que la coordinación se realiza para esta condición. En la ecuación (4.59) se calcula el tiempo de operación que debe tener el 51F.

$$t_{8102XF\ pri.} = 0,01 + 0,3 = 0,31\ [s] \tag{4.59}$$

Para que el relé opere en un tiempo mayor al calculado en la ecuación (4.59), permita la coordinación con la protección aguas abajo, proteja al transformador y al conductor aguas abajo se selecciona un "lever" igual a 10,04.

- **Sobrecorriente instantáneo (50F):** esta función debe proteger hasta la barra 51-8102 sec. La máxima corriente de cortocircuito es de 1,36 [kA] para falla 3ϕ. En la ecuación (4.60) se calcula la corriente "pick-up" de esta función.

$$I_{pick-up\,50F} = 1,3 \cdot 1360 \cdot \frac{5}{75} = 117,867\ [As] \tag{4.60}$$

En la Figura 4.30 se observa el ajuste de protecciones del relé del primario del transformador 8102XF, la cual coordina con la protección aguas abajo, protege al transformador y permite su energización.

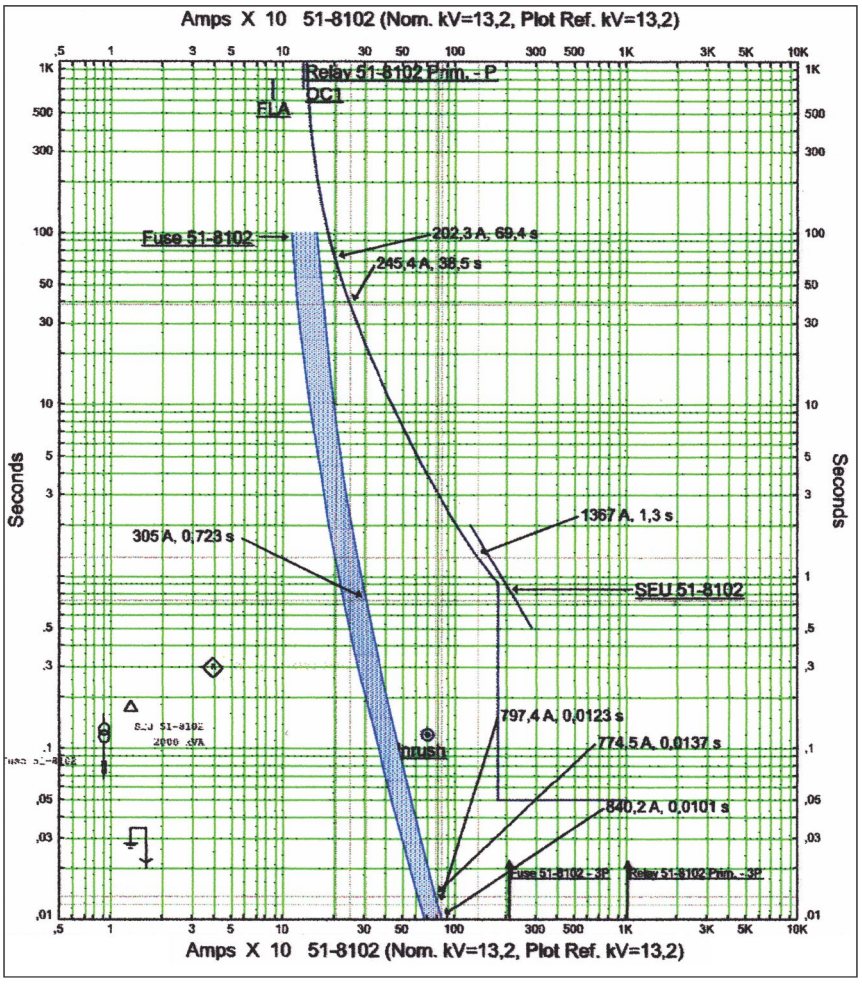


Figura 4.30: Ajuste de relé de protección del primario del transformador 8102XF

3. **CCM-1-8601MC**
   En el diagrama unilineal de la Figura 4.27 se observa este sector

   - **Fusible filtro 51-2401**

En la Tabla 4.37 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de este fusible.

Tabla 4.37: Corrientes para el ajuste del fusible 51-2401

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	Filtro 51.2	4,3	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	Filtro 51	0,314	$1\phi - t$

- **Corriente nominal:** la corriente nominal del banco de condensadores es de 22,3 [A]. En la ecuación (4.61) se calcula la corriente nominal del fusible.

$$I_{nom} = 1,35 \cdot 22,3 = 30,105\ [A] \tag{4.61}$$

- **Corriente de puesta de servicio:** en este item se considera la máxima corriente de cortocircuito (4,3 [kA] para falla 3ϕ). El fusible seleccionado debe cumplir con la siguiente condición de corriente de puesta en servicio:

$$\begin{aligned} I^2 \cdot t &= 2,65\sqrt{(1+(X/R)^2)} \cdot I_n \cdot I_{cc} \\ &= 2,65\sqrt{(1+(3,12)^2)} \cdot 22,3 \cdot 4,3 \\ &= 836,546\ [J] \end{aligned} \tag{4.62}$$

  El valor de energía calculado en (4.62) se compara con el valor de energía para 0,01 [s] del fusible, lo cual se calcula en la ecuación (4.63).

$$I^2 \cdot t = 0,7 \cdot 0,01 \cdot 429^2 = 1288,287\ [J] \tag{4.63}$$

  De la comparación de estos valores se infiere que el fusible no operará cuando el banco de condensadores se energice.

En la Figura 4.31 se observa el fusible filtro 51-2401. Este protege al banco de condensadores como al conductor del alimentador

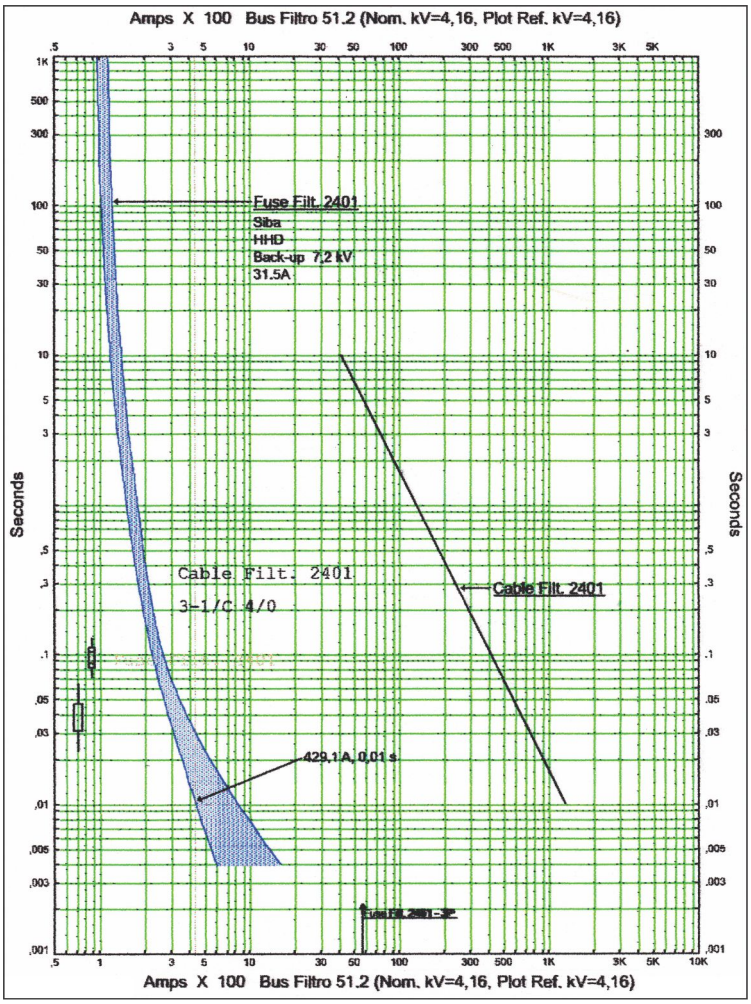


Figura 4.31: Fusible filtro 51-2401

- **Fusible primario transformador 51-8602**
  En la Tabla 4.38 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de esta protección.

Tabla 4.38: Corrientes de interés primario del transformador 51-8602

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud	Tipo de Falla
I_n	Primario T.8602	69,39 [A]	-
$I_{f\ máx\ fase}$	51-8601 pri.	4,78 [Ka]	3ϕ

El ajuste de esta protección debe considerar los siguientes puntos:

- No debe dañarse con:
  - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 69,39 = 104,085\ [A]$ para $t \to \infty$
  - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 69,39 = 832,68\ [A]$ durante 0,10 [s]
- Debe fundirse con:
  - $6 \cdot I_n = 6 \cdot 69,39 = 416,34\ [A]$ para $t < 300$ [s].

- Punto ANSI$=\frac{1}{0,04} \cdot 0,58 \cdot 69,39 = 1006,155\ [A]$ para $t \leq 2\ [s]$.

En la Figura 4.32 se observa que la selección es correcta ya que se cumplen los puntos anteriormente descritos.

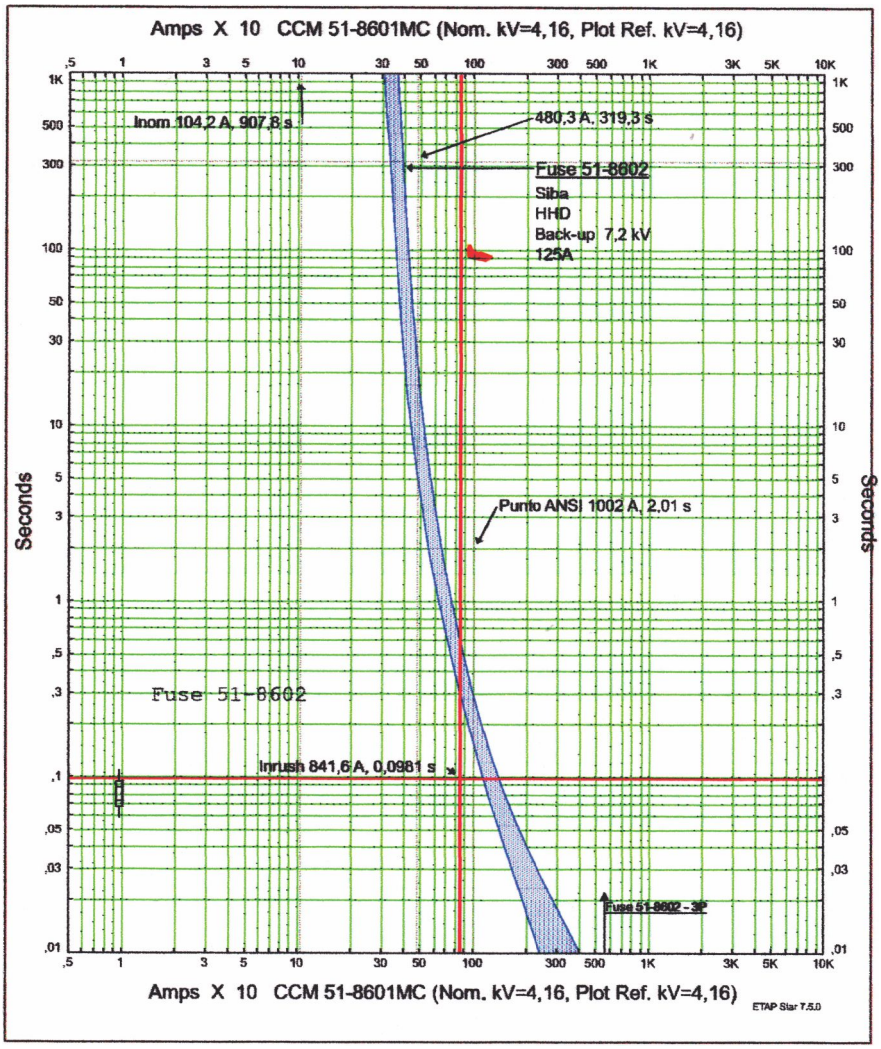


Figura 4.32: Fusible del primario del transformador 8602

En la Tabla 4.39 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.39: Fusible del primario del transformador 8602

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Back-Up	125	63	7,2

- **Motor 51-2401**

  En la Tabla 4.40 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de protecciones del motor.

Tabla 4.40: Corrientes del motor 51-2401

Corriente	Magnitud [A]
I_n	90,51
I_{rb}	497,805

- **Ajuste de Fusible tipo *R***
  En la ecuación (4.64) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R

$$n = \frac{497,805}{100} = 4,978 \longrightarrow 5 \tag{4.64}$$

  El tiempo de máxima fusible del fusible es de 0,0163 [s] para la falla máxima (3,66 [kA] para falla 3ϕ).
- **Ajuste de protección de sobrecarga (relé GE Multilin 269)**
  En la ecuación (4.65) se calcula la corriente "pick-up" del relé de sobrecarga lento.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 90,51 = 95,036\ [A] \tag{4.65}$$

  La curva seleccionada es la N°5 dado que permite que el motor pueda entrar en servicio y que esté protegido.

En la Figura 4.33 se observa el fusible de protección del motor. Se verifica que el motor es protegido correctamente y se permite su arranque. Además se protege al conductor que llega al motor.

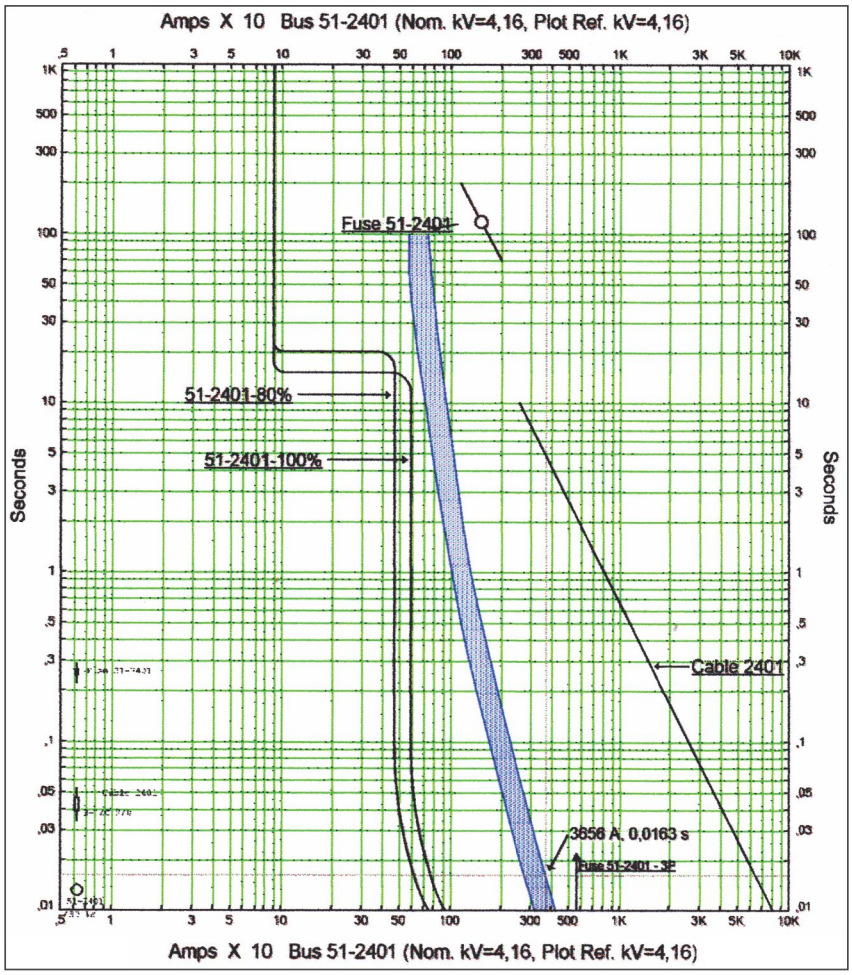


Figura 4.33: Ajuste de protecciones motor 51-2401

4. **Transformador 8101XF**
   Las protecciones eléctricas del transformador 8101XF consisten en un relé Square D Power Logic (para el primario y secundario), los cuales rigen la operación de su respectivo interruptor. Las protecciones descritas se observan en el diagrama unilineal de la Figura 4.27.

   - **Secundario**
     El relé de protección del secundario del transformador deben coordinarse con el fusible de protección del motor 51-2401 (protección más lenta aguas abajo). Las corrientes de interés para el ajuste de esta protección se muestran en la Tabla 4.41.

Tabla 4.41: Corrientes de interés del secundario del transformador 8101XF

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]		Tipo de Falla
		Vista por:		
		Fusible 51-2401	Relé 51-860MC	
$I_{f\ máx\ fase}$	51-2401.2	4,53	4,14	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	51-2401	1,08		$1\phi - t$

Las relaciones de transformación de los transformadores de corriente de fase y residual son 300/5 y 200/5 respectivamente.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente "pick-up" se considera igual a 600 [A], dado que con este valor se proteje el conductor aguas abajo y se permite la coordinación con el fusible 51-2401. En la ecuación (4.66) se muestra el cálculo de la corriente "pick-up" referida al secundario del transformador de corriente.

$$I_{pick-up\ 51F} = 600 \cdot \frac{5}{300} = 10\ [As] \tag{4.66}$$

Este relé debe proporcionar respaldo al fusible que proteje al motor 51-2401 por ende debe ser sensible a la falla mínima que ocurre en la barra de este motor (1,08 [kA] para falla $1\phi - t$). En la ecuación se observa el calculo de N.

$$N = \frac{1080 \cdot \frac{5}{300}}{10} = 1,8 > 1,5 \tag{4.67}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El "lever" se selecciona para la falla máxima en la barra 51-2401.2 (valores de corriente en la Tabla 4.41). El tiempo máximo de aclaramiento del fusible 51-2401 es de 0,0143 [s]. En la ecuación (4.68) se calcula el tiempo mínimo de operación del 51F.

$$t_{mín\ 51F\ 8101\ sec.} = 1,33 \cdot 0,0143 = 0,019\ [s] \tag{4.68}$$

El "lever" seleccionado es de 0,1 con el cual la falla máxima es aclarada en 0,213 [s].

  - **Sobrecorriente instantáneo (50F):** para el cálculo de la corriente "pick-up" se debe considerar las corrientes máximas de cortocircuito (ver Tabla 4.42) en las barras que delimitan el sector que debe proteger

Tabla 4.42: Corrientes para el ajuste de 50F 8101XF sec.

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	8101 sec.	4,25	3ϕ
$I_{f\ máx\ fase}$	CCM 51-8601MC	4,14	3ϕ

Dada la pequeña diferencia entre las corrientes calculadas en la Tabla 4.42 se desactiva esta función.

En la Figura 4.34 se observa el ajuste de las protecciones de sobrecorriente de fase.

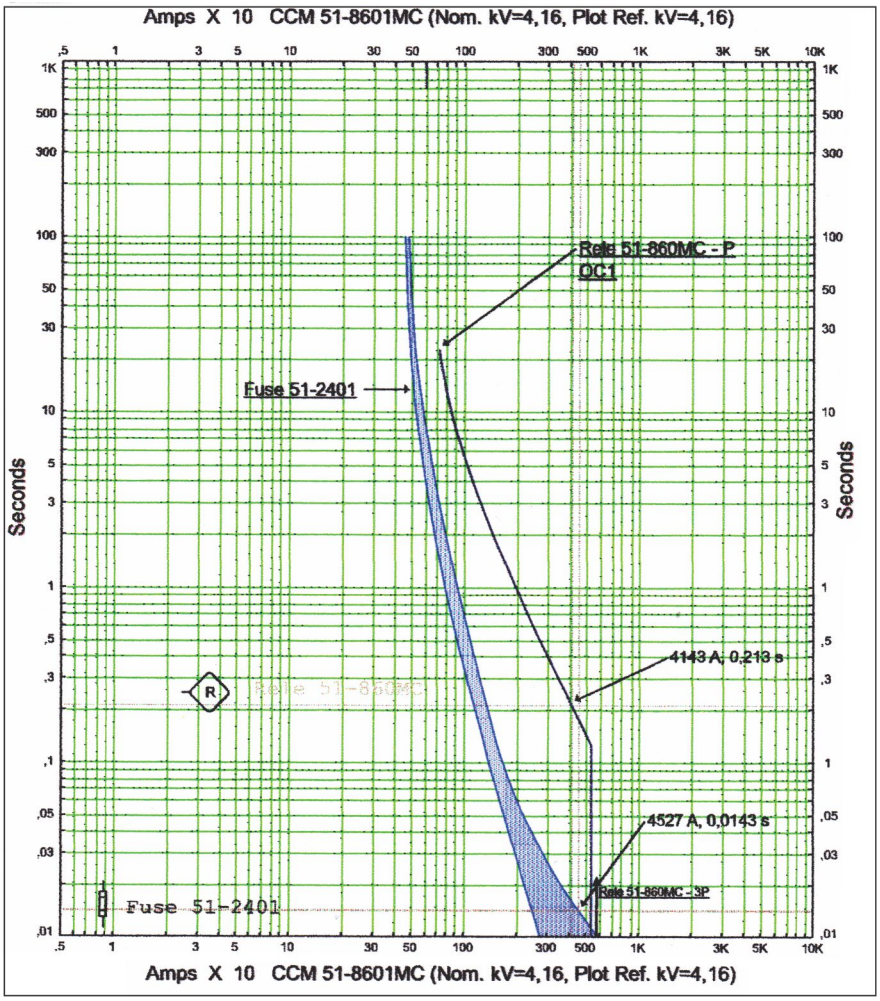


Figura 4.34: Ajuste 51F del secundario del transformador 8101XF

- **Primario**
  Las corrientes de interés para el ajuste de protecciones se muestran en la Tabla 4.43.

Tabla 4.43: Corrientes de interés del primario del transformador 8101XF

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	8101 sec.	1,34	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	CCM 51-8601MC	0,198	$1\phi - t$

La relación de transformación del transformador de corriente es de 500/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase**

- **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente nominal del primario del transformador es 87,48 [A]. En la ecuación (4.69) se calcula la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\,51F} = 1,1 \cdot 87,48 \cdot \frac{5}{500} = 0,962\ [As] \tag{4.69}$$

Esta función debe proporcionar respaldo respaldo al 51F del secundario del transformador 8104XF, por ende debe ser sensible a la corriente mínima de cortocircuitos en el CCM-51-8601MC (0,066 [kA] para falla $1\phi - t$). En la ecuación (4.70) se calcula N para este nivel de corriente.

$$N = \frac{164 \cdot \frac{5}{75}}{7,582} = 1,759 > 1,5 \tag{4.70}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. La selección del "lever" debe considerar el tipo de conexión del transformador. En la Tabla 4.44 se resume el efecto en los tiempos de operación de los relés de sobrecorriente involucrados.

Tabla 4.44: Corrientes de cortocircuito para falla en la barra 8101 sec.

Cortocircuito	8102 pri.		8102 sec.			$\Delta\ t$ [s]
	I_{pri} [kA]	t_{op} [s]	I_{sec} [kA]	I^*_{sec} [kA]	t_{op} [s]	
3ϕ	1,34	0,616	4,25	1,34	0,302	0,314
$2\phi - t$	1,34	0,616	3,77	1,188	0,383	0,232
2ϕ	1,34	0,616	3,69	1,162	0,402	0,214
$1\phi - t$	0,208	31,6	0,819	0,258	9,34	22,26

De la Tabla 4.44 se observa que el menor delta de tiempo se origina para la falla bifásica, es por esto que la coordinación se realiza para esta condición. En la ecuación (4.71) se calcula el tiempo de operación que debe tener el 51F del primario del transformador.

$$t_{8101XF\ pri.} = 0,402 + 0,300 = 0,702\ [s] \tag{4.71}$$

El "lever" que cumple con el tiempo calculado en la ecuación (4.71) es de 0,99

- **Sobrecorriente instantáneo (50F):** esta función debe proteger hasta la barra 51-8101 sec. La máxima corriente de cortocircuito es de 1,34 [kA] para falla 3ϕ. En la ecuación (4.72) se calcula la corriente "pick-up" de esta función.

$$I_{pick-up\,50F} = 1,3 \cdot 1340 \cdot \frac{5}{500} = 17,42\ [As] \tag{4.72}$$

En la Figura 4.35 se observa el ajuste de protecciones del relé del primario del transformador 8102XF, la cual coordina con la protección aguas abajo, protege al transformador y permite su energización.

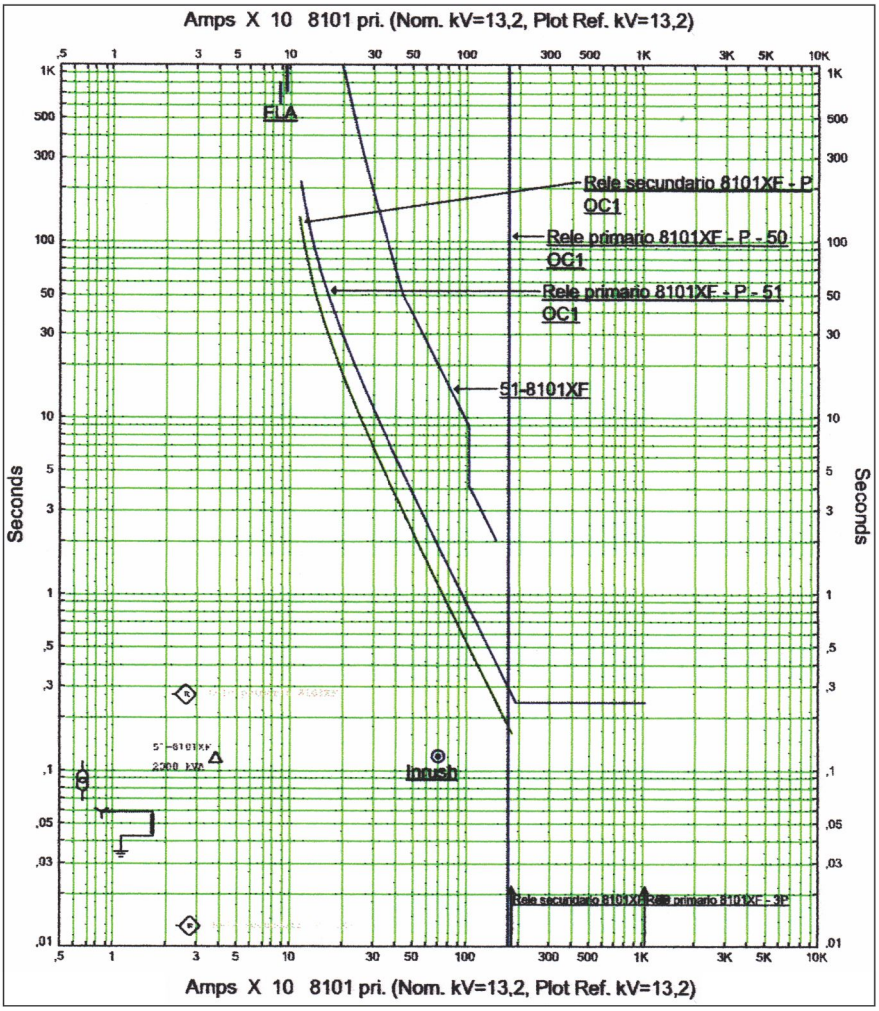


Figura 4.35: Ajuste del relé de protección del primario del transformador 8101XF

5. **Cabecera alimentador 1A**
   La protección eléctrica de la cabecera del alimentador 1A consiste en un relé Multilin 750R (funciones 51F y 50F) el cual rige la operación de su respectivo interruptor. La protección descrita se observa en la Figura 4.27. Las corrientes de interés para el ajuste de esta protección se muestran en la Tabla 4.45 .

Tabla 4.45: Corrientes de interés para el ajuste de protección de la cabecera 1A

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]		Tipo de Falla
		Vista por:		
		Relé 51-8102 pri.	Relé cabecera 1A	
$I_{f\ máx\ fase}$	51-8102 pri.	7,8	7,53	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	51-8102 sec.	0,201		$1\phi - t$

La relación de transformación del transformador es de 400/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente "pick-up" se selecciona de tal forma que el relé pueda coordinar en todo momento con la protección aguas abajo más lenta (51F primario transformador 8102XF). La corriente "pick-up" tendrá un valor de 134 [A]. En la ecuación (4.73) se realiza el cálculo de la corriente "pick-up" referida al secundario del transformador de corriente.

$$I_{pick-up\,51F} = 134 \cdot \frac{5}{400} = 1,675\ [As] \tag{4.73}$$

    El relé debe ser sensible a la falla mínima (0,201 [kA] para falla $1\phi - t$) que ocurre en la barra 51-8102 sec. En la ecuación (4.74) se muestra el resultado de esto.

$$N = \frac{201 \cdot \frac{5}{400}}{1,675} = 1,5 \tag{4.74}$$

    N es igual a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El "lever" se ajusta para la falla máxima en la barra 51-8102 pri. Su tiempo de operación debe ser como mínimo de 0,3 [s] más lento que la operación del 51F de la barra 51-8102 pri. el cual opera en 0,649 [s] para la falla máxima (7,8 [kA] para falla 3ϕ). En la ecuación (4.75) se calcula el tiempo de operación el tiempo de operación de la cabecera del alimentador 1A.

$$t_{51F\,1A} = 0,649 + 0,3 = 0,949\ [s] \tag{4.75}$$

    Se selecciona un "lever" de 21,14. Se aclara la falla máxima (7,8 [kA] para falla 3ϕ) en 1,26 [s].
  - **Sobrecorriente instantáneo (50F):** se ajusta para el 130 % de la corriente para la falla máxima en la barra 8102 pri. (7,8 [kA] para falla 3ϕ). En la ecuación (4.76) se calcula su ajuste.

$$I_{pick-up\,50F} = 1,3 \cdot 7880 \cdot \frac{5}{400} = 128,05\ [As] \tag{4.76}$$

    En la Figura 4.36 se observa el ajuste de la protección de sobrecorriente (51F-50F) del alimentador 1A. Esta protección cumple con la coordinación con la protección aguas abajo, como además de proteger a los conductores de su sector.

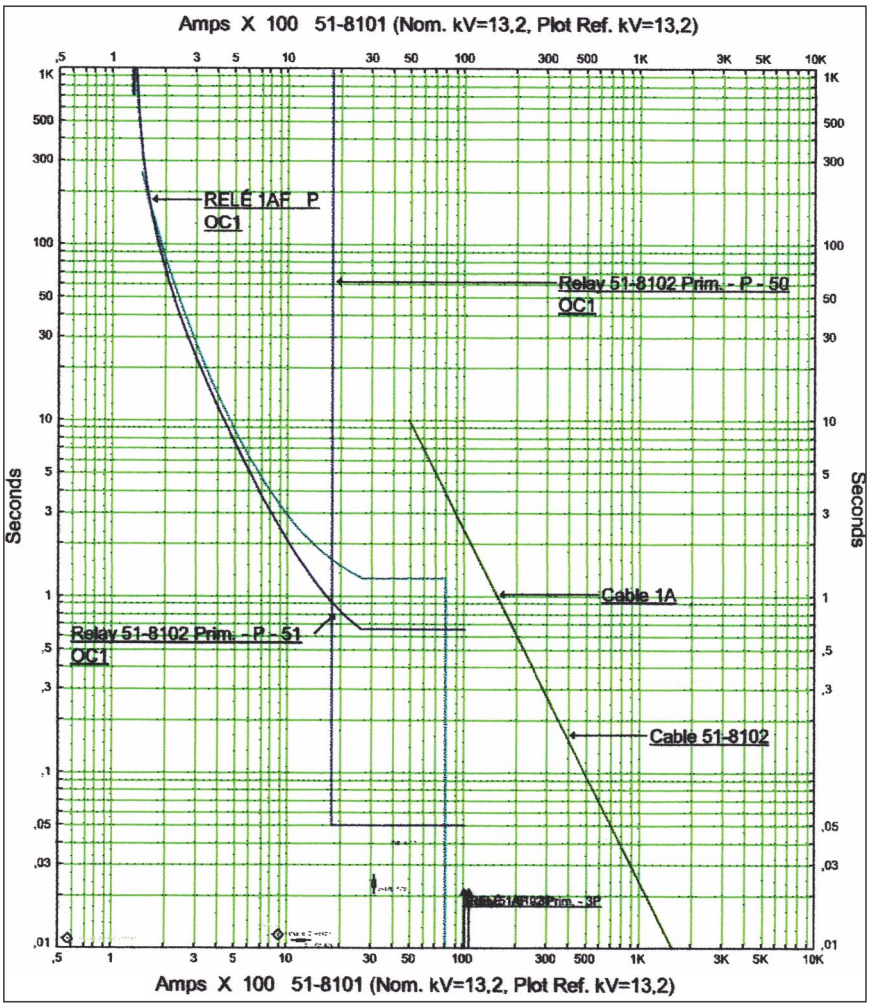


Figura 4.36: Ajuste de protecciones 51F-50F de la cabecera del alimentador 1A

4.3.5. Alimentador 4A

En la Figura 4.37 se observa el diagrama unilineal de este alimentador.

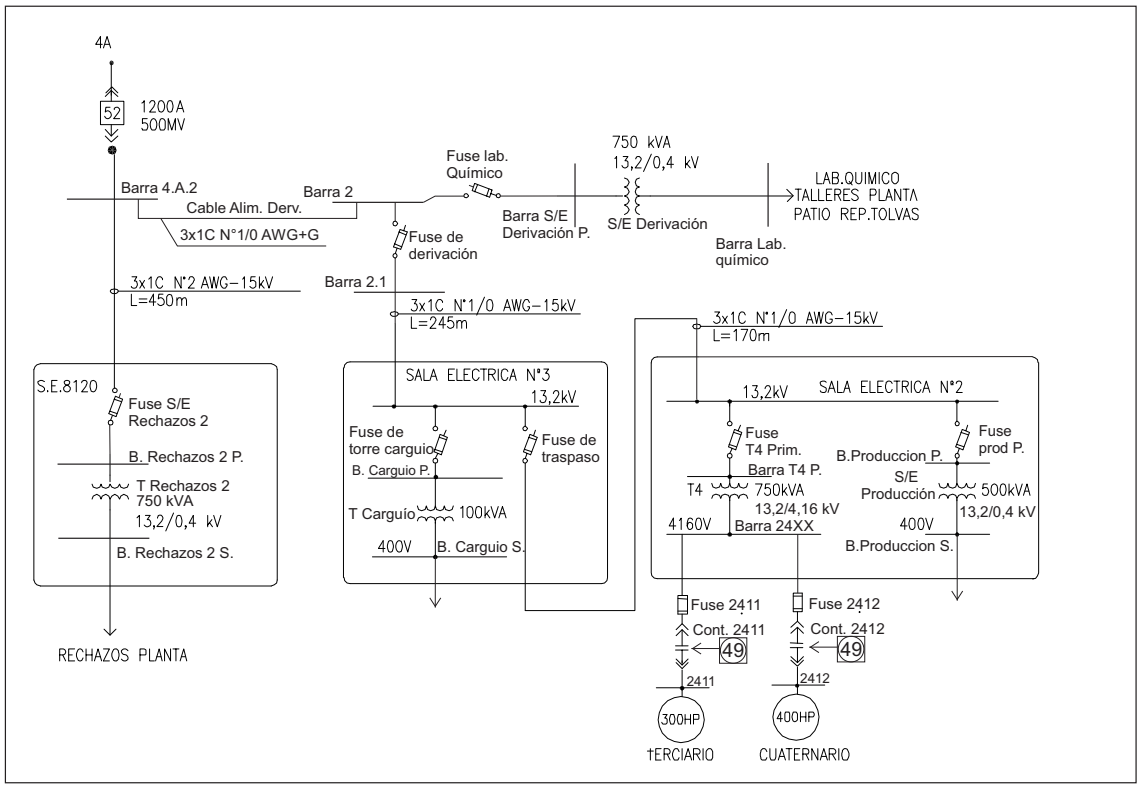


Figura 4.37: Diagrama unilineal alimentador 4A

- **Sala eléctrica N°2**
  La sala eléctrica N°2 alimenta electricamente al sector de chancadores y la S/E producción. A continuación se muestra el ajuste de las protecciones asociadas a estos sectores.

  - **Sector Chancadores: Terciario - Cuaternario**
    La topología de este sector se observa en la Figura 4.37.

    - **Motor 2411M (chancador terciario)**
      En la Tabla 4.46 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de protecciones del motor.

Tabla 4.46: Corrientes del motor 2411M

Corriente	Magnitud
I_n	37,81
I_{rb}	226,86

      - **Ajuste de fusible tipo *R***
        En la ecuación (4.77) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R

$$n = \frac{245,765}{100} = 2,458 \approx 3 \tag{4.77}$$

- ◇ **Ajuste protección de sobrecarga (GE Multilin 269)**
  En la ecuación (4.78) se calcula la corriente "pick-up" del relé de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 37,81 = 39,701\ [A] \tag{4.78}$$

  La curva seleccionada es la N°4. En la Figura se observa el ajuste de protecciones del motor 2411M, corroborándose que el equipo queda protegido y se permite correctamente su arranque. La falla máxima (2,344 [kA] para falla 3ϕ) en la barra 2411 es aclarada en 0,018 [s].

- ○ **Motor 2412M (chancador cuaternario)**
  En la Tabla 4.47 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de protecciones del motor.

Tabla 4.47: Corrientes del motor 2412M

Corriente	Magnitud
I_n	50,27
I_{rb}	326,755

  - ◇ **Ajuste de fusible tipo *R***
    En la ecuación (4.79) se calcula el coeficiente n que acompaña a la letra R

$$n = \frac{326,755}{100} = 3,268 \approx 4 \tag{4.79}$$

  - ◇ **Ajuste protección de sobrecarga (GE Multilin 269)**
    En la ecuación (4.80) se calcula la corriente "pick-up" del relé de sobrecarga.

$$I_{pick-up} = 1,05 \cdot 50,27 = 52,784\ [A] \tag{4.80}$$

    La curva seleccionada es la N°5. En la Figura 4.38 se observa el ajuste de protecciones del motor 2412M, corroborándose que el equipo queda protegido y se permite correctamente su arranque. La falla máxima (2,281 [kA] para falla 3ϕ) en la barra 2412 es aclarada en 0,019 [s].

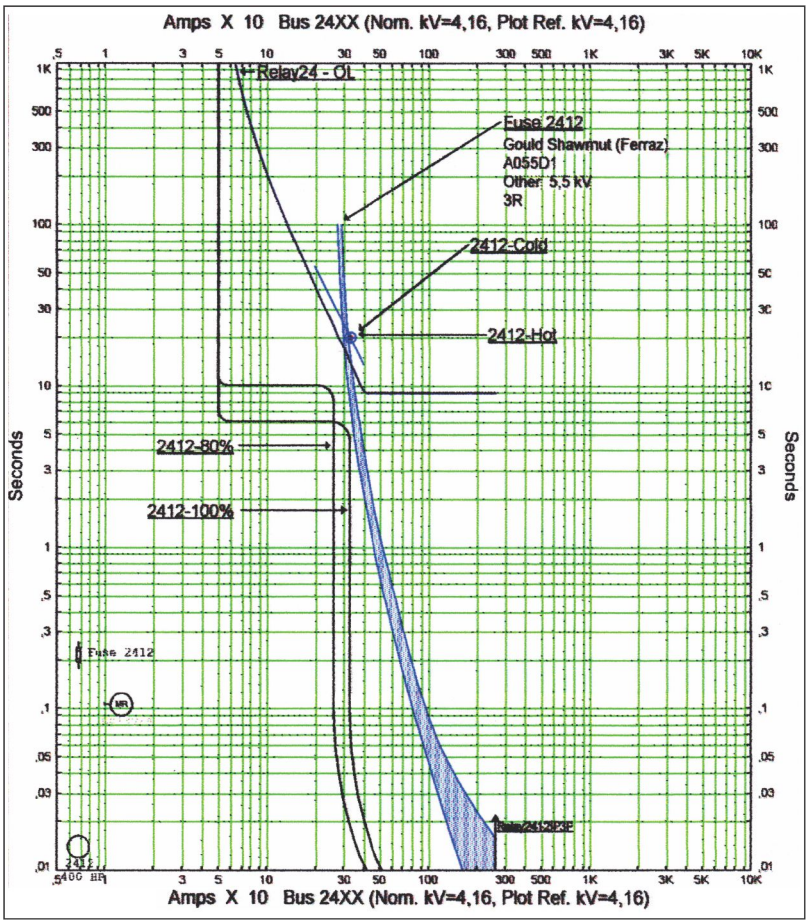


Figura 4.38: Ajuste de protecciones del motor 2412M

- **Primario T4 (Dyn1)**
  La coordinación es realizada con respecto al fusible 2411 (dado que es el fusible más lento aguas abajo). En la Tabla 4.48 se muestran las corrientes de interés para su selección.

Tabla 4.48: Corrientes para el ajuste de protección del primario del T4

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla	Vista por
$I_{f\ máx\ fase}$	2411	2,344	3ϕ	Fuse 2411
$I_{f\ máx\ fase}$	2411	0,621	3ϕ	Fuse prim. T4

La corriente nominal del primario de este transformador es de 32,8 [A]. El ajuste de esta protección debe considerar los siguientes puntos:

- No debe dañarse con:
  - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 32,8 = 49,2\ [A]$ para $t \to \infty$
  - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 32,8 = 393,6\ [A]$ durante 0,10 [s]
- Debe fundirse con:

- $\diamond$ $6 \cdot I_n = 6 \cdot 32,8 = 196,8$ $[A]$ para $t < 300$ [s].
- $\diamond$ Punto ANSI$=\dfrac{1}{0,052} \cdot 0,58 \cdot 32,8 = 365,846$ $[A]$ para $t \leq 3$ $[s]$.

- La curva tiempo mínimo de fusión del fusible ajustada debe encontrarse para corrientes hasta 0,621 [kA] por encima de la curva del tiempo máximo de fusión del fusible 2411. Para lo cual se debe cumplir la siguiente relación:

$$t_{mín\ fusión} = 1,33 \cdot 0,019 = 0,025\ [s] \tag{4.81}$$

En la Figura 4.39 se observa el cumplimiento de los puntos descritos. El tiempo de mínima fusión del fusible para la falla máxima es de 0,052 [s] siendo mayor al tiempo calculado en la ecuación (4.81).

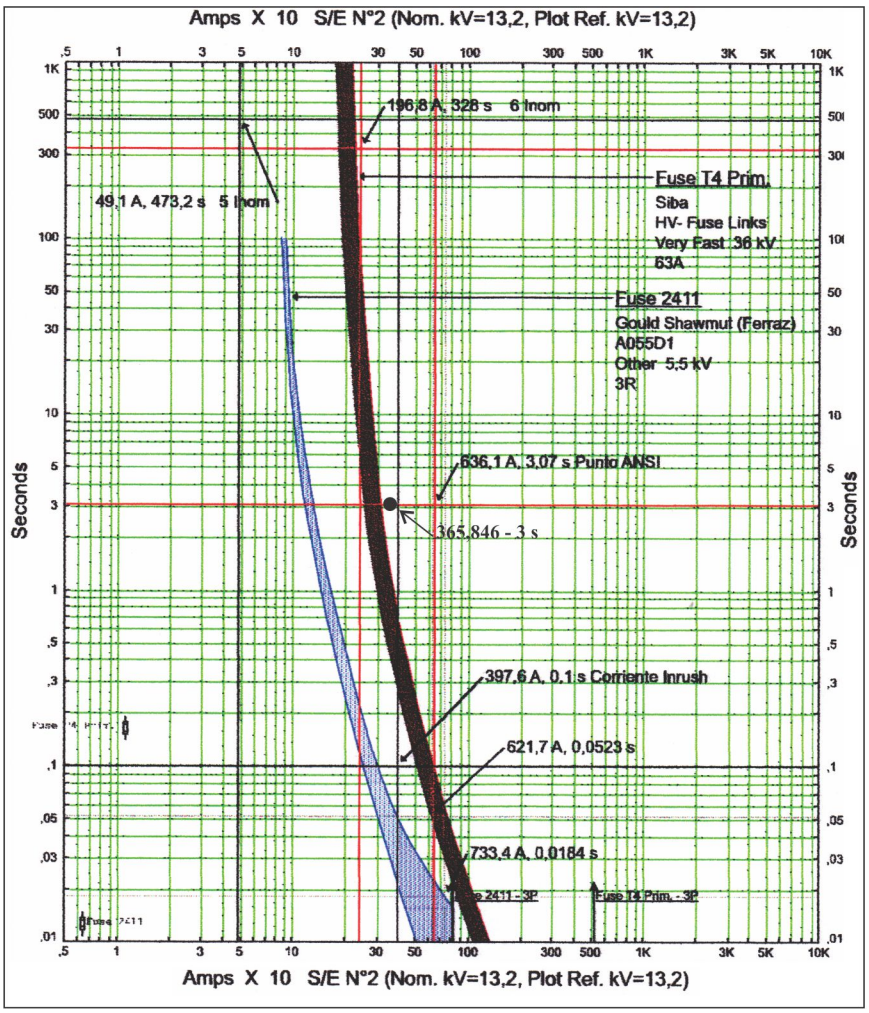


Figura 4.39: Fusible del primario del transformador T4

En la Tabla 4.49 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.49: Fusible del primario del transformador T4

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Very Fast Speed	63	40	17,5

- **Primario S/E producción**
  La corriente nominal del primario del transformador es de 21,87 [A]. El ajuste de protección debe considerar los siguientes puntos:
  - No debe dañarse con:
    - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 21,87 = 76,895\ [A]$ para $t \to \infty$
    - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 21,87 = 262,44\ [A]$ durante 0,10 [s]
  - Debe fundirse con:
    - $6 \cdot I_n = 6 \cdot 21,87 = 174,96\ [A]$ para $t < 300$ [s].
    - Punto ANSI=$\dfrac{1}{0,04} \cdot 0,58 \cdot 21,7 = 317,115\ [A]$ para $t \leq 3\ [s]$.

  En la Figura 4.40 se observa el cumplimiento de los puntos descritos.

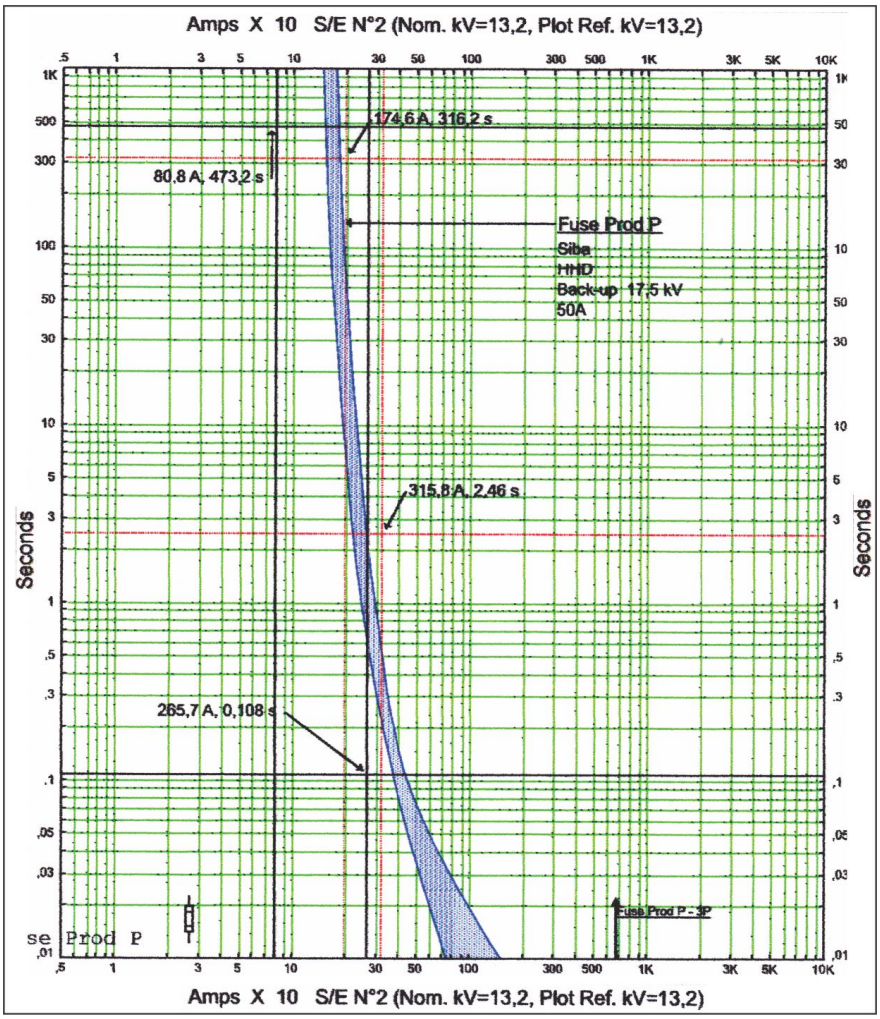


Figura 4.40: Fusible del primario de la S/E producción

En la Tabla 4.50 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.50: Fusible del primario de la S/E producción

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Very Fast Speed	63	40	17,5

- **S/E N° 3**
  Este sector se observa en el diagrama unilineal de la Figura 4.37.

  - **Fusible de traspaso**
    Esta protección debe coordinar con el fusibles del primario del transformador T4 (dado que es la protección más lenta aguas abajo). En la Tabla 4.51 se observan las corrientes necesarias para el ajuste del fusible.

Tabla 4.51: Corrientes de interés para el ajuste del fusible de traspaso

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	Primario T4	6,2	3ϕ

En la ecuación (4.82) se calcula el tiempo de mínima fusión de este fusible para la máxima corriente de cortocircuito (6,2 [kA] para falla 3ϕ) en la barra del primario T4

$$t\ mín\ fusión = 1,33 \cdot 0,004 = 0,005\ [s] \tag{4.82}$$

El fusible seleccionado tiene un tiempo de mínima fusión de 0,015 [s] siendo mayor al tiempo calculado en la ecuación (4.82). El ajuste se muestra en la Figura 4.41.

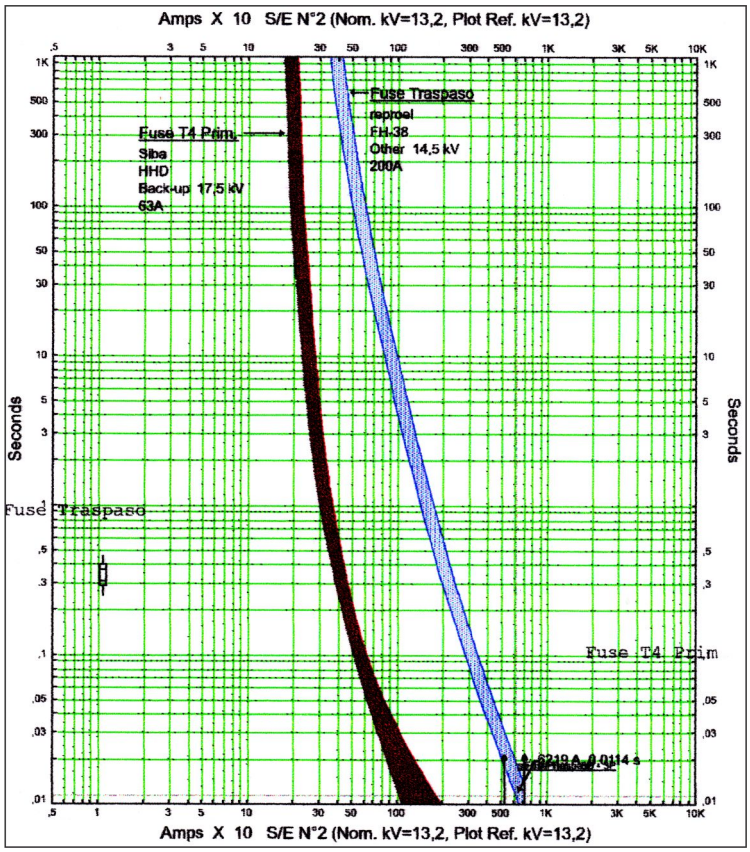


Figura 4.41: Fusible del primario de la S/E producción

En la Tabla 4.52 se describe las características del dispositivo seleccionado.

Tabla 4.52: Fusible de traspaso

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
REPROEL	FH-38	200	13,1	14,5

- **Primario S/E torre de carguío**
  La corriente nominal del primario del transformador es de 4,374 [A]. La selección de esta protección debe considerar los siguientes puntos:
  - No debe dañarse con:
    - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 4,374 = 6,561$ $[A]$ para $t \to \infty$
    - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 4,374 = 52,488$ $[A]$ durante 0,10 [s]
  - Debe fundirse con:
    - $6 \cdot I_n = 6 \cdot 4,374 = 174,96$ $[A]$ para $t < 300$ [s].
    - Punto ANSI$=\dfrac{1}{0,04} \cdot 0,58 \cdot 4,374 = 63,423$ $[A]$ para $t \leq 3$ $[s]$.

  En la Figura 4.42 se observa el cumplimiento de los puntos descritos.

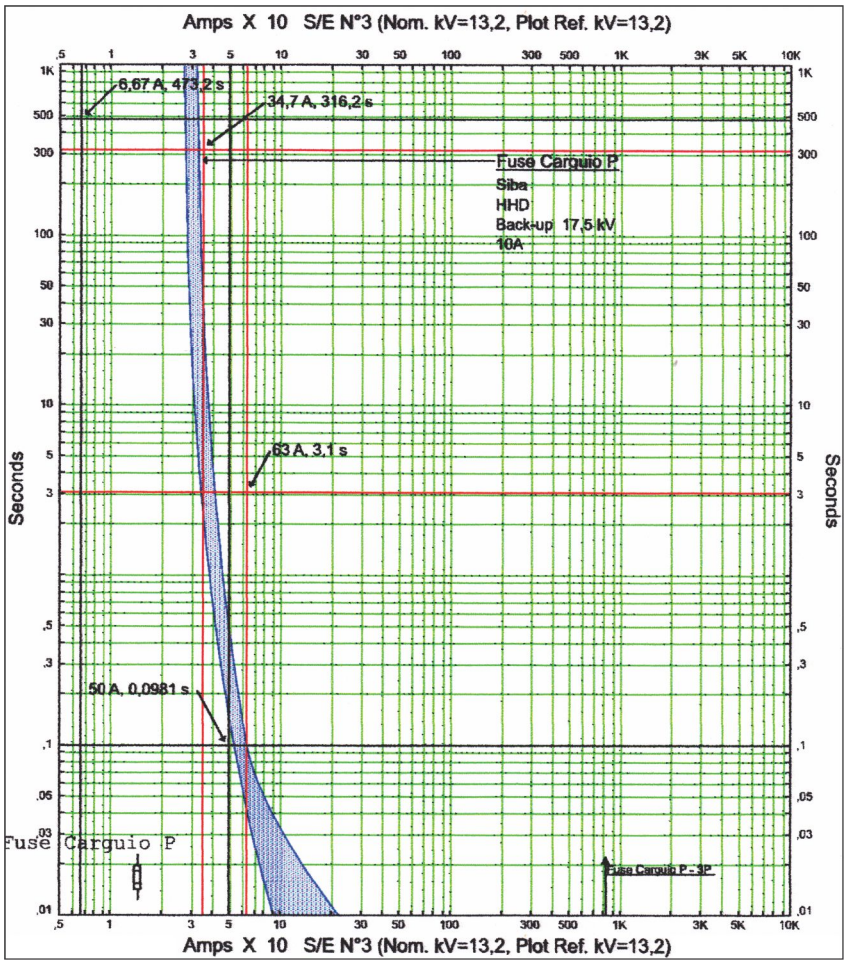


Figura 4.42: Fusible del primario del transformador de la torre de carguío

En la Tabla 4.53 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.53: Fusible del primario del transformador de la torre de carguío

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Back-up	10	63	17,5

- **Barra 4A.2**
  En la Figura 4.37 se observa el diagrama unilineal de este sector.

  - **Fusible de derivación**
    Este dispositivo debe coordinar con el fusible de traspaso dado que es el fusible más lento aguas abajo. En la Tabla 4.54 se muestran las corrientes de interés para el ajuste de esta protección.

Tabla 4.54: Corrientes de interés para el ajuste de fusible de derivación

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	Barra traspaso	7,14	3ϕ

El tiempo de máxima fusión del fusible de traspaso para la falla 3ϕ en la barra de traspaso es de 0,014 [s]. En la ecuación (4.83) se calcula el tiempo de mínima fusión del fusible de derivación.

$$t_{mín\ fusión} = 1,33 \cdot 0,014 = 0,019\ [s] \tag{4.83}$$

El fusible seleccionado tiene un tiempo mínimo de fusión de 0,05 [s] siendo mayor al tiempo calculado en la ecuación (4.83) y el conductor aguas abajo queda protegido por el fusible. En la Figura 4.43 se muestran las curvas del fusible de derivación, y del fusible de traspaso, de donde se observa que existe coordinación para todos los valores de corriente.

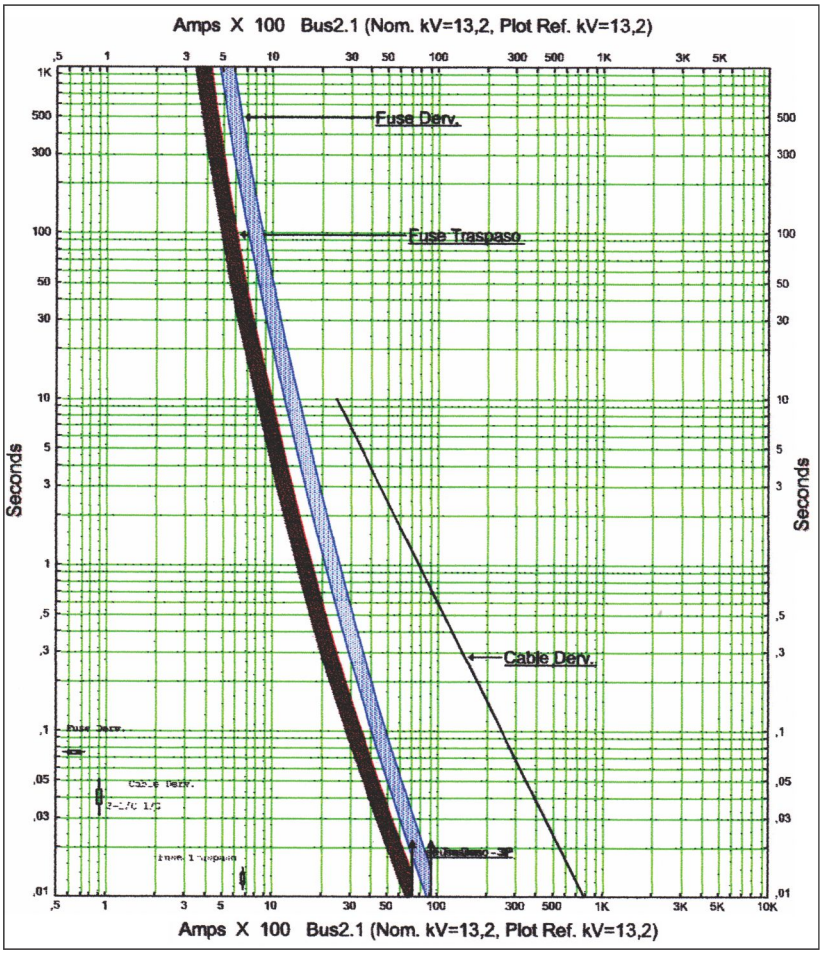


Figura 4.43: Fusible de derivación

En la Tabla 4.55 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.55: Fusible del primario del transformador de la torre de carguío

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
REPROEL	FH-38	315	13,1	17,5

- **Primario S/E derivación**
  La corriente del primario del transformador es de 32,8 [A]. La selección de esta protección debe considerar los siguientes puntos:
  - No debe dañarse con:
    - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 32,8 = 49,2\ [A]$ para $t \to \infty$
    - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 32,8 = 360,8\ [A]$ durante 0,10 [s]
  - Debe fundirse con:
    - $7 \cdot I_n = 7 \cdot 32,8 = 380,48\ [A]$ para $t < 300$ [s].
    - Punto ANSI=$\dfrac{1}{0,05} \cdot 0,58 \cdot 32,8 = 380,48\ [A]$ para $t \leq 3\ [s]$.

  En la Figura 4.44 se observa el cumplimiento de los puntos descritos.

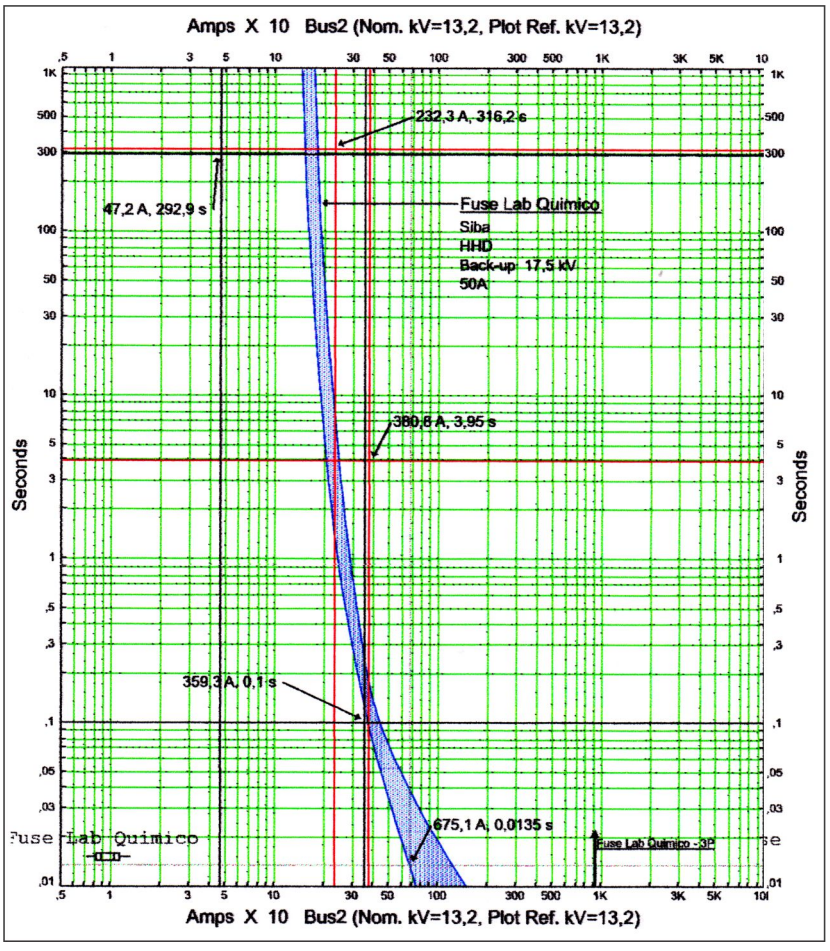


Figura 4.44: Fusible del primario del transformador de la S/E de Derivación

En la Tabla 4.56 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.56: Fusible del primario del transformador de la S/E de derivación

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Back-up	10	63	17,5

- **Primario S/E rechazos 2**
  La corriente del primario del transformador es de 32,8 [A]. La selección de esta protección debe considerar los siguientes puntos:
  - No debe dañarse con:
    - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 32,8 = 49,2\ [A]$ para $t \to \infty$
    - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 32,8 = 360,8\ [A]$ durante 0,10 [s]
  - Debe fundirse con:
    - $7 \cdot I_n = 7 \cdot 32,8 = 380,48\ [A]$ para $t < 300$ [s].
    - Punto ANSI=$\dfrac{1}{0,05} \cdot 0,58 \cdot 32,8 = 380,48\ [A]$ para $t \leq 3\ [s]$.

  En la Figura 4.45 se observa el cumplimiento de los puntos descritos.

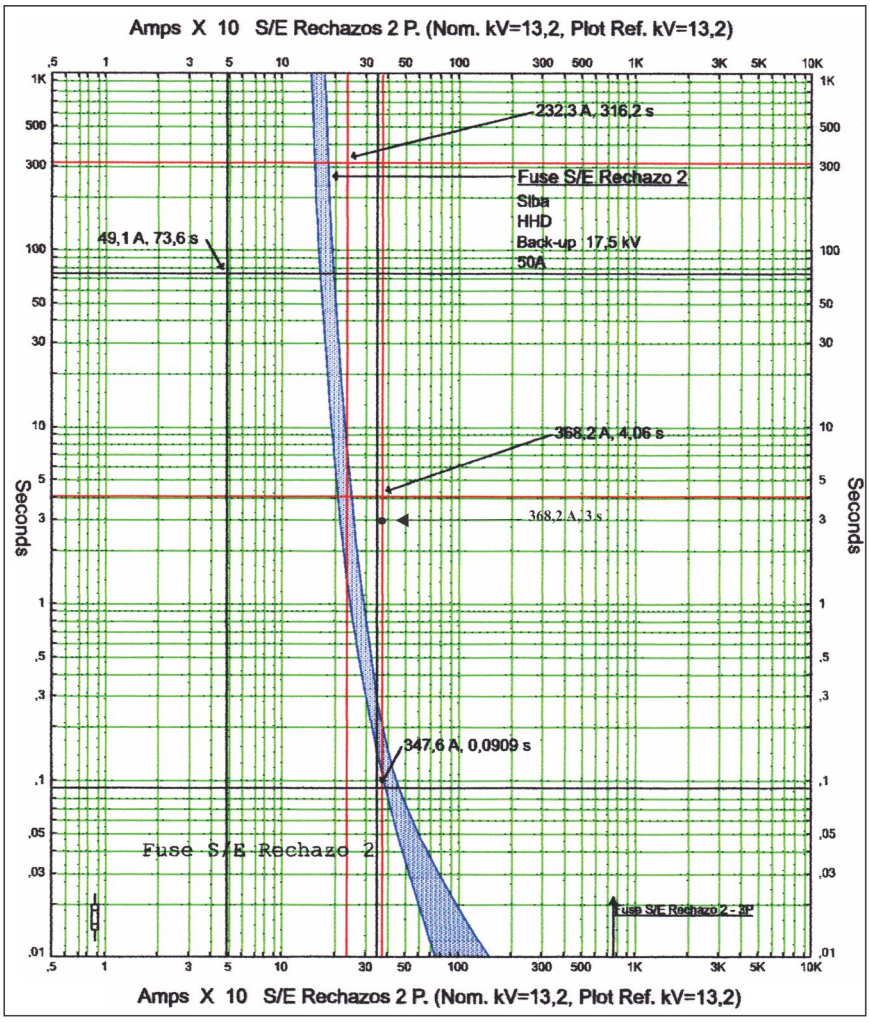


Figura 4.45: Fusible del primario del transformador de la S/E rechazos 2

En la Tabla 4.57 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.57: Fusible del primario del transformador de la S/E rechazos 2

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Back-up	50	63	17,5

- **Cabecera 4A**
  La protección eléctrica de la cabecera consiste en un relé Multilin 750R el cual rige la operación de su respectivo interruptor. Esta protección debe proteger el cable aguas abajo y además respaldar el funcionamiento derivación. Las corrientes de interés para el ajuste de esta protección se muestran en la Tabla 4.58.

Tabla 4.58: Corrientes de interés para el ajuste de la protección de la cabecera 4A

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	Bus 2	7,54	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	S/E N° 3	4,25	2ϕ

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 400/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la selección de la corriente "pick-up" se realiza de tal manera que proteja a los conductores aguas abajo, coordine con el fusible de traspaso y sea sensible a la corriente de falla mínima en la barra S/E N° 3. Se selecciona una corriente "pick-up" de 856 [A]. En la ecuación (4.84) se realiza el cálculo de la corriente "pick-up" referida al secundario del transformador de corriente.

$$I_{pick-up\ 51F} = 856 \cdot \frac{5}{400} = 10,7\ [As] \tag{4.84}$$

Este relé debe proporcionar respaldo al fusible de derivación, por ende debe ser sensible a la falla mínima que ocurre en la barra S/E N° 3. En la ecuación (4.85) se muestra el resultado de esto.

$$N = \frac{4250 \cdot \frac{5}{400}}{10,7} = 4,965 > 1,5 \tag{4.85}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El "lever" del relé se selecciona de tal manera que el tiempo de operación de la unidad de sobrecorriente sea como mínimo 1,33 veces mayor que el tiempo mmáximo de aclaramiento del fusible para la falla máxima en la barra 2.1. El fusible de derivación tiene un tiempo máximo de fusión para este nivel de corriente de 0,027 [s]. En la ecuación (4.86) se muestra el cálculo del tiempo mínimo de operación del relé.

$$t_{51F\ 4A} = 1,33 \cdot 0,027 = 0,036\ [s] \tag{4.86}$$

Para cumplir este tiempo y lograr la coordinación en todo momento se selecciona un "time dial" de 5.

- **Sobrecorriente instantáneo (50F):** este relé se ajusta para el 130 % de la corriente para la falla máxima en la barra 2. En la ecuación (4.87) se calcula su ajuste.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 7540 \cdot \frac{5}{400} = 122,525\ [As] \tag{4.87}$$

En la Figura 4.46 se observa el ajuste de la protección de sobrecorriente (51F-50F) del alimentador 4A. Esta protección cumple con la coordinación con la protección aguas abajo, como además de proteger a los conductores de su sector.

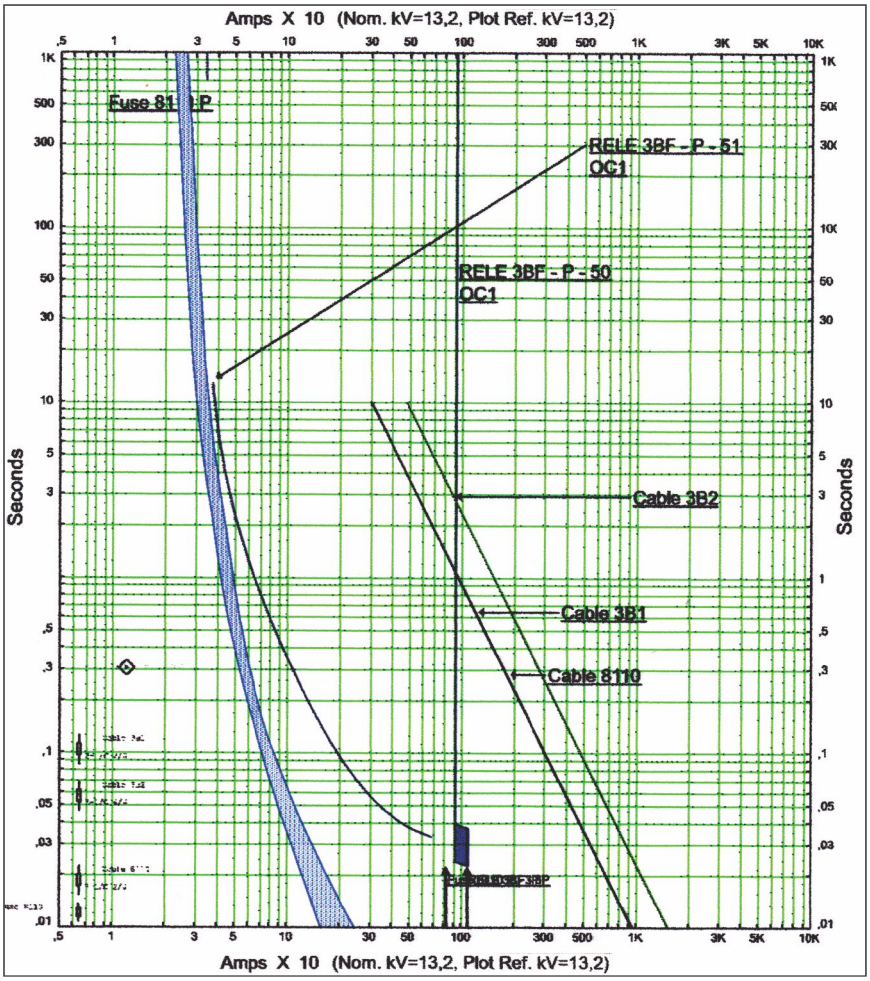


Figura 4.46: Ajuste de protecciones 51F-50F de la cabecera del alimentador 4A

4.3.6. Alimentador 3B

En la Figura 4.47 se observa el diagrama unilineal de este sector.

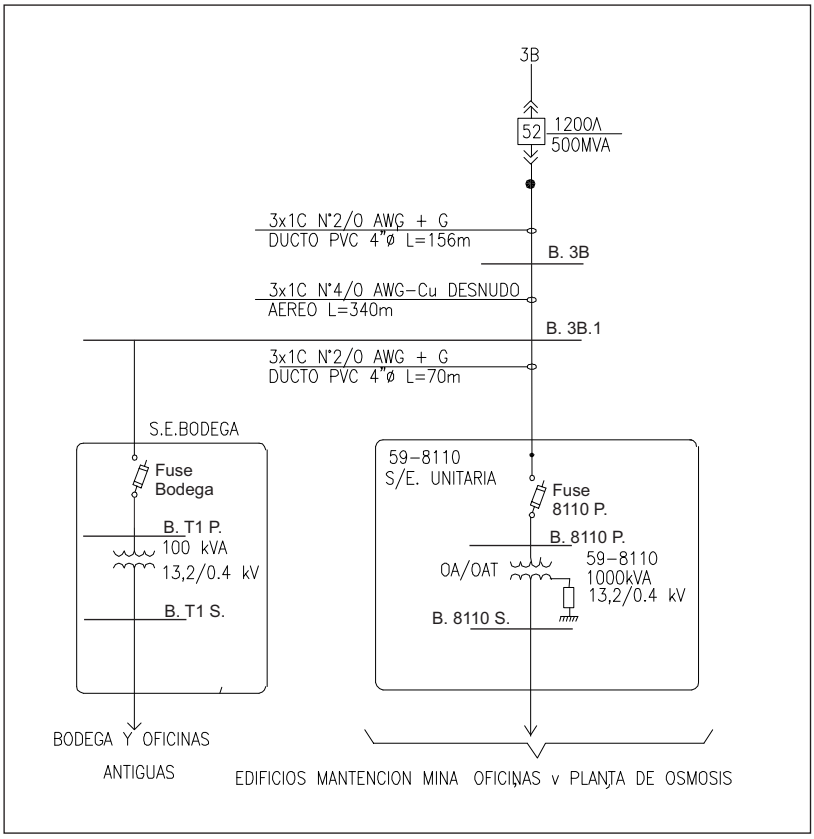


Figura 4.47: Diagrama unilineal alimentador 3B

- **Fusible primario transformador 59-8110**
  La corriente nominal del primario del transformador es de 43,74 [A]. La selección de esta protección debe considerar los siguientes puntos:

  - No debe dañarse con:
    - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 43,74 = 65,61\ [A]$ para $t \to \infty$.
    - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 43,74 = 524,88\ [A]$ durante 0,10 [s].
  - Debe fundirse con:
    - $6 \cdot I_n = 6 \cdot 43,74 = 306,18\ [A]$ para $t < 300$ [s].
    - Punto ANSI=$\dfrac{1}{0,05} \cdot 0,58 \cdot 43,74 = 507,384\ [A]$ para $t \leq 3\ [s]$.

  En la Figura 4.48 se observa que la selección es correcta ya que se cumplen los puntos descritos.

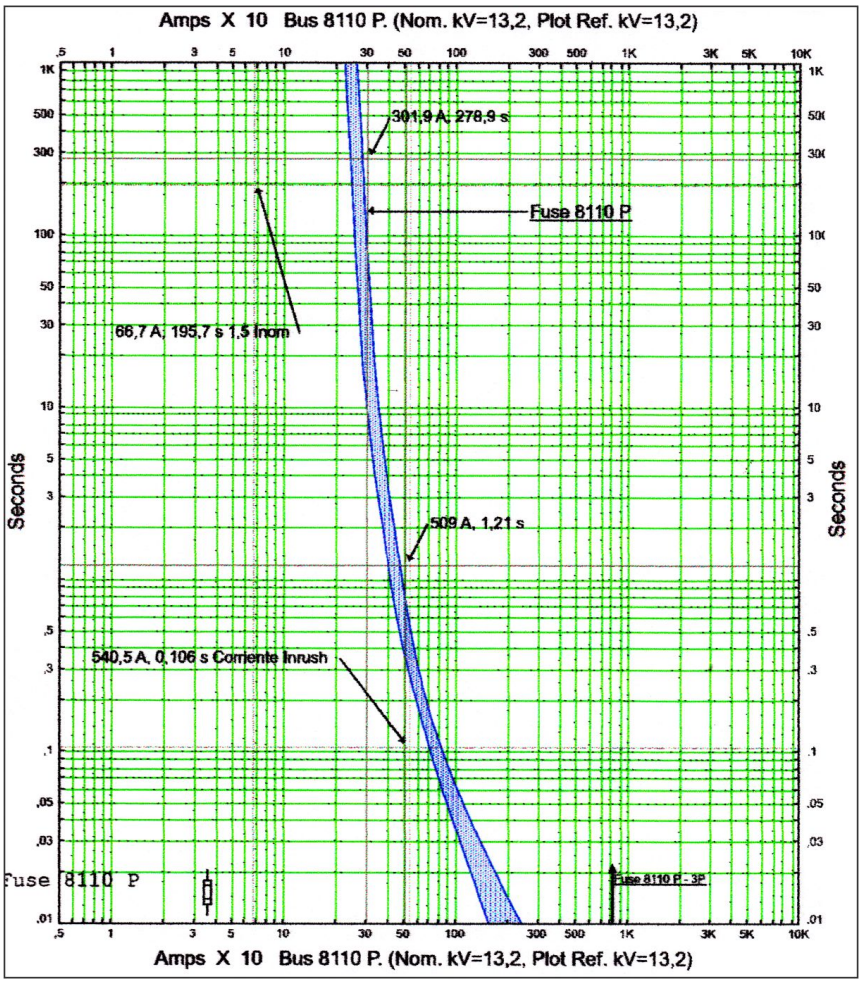


Figura 4.48: Fusible del primario del transformador 59-8110

En la Tabla 4.59 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.59: Fusible del primario del transformador 59-8110

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Back-UP	80	63	17,5

- **Fusible primario T1**
  La corriente nominal del primario del transformador es de 4,374 [A]. La selección de esta protección debe considerar los siguientes puntos:

  - No debe dañarse con:
    - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 4,374 = 6,561\ [A]$ para $t \to \infty$
    - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 43,74 = 52,488\ [A]$ durante 0,10 [s]
  - Debe fundirse con:
    - $8 \cdot I_n = 8 \cdot 4,374 = 34,992\ [A]$ para $t < 300$ [s].

- Punto ANSI$=\frac{1}{0,04} \cdot 0,58 \cdot 4,374 = 63,423\ [A]$ para $t \leq 4\ [s]$.

En la Figura 4.49 se observa que la selección es correcta ya que se cumplen los puntos descritos.

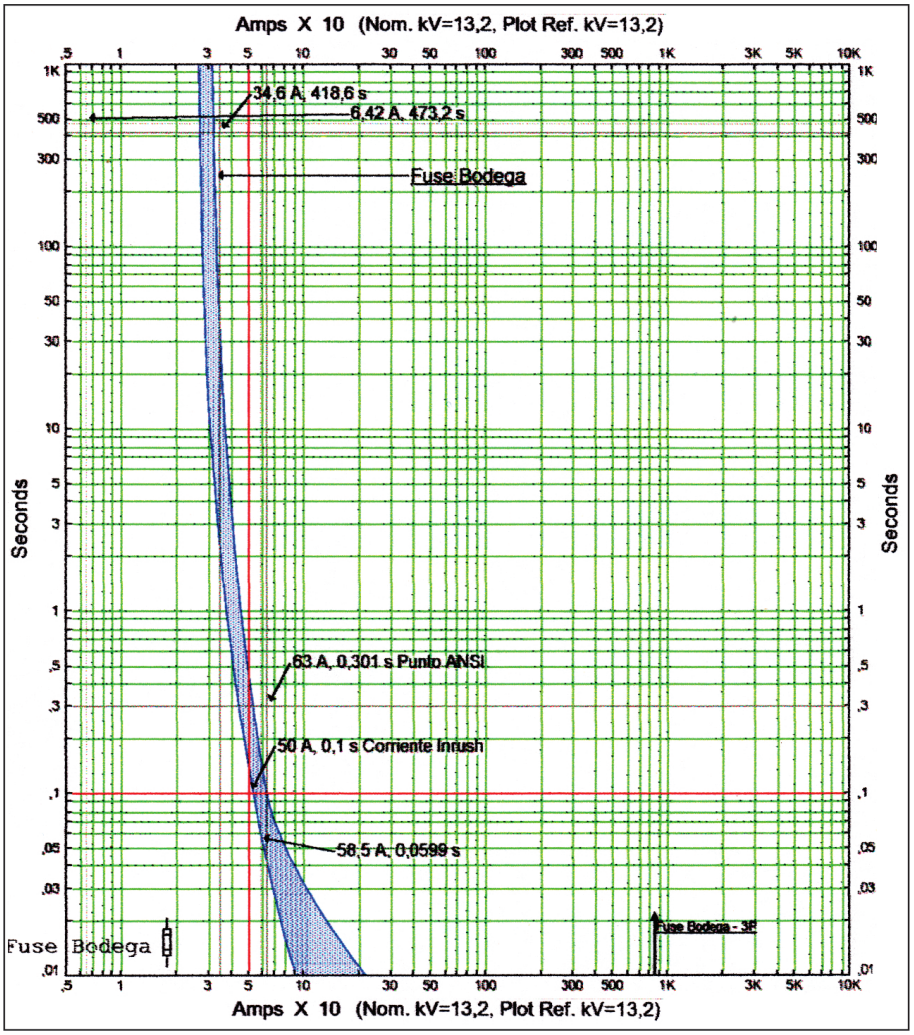


Figura 4.49: Fusible del primario del transformador T1

En la Tabla 4.60 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.60: Fusible del primario del transformador T1

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Back-UP	10	63	17,5

- **Cabecera 3B**
  La protección eléctrica de la cabecera del alimentador 3B consiste en un relé multilin 750R el cual rige la operación de su respectivo interruptor. Esta protección debe

proteger a su conductor más cercano aguas abajo, además de respaldar el funcionamiento del fusible más lento aguas abajo (fusible 8110 P). Las corrientes de interés para el ajuste de esta protección se muestran en la Tabla 4.61.

Tabla 4.61: Corrientes para el ajuste de la protección de la cabecera 3B

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ máx\ fase}$	8110 P.	7,12	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	3B.2	0,44	2ϕ

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 150/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente "pick-up" (340 [A]) de esta protección se selecciona de tal forma que proteja a los conductores aguas abajo además de poder coordinar con la protección más lenta aguas abajo. En la ecuación (4.88) se muestra el cálculo de la corriente "pick-up" del relé referida al secundario del transformador de corriente.

$$I_{pick-up\ 51F} = 340 \cdot \frac{5}{400} = 4,25\ [As] \tag{4.88}$$

    Este relé debe proporcionar respaldo al fusible 8110 P., por ende debe ser sensible a la falla mínima que ocurre en la barra 3B.2. En la ecuación (4.89) se muestra el resultado de esto.

$$N = \frac{440 \cdot \frac{5}{150}}{4,25} = 3,451 > 1,5 \tag{4.89}$$

    N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El "lever" se selecciona de tal manera que el tiempo mínimo de operación de la unidad de sobrecorriente sea como mínimo 1,33 veces mayor que el tiempo máximo de aclaramiento del fusible 8110 P para la falla máxima en la barra 8110 P. El fusible 8110 P. tiene un tiempo máximo de fusión para este nivel de corriente de 0,008 [s]. En la ecuación (4.90) se muestra el cálculo del tiempo de operación mínimo de funcionamiento del relé en estudio.

$$t_{mín} = 1,33 \cdot 0,008 = 0,011\ [s] \tag{4.90}$$

    Para cumplir con este tiempo y lograr la coordinación en todo momento se selecciona un "lever" de 0,5.
  - **Sobrecorriente instantáneo (50F):** esta función se ajusta para el 130 % de la corriente para la falla máxima en la barra 2. En la ecuación (4.91) se calcula su ajuste.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 7120 \cdot \frac{5}{150} = 308,533\ [As] \tag{4.91}$$

    En la Figura 4.50 se observa el ajuste de las protecciones de sobrecorriente de fase.

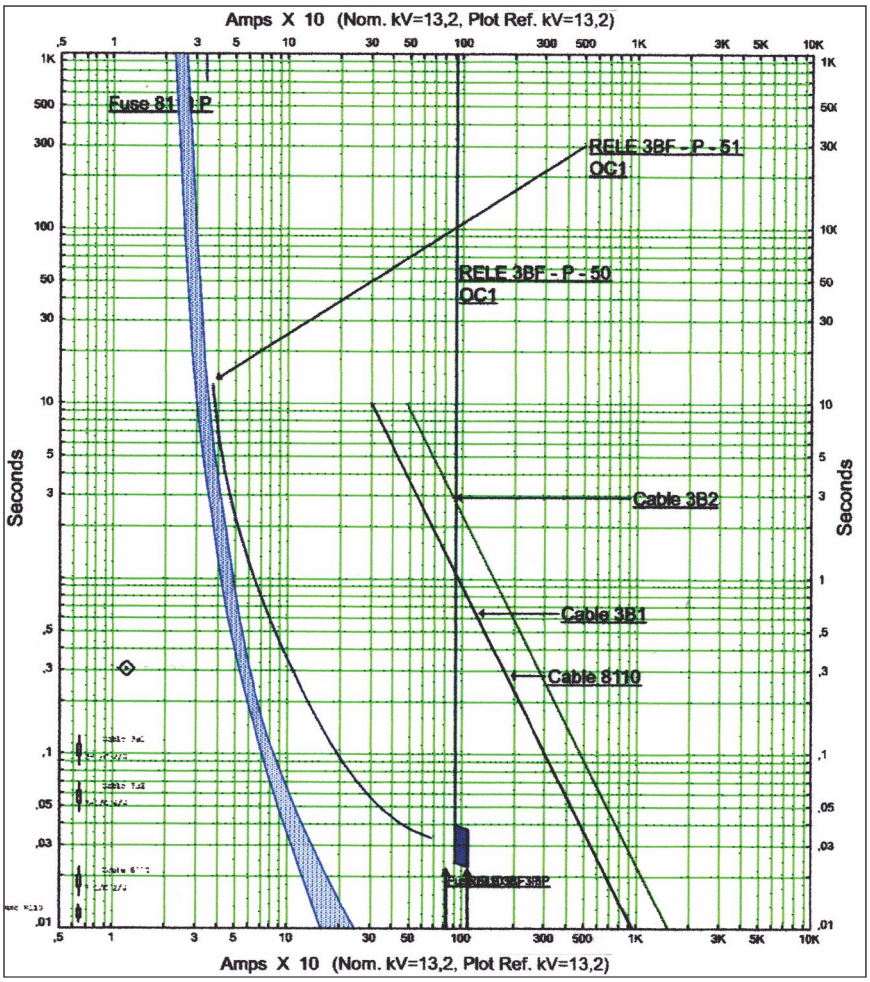


Figura 4.50: 51F-50F cabecera alimentador 3B

4.3.7. Alimentadores 6A-6B

En la Figura 4.51 se observa el diagrama unilineal de este sector.

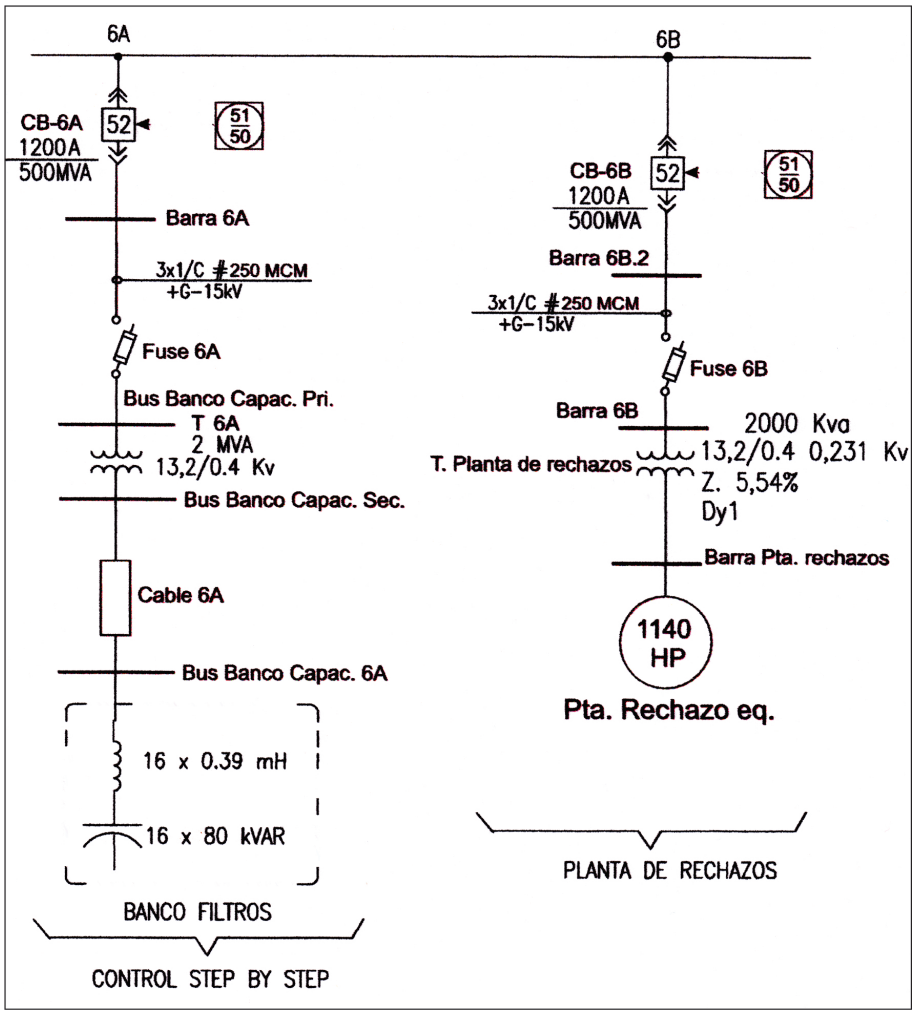


Figura 4.51: Diagrama unilineal alimentadores: 6A y 6B

1. **Fusible primario T6A**
   La corriente nominal del primario del transformador es de 87,48 [A]. La selección de esta protección debe considerar los siguientes puntos:

   - No debe dañarse con:
     - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 87,48 = 131,22\ [A]$ para $t \to \infty$
     - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 87,48 = 1049,76\ [A]$ durante 0,10 [s]
   - Debe fundirse con:
     - $6 \cdot I_n = 6 \cdot 87,48 = 524,88\ [A]$ para $t < 300$ [s].
     - Punto ANSI$= \dfrac{1}{0,0625} \cdot 0,58 \cdot 87,48 = 811,814\ [A]$ para $t \leq 4\ [s]$.

   En la Figura 4.52 se observa que la selección es correcta ya que se cumplen los puntos descritos.

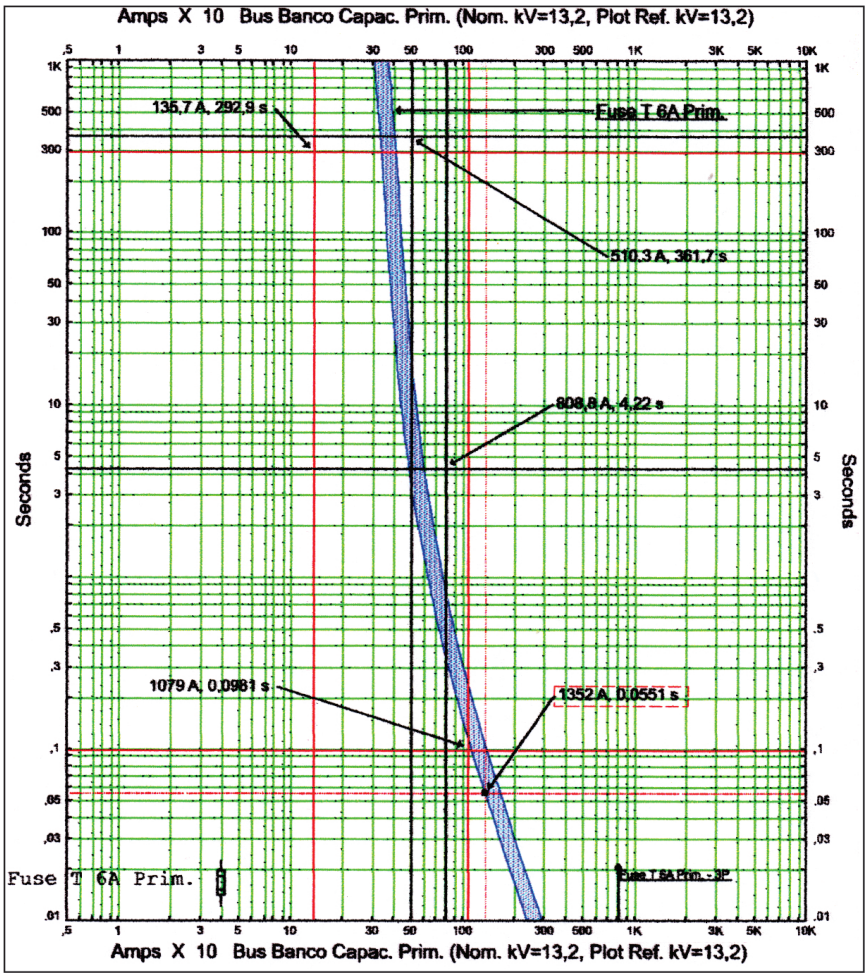


Figura 4.52: Fusible del primario del transformador 6A

En la Tabla 4.62 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.62: Fusible del primario del transformador 6A

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Back-UP	125	63	17,5

2. **Cabecera 6A**
La protección eléctrica de la cabecera consiste en un relé Multilin 750R el cual rige la operación de su respectivo interruptor. Las corrientes de interés para el ajuste de esta protección se muestran en la Tabla 4.63.

Tabla 4.63: Corrientes de interés para el ajuste de la protección de la cabecera 6A

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
I_n	Primario T6A	87,48 [A]	-
$I_{f\ máx\ fase}$	Banco capac. 6A	8,2	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	Banco capac. sec.	0,658	2ϕ

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 150/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51):** la selección de la corriente "pick-up" se realiza de tal manera que proteja al conductor de su sector, y además permita la coordinación con la protección más lenta aguas abajo (fusible primario transformador T6A) por consiguiente se selecciona una corriente "pick-up" de 437,4 [A]. En la ecuación (4.92) se muestra el cálculo de esta corriente referida al secundario del transformador de corriente.

$$I_{pick-up\ 51F} = 437,4\frac{5}{150} = 14,58\ [As] \tag{4.92}$$

Este relé debe proporcionar respaldo al fusible T6A., por ende debe ser sensible a la falla mínima que ocurre en la barra banco capac sec., en la ecuación (4.93) se muestra el resultado de esto.

$$N = \frac{658 \cdot \frac{5}{150}}{14,58} = 1,504 > 1,5 \tag{4.93}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El "lever" del relé se selecciona de tal manera que el tiempo mínimo de operación de la unidad de sobrecorriente sea como mínimo 1,33 veces mayor que el tiempo mmáximo de aclaramiento del fusible para la falla máxima en la barra banco capac. 6A (8,2 [kA] para falla 3ϕ). El fusible T6A tiene un tiempo máximo de fusión para este nivel de corriente de 0,006 [s], en la ecuación (4.94) se muestra el cálculo del tiempo mínimo de operación del relé.

$$t_{51F\ 6A} = 1,33 \cdot 0,006 = 0,08\ [s] \tag{4.94}$$

Para cumplir como mínimo con el tiempo calculado en la ecuación (4.94) y además lograr la coordinación en todo momento se selecciona un "lever" de 1,88. Con este ajuste se logra que la falla máxima se aclare en 0,087 [s].

  - **Sobrecorriente instantáneo (50F):** este relé se ajusta para el 130 % de la corriente para la falla máxima en la barra banco capac prim. En la ecuación (4.95) se calcula su ajuste.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 8200 \cdot \frac{5}{150} = 355,333\ [As] \tag{4.95}$$

En la Figura 4.53 se observa el ajuste de la protección de sobrecorriente de fase, se observa que existe coordinación en todo momento, y además el conductor aguas abajo queda protegido.

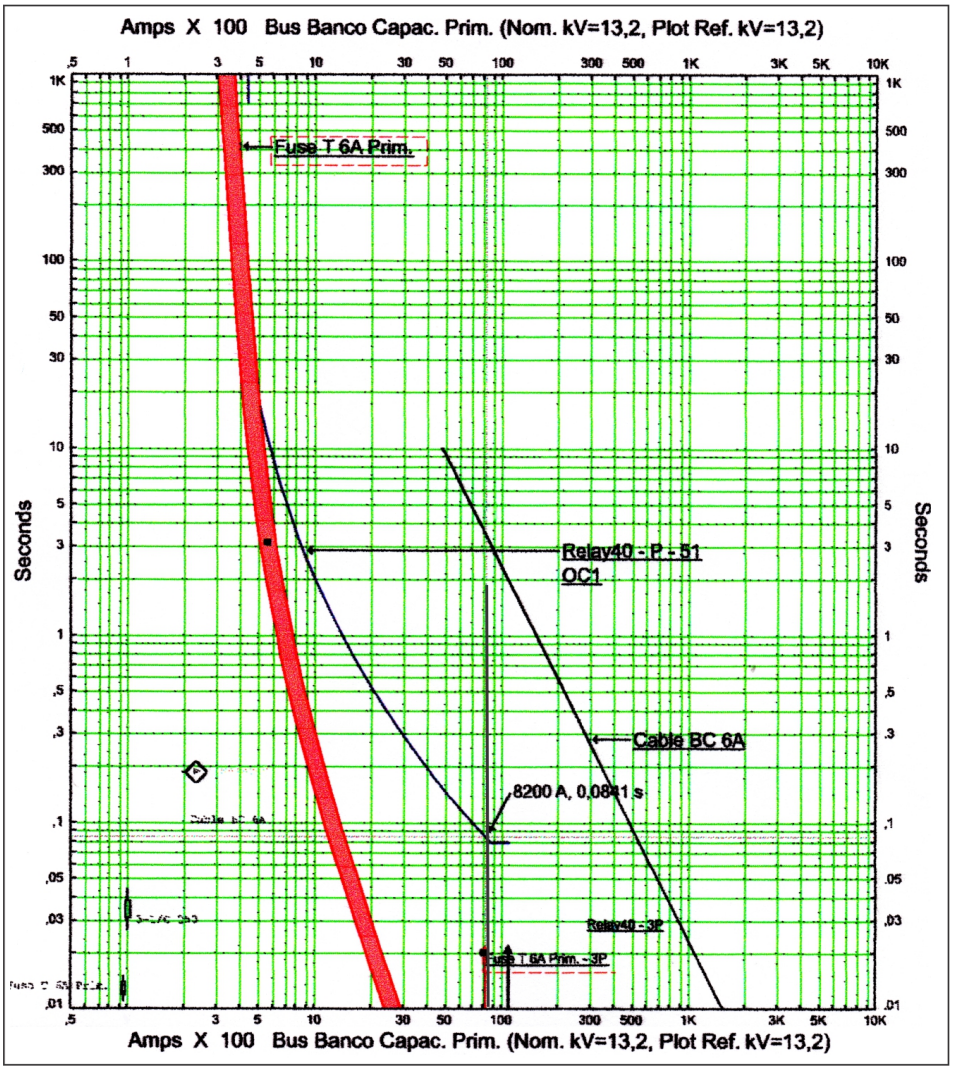


Figura 4.53: Ajuste de protecciones 51F-50F de la cabecera del alimentador 6A

3. Fusible primario transformador planta de rechazos

La corriente nominal del primario del transformador es de 87,48 [A]. La selección de esta protección debe considerar los siguientes puntos:

- No debe dañarse con:
  - Corriente nominal: $1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 87,48 = 131,22\ [A]$ para $t \to \infty$
  - Corriente inrush: $12 \cdot I_n = 12 \cdot 87,48 = 1049,76\ [A]$ durante 0,10 [s]
- Debe fundirse con:
  - $6 \cdot I_n = 6 \cdot 87,48 = 524,88\ [A]$ para $t < 300$ [s].
  - Punto ANSI$= \dfrac{1}{0,0625} \cdot 0,58 \cdot 87,48 = 811,814\ [A]$ para $t \leq 4\ [s]$.

En la Figura 4.54 se observa que la selección es correcta ya que se cumplen los puntos descritos.

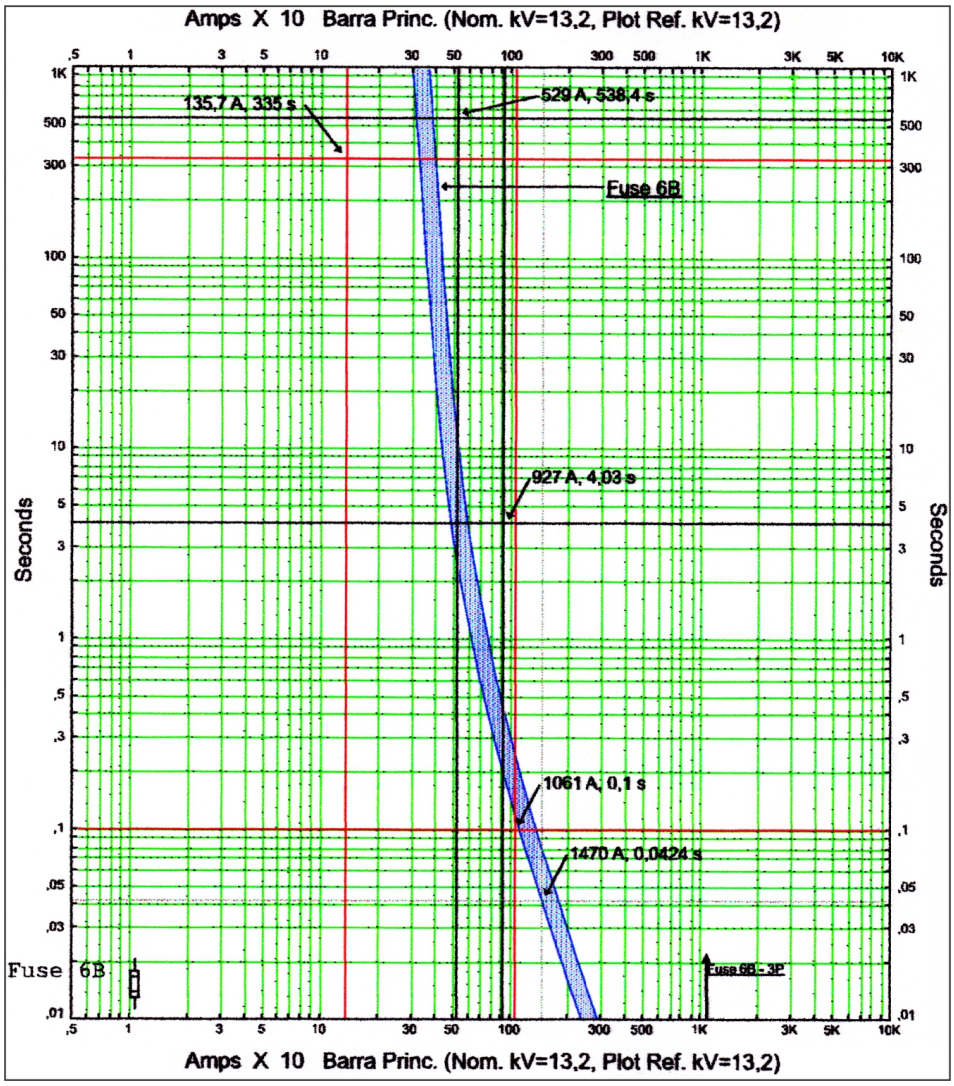


Figura 4.54: Fusible del primario de la planta de rechazos (6B)

En la Tabla 4.64 se describe las características del fusible seleccionado.

Tabla 4.64: Fusible del primario del transformador 6B

Marca	Modelo	I_n [A]	Capacidad de cortocircuito [kA]	U_n [kV]
SIBA	Back-UP	125	63	17,5

4. **Cabecera 6B**
La protección eléctrica de la cabecera consiste en un relé Multilin 750R el cual rige la operación de su respectivo interruptor. Las corrientes de interés para el ajuste de esta protección se muestran en la Tabla 4.65.

Tabla 4.65: Corrientes de interés para el ajuste de la protección de la cabecera 6BA

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
I_n	Primario T6B	87,48 [A]	-
$I_{f\ máx\ fase}$	Banco 6B	7,9	3ϕ
$I_{f\ mín\ fase}$	Barra Pta. Rechazos	0,658	2ϕ

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 150/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la selección de la corriente "pick-up" se realiza de tal manera que proteja al conductor de su sector, y además permita la coordinación con la protección más lenta aguas abajo (fusible primario transformador T6A) por consiguiente se selecciona una corriente "pick-up" de 437,4 [A]. En la ecuación (4.96) se muestra el cálculo de esta corriente referida al secundario del transformador de corriente.

$$I_{pick-up\ 51F} = 437,4\frac{5}{150} = 14,58\ [As] \tag{4.96}$$

    Este relé debe proporcionar respaldo al fusible T6A., por ende debe ser sensible a la falla mínima que ocurre en la barra banco capac sec., en la ecuación (4.97) se muestra el resultado de esto.

$$N = \frac{658 \cdot \frac{5}{150}}{14,58} = 1,504 > 1,5 \tag{4.97}$$

    N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El "lever" del relé se selecciona de tal manera que el tiempo mínimo de operación de la unidad de sobrecorriente sea como mínimo 1,33 veces mayor que el tiempo mmáximo de aclaramiento del fusible para la falla máxima en la barra 6B (7,9 [kA] para falla 3ϕ). El fusible T6B tiene un tiempo máximo de fusión para este nivel de corriente de 0,003 [s], en la ecuación (4.98) se muestra el cálculo del tiempo mínimo de operación del relé.

$$t_{51F\ 6B} = 1,33 \cdot 0,003 = 0,004\ [s] \tag{4.98}$$

    Para cumplir como mínimo este tiempo, y para lograr la coordinación en todo momento se selecciona un "time dial" de 1,88. Con este ajuste se logra que la falla máxima se aclare en 0,09 [s].
  - **Sobrecorriente instantáneo (50F):** este relé se ajusta para el 130 % de la corriente para la falla máxima en la barra 6B. En la ecuación (4.99) se calcula su ajuste.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 7660 \cdot \frac{5}{150} = 331,933\ [As] \tag{4.99}$$

    En la Figura 4.55 se observa el ajuste de la protección de sobrecorriente de fase, se observa que existe coordinación en todo momento, y además el conductor aguas abajo queda protegido.

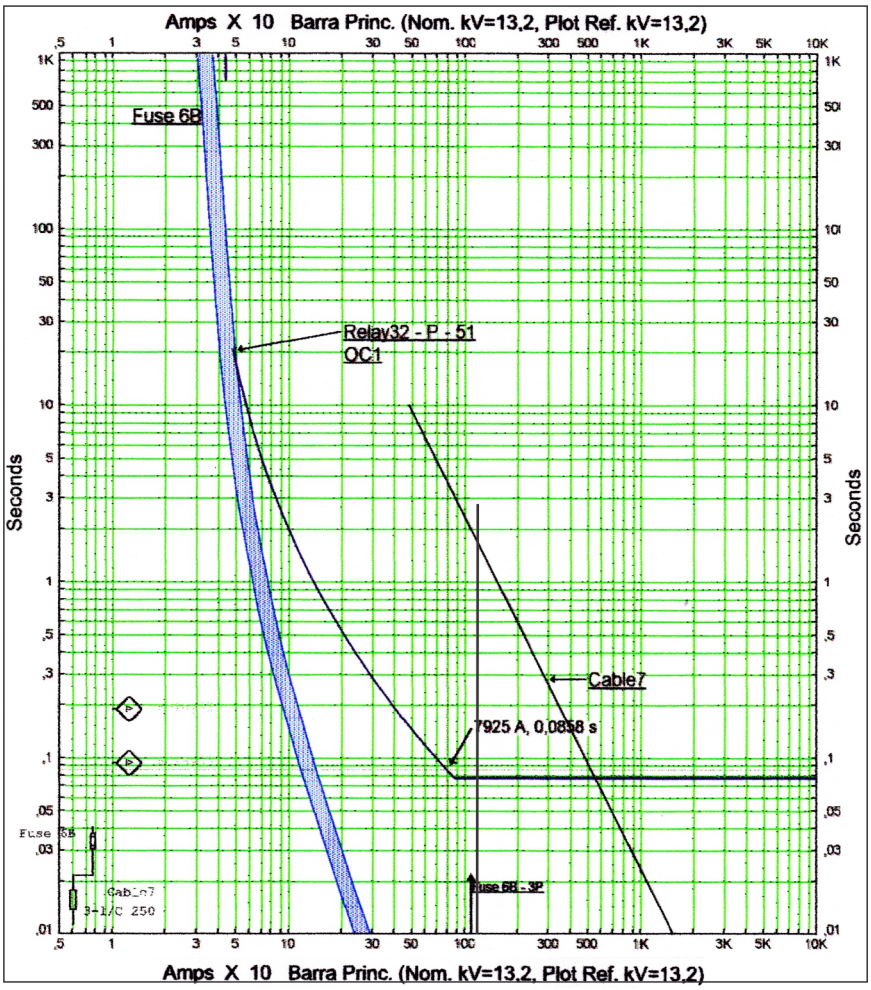


Figura 4.55: Ajuste de protecciones 51F-50F de la cabecera del alimentador 6B

4.3.8. Transformador S/E principal

Las protecciones eléctricas del transformador de la S/E principal consisten en sendos relés GE Multilin 750R para el primario y secundario, los cuales rigen la operación de sus respectivos interruptores electromagnéticos. Las protecciones descritas se observan en la Figura 4.56.

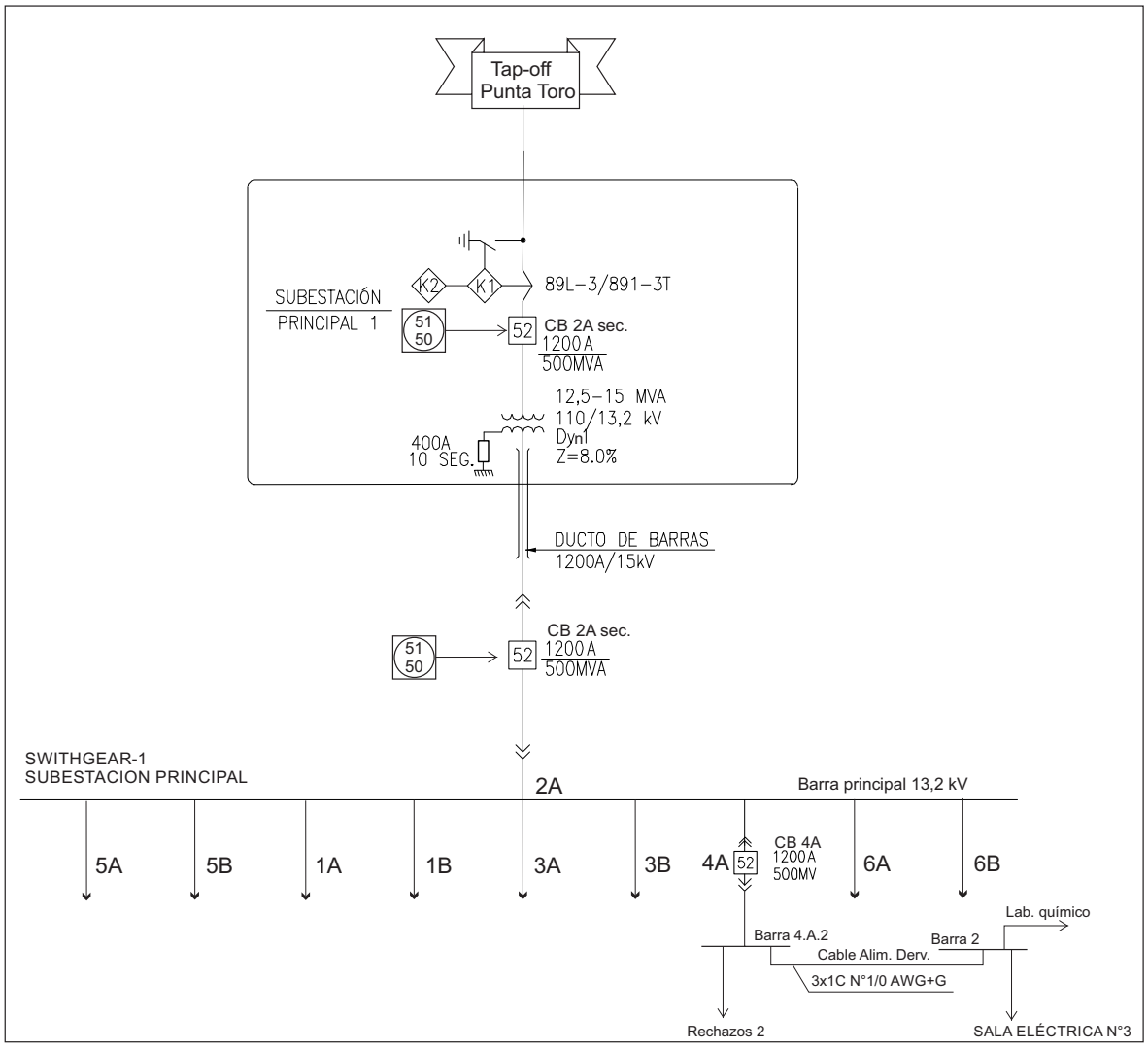


Figura 4.56: Diagrama unilineal S/E principal

1. **Secundario**
   El relé debe coordinar con el relé ubicado en la cabecera del alimentador 4A (dado que es el relé más lento aguas abajo). Las corrientes de interés para el ajuste de esta protección se muestran en la Tabla 4.66.

Tabla 4.66: Corrientes para el ajuste de protección del secundario de la S/E principal

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla	Vista por
$I_{f\ máx\ fase}$	4A.2	6,43	$1\phi - t$	Sec. S/E Princ.
$I_{f\ máx\ fase}$	4A.2	7,81	$1\phi - t$	Cabecera 4A
$I_{f\ mín\ fase}$	2	4,43	$1\phi - t$	Sec. S/E Princ.

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 1000/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**

- **Sobrecorriente inverso (51F):** en este caso se considera un 32 % de la corriente nominal (546,7 [A]). En la ecuación (4.100) se muestra el cálculo de esta corriente referida al secundario del transformador de corriente.

$$I_{pick-up\ 51F} = 1,32 \cdot 546,7 \cdot \frac{5}{1000} = 3,608\ [As] \tag{4.100}$$

Debe proporcionar respaldo al relé de sobrecorriente de la cabecera del alimentador 4A por ende debe ser sensible a la falla mínima (4,43 [kA] para falla $1\phi - t$) que ocurre en la barra 2. En la ecuación (4.101) se muestra el cálculo de N.

$$N = \frac{4430 \cdot \frac{5}{1000}}{3,608} = 6,137 > 1,5 \tag{4.101}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. El relé 4A (51F) opera para la falla máxima (7,81 [kA] para falla $1\phi - t$ visto por relé 4A) en la barra 4A.2 en 0,362 [s]. El tiempo de operación del relé para la falla máxima (6,43 [kA] para falla $1\phi - t$ visto por relé 2A sec.) en la barra 4A.2 se calcula en la ecuación (4.102).

$$t_{op\ 51} = t_{op\ 51\ 4A} + 0,3 = 0,362 + 0,3 = 0,662\ [s] \tag{4.102}$$

El "lever" que cumple con el tiempo calculado en la ecuación anterior es de 14,37.

- **Sobrecorriente instantáneo (50F):** dado que este relé esta ubicado en el mismo switchgear del relé de la cabecera 4A (desde el punto de vista eléctrico es el mismo punto) se desactiva la función 50F.

En la Figura 4.57 se observa el ajuste de la protección de sobrecorriente de fase.

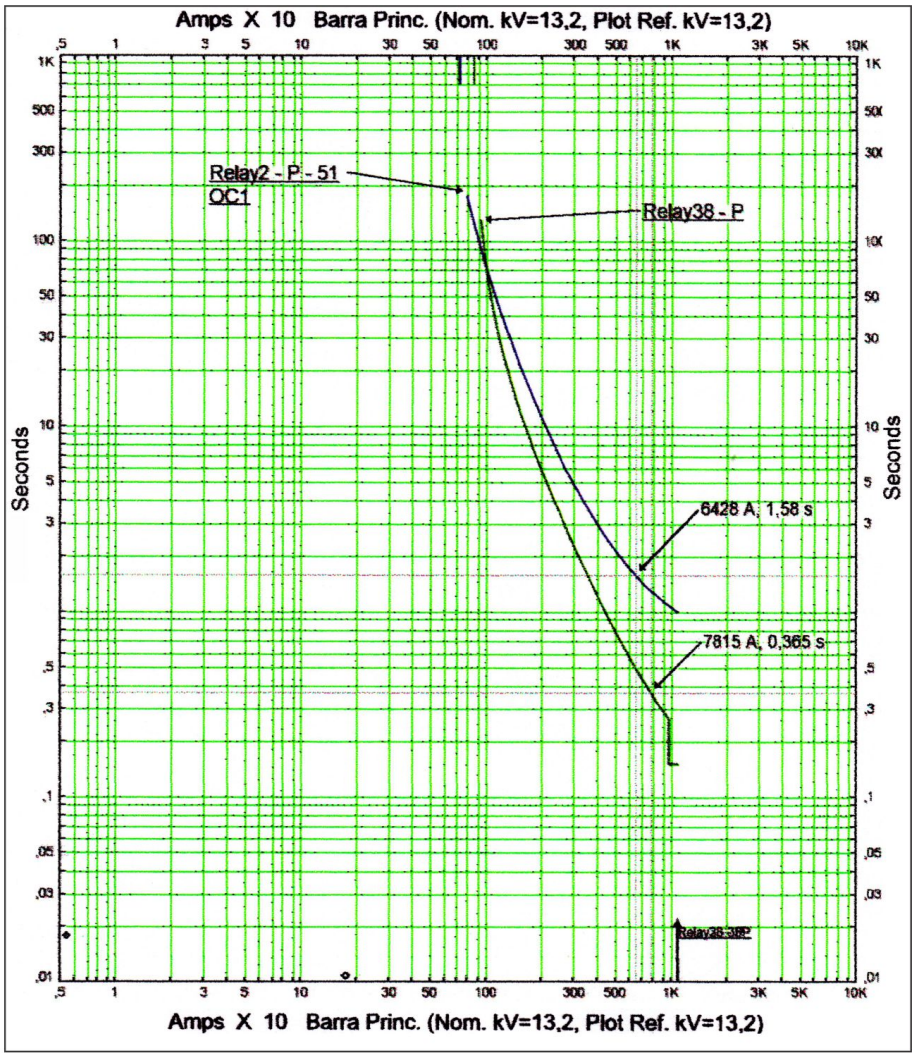


Figura 4.57: Ajuste de protección del 51F del secundario de la S/E principal

2. **Primario**
   Las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del primario de este transformador se muestran en la Tabla 4.67.

Tabla 4.67: Corriente para el ajuste de protección del primario de la S/E principal

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
$I_{f\ m\acute{i}n\ fase}$	Barra princ.	0,4	$1\phi - t$

La relación de transformación del transformador de corriente de fase es de 100/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** la corriente nominal del primario del transformador es de 65,61 [A]. En la ecuación (4.103) se calcula la corriente

"pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 51F} = 1,20 \cdot 65,61 \cdot \frac{5}{100} = 3,937\ [As] \tag{4.103}$$

Debe proporcionar respaldo al relé de sobrecorriente ubicado en el secundario de la S/E principal, por ende debe ser sensible a la falla mínima en la barra S/E principal (0,4 [kA] para falla $1\phi - t$). En la ecuación (4.104) se muestra el cálculo de *N*.

$$N = \frac{400 \cdot \frac{5}{100}}{3,937} = 5,08 > 1,5 \tag{4.104}$$

N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé entrega respaldo para este nivel de corriente. La selección del "lever" debe considerar el tipo de conexión del transformador. En la Tabla 4.68 se resume el efecto en los tiempos de operación de los relés involucrados.

Tabla 4.68: Falla en la barra S/E principal

Falla	Primario S/E Principal		Secundario S/E Principal			$\Delta\ t$ [s]
	I_{pri} [kA]	t_{op} [s]	I_{sec} [kA]	I^*_{sec} [kA]	t_{op} [s]	
3ϕ	0,703	2,28	5,86	0,703	1,75	0,53
$2\phi - t$	0,703	2,28	6,31	0,757	1,6	0,68
2ϕ	0,703	2,28	5,08	0,61	2,1	0,18
$1\phi - t$	0,394	5,11	6,43	0,772	1,56	3,55

De la Tabla 4.68 se observa que la menor diferencia entre los tiempos de operación es para la falla bifásica, es por esto que la coordinación se realiza para esta condición. En la ecuación (4.105) se calcula el tiempo mínimo de operación para el relé 51-2A pri.

$$t_{51-2A\ pri.} = 2,1 + 0,3 = 2,4\ [s] \tag{4.105}$$

El "lever" seleccionado es de 22,37; el cual cumple con el tiempo de operación calculado en la ecuación (4.105).

- **Sobrecorriente instantáneo (50F):** la máxima corriente de cortocircuito para la falla trifásica. Los valores de corriente se muestran en la Tabla (4.68). En la ecuación (4.106) se calcula la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,3 \cdot 703 \cdot \frac{5}{100} = 45,695\ [As] \tag{4.106}$$

En la Figura 4.58 se observa el ajuste de las protecciones de sobrecorriente de fase del primario del transformador. La protección proteje al transformador, permite su energización y además existe coordinación en todo momento con la protección aguas abajo.

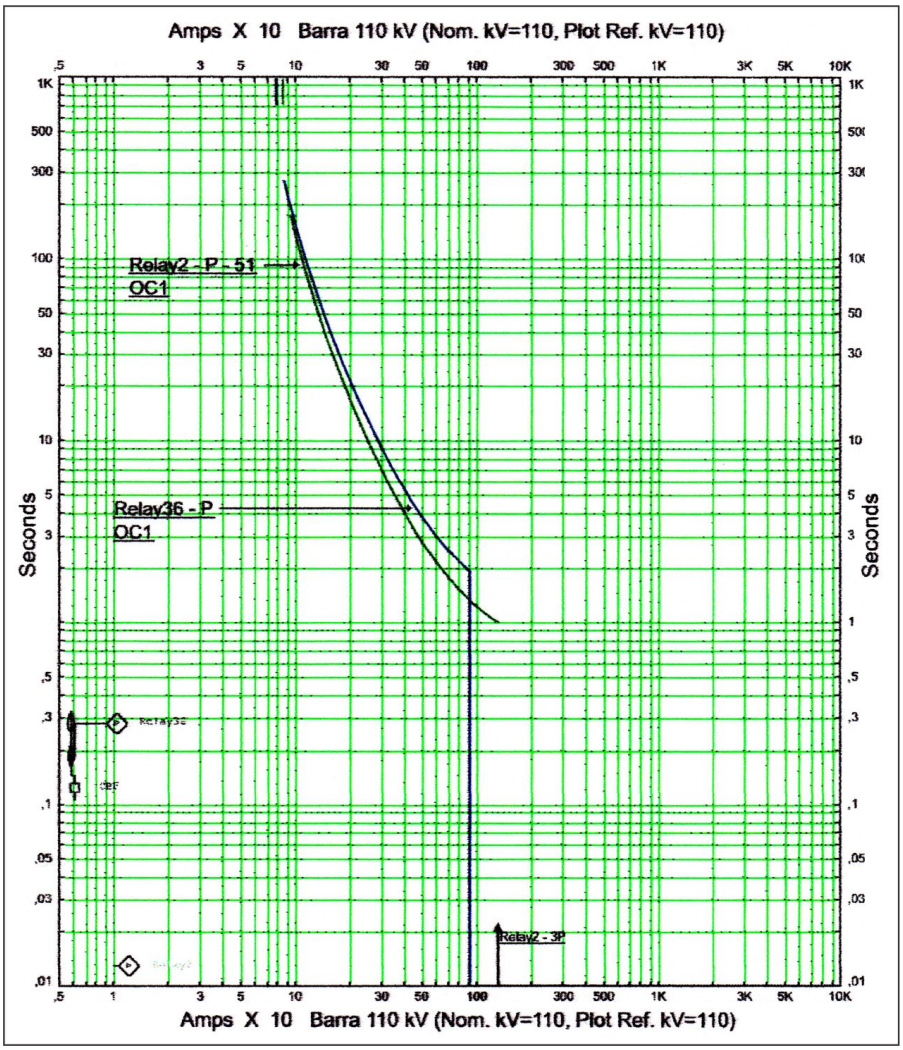


Figura 4.58: 51F-50F primario del transformador de la S/E principal

4.4. Ampliación futura

En el año 2017 se tiene previsto instalar una correa transportador que retirará el material estéril de la planta de beneficio. La correa transportadora consta de 2 motores de 4,16 [kV] cada uno de 200 HP, alimentados a través de su respectivo variador de frecuencia. Se tiene previsto conectar los motores al CCM-51-8102. En la Figura 4.59 se observa el diagrama unilineal de la expansión futura.

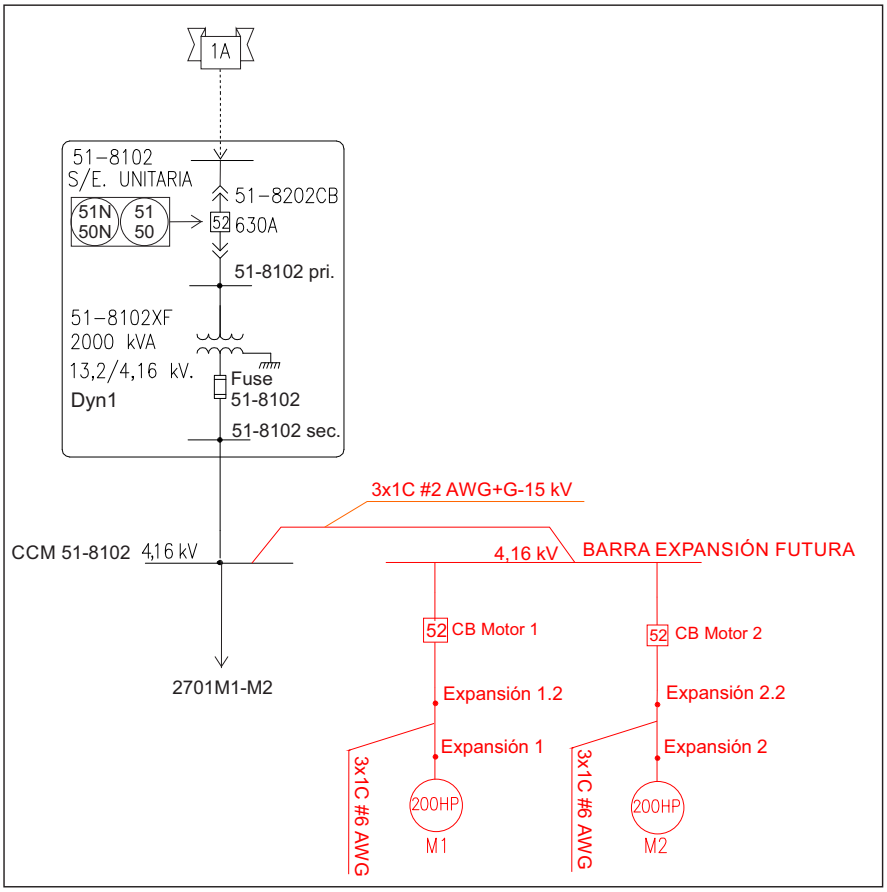


Figura 4.59: Diagrama unilineal expansión futura

4.4.1. Perfil de tensión con expansión

En la Tabla 4.69 se muestran las tensiones de las barras que se ven afectado por la conexión de los motores. Se puede observar que la conexión de estas cargas no afectan el cumplimiento del criterio $\pm 7\,\%$.

Tabla 4.69: Tensiones en las barras afectadas por la expansión futura

Barra	U_S [pu]
Expansión futura	96,72
Expansión	96,68
CCM-51-8102	96,79
51-8102 sec.	96,81
51-8102	98,41
51-8101	98,41
1A.2	98,41
Barra principal 13,2 kV	98,45
Barra principal 110 kV	99,93

4.4.2. Cargabilidad de transformadores

En la Tabla 4.70 se muestran los porcentaje de carga de los transformadores afectador por la conexión de los motores. Se observa que en ninguno de los dos transformadores se sobrepasa su capacidad nominal.

Tabla 4.70: Cargabilidad transformadores

Transformador	Carga [%]	
	Sin expansión	Con expansión
S/E Principal	78,1	80,6
SEU 51-8102	31,9	49,7

4.4.3. Ajuste de protecciones expansión futura

En la Tabla 4.71 se observan las corrientes de interés para el ajuste de las protecciones del motor.

Tabla 4.71: Corrientes para el ajuste de protecciones motores expansión futura

Corriente	Barra en cortocircuito	Magnitud [kA]	Tipo de Falla
I_n	-	26,54	-
$I_{f\ máx\ fase}$	Nivel 475 sec.	3,122	$1\phi - t$
$I_{f\ mín\ fase}$	Nivel 475	0,399	$1\phi - t$

La relación de transformación del transformador de corrientes es de 250/5.

- **Protecciones de sobrecorriente de fase.**
  - **Sobrecorriente inverso (51F):** en la ecuación (4.107) se muestra el cálculo de la corriente "pick-up" del relé.

$$I_{pick-up\ 51F} = 1,1 \cdot 26,54 \cdot \frac{5}{250} = 0,584\ [As] \tag{4.107}$$

    Esta función debe proteger al motor aguas abajo por ende debe ser sensible a la falla mínima en la barra de este equipo. En la ecuación (4.108) se calcula N para la corriente de falla mínima.

$$N = \frac{113 \cdot \frac{5}{250}}{0,584} = 3,87 > 1,5 \tag{4.108}$$

    N en este caso es mayor a 1,5 por ende el relé es sensible para la falla mínima. El "lever" se selecciona de tal manera que la función proteja y permita la partida del motor y proteja al cable asociado. El "lever" que cumple con estas exigencias es igual a 1,83.
  - **Sobrecorriente instantáneo (50F):** en la ecuación (4.109) se calcula su ajuste.

$$I_{pick-up\ 50F} = 1,25 \cdot 172,51 \cdot \frac{5}{250} = 4,313\ [As] \tag{4.109}$$

En la Figura 4.60 se observa el ajuste de protección del relé (funciones 51F-50F). De la Figura se infiere que el motor M1 y su cable de alimentación quedan protegidos, y además se permite el arranque del motor sin que opere el relé.

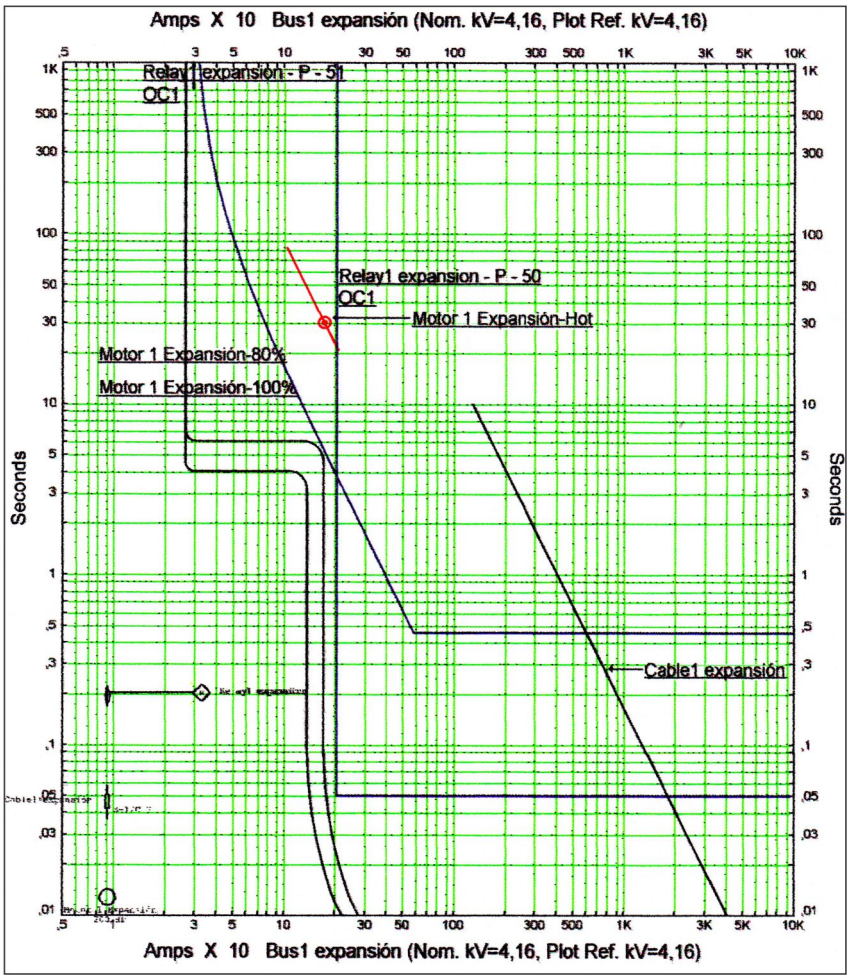


Figura 4.60: 51F-50F expansión futura

Cabe mencionar que los motores poseen variadores de frecuencia (los cuales no regeneran energía) y su protección de sobrecorriente es más rápido que la protección del motor 2701M. Debido a esto la conexión de la expansión futura no afecta en el ajuste de protecciones aguas arriba del CCM-51-8102.

CAPÍTULO 5

Resumen final y conclusiones

En este trabajo se realizó la modelación SEP de la mina Los Colorados, el cual permitirá a la empresa centrar con una importante ayuda en la gestión eléctrica ya que gracias a ella se podrán realizar diversos estudios futuros; entre los que se puede mencionar análisis de factor de potencia, conexión de banco de condensadores ,arranque de motores, saturación de transformadores de corriente, repotenciamiento de motores, además de actualizar los estudios realizados en este documento (flujo de potencia, estudio de cortocircuito y ajustes de protecciones de sobrecorriente).

Del estudio de flujo de potencia realizado se determinaron las condiciones operativas del sistema eléctrico, se determinaron los perfiles de tensión en todas las barras del sistema, los flujos de potencia por los cables, líneas y transformadores. Los resultados obtenidos de este estudio permiten gestionar de mejor forma el sistema eléctrico, y concluir que se cuenta con una gran capacidad de expansión.

Del estudio de cortocircuito se obtienen los niveles de corriente de cortocircuito (máximo y mínimos) en cada una de las barras del sistema, los cuales fueron utilizados para validar la correcta selección de los interruptores (capacidad de cortocircuito).Los resultados del estudio de cortocircuito permitirán en el futuro realizar estudios térmicos y dinámicos en elementos de las instalaciones como sistemas de barras, tableros, cables, etc. Además de permitir obtener los equivalentes de Thevenin para los sectores más importantes, calcular las mallas de puesta a tierra considerando los tiempos de operación de las protecciones eléctricas, y estudiar la saturación de los transformadores de corriente. El ajuste de los dispositivos de protección de sobrecorriente permitió mejorar la coordinación entre ellas. Dado que en el pasado existían muchos problemas en este ámbito.

Del estudio para la expansión futura (2 motores de 200 HP) se concluye que dada su conexión no se deben realizar cambios en el SEP debido a que su conexión no afecta la seguridad eléctrica.

Se recomienda mantener actualizado el modelo para que los estudios futuros tengan validez. Una importante ayuda a la gestión eléctrica seria analizar el sistema en tiempo real, para lo cual ETAP cuenta con el módulo “real-time systems”.

APÉNDICE A

Diagramas unilineales

A.1. Diagrama unilineal SIC, sector Punta de Toro

En la Figura A.1 se observa el diagrama unilineal del sector de Punta de Toro.

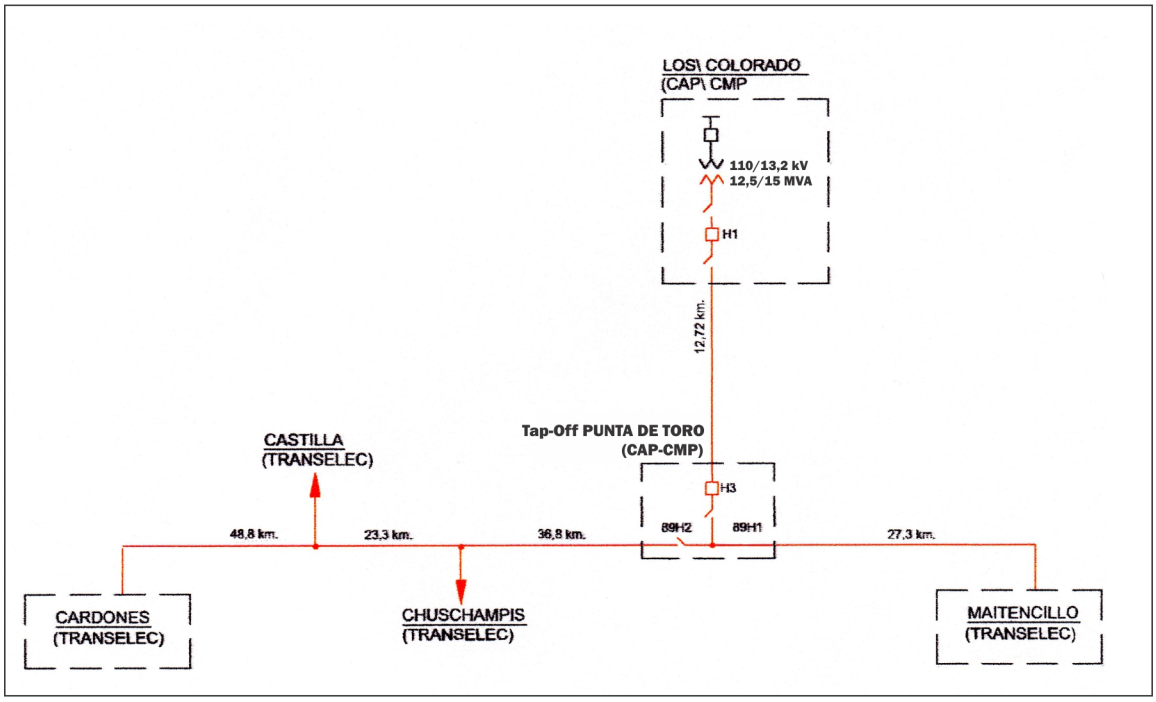


Figura A.1: Diagrama unilineal SIC. Punta de Toro

A.2. Diagrama unilineal inicial mina Los Colorados

En la Figura A.2, Figura A.3, Figura A.4, Figura A.5 y Figura A.6 se observa el diagrama unilineal inicial de referencia para la modelación del SEP.

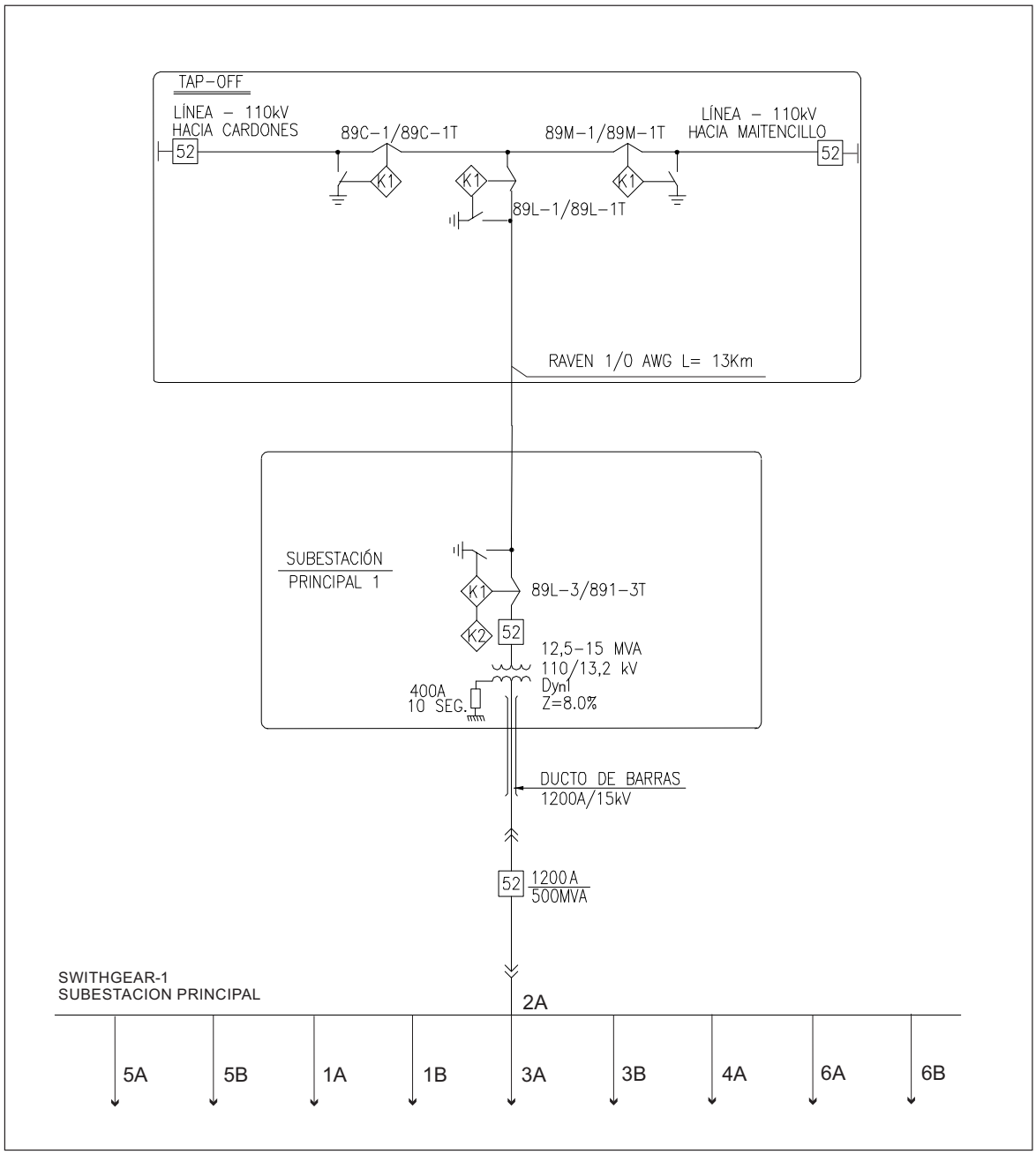


Figura A.2: Diagrama unilineal inicial 1 de 5

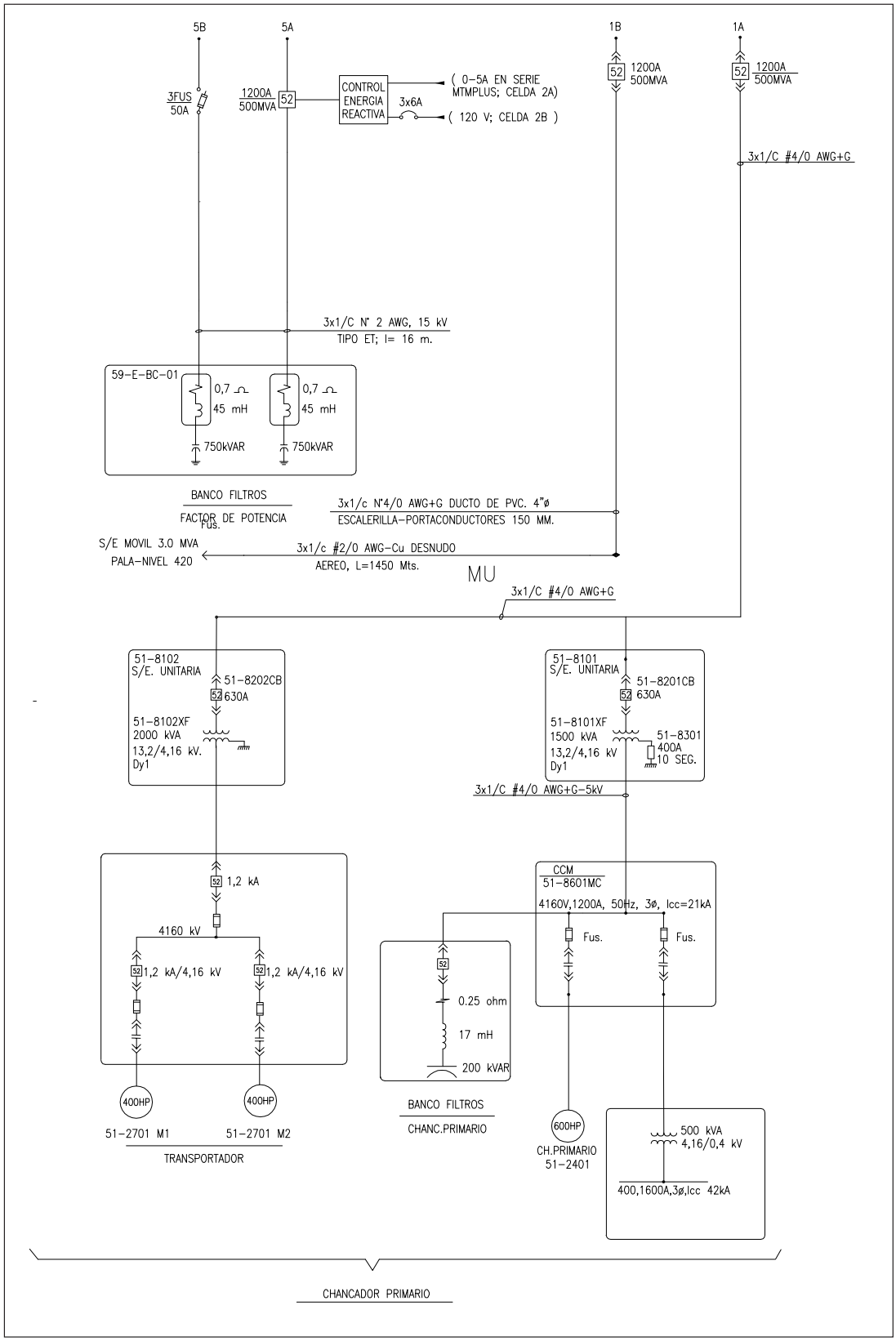


Figura A.3: Diagrama unilineal inicial 2 de 5

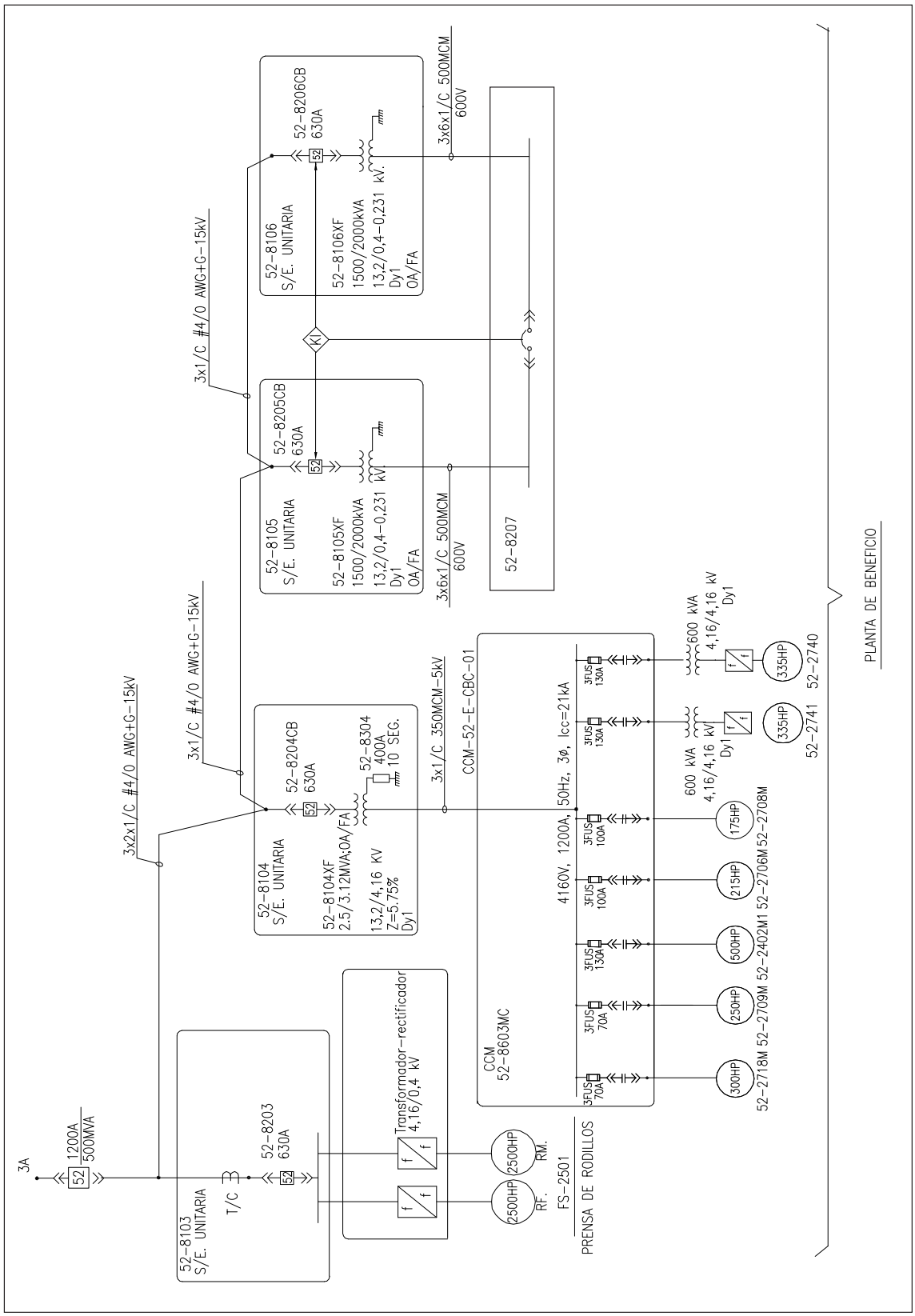


Figura A.4: Diagrama unilineal inicial 3 de 5

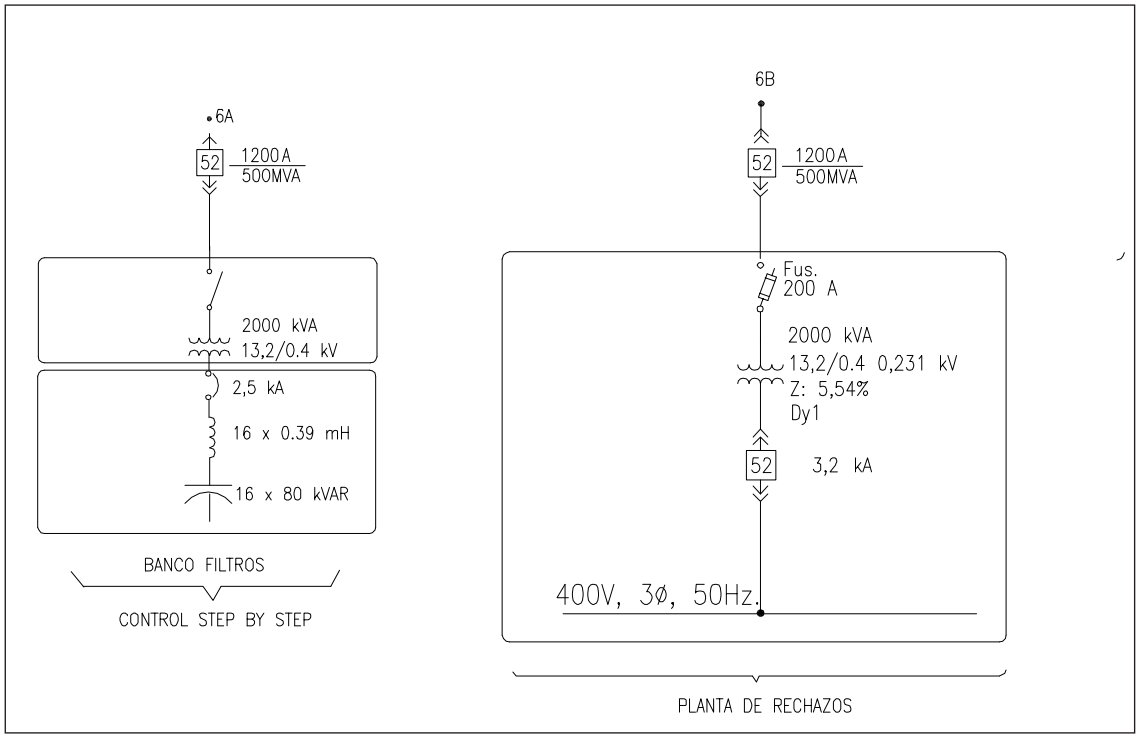


Figura A.5: Diagrama unilineal inicial 4 de 5

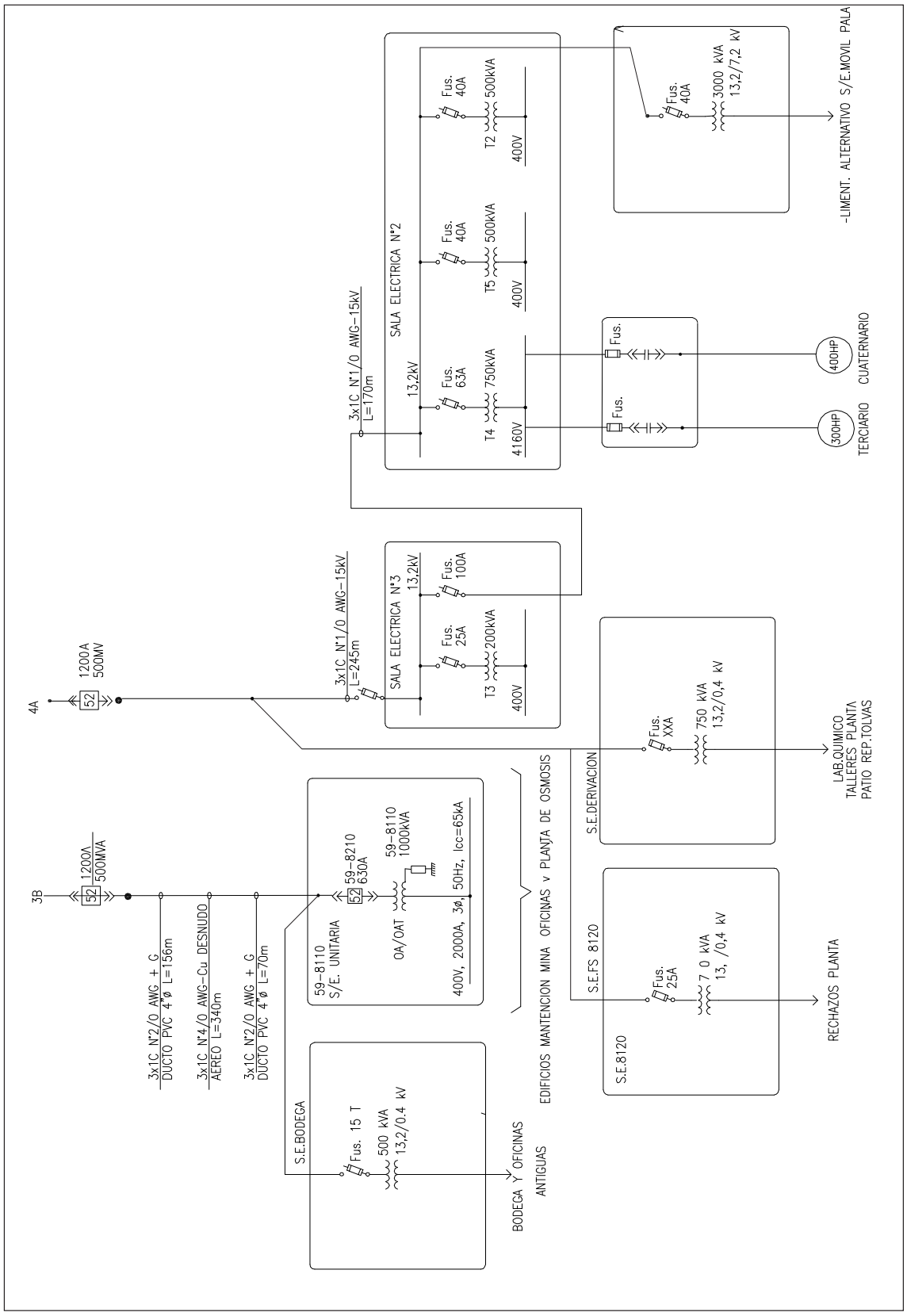


Figura A.6: Diagrama unilineal inicial 5 de 5

A.3. Diagrama unilineal actualizado mina Los Colorados

En la Figura A.7, Figura A.8, Figura A.9, Figura A.10 y Figura A.11 se observa el diagrama unilineal actualizado del SEP local.

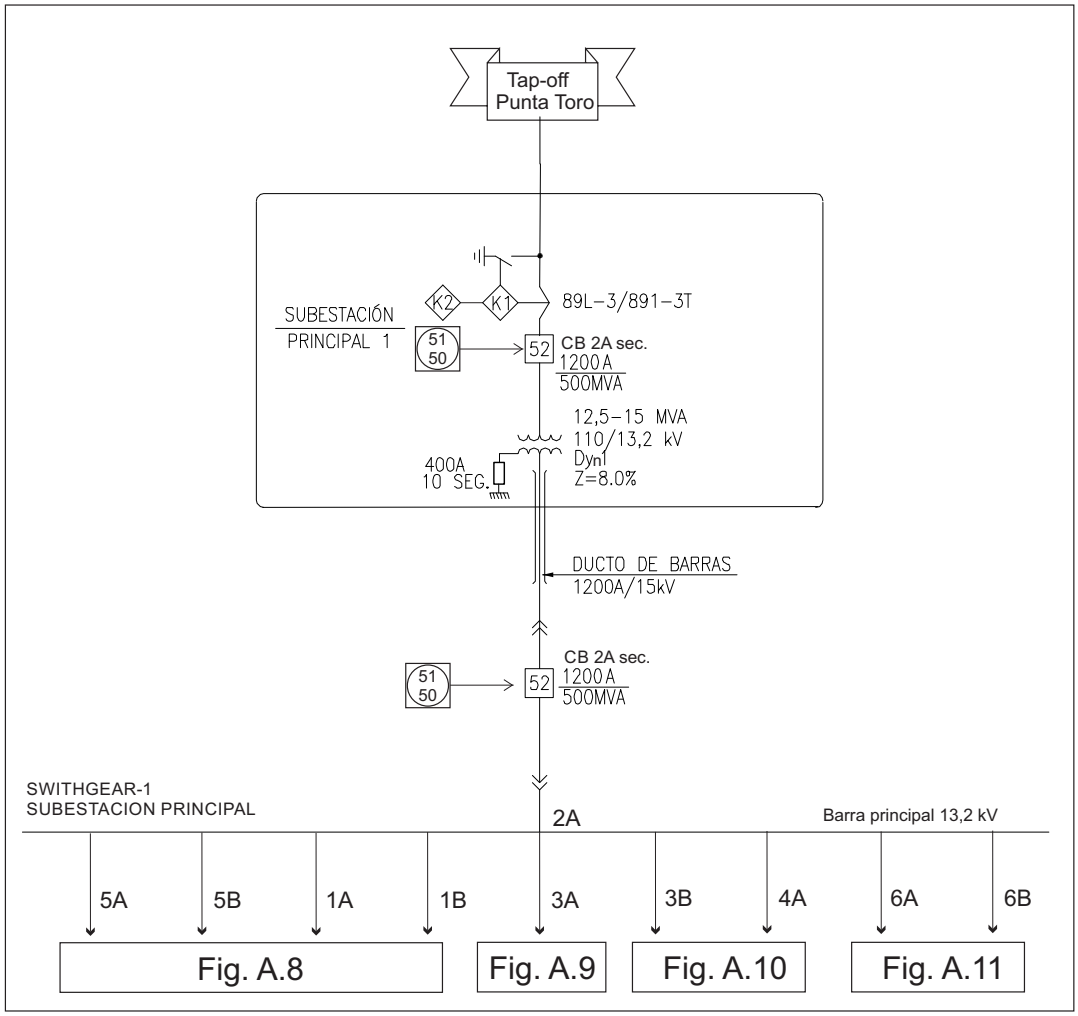


Figura A.7: Diagrama unilineal S/E principal

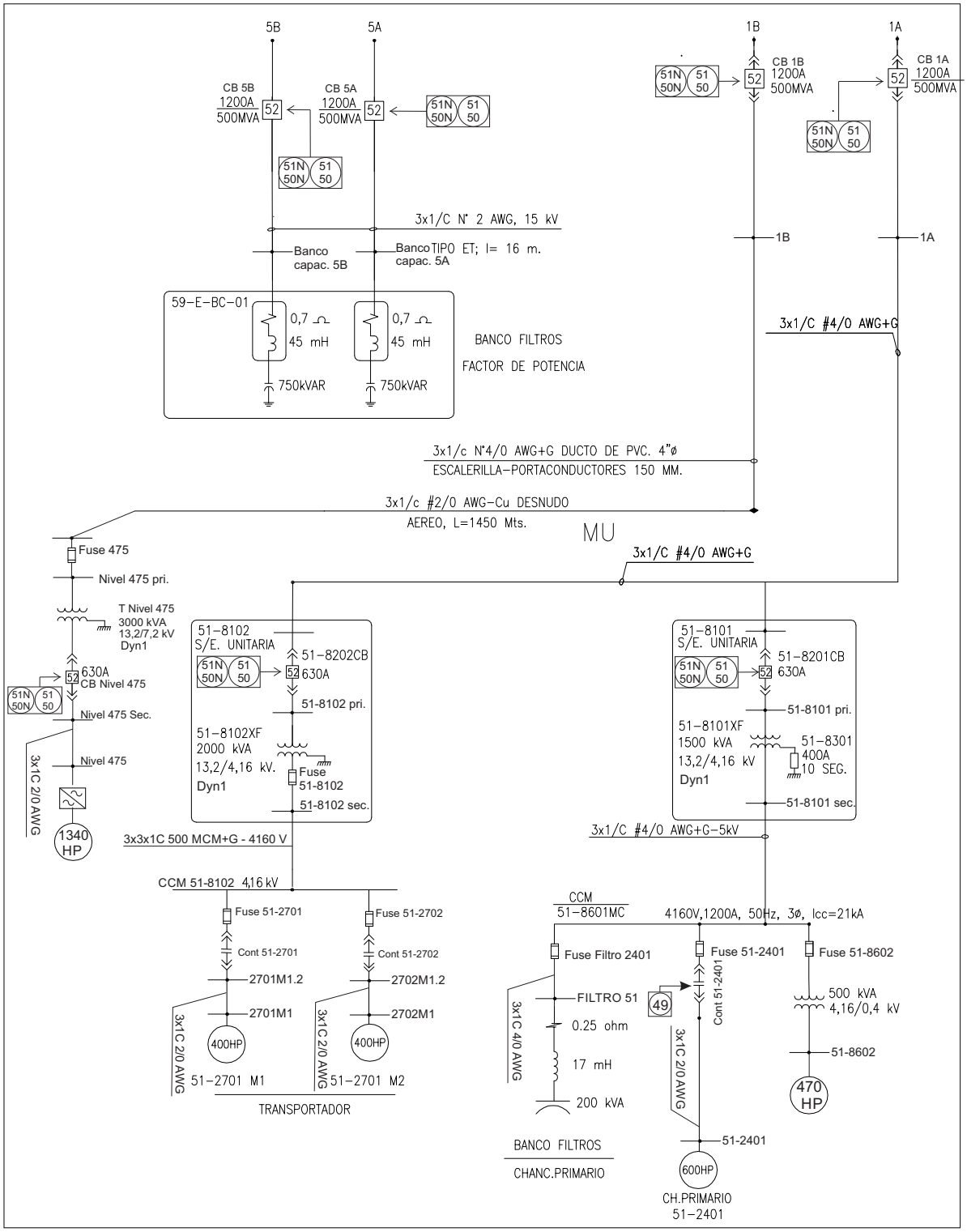


Figura A.8: Diagrama unilineal alimentadores: 5A, 5B, 1A y 1B

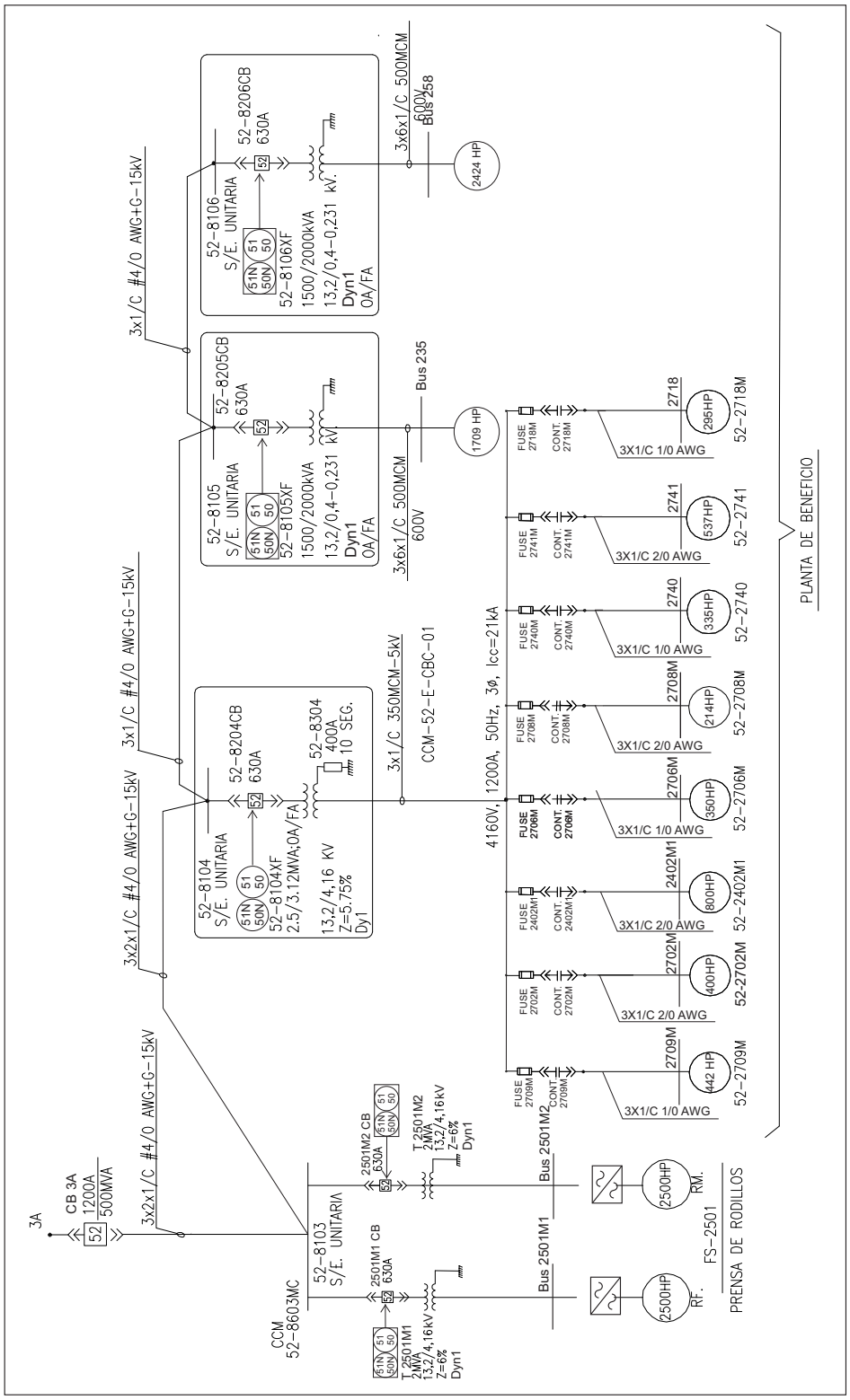


Figura A.9: Diagrama unilineal alimentador 3A

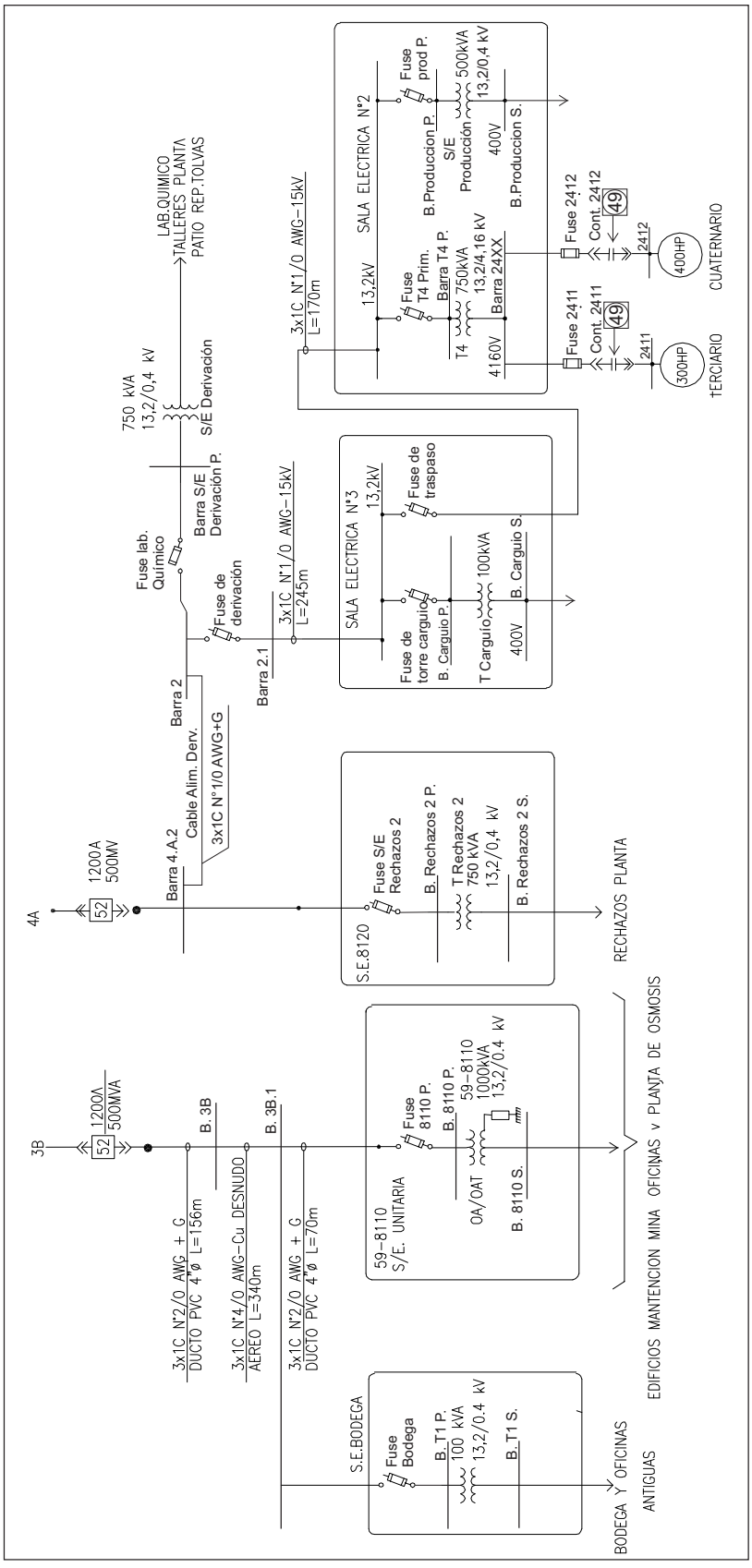


Figura A.10: Diagrama unilineal alimentadores: 3B y 4A

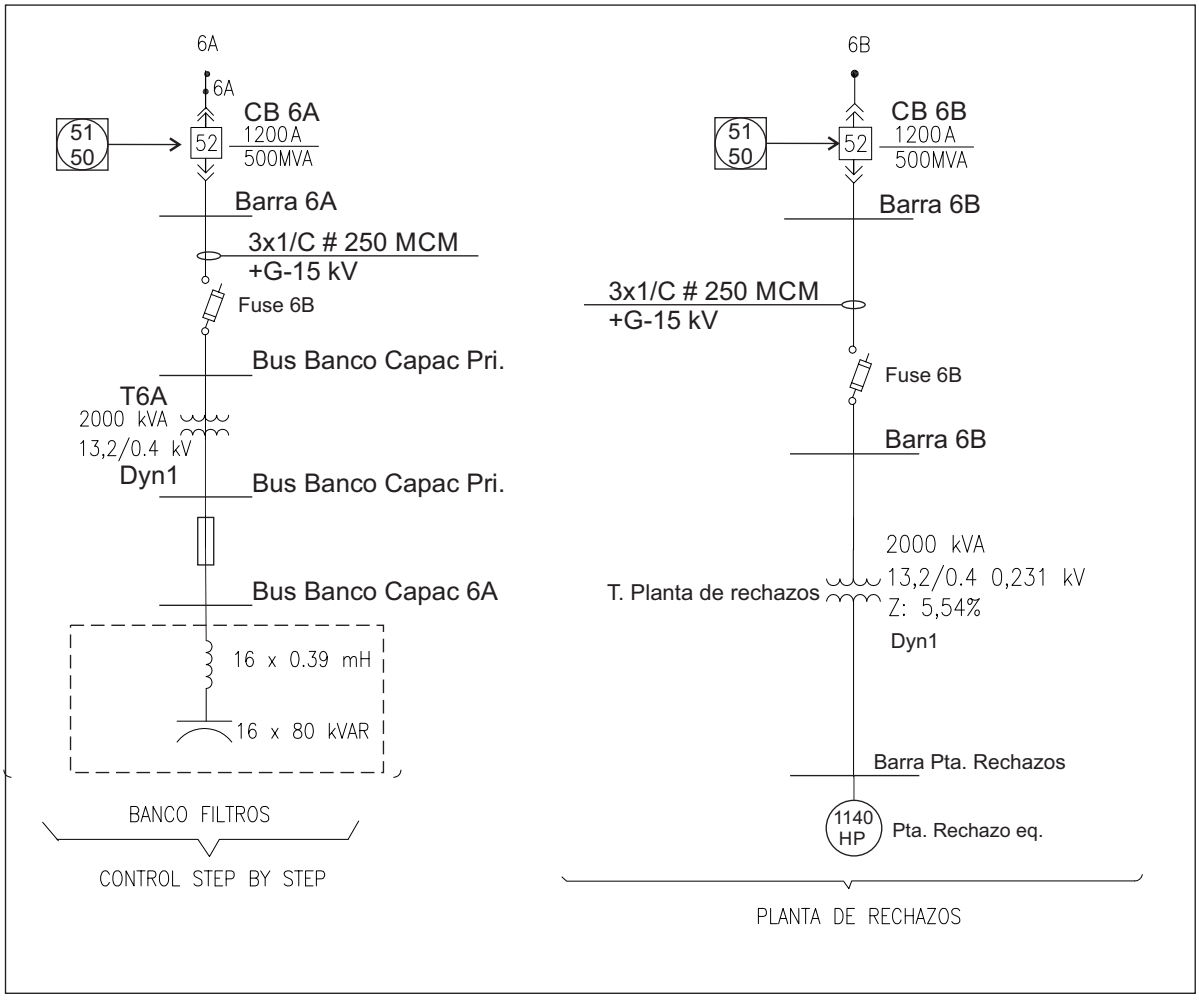


Figura A.11: Diagrama unilineal alimentadores: 6A y 6B

APÉNDICE B

Instalaciones eléctricas minera Los Colorados

En la Tabla B.1, Tabla B.2, Tabla B.3 y Tabla B.4 se detallan las instalaciones eléctricas más relevantes del sistema eléctrico.

Tabla B.1: Relés y fusibles

Tipo	Marca	Modelo
Relé	GE	MULTILIN 750R
Relé	Thytronic	SHG
Relé	GE	565 (5A)
Relé	Square D	Power Logic
Fusible	SIBA	HV-FUSE 200
Relé	GE	269
Fusible	GE	EJ2
Fusible	GE	9F59K
Fusible	G. Shawmut	A055D1
Fusible	Siba	HHD-HV-160A
Fusible	Siba	HHD-80

Tabla B.2: Motores de media y baja tensión

Tag	U_n [kV]	P [HP]	I_n [A]	I_{rb} [$\% \cdot I_n$]	FP [%]	η [%]	n [rpm]	FC [%]	Marca
2740	4,16	335	42,4	600	84	97,42	1484	90	WEG
2741	4,16	537	70.03	600	85	93,26	1450	85	WEG
2708	4,16	214	27,2	630	88	92,78	1480	90	GEVISA G.E.
2706	4,16	350	42,19	580	91,93	93.03	1584	90	WEG
2402	4,16	800	97,09	600	91,76	93,47	988	45	WEG
2702	4,16	400	43,88	600	91,93	93,03	1483	90	WEG
2709	4,16	442	53,42	650	92,03	93,16	1480	90	GEVISA G.E.
2718	4,16	295	35,7	620	91,93	93,03	1484	85	WEG
2401	4,16	603	90,51	550	75	92	750	75	WEG
2701M1	4,16	400	50,3	600	91,99	93,1	1470	90	GEVISA G.E.
2701M2	4,16	400	50,3	600	91,99	93,1	1470	90	GEVISA G.E.
2501M1	4,16	2500	298	650	92,3	94,05	998	60	WEG
2501M2	4,16	2500	298	650	92,3	94,05	998	60	WEG
2412	4	400	50,3	650	91,99	93,1	1499	90	WEG
2411	4	300	37,8	650	91,87	92,96	1499	90	TECO
PALA	7,16	1340	93,01	650	92,49	93,73	1480	90	WEG
8602	0,38	470	626,5	580	95	89,34	1481	65	WEG
8105XF	0,38	1870	2710	620	85	92	1499	71	WEG
8106XF	0,38	2424	3327	650	85	92	1499	60	WEG
Rechazo 6B	0,38	1155	1732	600	84	90	1392	75	WEG

Tabla B.3: Interruptores de alta y media tensión

Tag	Marca	Modelo	U_n [kV]	I_n [A]	I_{sc} [kA]	I_p^* [kA]	Ciclos
CB 1A	GE	VB-13.8-1500	15	1200	63	286,8	8
CB 1B	GE	VB-13.8-1500	15	1200	63	286,8	8
CB 2501M1	Siemens	15-3AF-12.5	15	1250	12,5	31,5	8
CB2501M2	Siemens	15-3AF-12.5	15	1250	12,5	31,5	8
CB 3A	GE	VB-13.8-1500	15	1200	63	286,8	8
CB 51-8101 Prim.	Merlin Gerin	Mcset LF1	15	630	20	80	8
CB 51-8101 Sec.	Merlin Gerin	Mcset LF1	7,2	1250	31,5	80	8
CB 51-8102	Merlin Gerin	Mcset LF2	17,5	630	31,5	80	8
CB 8104XF AT	Merlin Gerin	Mcset LF2	17,5	630	31,5	80	8
CB8104XFBT	Alstom	HMC 1172	7,2	1250	16	161	8
CB NIVEL 475	Merlin Gerin	Mcset LF1	7,2	630	31,5	80	8
CB PUNTA TORO	Alstom	FX11-145	145	3150	45	85	8
CB T 2A Prim.	Alstom	FX11-123	123	3150	31,5	85	8
CB T 2A Sec.	GE	VB-13.8-1500	15	1200	63	286,8	8
CB-8105 AT	Merlin Gerin	Mcset LF2	17,5	630	31,5	80	8
CB-8106 AT	Merlin Gerin	Mcset LF2	17,5	630	31,5	80	8
CB 2411	Merlin Gerin	Mcset LF1	7,2	630	31,5	80	8
CB 2412	Merlin Gerin	Mcset LF1	7,2	630	31,5	80	8
CB3B	GE	VB-13,8-1500	15	1200	63	286,8	8
CB4A	GE	VB-13,8-1500	15	1200	63	286,8	8
CB5A	GE	VB-13,8-1500	15	1200	63	286,8	8
CB5B	GE	VB-13,8-1500	15	1200	63	286,8	8
CB6A	GE	VB-13,8-1500	15	1200	63	286,8	8

Tabla B.4: Datos de placa de transformadores

Transformadores							
Tag	U_n [kV]	Z [%]	X/R [%]	D. Vect	S [MVA]		Marca
S/E Principal	110/13,2	8,1	18,6	Dyn1	OA	12,5	RHONA
					FA	15	
S/E Unitaria 51-8102	13,2/4,16	5,8	7,1	Dyn1	OA	2	RHONA
51-8101XF	13,2/4,16	5,9	7,1	Dyn1	OA	1,5	RHONA
51-8104XF	13,2/4,16	5,75	10,67	Dyn1	OA	2,5	RHONA
					FA	3,12	
51-8105XF	13,2/0,40	6,25	7,1	Dyn1	OA	1,5	RHONA
					FA	2	
8106XF	13,2/0,40	6,25	7,1	Dyn1	OA	1,5	RHONA
					FA	2	
S/E Derivación	13,2/0,40	5	3,96	Dyn1	OA	0,75	SCHAFFNER
S/E Rechazos 1	13,2/4.16	5,54	7,1	Dyn1	ONAN	2	RHONA
T4	13,2/4,16	5,2	3,96	Dyn1	ONAN	0,75	RHONA
T Carguío	13,2/0,4	4	2,47	Dyn1	ONAN	0,1	SCHAFFNER
S/E Rechazos 2	13,2/0,4	4	3,09	Dyn1	ONAN	0,75	SCHAFFNER
T Nivel 475	13,2/7,2	6,7	10,67	Dyn1	ONAN	3	SCHAFFNER
T 59-8210	13,2/0,4	5	5,79	Dyn1	ONAN	1	RHONA
T 51-8602	13,2/0,4	4	3,09	Dyn1	ONAN	0,5	RHONA
T 2501M1	13,2/4,16	6	7,1	Dyn1	ONAN	2	RHONA
T 2501M2	13,2/4,16	6	7,11	Dyn1	ONAN	2	RHONA
T 6A	13,2/0,4	6,25	7,1	Dyn1	OA	2	RHONA
S/E Producción	13,2/0,4	4,8	3,09	Dyn1	ONAN	0,5	SCHAFFNER
T1	13,02/0,4	4	2,47	Dyn1	ONAN	0,1	SCHAFFNER

APÉNDICE C

Cálculo de corrientes de cortocircuito

Las corrientes de cortocircuito se calculan en base al procedimiento DO "Términos y condiciones del cálculo de corrientes de cortocircuito para la verificación del dimensionamiento de interruptores en el SIC" [7].

C.1. Supuestos y simplificaciones

El cálculo de las corrientes de cortocircuito supone las siguientes simplificaciones:

- Durante el tiempo de duración del cortocircuito no existe cambio en el tipo de cortocircuito, esto es, un cortocircuito trifásico permanece trifásico y un cortocircuito monofásico permanece monofásico durante todo el tiempo del cortocircuito.
- Durante el tiempo de duración del cortocircuito, no existen cambios topológicos en la red.
- La impedancia de los transformadores es referida a la posición nominal del cambiador de tomas. No obstante, el cálculo de corrientes de cortocircuito debe considerar un factor de corrección que represente a la posición del cambiador de tomas que de origen a la menor impedancia de cortocircuito.
- Las magnitudes de la resistencia del arco del cortocircuito y de la impedancia de falla se consideran despreciables.
- No se consideran: las capacitancias de las líneas, las admitancias "shunt" y las cargas estáticas (no rotatorias), excepto las correspondientes a la red de secuencia cero del sistema.
- Se debe considerar una tensión de prefalla igual a c veces la tensión nominal del sector donde ocurre la falla. El factor c, depende del nivel de tensión y de la corriente de cortocircuito que se requiere calcular (máxima o mínima), en la Tabla C.1 se resumen los valores del factor c.

Tabla C.1: Factor C

Factor C	
Tensión nominal	C
230 V - 400 V	1
400 V <V nom $\leq$ 1 kV	1,05
V nom >1 kV	1,1

C.1.1. Condiciones de aplicación

- **Corriente de cortocircuito máxima:** el cálculo de estas corrientes deberá contemplar las siguientes condiciones:
  - Se debe utilizar la configuración del sistema que contribuya a obtener el mayor valor de corriente de cortocircuito.
  - Se modela la red externa con su mínima impedancia de cortocircuito equivalente, que corresponde a la máxima contribución de corriente al cortocircuito.
  - La resistencia de las líneas aéreas y cables deberá ser considerada para una temperatura de 20 grados Celsius.
  - Se debe considerar el aporte de los motores a la corriente de cortocircuito.
- Corriente de cortocircuito mínima: el cálculo de estas corrientes deberá contemplar las siguientes condiciones:
  - Se utiliza la configuración del sistema que contribuya a obtener el mínimo valor de corriente de cortocircuito.
  - Se modela la red externa con el máximo valor de impedancia de cortocircuito, que corresponde a la mínima contribución de corriente de cortocircuito.
  - El aporte de la corriente de los motores se considera despreciable.
  - La resistencia de las líneas aéreas y cables deberá ser considerada para su mayor temperatura soportada.

APÉNDICE D

Protecciones de sobrecorriente

Uno de los fenómenos más comunes se presentan durante las anormalidades de un SEP, y en especial en los cortocircuitos, es el aumento de corriente por sobre los valores normales de operación. Este aumento se utiliza para discriminar la ocurrencia de fallas, ya sea como protección principal o de respaldo. Dentro de ese tipo de protecciones se encuentran los fusibles y relés de sobrecorriente, los cuales se utilizan en la mina.

D.1. Relés de sobrecorriente de tiempo inverso

A continuación se detallan los diferentes términos que se utilizan en este tipo de protecciones, como además los criterios a utilizar en su ajuste [8].

- **Tap:** es el dispositivo que permite seleccionar la corriente de operación de relé dentro de un rango de tomas o derivaciones dispuestas para este efecto. Normalmente el valor del tap se designa en Amperes y representa el valor de corriente que haría operar al relé en un tiempo indeterminado (muy largo). En general los relés modernos, la diferencia entre los valores de tap es infinitesimal, por ende el ajuste puede realizarse exactamente a la corriente calculada.
- **Corrientes mínimas de operación o "pick-up":** es la corriente que produce el cambio de estado del relé.
- **Lever o dial de tiempo:** permite seleccionar la curva de tiempo de operación del relé de modo que sea selectivo con la operación de relés ubicados en zonas adyacentes.
- **Tiempo de paso:** cuando se coordinan relés debe mantenerse un intervalo de tiempo entre sus curvas, con el objeto de obtener una operación secuencial correcta de los interruptores. A este intervalo se le denomina tiempo de paso, y su valor final depende de factores tales como tiempo de apertura del interruptor, sobrecarrera y error de las curvas de operación de los relés, y a otros factores, como la exactitud de los transformadores de corriente y a su posible saturación. Como la determinación exacta de cada uno de estos errores es prácticamente imposible, habitualmente se usan como valores aceptables, tiempos de paso de 0,3 o 0,4 segundos. En este valor se considera:

- Tiempo de apertura del interruptor: 0,08 seg.
- Sobrecarrrera: 0,10 seg.
- Error de curvas de los relés: 0,10 seg.
- Factor de seguridad (incluye otros errores):0,02 a 0,12 seg.

Finalmente, y por criterio de la empresa, se utiliza un tiempo de paso de 0,3 segundos.

- **Ajuste de la corriente mínima de operación ("pick-up") de la fase** : la corriente "pick-up" se debe ajustar de modo que no se sobrepase la corriente máxima permitida en cada uno de los equipos e instalaciones protegidas, de tal modo que estas operen en condiciones seguras en todo momento, sin daño o perdida de vida útil en toda condición de operación de régimen permanente. A continuación se definen para cada uno de los equipos e instalaciones de los criterios considerados adecuados:

  - **Transformadores de Poder:** la corriente "pick-up" se ajusta al 110 % de la corriente de potencia nominal de la última etapa de ventilación del transformador. En caso que con este valor de corriente "pick-up", no se logre la coordinación con las protecciones agua abajo, se podrá aumentar el valor del "pick-up" hasta el 140 % de la corriente nominal del transformador.
  - **Cables:** el "pick-up" máximo admisible de un cable monofásico o trifásico corresponde a su corriente nominal garantizada por el fabricante, la cual debe considerar las limitaciones impuestas por su tendido (ducto, tierra, bandeja descubierta o conduit). No se recomienda ajustar el "pick-up" igual a la capacidad de sobrecarga de emergencia, pues solo es posible sobrecargar un cable por periodos muy limitados de tiempo.
  - **Líneas aéreas y alimentadores de media tensión:** la corriente "pick-up" máxima admisible en una línea aérea o alimentador de media tensión corresponde a la capacidad térmica de su conductor a 75 grados Celsius.
  - **Motores:** la corriente "pick-up" se ajustará entre el 110 a 120 % de su corriente de potencia nominal.

- **Ajuste de la corriente mínima de operación ("pick-up") instantánea:** se ajustará para que opere al 130 % de la falla máxima en el extremo del sector que debe proteger el relé. Se corroborara que la corriente "pick-up" seleccionada no supere a la corriente de cortocircuito máxima de la barra donde está ubicado el relé.

  - **Alimentadores con motor:** la energización de motores causa corrientes de arranque de 5 a 7 veces la corriente nominal (corriente de rotor bloqueado), y adicionalmente aparece una corriente asimétrica ("inrush"). Para los motores esta función se ajustará para que opere para una corriente entre 120 a 130 % de la corriente de rotor bloqueado con un retardo de 50 a 100 [ms].

$$I_{pick-up\,50} = 1,25 \cdot I_{rb} \tag{D.1}$$

- **Ajuste de la corriente mínima de operación ("pick-up") residual:** la corriente mínima de operación de la protección de sobrecorriente residual, se debe ajustar de modo que sea sensible a la mínima corriente de falla a tierra que se pueda presentar en el sistema protegido, y a la vez asegurar una correcta coordinación con el resto de

las protecciones. La mínima corriente de cortocircuito para la cual debe ser sensible la protección residual se determina como la corriente de falla calculada en el extremo más distante, en condiciones de generación mínima y con resistencia de falla. No siempre es posible ajustar la protección residual sensible a la mínima corriente de falla, en cuyo caso se deberá a la máxima sensibilidad posible. Esta condición quedará determinado por el compromiso entre la coordinación con el resto de las protecciones, la sensibilidad a los fenómenos transitorios, la tecnología del sistema de protección, las conexiones a la tienrra existentes.

- **Transformadores de potencia:** el "pick-up" de la sobrecorriente residual de un transformador deberá ser ajustado al 15 % de la corriente nominal de la última etapa de ventilación.
- **Líneas aéreas:** el "pick-up" de la sobrecorriente residual de una línea de transmisión aérea corresponde aproximadamente al 10 % de la capacidad térmica de los conductores
- **Alimentadores de media tensión:** el "pick-up" de la corriente residual de un alimentador de media tensión debe ser ajustado en el rango comprendido entre 5 y 7 % de la capacidad térmica del conductor del alimentador. El criterio indicado es válido para ser aplicado solo a las redes de media tensión cuyas cargas son alimentadas mediante transformadores de distribución trifásicos con enrollados delta-estrella y sin transformadores reguladores conectado a tierra.
- **Motores:** la corriente "pick-up" debe ser ajustado al 15 % de la corriente nominal del motor.

D.2. Procedimiento de ajuste de relé de sobrecorriente de fase de tiempo inverso

En esta sección se describe el procedimiento de ajuste del relé de sobrecorriente de fase de tiempo inverso [9]. A continuación de detalla el paso a paso su ajuste:

- Para ajustar este tipo de relé se necesita conocer:
  - Corriente o potencia nominales de carga (I_{nom}, S_{nom}).
  - Sobrecargas admisibles o probables.
  - I falla máx. y mín (determinados con ETAP), y el tiempo de operación para falla máxima.
- Determinar corriente nominal

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3} \cdot E_{nom_{LL}}} \tag{D.2}$$

- Elección del tap de ajuste del 51.

$$I_{pick-up} = k \cdot I_{nom} \cdot \frac{\alpha}{5} \tag{D.3}$$

- Comprobación del tap, siempre que k se admita.

$$N_{F\ mín} = \frac{I_{F\ mín}\frac{\alpha}{5}}{I_{pick-up}} \geq 1{,}5 \tag{D.4}$$

- **Elección o ajuste de "lever" (L):** en las protecciones ubicadas cercanas a las cargas se utiliza un tiempo de operación para falla máxima de los relés de protección, $t_{F\ máx}$, como mínimo de 0,05 [s][11]. Luego de determinado $N_{F\ máx}$ con la ecuación (D.5), se determina el "lever" como se observa en la Figura .

$$N_{F\ máx} = I_{F\ máx} \cdot \frac{\alpha}{5} \tag{D.5}$$

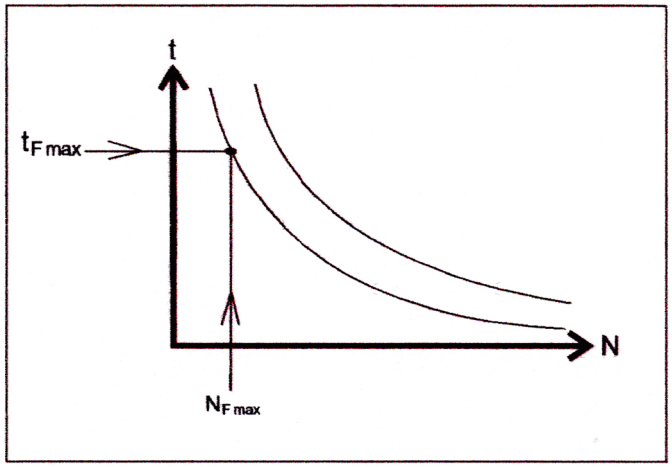


Figura D.1: Selección del "lever"

D.3. Coordinación de relés de sobrecorriente de secciones vecinas

Para lograr una correcta selectividad entre relés sucesivos se debe considerar un intervalo de tiempo prudencial. Dado que este intervalor de tiempo debe ser mayor al tiempo que se demora en operar el interruptor asociado a la protección principal. Por ejemplo cuando ocurre una falla en F (ver Figura D.2) debe operar el 51B dando orden de disparo al 52B.

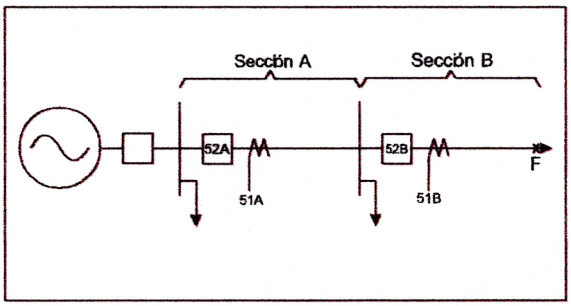


Figura D.2: Coordinación de relés de sobrecorriente

Para determinar el tiempo de aclaramiento de la falla ubicada en F se utiliza la ecuación (D.6).

$$t_{BF} = t_{51-B_F} + t_{52-B} \tag{D.6}$$

[11]Determinada por la empresa

El respaldo del 51B debe ser el 51A dando orden de disparo al 52A.

$$t_{AF} = t_{51-A_F} + t_{52-A} \tag{D.7}$$

donde se debe cumplir que:

$$t_{51-A_F} = t_{51-B_F} + \Delta t \geq t_{BF} \tag{D.8}$$

Para que se cumpla la relación de la ecuación (D.8), Δt se considera igual a 0,3 (s). Este valor es utilizado en el ajuste de este tipo de protecciones por el Departamento de Potencia de mina Los Colorados.

D.4. Selección de fusibles

A continuación se detallan los aspectos y procedimientos que se deben considerar en la selección de fusibles [9]. Los datos que deben conocerse de un sistema de distribución para seleccionar un fusible para una ubicación particular en el sistema son:

- Tensión del sistema y nivel de aislación.
- Tipo del sistema de distribución
- Razón $\frac{X}{R}$ e $I_{F\,máx}$.
- Corriente de carga (posible sobrecarga).

Estos cuatro factores determinan tres valores nominales del fusible:

- Corriente nominal.
- Tensión nominal.
- Capacidad de interrupción.

D.4.1. Criterios de ajuste para protección de transformador mediante fusibles

Se recomienda considerar los siguientes puntos:

- Deben ser capaces de soportar sin quemarse la corriente nominal incrementadas en un margen de seguridad que permita sobrecargas controladas, o que de la posibilidad de aumentar la capacidad del transformador mediante ventilación adicional. En general, los fusibles deberán ser capaces de soportar 1,5 veces la corriente nominal en forma permanente.
- Deben ser capaces de soportar sin dañarse, la corriente de magnetización "Inrush" por lo menos 0,1 [s]. Esta corriente es del orden de 10 veces la corriente nominal del transformador.
- Los fusibles deben quemarse para una corriente igual o superior a 6 veces la corriente nominal del transformador, siempre que la impedancia de este último sea inferior al 6 %. Si la impedancia del transformador está entre 6 y 10 %, deberá considerarse 4 a 6 veces la corriente nominal. El tiempo debe garantizar que no se daña el transformador.

- Los fusibles deben quemarse para los valores de corriente y dentro de los tiempos establecidos por la norma ASA y NEMA para las corrientes efectivas máximas de cortocircuito, simétricas, que pueden soportar los transformadores durante tiempos determinados.

Tabla D.1: Máximo valores de corriente de cortocircuito, según norma ASA-NEMA para falla 3ϕ

Z_t [%]	$I_{F\ máx}\ CA\ RMS$	Tiempo máximo [s]
4	$25,0 \cdot I_n$	2
5	$20,0 \cdot I_n$	3
6	$16,6 \cdot I_n$	4
7	$14,3 \cdot I_n$	5

D.4.2. Coordinación entre fusibles

La coordinación entre fusibles se realiza de forma semejantea la de los relés de sobrecorriente de tiempo inverso (51), salvo que:

- Es necesario considerar para cada fusible una zona de operación: curva de tiempo mínimo de fusible corregida-curva de tiempo total de aclaramiento del fusible.
- En caso de fusibles ubicados en lados diferentes de un transformador (primario y secundario), es necesario referir las curvas características de operación de los fusibles a un lado del transformador.
- El tiempo máximo de aclaramiento de un fusible no debe exceder el 75 % del tiempo de mínimo de fusión del fusible que le da respaldo (ver Figura D.3 y ecuación (D.9)).

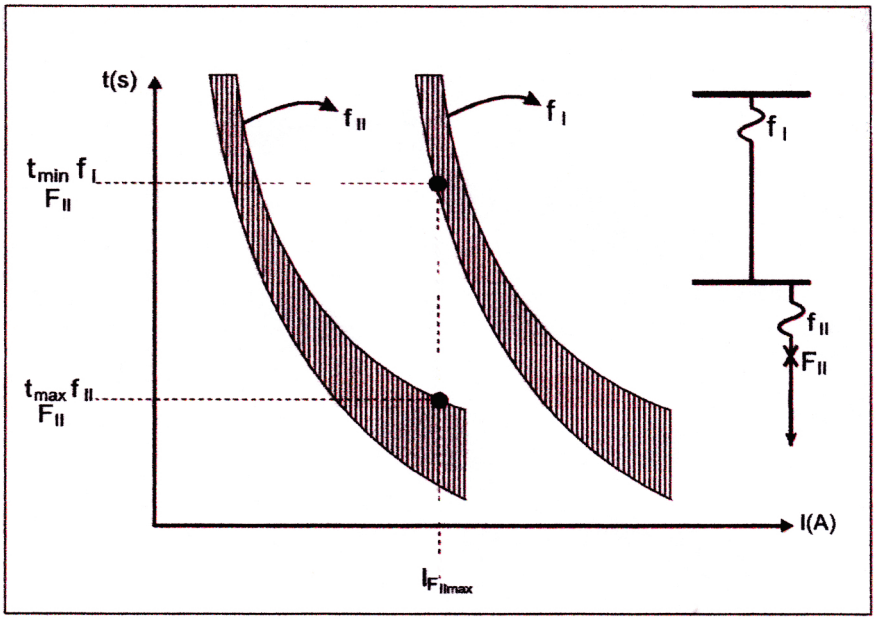


Figura D.3: Coordinación de fusibles vecinos

$$t_{máx\ fII} \leq 0,75 t_{mín\ fI} \tag{D.9}$$

D.4.3. Coordinación de fusibles con transformador intermedio

Para este caso es necesario analizar diferentes tipos de fallas con el fin de determinar la situación más crítica. Desde el punto de vista de la coordinación, las condiciones más críticas son aquellas donde la corriente de línea en por unidad en el lado primario del transformador es mayor que la corriente de línea en por unidad en el lado secundario del transformador. Para esta situación, el fusible ubicado en el primario lleva relativamente mayor corriente que el ubicado en el secundario. La Tabla D.2 entrega la relación en por unidad que existe entre las corrientes de línea del primario y del secundario, para diferentes tipos de conexión del transformador y de fallas en el secundario.

Tabla D.2: Relación entre corrientes de fase en pu de un transformador

Conexión Transformador	Tipo de falla		
	3ϕ	2ϕ	$1\phi - t$
$Y_n y_n$	1,0	1,0	1,0
D_d	1,0	0,87	-
$D y_n$	1,0	1,15	0,58

D.4.4. Coordinación entre fusible e interruptor automático

Debido a que los equipos de protección ubicados en el secundario de un transformador tieen corriente nominal o ajustes mayores que los del primario, a veces surgen algunas dificultades para lograr una coordinación adecuada de las protecciones, para fallas en el secundario, que esté de acuerdo con la curva de características de corto tiempo del transformador. Si esta situación se presenta, es recomendable que la corriente nominal o los ajustes de la protección del secundario se revise para ver si es posible una reducción, antes que aceptar emplear un fusible de corriente nominal mayor que la necesaria para el fusible ubicado en el primario del transformador, ya que esto reduciría la protección del transformador. Según el fusible esté "aguas arriba" o "aguas abajo" del interruptor, se deberán usar para realizar la coordinación las curvas "tiempo mínimo de fusión" ajustada o "tiempo total de aclaramiento", referidas al mismo lado del transformador. En caso del interruptor, será necesario emplear la curva "tiempo total de aclaramiento-corriente", o la curva "tiempo-corriente" del relé; es necesario recordar que:

$$t_{total} = t_{51} + t_{52} \tag{D.10}$$

D.4.5. Protección de banco de condensadores

A continuación se detallan los aspectos a tener en consideración en la selección de fusible [10] para cuando proteje a un banco de condensador.

- **Corriente nominal:** independientemente de si se emplean fusibles para un solo condensador o para un grupo, primero se debe determinar la capacidad de la unidad, o sea la corriente por fase. A continuación se debe tomar en cuenta el contenido de

armónicas. Se utilizará un valor de 1,35 veces la corriente de carga para determinar la corriente nominal del dispositivo de protección.

- **Corriente de puesta de servicio:** dado que esta corriente es de régimen transitorio, es mejor analizar este fenómeno a través del concepto de energía $I^2 \cdot t$. Para calcular la magnitud de la corriente de puesta de servicio en un punto determinado del circuito, conectado en estrella aterrizado, se puede emplear una expresión de la energía dada en función de la corriente de cortocircuito y de la relación X/R del circuito hasta el punto de localización del banco. La expresión de la ecuación (D.11) permite calcular la energía $I^2 \cdot t$ basada en el valor "peak" de la corriente de puesta de servicio.

$$I^2 \cdot t = 2,65 \cdot \sqrt{(1 + K^2)} \cdot I_n \cdot I_{cc} \tag{D.11}$$

Donde:
K: X/R en el lugar donde este instalado el banco.
I_n: Corriente nominal del banco [A].
I_{cc}: Corriente de cortocircuito en el lugar donde este instalado el banco [kA].

Una vez que se calcula la energía entonces es necesario determinar la energía de fusión mínima del fusible seleccionado. Esto se realiza calculando la energía para 0,01 [s] en la curva tiempo-corriente de fusión mínima y multiplicándola por un factor igual a 0,7; este valor es un factor de seguridad que permite considerar el efecto piel a altas frecuencias. Finalmente, la energía ($I^2 \cdot t$) de puesta de servicio se puede comparar con la energía de la curva de fusión mínima para determinar si el fusible opera o no cuando el banco se energice.

D.4.6. Protección de motores con fusible

- **Motores de media tensión.** Mediante de fusibles Tipo R y contactor comandado por relé (ANSI 49): para proteger contra sobrecargas se utilizará el contactor comandado por el relé 49 el cual será ajustado al 105 % de la corriente nominal del motor a plena carga (esta selección debe permitir el arranque del motor). Para proteger contra cortocircuitos se utilizará los fusibles tipo R ($2R, 3R \ldots nR$) que al igual que el relé 49 deben permitir el arranque a tensión nominal del motor, y que se funda a valores mayores a la corriente de arranque (I_{rb}). Para seleccionar el coeficiente n que acompaña a la letra R se realizará el siguiente procedimiento [11]:

$$n = \frac{I_{rb}}{100} \tag{D.12}$$

En caso que n sea un número decimal se ajustará al número entero mayor. Con ayuda de ETAP, se debe corroborar que relé 49 actué antes que el fusible para corrientes cercanas al 105 % de la corriente nominal del motor. A continuación en la Tabla D.3 se muestra la corriente nominal para fusibles tipo R disponibles en el mercado.

Tabla D.3: Corriente nominal de fusibles tipo R

Designación nR	Corriente Nominal [A]
$2R$	70
$3R$	100
$4R$	130
$5R$	150
$6R$	170
$9R$	200
$12R$	230
$18R$	390
$24R$	450
$26R$	480

Bibliografía

[1] CAP Minería. Proceso productivo mina Los Colorados [en línea] «http://www.capmineria.cl/operaciones/valle-del-huasco» [consulta: 10 de septiembre 2015].

[2] PÁGINA Web ETAP. Definición de ETAP [en línea] «http://www.etap.com» [consulta: 10 de agosto 2015].

[3] COMISIÓN Nacional de Energía. Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio. Santiago. 2009. 59 p.

[4] ETAP 12.0.0 User Guide. 2012.

[5] PÁGINA web CDEC-SIC, «http://www.cdec-sic.cl» [consulta: 10 de octubre 2015].

[6] INTERNATIONAL Electrotechnical Commission. HV AC Circuit Breakers. IEC 62271-100. 2001

[7] DIRECCIÓN de Operación CDEC-SIC. Procedimiento DO Cálculo del Nivel Maximo de Cortocircuito. Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central. Junio 2010.

[8] TRASNET. Departamento de Ingeniería. Instrucción Técnica de Criterios de Ajuste de Protecciones de Sobrecorriente. 2012.

[9] LEIVA, Nelson. Apuntes ELI-347, Análisis de Sistemas de Potencia II. Universidad Técnica Federico Santa María. 2008.

[10] CONCHA, Patricio. Ajuste de fusible para protección de banco de condensadores [en línea] «http://patricioconcha.ubb.cl/eleduc/public_www/capitulo4/consideraciones_en_cuanto_a_la_proteccion_de_bancos_condensadores.html» [consulta: 20 octubre 2015]

[11] GONZÁLEZ, Hernán. Procedimiento de selección de fusible tipo R para protección de motores de media tensión. CAP. 2014.