

Universidad Técnica Nacional de Costa Rica

Sede el Pacífico

Carrera de Ingeniería Eléctrica

“Estudio de arco y choque eléctrico de la planta de producción Cemex Colorado, basado en la norma IEEE 1584-2018 y NFPA 70E-2018”

Trabajo final de graduación como requisito para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica

Sustentante:

Luis Miguel Esquivel Sequeira

**Puntarenas, Costa Rica
2021**

ACTA DE APROBACIÓN

En la ciudad de Puntarenas, a los 07 días del mes de mayo del año 2021 al ser las 16:00 horas, estando presentes en el Campus Juan Rafael Mora Porras de la Sede del Pacífico de la Universidad Técnica Nacional, las siguientes personas:

Profesor Tutor: Billy Quesada Solano

Profesor Lector Externo: Jesús Rubaldo Batista Castillo

Profesor Lector Interno: José A. Vásquez Araya

Presidente del Tribunal Examinador: Carlos Ruiz Rodríguez

En su condición de miembros del Tribunal Evaluador, para evaluar el Proyecto de Graduación para optar por el grado de **Licenciatura en Ingeniería Eléctrica**, de las personas estudiantes, **Luis Miguel Esquivel Sequeira** cédula de identidad **503860430**.

Reunido el Tribunal Evaluador los aspirantes procedieron a presentar y defender su Proyecto de Graduación titulado **“Estudio de arco y choque eléctrico de la planta de producción Cemex Colorado, basado en la norma IEEE 1584-2018 y NFPA 70E-2018.”**

Concluida la presentación y defensa del Proyecto de Graduación, el Tribunal Evaluador consideró que, de conformidad con la normativa en la materia, las personas estudiantes obtuvieron una calificación de 85, cumpliendo con las exigencias requeridas para la aprobación del Proyecto y le es conferido el grado de **Licenciado en Ingeniería Eléctrica**.

No Si () mención honorífica


Billy Quesada Solano
Profesor Tutor


José A. Vásquez Araya
Lector interno

Jesús Rubaldo Batista Castillo
Lector Externo


Carlos Ruiz Rodríguez
Presidente del Tribunal Examinador


Sello

50209034

Estudiantes:


Luis Miguel Esquivel Sequeira
Cédula 503860430

Dedicatorias

A Danna y a Ian, mis hijos.

Agradecimientos

A mi familia y amigos, que siempre tuvieron palabras de apoyo.

A Miguel Alfaro Vargas, por sus consejos en momentos oportunos.

A los profesores de mi amada institución, por su atención y disponibilidad.

Tabla de contenidos

CAPÍTULO I: Descripción del proyecto	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 ANTECEDENTES.....	5
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.5 OBJETIVOS.....	15
1.5.1 Objetivo general.....	15
1.5.2 Objetivos específicos.....	15
1.6 ALCANCE.....	16
1.7 LIMITACIONES.....	17
1.8 VIABILIDAD.....	17
1.9 CRONOGRAMA.....	18
CAPÍTULO II: Marco teórico	20
2.1. SOBRE CORRIENTES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	23
2.1.1. Corriente nominal.....	23
2.1.2. Corriente de sobrecarga.....	24
2.1.3. Corriente de falla.....	24
2.1.4. Clasificaciones de fallas.....	24
2.1.5. Corriente de falla a tierra.....	24
2.1.6. Fuentes de corriente de falla.....	25
2.1.7. Variación de tiempo de corriente de cortocircuito.....	25
2.1.8. Corrientes simétricas y asimétricas de cortocircuito.....	27
2.2. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE.....	28
2.2.1. Requerimientos básicos de las protecciones.....	29
2.2.2. Fusibles.....	29
2.2.2.1. Fusibles de bajo voltaje.....	30
2.2.2.2. Fusibles de mediana tensión.....	31
2.2.2.2.1. Fusibles limitadores de corriente de mediana tensión.....	31
2.2.2.3. Fusibles de alta tensión.....	32
2.2.3. Disyuntores.....	32
2.2.3.1. Disyuntores de baja tensión.....	32
2.2.3.1.1. Interruptores de circuito de caja moldeada (MCCB).....	33
2.2.3.1.2. Interruptores de potencia de baja tensión (LVPCB).....	33
2.2.3.1.3. Disyuntores con limitación de corriente.....	37
2.2.3.2. Disyuntores de mediana tensión.....	37
2.2.3.2.1. Tipo cerrado de metal.....	38
2.2.3.2.2. Tipo revestido de metal.....	38
2.2.3.2.3. Interruptores SF6.....	38
2.2.3.2.4. Interruptores de vacío.....	38

2.2.4.	Relés de protección.....	39
2.2.4.1.	Relé de sobrecorriente	40
2.2.4.2.	Relé diferencial.....	41
2.3.	COORDINACIÓN Y SELECTIVIDAD DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN.....	42
2.3.1.	Curvas características de tiempo-corriente.....	43
2.3.2.	Datos necesarios para un estudio de coordinación	44
2.3.3.	Procedimiento de coordinación	45
2.3.4.	Intervalos de tiempo de coordinación.....	47
2.3.5.	Requisitos de coordinación.....	50
2.3.5.1.	Límites del transformador NFPA 70	51
2.3.5.2.	Punto de resistencia ANSI C57.12	51
2.3.5.3.	Irritación magnetizante (inrush)	51
2.3.6.	Tiempo mínimo definido inverso en relés de protección contra sobrecorriente estándar	52
2.4.	ESTUDIO DE ARCO Y CHOQUE ELÉCTRICO	58
2.4.1.	Riesgos del arco y choque eléctrico	58
2.4.2.	Efectos del arco eléctrico.....	59
2.4.3.	Normativa	59
2.4.3.1.	NFPA 70E-2018: Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo.....	61
2.4.3.1.1.	Límites de aproximación	62
2.4.3.1.2.	Condición de trabajo eléctricamente segura	63
2.4.4.	Análisis de peligro de choque y análisis de peligro de relámpago de arco	65
2.4.4.1.	Análisis de peligro de choque.....	65
2.4.4.2.	Análisis de peligro de relámpago	65
2.4.4.2.1.	Equipo de protección personal (EPP).....	65
2.4.5.	IEEE 1584-2018: Guía para el cálculo de los riesgos derivados del “arcflash”	66
2.4.5.1.	Pasos para realizar el análisis de peligro de relámpago de arco	68
2.4.5.1.1.	Paso 1: recolectar la información del sistema y la instalación	68
2.4.5.1.2.	Paso 2: determinar los modos de operación del sistema	69
2.4.5.1.3.	Paso 3: determinar las corrientes de falla franca	69
2.4.5.1.4.	Paso 4: el espacio típico y el tamaño del gabinete en función de los voltajes del sistema y las clases de equipos.....	69
2.4.5.1.5.	Paso 5: determinar la configuración de los electrodos en los equipos	70
2.4.5.1.6.	Paso 6: determinar las distancias de trabajo	70
2.4.5.1.7.	Paso 7: determinar las corrientes de falla de arco	71
2.4.5.1.8.	Paso 8: hallar las características del dispositivo de protección y la duración de los arcos	71
2.4.5.1.9.	Paso 9: determinar la energía incidente para cada locación de trabajo (equipo).....	71
2.4.5.1.10.	Paso 10: determinar la frontera de protección de “arc flash” para cada locación de trabajo en el estudio	71

2.4.6.	Modelos para los cálculos de arcflash	72
2.4.6.1.	Norma IEEE 1584-2018	72
2.4.6.1.1.	Corrientes de arco medias intermedias	72
2.4.6.1.2.	Factor de corrección de la variación de corriente de arco	73
2.4.6.1.3.	Energía incidente promedio	74
2.4.6.1.4.	Límites de destello de arco promedios	75
2.4.6.1.5.	Factor de corrección para el tamaño de los gabinetes	76
2.4.6.1.6.	Determinación de la I_{arc} , E, y AFB ($600\text{ V} < V_{oc} \leq 15\ 000\text{ V}$)	77
2.4.6.1.7.	Determinación de la I_{arc} , E, y AFB ($V_{oc} \leq 600\text{ V}$)	80
2.4.6.2.	Método de Lee	82
CAPÍTULO III: Marco metodológico		83
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	84
3.2.	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	85
3.3.	FUENTES DE INFORMACIÓN	86
3.4.	VARIABLES	87
3.5.	SUJETO DE INFORMACIÓN	87
3.6.	RESUMEN	88
CAPÍTULO IV: Presentación y análisis de los resultados		89
4.1.	CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO	90
4.2.	INTRODUCCIÓN AL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO MEDIANTE EL SOFTWARE EASYPOWER	92
4.3.	EQUIPOS Y DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN	99
4.3.1.	Relés de sobrecorriente	99
4.3.2.	Ajuste y coordinación de las protecciones	99
4.3.3.	Funciones de las protecciones	100
4.3.4.	Ajustes de las protecciones para motores y transformadores	100
4.3.5.	Criterios para la selección de los ajustes y coordinación de los relés de sobrecorriente	101
4.3.5.1.	Ajuste de la protección temporizada de fase	101
4.3.5.2.	Ajuste de la unidad instantánea de fase	102
4.3.6.	Coordinación de las protecciones de sobrecorriente de fase	103
4.3.7.	Subestación principal	105
4.3.8.	Horno enfriador	115
4.3.9.	Molino de crudo	126
4.3.10.	CCM Trituración	135
4.3.11.	CCM Molino cemento	138
CAPÍTULO V: Diseño e implementación del proyecto		156
5.1.	EVALUACIÓN DE RIESGOS Y DOCUMENTACIÓN	160
5.1.1.	Informes	161
5.1.2.	Diagrama unifilar	162
5.1.3.	Documentación en los equipos	163

5.1.3.1. Etiquetas de advertencia con valores de destello de arco	163
5.2. LÍMITES DE EXPOSICIÓN AL ARCO	164
5.2.1. Frontera de aproximación restringida.....	165
5.2.2. Frontera de relámpago de arco	166
5.3. REDUCCIÓN DEL NIVEL DE ENERGÍA DE ARCO LIBERADA.....	167
5.3.1. Esquema diferencial de bus	170
5.3.2. Esquema de enclavamiento de zona mediante relevación de sobrecorriente	172
5.3.3. Habilitación del elemento instantáneo durante el mantenimiento.....	173
5.3.4. Sensores ópticos (dispositivo AFD: detector de arc flash).....	174
5.4. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL	177
5.4.1. Normas sobre equipos de protección personal	178
5.4.2. Factores que afectan el nivel de protección en la selección del EPP	183
5.5. EQUIPO DE PROTECCIÓN CONTRA RELÁMPAGOS DE ARCO.....	184
5.5.1. Protección de la cabeza, la cara, el cuello y el mentón (área de la cabeza)	185
5.5.2. Protección de los ojos.....	186
5.5.3. Protección auditiva	186
5.5.4. Protección de manos y brazos	186
5.5.5. Protección contra choque.....	186
5.5.6. Protección contra relámpago de arco.....	188
5.5.7. Uso y mantenimiento.....	188
5.5.8. Protección de los pies	188
5.6. SELECCIÓN DE EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL	189
5.6.1. Otros equipos de protección	194
5.6.1.1. Varas reforzadas con fibra de vidrio.....	194
5.6.1.2. Escaleras portátiles	195
5.6.1.3. Escudos protectores	195
5.6.1.4. Equipos de hule aislante	195
5.6.1.5. Barreras físicas o mecánicas.....	195
CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones	196
6.1. CONCLUSIONES	197
6.2. RECOMENDACIONES	199
Bibliografía.....	202
Anexo 1	210
Anexo 2	217
Anexo 3	219

Tabla de figuras

fig. 1. números de lesiones eléctricas fatales.....	8
fig. 2. número de fatalidades eléctricas por actividad laboral	9
fig. 3. número de lesiones eléctricas no fatales.	10
fig. 4. índice de lesiones eléctricas no fatales por actividad laboral.....	11
fig. 5. fases operativas y de producción de la planta de cemento.....	21
fig. 6. corrientes simétricas de cortocircuito de cuatro fuentes combinadas	26
fig. 7. corriente típica de falla del sistema	28
fig. 8. corriente de ajuste instantánea (magnética) proporcionada por disyuntores termomagnéticos.....	34
fig. 9. unidad electrónica ajustable con long-time (tiempo largo), <i>short-time</i> (tiempo corto), <i>instantaneous</i> (instantáneo), y ajustes de falla a tierra.....	34
fig. 10. tcc de curva típica de un mccb o lvpcb con funciones ajustables definidas	35
fig. 11. tcc de curva típica de falla a tierra de ajuste electrónico de un disyuntor.....	35
fig. 12. esquema o representación del relé diferencial	42
fig. 13. a) característica de las curvas temporizadas del relé según iec 60255; b) característica de las curvas temporizadas del relé norteamericana ieee	54
fig. 14. características típicas de tiempo-corriente para relés según el estándar tiempo definido inverso	54
fig. 15. curva característica de ajuste de un relé diferencial.....	57
fig. 16. etiqueta requerida por nfpa 70e.....	60
fig. 17. fronteras o límites de aproximación por choque enumerado según el punto 2.4.3.1.1.	63
fig. 19. epp de protección de relámpago según la categoría de riesgo	66
fig. 20. esquema eléctrico de potencia de la planta de producción cemex, c.r.....	94
fig. 21. coordinación de tiempo – corriente.....	104
fig. 22. corriente de falla y tiempo de operación en función de la distancia de la fuente eléctrica.....	104
fig. 23. diagrama unifilar de la zona de la subestación	106
fig. 24. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación	107
fig. 25. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 1, subestación-molino cemento.	108

fig. 26. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 2, subestación- ccm trituración.....	109
fig. 27. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 3, subestación- molino crudo.....	110
fig. 28. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 4, subestación-horno enfriador	111
fig. 29. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 5, subestación-servicios auxiliares	112
fig. 30. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 6, subestación-ciudadela martínez.....	114
fig. 31. diagrama unifilar de la zona del horno enfriador y molino coke	115
fig. 32. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona horno enfriador, ramal 1, transformador 11	116
fig. 33. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona horno enfriador, ramal 2, vent. noric	117
fig. 34. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona horno enfriador, ramal 3, transformador 10.....	119
fig. 35. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona horno enfriador, ramal 4, transformador 9.....	120
fig. 36. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino coke, ramal 1, transformador 8	122
fig. 37. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino coke, ramal 2, mt8 molino vertical	123
fig. 38. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino coke, ramal 3, transformador 7.....	125
fig. 39. diagrama unifilar de la zona de molino crudo.....	126
fig. 40. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 1, mt7 vti horno	127
fig. 41. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 2, mt6 ventilador captador de polvo.....	128
fig. 42. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 3, mt5 molino de crudo.....	129
fig. 43. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 4, transformador 6	130
fig. 44. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 5, transformador 5	131

fig. 45. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 6, mt4 ventilador tiro de horno	133
fig. 46. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 7, transformador 4	134
fig. 47. diagrama unifilar de la zona de trituración	135
fig. 48. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona trituración, ramal 1, mt3 cantera	136
fig. 49. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona trituración, ramal 2, transformador 3	137
fig. 50. diagrama unifilar de la zona de molino cemento	138
fig. 51. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de molino cemento, ramal 1, transformador 2	140
fig. 52. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de molino cemento, ramal 2, mt2 motor separador pl. pulse	141
fig. 53. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de molino cemento, ramal 3, mt1 motor molino cemento	142
fig. 54. representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de molino cemento, ramal 4, transformador 1	144
fig. 55. etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de la subestación	151
fig. 56. etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona del horno enfriador.....	152
fig. 57. etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de molino coke.....	152
fuentes: easypower	152
fig. 58. etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de molino de crudo	153
fig. 59. etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de trituración	154
fuentes: easypower	154
fig. 60. etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de molino cemento.....	154
fig. 61. etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de servicios auxiliares.....	155
fig. 62. configuración de electrodos según ieee 1584-2018	158

fig. 63. a) arco con electrodos verticales detrás de la caja, b) arco con electrodos de descarga horizontal	159
fig. 64. unidad de ajuste de potencia remota	169
fig. 65. esquema de bus diferencial de alta impedancia	171
fig. 66. diferencial de bus de baja impedancia	172
fig. 67. esquema de ajuste de bus rápido	173
fig. 68. sistema de detección de destello de arco y humo para un panel board	175
fig. 69. ejemplos de protectores faciales para altas categorías o energías incidente	185
fig. 70. guantes (caucho y cuero) seguridad contra arco y choque eléctrico	187
fig. 71. calzado de seguridad contra arco y choque eléctrico	189
fig. 72. pértiga o vara de fibra de vidrio de seguridad contra arco y choque eléctrico.	194

Tabla de cuadros

Tabla 1. Cronograma de ejecución	18
Tabla 2. Tiempos de coordinación de dispositivos de protección.....	49
Tabla 3. Definiciones de características estándar de protección de relés.....	52
Tabla 4. Definiciones ANSI IDMT de características estándar de protección de relés .	53
Tabla 5. Cuadro resumen de instrumentos, fuentes y análisis de datos de la metodología	88
Tabla 6. Datos de entrada de red eléctrica.....	92
Tabla 7. Informe resumen de estudios de cortocircuitos en los buses de media tensión - 1/2 ciclo trifásico	96
Tabla 8. Informe resumen de estudios de cortocircuitos en los buses de baja tensión - 1/2 ciclo trifásico	98
Tabla 10. Reporte de ajustes de coordinación de los relés de protección (mediana tensión)	145
Tabla 11. Reporte de ajustes de coordinación de los relés de protección (mediana tensión)	146
Tabla 12. Reporte de ajustes de coordinación de disyuntores de potencia de baja tensión	147
Tabla 13. Reporte de parámetros de coordinación de fusibles en mediana y baja tensión	148
Tabla 14. Reporte umbral de energía incidente de destello de arco	149
Tabla 15. Resumen de las ventajas y desventajas del sistema que debe reducir el peligro de arco-destello.....	176
Tabla 16. Clasificación de voltaje de guantes de seguridad contra arco y choque eléctrico	187
Tabla 17. EPP con categoría 1 de seguridad contra arco y choque eléctrico	190
Tabla 18. EPP con categoría 2 de seguridad contra arco y choque eléctrico	191
Tabla 19. EPP con categoría 3 de seguridad contra arco y choque eléctrico	192
Tabla 20. EPP con categoría 4 de seguridad contra arco y choque eléctrico	193

NOMENCLATURA

ANSI: American National Standards Institute

ASTM: American Society for Testing and Materials

CCM: Centro de Control de Motores

EPP: Equipo de Protección Personal

FLA: Full Load Ampères

FLC: Full Load Current

HCB: electrodos / conductores horizontales dentro de una caja / envoltente de metal

HOA: Conductores / electrodos horizontales abiertos

HRC: Hazard RiskCategory

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

MCC: Motor Control Center

NEC: National Electric Code

NFPA: National Fire Protection Association

OSHA: Occupational Safety and Health Administration

RMS: Root Mean Square

UL: Underwriter Laboratories

VCB: conductores / electrodos verticales dentro de una caja / envoltente de metal

VCBB: electrodos / conductores verticales terminados en una barrera aislante dentro de una caja / envoltente de metal

VOA: Conductores / electrodos verticales abiertos

Resumen

Cemex es una compañía global dedicada a la elaboración y distribución de materiales de construcción con sedes en más de 50 países y fundada en México en 1906. En 1980, abrió su economía hacia otros países. En ese tiempo, ya estaba pasando por un proceso de consolidación y fue así como decidió extenderse hacia otros países forjando una de sus sedes en Costa Rica.

Durante su permanencia, esta empresa ha experimentado múltiples cambios en sus procesos industriales, como consecuencia de los avances tecnológicos. Esto ha repercutido en la integridad de los equipos que protegen y distribuyen la energía eléctrica. Así mismo, estos elementos que componen el sistema eléctrico demandan ser más complejos y robustos para asegurar la protección de éste y del personal de mantenimiento.

La reposición o el mantenimiento de estos equipos puede causar un comportamiento no esperado en la red ante una falla. Por ende, es conveniente realizar los estudios pertinentes para pronosticar o evaluar el comportamiento de la falla. En ese sentido, el estudio de arco y choque eléctrico determina la cantidad de energía liberada por una eventual falla en el sistema eléctrico, la cual es obtenida bajo el cálculo y modelado; en consecuencia, se obtiene el nivel de protección requerido para estimar los límites y las condiciones de seguridad en los lugares de trabajo, EPP y herramientas requeridas.

Este proyecto tiene como fin establecer elementos de seguridad rigurosos para el mantenimiento y la operación de los equipos energizados, lo cual reducirá la afectación a la integridad de los operadores al sufrir quemaduras provocadas por el contacto directo o indirecto con una falla en la red eléctrica.

Palabras claves: arco eléctrico, choque eléctrico, falla atornillada, energía incidente, destello de arco, corto circuito, distancia de trabajo.

Abstract

Cemex is a multinational building products manufacturer and distributor with offices in more than 50 countries. It was established in Mexico in 1906. It opened its markets to other countries in 1980, but it was still during a privatization period at the time. This is how it chose to branch out into other nations, establishing a base in Costa Rica.

This corporation has experienced numerous improvements in its manufacturing processes because of technical advancements, which has influenced the integrity of the machinery that protects and distributes electrical resources during its lifetime. Similarly, the components that make up the electrical grid must be more complicated and durable to ensure the safety of the system and the repair personnel.

Replacement or repair of this equipment may result in unpredictable network behavior in the event of a malfunction, therefore it is useful to conduct relevant experiments to forecast or test failure behavior, such as arc and electric shock studies this determines the amount of energy released in the case of an electrical circuit breakdown, these calculations and simulation determines, the degree of security needed to predict the limitations and safety conditions in the workplace, as well as PPE and required equipment, is determined.

The aim of this project is to create strict protection elements for the repair and management of energized devices, which will help to protect operators' dignity by reducing the risk of burns caused by direct or indirect interaction with a fault of the electrical network.

Keywords: electric arc, electric shock, bolted fault, incident energy, arc flash, short circuit, working distance.

CAPÍTULO I

Descripción del proyecto

1.1 Introducción

El presente documento contiene el estudio de arco y choque eléctrico de la planta de producción de cemento Cemex, ubicada en Colorado de Abangares, Guanacaste. Este proyecto tiene como fin conocer el nivel del riesgo y la cantidad de energía liberada por destello de arco y choque eléctrico para enmarcar las condiciones de seguridad requeridas ante un eventual fenómeno eléctrico. Con ello, se buscan establecer las fronteras de seguridad o límites de acercamiento en equipos de distribución y control de la energía eléctrica y, por consiguiente, emplear protocolos para calificar o designar un lugar de trabajo como seguro.

Algunas causas de estos fenómenos son el inadecuado procedimiento en el mantenimiento y/o el ejercicio de actividades cerca de equipos energizados en ambientes no acondicionados y condiciones inseguras, o bien, en su defecto, el mal funcionamiento de los equipos eléctricos.

La importancia de este estudio trae consigo algunas consecuencias como el etiquetado de los equipos, el cual posee información técnica como, cantidad de energía liberada en una falla eléctrica, límites de aproximación y su señalización respectiva, la categoría de peligro de riesgo con recomendación del equipo de protección personal requerido; dicho equipo debe ser resistente a las llamas con certificación ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales). Además de esto, el efectuar una tarea trae, como requisito, un permiso escrito para realizar el trabajo eléctrico energizado que debe poseer los datos anteriormente citados.

El capítulo 1 está conformado por una breve explicación de la política de seguridad de Cemex. Con esto, se busca fortalecer la seguridad ocupacional mediante

las normativas vigentes relacionadas como la NFPA 70E-2018, la cual sirve como documento de referencia para OSHA 1910 Subparte S en su regulación en seguridad eléctrica, IEEE 1584-2018 como guía para el desarrollo de cálculo de riesgo de arco eléctrico que establece la cantidad de energía liberada y las disposiciones de diseño para sistemas de supresión de arco.

Este capítulo registra estudios estadísticos realizados por la Oficina de Estadísticas Laborales (BLS) y la Fundación Internacional de Seguridad Eléctrica (ESFI), ambos de EE. UU., indicando el número de lesiones eléctricas fatales y no fatales para los trabajadores en los EE. UU. entre 1992 y 2017. Dichos números son evaluados según la actividad laboral.

La finalidad de este estudio consiste en delimitar los lineamientos para determinar el EPP por utilizar reduciendo la afectación de un peligro. El EPP brinda protección sobre el área de la cara y la parte frontal del cuerpo con una distancia de trabajo establecida.

El capítulo 2 aborda el argumento teórico relacionado con el estudio de corto circuito, coordinación de protecciones en baja, mediana y alta tensión, añadiendo los métodos o procedimientos de cálculo de arco y choque eléctrico, donde también se incorporan las características y efectos que éste posee, los tipos de límites de aproximación y las categorías de riesgo con su respectivo nivel de energía incidente.

El capítulo 3 contiene el marco y la estrategia metodológica. Por tanto, se define el procedimiento que conlleva este estudio. Primeramente, las fuentes de información estarán fijadas por las mencionadas en el capítulo 1, a lo cual se suman los estudios realizados por PROCOSA, empresa contratada por Cemex para realizar los estudios de cortocircuito y coordinación de protecciones en el año 2015, las cuales, mediante visitas

e inspecciones de campo, se modificaron y se actualizaron. Esta información es tabulada para luego ser analizada para la generación de las recomendaciones respectivas.

El capítulo 4 abarca el cálculo y los resultados de estudios cortocircuito y coordinación de protecciones, arco y choque eléctrico; a través del *software* de ingeniería eléctrica EasyPower, se definen los parámetros de coordinación de las protecciones en consecuencia de su ajuste y, con esto, son proporcionados los cálculos de energía incidente en cal/cm^2 que se traducen en categorías de riesgo.

El capítulo 5 posee el diseño y la implementación del proyecto, que consiste en elegir el equipo de protección personal de acuerdo con la información proporcionada por el software de ingeniería para cada subestación, *switchboard*, *panelboard* y CCM. Con esto, también se designarán protocolos de seguridad eléctrica en condición de arco y choque eléctrico para el personal de mantenimiento de la planta de producción Cemex.

El apéndice 1 mostrará algunos ejemplos de coordinación de protecciones en TCC. En ese sentido, se detalla el comportamiento de las curvas de operación entre las diferentes protecciones contempladas en este proyecto.

El anexo 1 está constituido por el diagrama unifilar eléctrico de la planta de Cemex actualizada con elementos de distribución de la energía, así como sus protecciones de la red eléctrica.

1.2 Antecedentes

La política de seguridad y salud de la Empresa Cemex en Costa Rica indica que “nada es más importante que nuestro compromiso con la salud y la seguridad y la prevención de lesiones. Creemos que lograr CERO lesiones no solo es posible, sino que es nuestra responsabilidad moral. Estamos plenamente comprometidos con llevar a cabo nuestras actividades de manera segura y eficiente, y de cuidar del bienestar de nuestros empleados, contratistas y otras personas que pudieran interactuar con nosotros a raíz de nuestras actividades” (Cemex, 2018).

La NFPA 70-2014, en su artículo 110.16, aconseja que los dispositivos eléctricos, tales como centros de distribución eléctrica de considerable potencia que estén en unidades que no sean de vivienda, deben ser monitoreados por el ente técnico competente para advertir al personal calificado sobre los potenciales riesgos del relámpago de arco eléctrico. El marcado debe cumplir con los requisitos establecidos y debe estar ubicado de manera que sea claramente visible para el personal de mantenimiento.

Asimismo, es importante hacer mención de estándar OSHA, el cual, en su sección 1910.333, incisos “b” y “c”, explica los procedimientos de seguridad para un evento energizado o no energizado, las condiciones de etiquetado, el bloqueo de equipo, la señalización que deben poseer los equipos de mantenimiento y las zonas de seguridad.

La NFPA 70E-2018 contiene las regulaciones en materia de protocolos de seguridad de riesgo a arco y choque eléctrico, uso y tipo de equipo de protección. Un equipo, que no sea puesto en una condición de trabajo seguro, se considera que está energizado y se deben tomar precauciones al operarlo. Para reducir el riesgo de

exposición a arco y choque eléctrico que atente contra la integridad física del trabajador, se establecen en el artículo 130.2 (B)(2) los elementos necesarios para laborar en una zona energizada y que son necesarios para aprobar el permiso de trabajo, los cuales son:

- Las descripciones de los circuitos y equipos donde se va a trabajar y su localización.
- Descripción del trabajo que se va a realizar.
- Justificación de por qué se debe realizar el trabajo en condición energizada.
- La descripción de las prácticas de trabajo seguro que se emplearán.
- Resultados de la evaluación de riesgo de choque.
 - a) Tensión a la que el personal estará expuesto.
 - b) Frontera de aproximación limitada.
 - c) Frontera de aproximación restringida.
 - d) Equipos de protección personal y otros equipos de protección requeridos por esta norma para llevar a cabo de manera segura la tarea asignada y para proteger contra peligro de choque.
- Resultados de la evaluación de riesgo de relámpago de arco.
 - a) Energía incidente disponible a la distancia de trabajo o la categoría de EPP para relámpago de arco.
 - b) Equipo personal y otros equipos requeridos por esta norma para proteger de peligro de relámpago de arco.
 - c) Frontera de relámpago de arco.
- Medios empleados para restringir del acceso de personas no calificadas al área de trabajo.
- Evidencia de que se completó la descripción del trabajo, incluyendo una discusión sobre los peligros específicos del trabajo.

- Firma(s) de aprobación del trabajo energizado por responsable, gerencia u oficial de seguridad.

La norma IEEE 1584-2018 es una norma de diseño y cálculo, usada para obtener los resultados de riesgo de choque y relámpago de arco para su correcta evaluación por medio del software de modelado eléctrico EasyPower. Éste brinda la facilidad de colocar y configurar las capacidades o dimensiones respectivas de los elementos del sistema eléctrico.

El personal de mantenimiento hace uso como procedimiento de realización de trabajo eléctrico, un permiso eléctrico, el cual no posee todos los parámetros antes mencionados por la NFPA 70E, debido a que no se ha realizado antes este estudio. La señalización existente del límite de aproximación en los centros de control y de carga, no se encuentran correctamente dimensionados, al no existir una estimación registrada de la cantidad de energía incidente, en consecuencia, el equipo de protección personal no es el requerido.

Debido a los avances tecnológicos experimentados en las últimas décadas, la implementación de protocolos para la seguridad laboral involucra una disminución en los accidentes eléctricos.

La Fundación Internacional de Seguridad Eléctrica (ESFI, por sus siglas en inglés) utiliza el Censo de Lesiones Ocupacionales Fatales (CFOI) y la Encuesta de Lesiones Ocupacionales (SOII) de la Oficina de Estadísticas Laborales de EE. UU. (BLS). Éstas indican que hubo casi 6,000 lesiones eléctricas fatales para los trabajadores en los EE. UU. entre 1992 y 2013. Los datos de BLS también indican que hubo 24,100 lesiones eléctricas no fatales entre 2003 y 2012 (ESFI,2018).

Una cantidad de incidentes eléctricos con fatalidad de carácter laboral ha disminuido en los últimos 20 años. No obstante, las lesiones eléctricas no fatales tienden

a ser menos constantes. Entre los años 2003 y 2009, el total de lesiones no fatales varió de 2,390 en 2003 a 2,620 en 2009, con un máximo de 2,950 lesiones en 2005. La totalidad de lesiones no fatales entre los años 2010 y 2012 descendieron en este período con 1,890 lesiones sin fatalidad en 2010, 2,250 en 2011 y 1.700 en 2012(R. B. Campbell, 2015).

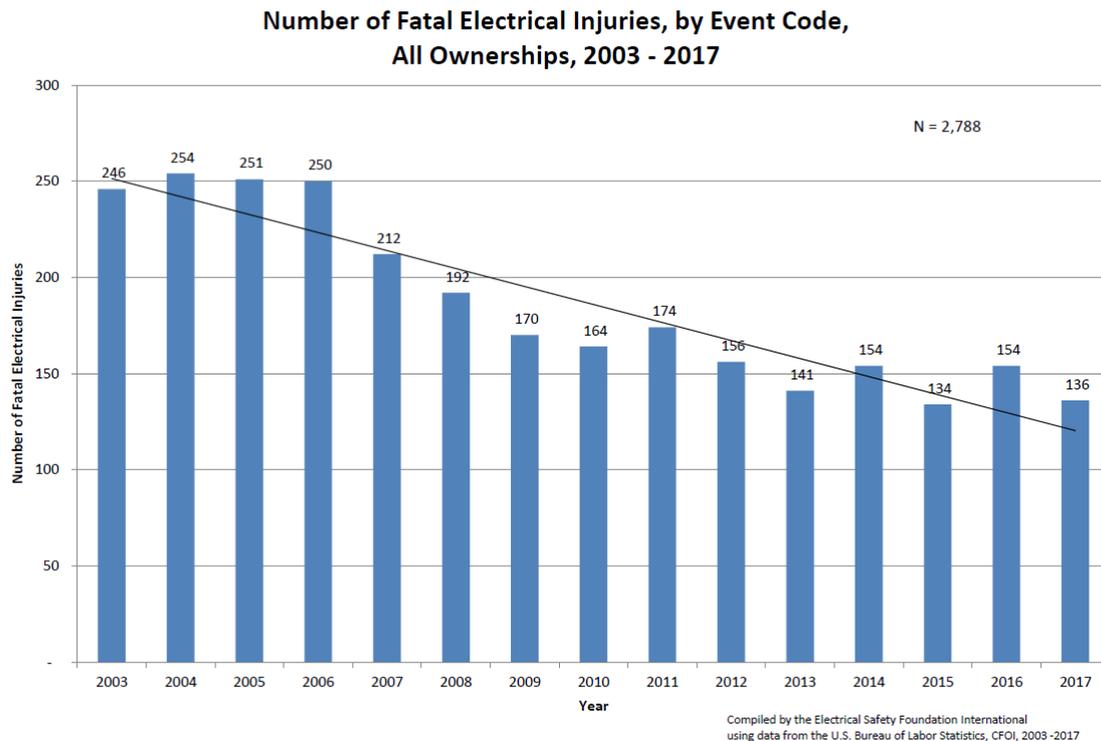


Fig. 1. Números de lesiones eléctricas fatales.

Fuente: ESFI,2018

Se registran 136 fatalidades eléctricas fatales en el 2017 con una caída del 11.6% desde 2016, volviendo a los niveles de 2015. El contacto con la exposición a la corriente eléctrica representó el 2.6% de todas las muertes en el lugar de trabajo. En 2016, representaron 2.9%, en 2015 2.7% y 3.1% en 2014 (ESFI,2018).

El contacto con la exposición a la corriente eléctrica mantuvo su posición como el sexto tipo más común de fatalidad en el lugar de trabajo. Las electrocuciones

representaron todas menos una de las muertes eléctricas en el lugar de trabajo (R. B. Campbell, 2015).

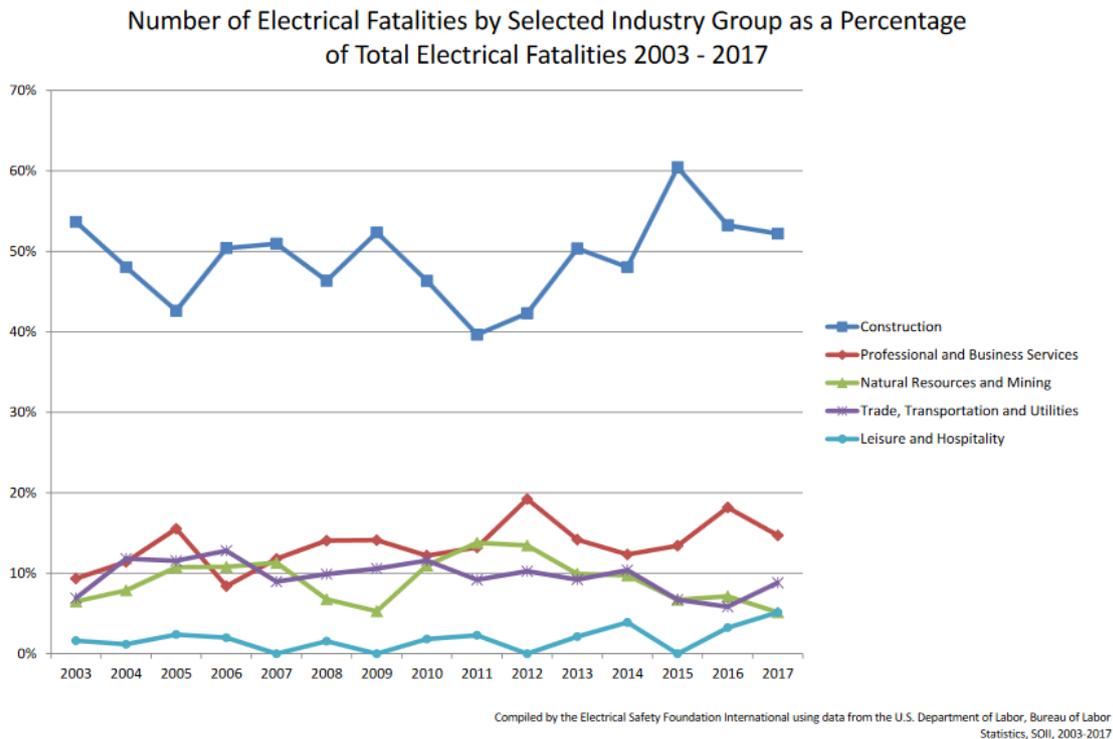


Fig. 2. Número de fatalidades eléctricas por actividad laboral

Fuente: ESFI,2018

El 54% de todas las lesiones eléctricas fatales ocurrió en la industria de la construcción. La segunda industria líder en fatalidades eléctricas en servicios profesionales y comerciales con 20 fatalidades (15%). La industria de servicios públicos tuvo la tasa más alta de lesiones eléctricas fatales seguida de la construcción. Las muertes eléctricas representan el 5.7% de todas las lesiones eléctricas.

Las industrias de renombre privadas productoras dedicadas a recursos naturales y minería, construcción y manufactura, representaron el 64.9% de las lesiones eléctricas fatales en comparación con el 35.1% de las lesiones fatales de las industrias privadas que prestan servicios manteniendo los números de 2016 (ESFI,2018).

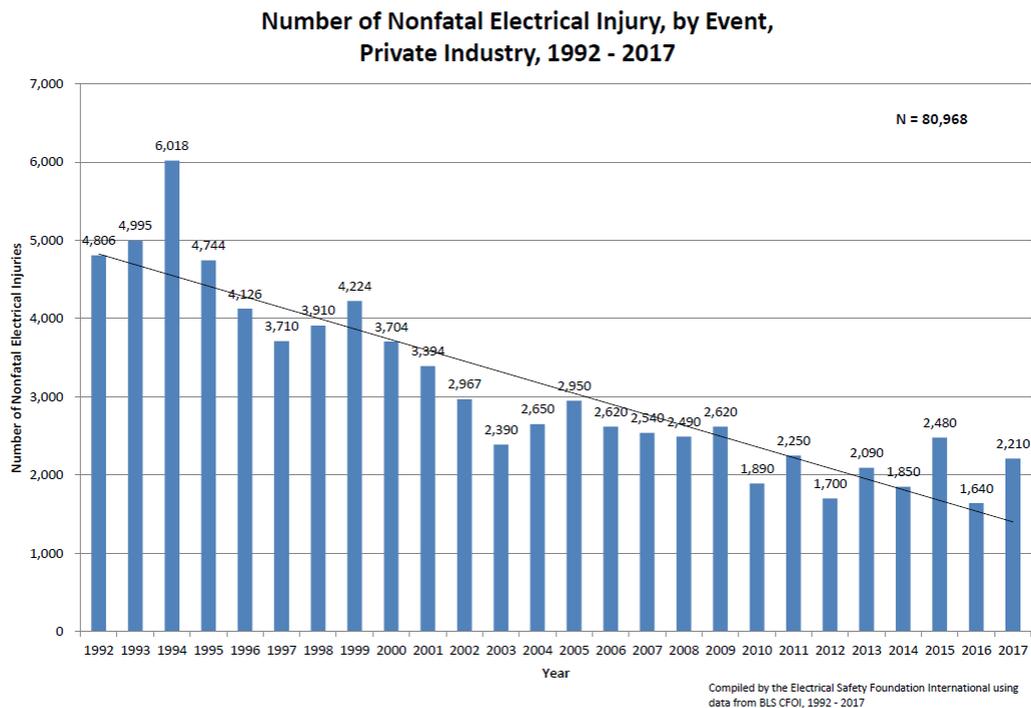


Fig. 3. Número de lesiones eléctricas no fatales.

Fuente: ESFI,2018

Hubo 2,210 lesiones eléctricas no fatales en 2017, un aumento del 35% con respecto a 2016 y una disminución del 10% con respecto a 2015. El 0.25% de todas las lesiones no fatales que resultan en días fuera del trabajo podría atribuirse a la electricidad durante 2017. El número medio de días fuera del trabajo por lesiones eléctricas no fatales fue de 10, el doble que en 2016 y el número más alto desde 2013 (ESFI,2018).

**Number of Nonfatal Electrical Injuries, Private Industry by Nature of Injury
(Electrical Shocks / Electrical Burns), 2003 - 2017**

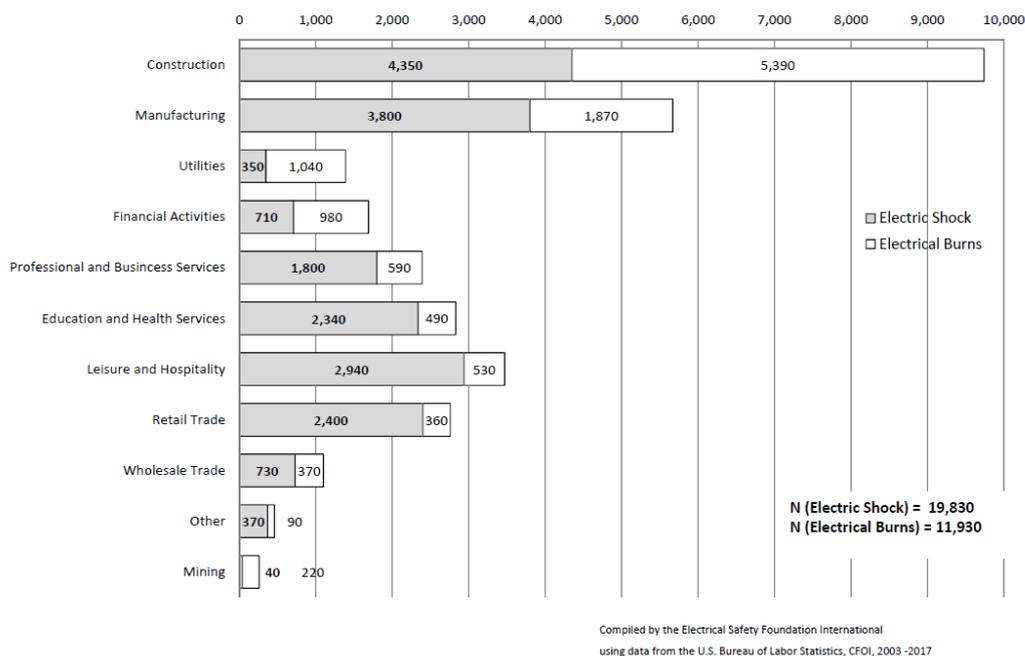


Fig. 4. Índice de lesiones eléctricas no fatales por actividad laboral

Fuente: ESFI,2018

Las industrias con el mayor número de lesiones eléctricas no fatales son las siguientes: construcción - 360 (16%), bienes raíces y alquiler y arrendamiento - 330 (15%), servicios profesionales, científicos y técnicos: 290 (13%), fabricación - 260 (12%) (ESFI,2018)

Los choques representaron 1.330 lesiones eléctricas no fatales, mientras que las quemaduras representaron 900, 140 choques y 230 quemaduras ocurrieron en la industria de la construcción, 40 choques y 60 quemaduras ocurrieron en la industria de servicios públicos (ESFI, 2018).

El Consejo de Salud Ocupacional de Costa Rica, en su documento llamado “Estadísticas de Salud Ocupacional” (2018), reporta una fatalidad en este año por contacto eléctrico directo.

El principal evento de lesiones eléctricas por lesiones no fatales entre 2003 y 2010 (después de lo cual se introdujeron cambios en los códigos de eventos de lesiones)

fue contacto con la corriente eléctrica de la máquina, herramienta, electrodoméstico o artefacto de iluminación, que representaron el 37% de las lesiones durante su período. El segundo evento principal de lesiones eléctricas no fatales fue 'contacto con cableado, transformadores u otros componentes eléctricos', con un 35% de las lesiones. Otras categorías principales de eventos incluyeron 'contacto con corriente eléctrica, no especificada' (11%) y contacto con corriente eléctrica, no clasificada en otra parte (10%). El 'contacto con líneas eléctricas aéreas', que fue la causa de más del 40% de las lesiones eléctricas fatales, representó solo el 2% de las lesiones no fatales (R. B. Campbell, 2015).

Una revisión de investigaciones seleccionadas de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) de incidentes de lesiones eléctricas e investigaciones previas indica que el trabajo realizado de manera inapropiada en equipos energizados está asociado con una parte sustancial de las lesiones eléctricas. Parte del trabajo en equipos energizados es inadvertido y resulta de una falla en reconocer todas las fuentes eléctricas. La planificación exhaustiva previa al trabajo con personal calificado es esencial para identificar todas las fuentes eléctricas, incluidos los riesgos imprevistos (R. B. Campbell, 2015).

Investigaciones previas indican que las presiones de tiempo y las demandas de los supervisores contribuyen a que los trabajadores tomen atajos con los requisitos de seguridad. Los trabajadores pueden recibir mensajes mixtos cuando las comunicaciones de la organización les aconsejan que sigan los procedimientos de seguridad, al tiempo que enfatizan la importancia de mantener los horarios de producción u otros factores que pueden comprometer la seguridad.

Muchos trabajadores que experimentan lesiones eléctricas no tienen suficiente capacitación para trabajar en o alrededor de equipos eléctricos energizados. No usar el EPP adecuado es un factor que contribuye a la ocurrencia de muchas lesiones eléctricas.

1.3 Planteamiento del problema

El Departamento de Mantenimiento posee actualmente elementos de protección personal que minimiza el riesgo por accidente eléctrico, sin embargo, no existe un estudio correspondiente que respalde la categoría o el nivel de riesgo en las zonas de trabajo en condiciones energizadas. Además, la demarcación de las fronteras de aproximación de seguridad no posee las distancias requeridas.

En algunos de los equipos que componen la distribución y protección del sistema eléctrico, no existe información necesaria relacionada con el nivel de riesgo y EPP requerido para el mantenimiento y la operación. Con esto, se determinan las condiciones de seguridad que deben poseer los lugares de trabajo.

Dicho lo anterior, al desconocerse de la información citada, los permisos para trabajos eléctricos se presentan incompletos. Frente a tal condición, queda en evidencia que existe el riesgo de un incidente o accidente eléctrico para el personal, pues no existe la categorización de riesgo de los EPP para operación y mantenimiento.

1.4 Justificación

La empresa Cemex está comprometida con la salud y seguridad ocupacional. Por ende, es importante mencionar que, recientemente, han existido medidas para establecer condiciones de trabajo eléctricamente seguras, es decir, existen elementos de protección contra riesgo eléctrico que los empleados poseen para realizar trabajos en o cerca de partes energizadas. Sin embargo, el sistema eléctrico no posee el análisis de peligro de arco y choque. Por esto, esas medidas no están siendo aplicadas correctamente.

En los últimos años, la exposición a la electricidad es una de las principales causas más comunes de muerte en lugares de trabajo. En la actualidad, las empresas establecen prácticas o protocolos de seguridad ocupacional para minimizar el riesgo y el impacto de un accidente eléctrico sobre la o el trabajador.

El estudio de arco y choque eléctrico es una medida utilizada para determinar la cantidad de energía emitida por un evento. Éste proporciona los parámetros indicados para generar la categoría de riesgo y, con esto, el equipo de protección personal requerido para la operación y mantenimiento eléctrico. También, busca establecer las fronteras de seguridad en los lugares de trabajo y define las condiciones de seguridad necesarias para definir a cuánta distancia es recomendado usar equipo de protección al igual que su clasificación.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

1. Realizar el estudio de arco y choque eléctrico de la planta productora Cemex mediante el cálculo y el modelado de la red eléctrica en el software de ingeniería de acuerdo con el estándar IEEE 1584-2018 y NFPA70E-2015, determinando así las condiciones mínimas de seguridad eléctrica para operarios y personal de mantenimiento.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Adquirir conocimientos de las metodologías de cálculo a través del análisis de las normas NFPA 70E-2018 e IEEE 1584-2018 con el fin de obtener criterios en el tema de seguridad eléctrica laboral.
2. Realizar la recolección y verificación de los parámetros eléctricos por medio del diagrama unifilar de la instalación y visitas de campo, obteniendo así la información requerida del sistema eléctrico para el estudio.
3. Analizar los escenarios de operación de las protecciones de sobre corriente mediante un Software de Ingeniería EasyPower, generando las recomendaciones técnicas de los equipos protección personal para operación y mantenimiento.
4. Determinar las condiciones seguras de trabajo de acuerdo con los estudios realizados estableciendo la demarcación de las zonas de seguridad y elección del equipo de protección personal de acuerdo con la categoría de peligro de riesgo.

1.6 Alcance

Este proyecto tiene como alcance la recomendación de las prácticas de mantenimiento seguras, establecer la categoría de riesgo en los lugares de trabajo; esto va en conjunto con la elección del EPP para cada zona de trabajo según los resultados correspondientes. Para lograr esto, se cuenta, por parte de la empresa, con registros digitales e impresiones de datos de estudios de corriente de corto circuito disponibles además del estudio de coordinación de protecciones, los mismos no han sido actualizados. Por lo tanto, se realizaron visitas de campo para la verificación y corrección de los datos contemplados en el diagrama unifilar, así como en los estudios citados.

Los estudios convenientes del sistema eléctrico en el *software* de ingeniería EasyPower serán tabulados en el capítulo 4 de este proyecto con su análisis respectivo. Por otra parte, en el capítulo 5, se expone la generación de las etiquetas de advertencia de peligro de arco eléctrico. Dichas etiquetas identifican la energía incidente y la distancia de trabajo, el voltaje nominal del sistema y el límite de arco eléctrico. Además, se incluyen límites de aproximación limitados, restringidos y prohibidos, fecha, dispositivo de protección, equipo de protección personal recomendado. También, se proporciona la corriente de falla atornillada, todo lo cual cumple con la NFPA 70E 130.3

1.7 Limitaciones

A continuación, se muestran las limitaciones experimentadas en la realización de este proyecto:

- La base de datos del *software* de modelado y diseño eléctrico EasyPower no posee las características de algunos fusibles de mediana tensión. A esto, se suma que la empresa que los fabricaba ya no existe. Frente a esta situación, en capítulos posteriores, se podrán proporcionar las recomendaciones pertinentes.

1.8 Viabilidad

Se dispone de herramientas de modelado para el cálculo y análisis, así como de recursos como los diagramas unifilares actualizados, estudios de cortocircuito e información de los ajustes de las protecciones últimamente realizados.

Asimismo, se dispone del recurso humano para responder a las recomendaciones que se deseen implementar al concluir el estudio.

1.9 Cronograma

Seguidamente se muestra el cronograma de la realización del presente proyecto.

Tabla 1. Cronograma de ejecución

N°	Actividades	Duración	Comienzo	Fin	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	37				
1	Realizar el Estudio de Arco y Choque Eléctrico de la de la Planta de Producción Cemex	37 semanas	30-mar-20	11-dic-20																							
2	Analizar las metodologías de cálculo mediante la normativa vigente.	6 semanas	30-mar-20	10-may-20																							
3	Adquirir y analizar las normas relacionadas al cálculo arco y choque eléctrico designadas	6 semanas	30-mar-20	10-may-20																							
4	Recolección y verificación de datos técnicos de la red eléctrica.	11 semanas	11-may-20	26-jul-20																							
5	Recolectar información de elementos de carga, distribución y transformación de la energía en la red eléctrica como conductores, busbar, transformadores y motores.	6 semanas	11-may-20	21-jun-20																							
6	Recolectar información de las protecciones en mediana y baja tensión de la red eléctrica	6 semanas	11-may-20	21-jun-20																							
7	Verificar la información recolectada de los modelos de centros de carga y de las protecciones eléctricas principales mediante visitas de campo	1 semana	22-jun-20	28-jun-20																							
8	Crear una base con los datos recolectados	2 semanas	29-jun-20	12-jul-20																							
9	Actualizar y realizar modificaciones correspondientes en el diagrama unifilar de potencia	1 semana	13-jul-20	19-jul-20																							
10	Definir el esquema de potencia con todos los elementos de protección el <i>software</i> de ingeniería EasyPower	1 semana	20-jul-20	26-jul-20																							

Tabla 1. *Continuación.*

11	Generar los estudios de corto circuito, coordinación de protecciones, arco y choque eléctrico.	16 semanas	27-jul-20	15-nov-20	
12	Realizar el estudio y la tabulación del cálculo de corto circuito en el <i>software</i> de ingeniería EasyPower	14 semanas	27-jul-20	01-nov-20	
13	Generar el estudio, ajuste y coordinación de protecciones eléctricas en baja, mediana y media alta tensión.	14 semanas	10-ago-20	15-nov-20	
14	Generar el estudio de arco y choque eléctrico en el <i>software</i> de ingeniería EasyPower.	2 semanas	02-nov-20	15-nov-20	
15	Analizar los datos proporcionados por el <i>software</i> de ingeniería mediante las TCC de las zonas de protección.	3 semanas	26-oct-20	15-nov-20	
16	Redefinir el ajuste de las protecciones del sistema eléctrico en caso de requerirlo	1 semanas	09-nov-20	15-nov-20	
17	Establecer condiciones seguras de trabajo mediante el estudio de arco y choque eléctrico	4 semanas	16-nov-20	11-dic-20	
18	Generar las etiquetas de advertencia en el <i>software</i> de ingeniería para cada punto de distribución de energía eléctrica	1 semana	16-nov-20	23-nov-20	
19	Determinar la demarcación de las zonas de seguridad (distancias o fronteras de seguridad eléctrica)	1 semana	16-nov-20	23-nov-20	
20	Definir los tipos de EPP para cada zona de acuerdo a la categoría de riesgo determinada por las etiquetas de advertencia	1 semana	16-nov-20	23-nov-20	
21	Generar las medidas y las recomendaciones de seguridad para arco y choque eléctrico	4 semanas	16-nov-20	11-dic-20	
22	Entregar el informe del proyecto	1 semanas	07-dic-20	11-dic-20	

Fuente: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo

CAPÍTULO II

Marco teórico

Este capítulo está dirigido a la explicación del desarrollo del estudio de arco y choque eléctrico. Además de esto, de manera conjunta, se detallan los diferentes estudios que esto trae consigo, como la coordinación y selectividad de las protecciones eléctricas a partir del cálculo de cortocircuito. Se cuenta con registros de estos, los cuales serán actualizados debido a las modificaciones que ha sufrido algunos elementos del sistema eléctrico de potencia de la planta de proceso y fabricación de cemento. Dicho proceso de fabricación se representa en la figura No. 5, al igual que se detallan las partes según el flujo o proceso de producción.

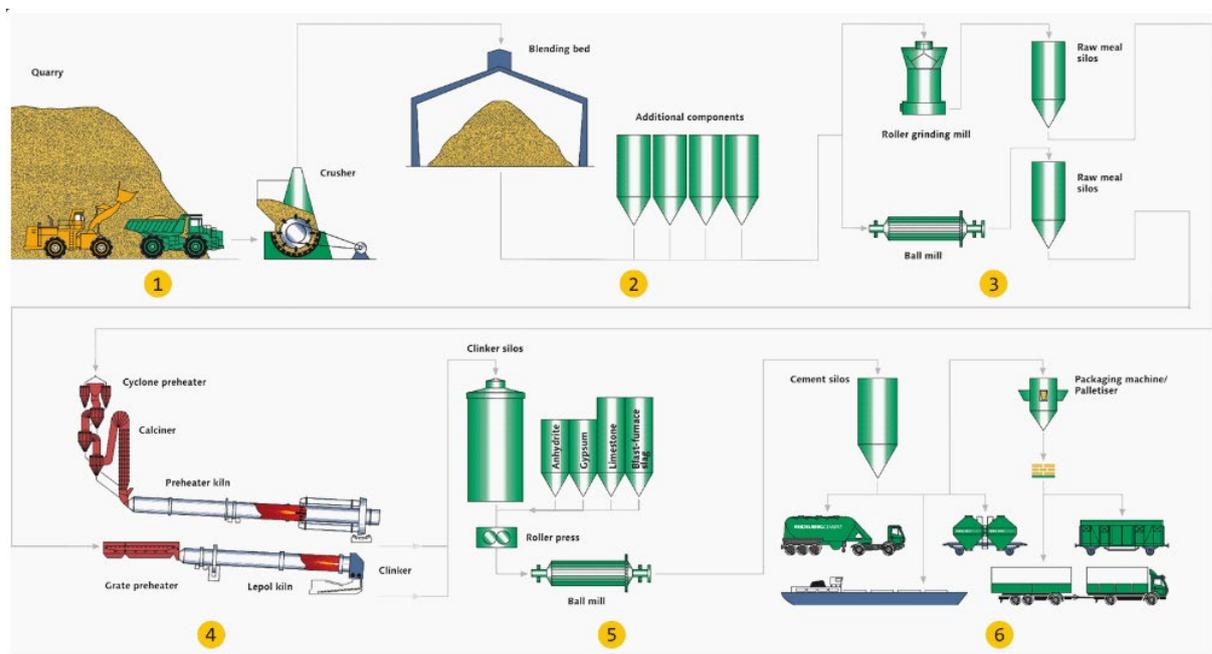


Fig. 5. Fases operativas y de producción de la planta de cemento

Fuente: Csanyi, 2020

En la parte No. 1, se muestra la extracción de materias primas para la fabricación del cemento, las cuales son la piedra caliza, la arcilla y la marga. Éstas se extraen de las canteras o minas mediante explosivos y maquinaria pesada. Los cargadores transportan

la materia prima a las instalaciones de trituración. En este sitio, la roca se descompone en partes más pequeñas.

En la parte No. 2, el material triturado se transporta al almacenamiento de materia prima de la planta de cemento mediante cintas transportadoras y, en casos excepcionales, con camiones. Ésta se almacena en lechos de mezcla y se homogeniza.

En la parte No. 3, la mezcla en bruto deseada de materia prima triturada y los componentes adicionales necesarios para el tipo de cemento se prepara mediante dispositivos dosificación. Los molinos de rodillos y los molinos de bolas muelen la mezcla hasta obtener un polvo fino al mismo tiempo que la secan, antes de transportarla a los silos de harina cruda para su posterior homogeneización.

En la parte No. 4, la quema de la harina cruda a aprox. 1.450°C se realiza en hornos o precalentadores que funcionan por diversos métodos, siendo la principal diferencia en la preparación y precalentamiento de la alimentación del horno. Por conversión química, un proceso conocido como sinterización, se forma un nuevo producto: el clínker.

En la parte No. 5, el clínker se enfría y se almacena en silos de clínker. Desde allí, el clínker se transporta a molinos de bolas o prensas de rodillos, en los cuales se muele hasta obtener un cemento muy fino, con la adición de yeso y anhidrita, así como otros aditivos, según el uso que se le vaya a dar al cemento.

En la parte No. 6, el cemento terminado se almacena en silos separados, según el tipo y la clase de resistencia. Desde allí, se carga principalmente a granel para luego ser distribuidos en forma de sacos, llenados por envasadoras rotativas y apilados por sistemas de paletización automática (Csanyi, 2020).

Los sistemas de energía eléctrica deben estar diseñados para servir una variedad de cargas de manera segura y confiable. El control efectivo de la corriente de cortocircuito (corriente de falla) es importante para la elección de la protección y coordinación en el sistema de energía. Para realizar estos estudios, es necesario hacer distinciones entre los diversos tipos de corriente disponibles, tanto normales, como anormales. También, es importante diferenciar entre los caminos que tomarán los distintos tipos de corriente. Tanto el tipo actual, como la ruta actual, así como la magnitud actual son parámetros que deben ser considerados para la selección y el ajuste de los dispositivos de protección contra sobrecorriente no así sus recomendaciones.

La coordinación y el ajuste de estos dispositivos afectarán, directa o indirectamente, el comportamiento de un evento no deseado aumentando o reduciendo su impacto. Un evento de corto circuito trae consigo fenómenos, como el arco y choque eléctrico.

Seguidamente, se muestra la respectiva documentación y desarrollo teórico en el cual se fundamenta este proyecto.

2.1. Sobre corrientes en sistemas eléctricos de potencia

2.1.1. Corriente nominal

La corriente nominal o de carga puede definirse como la corriente diseñada específicamente para ser utilizada por una carga en condiciones normales de funcionamiento. Dependiendo de la naturaleza de la carga, el valor de la corriente normal puede variar de un nivel bajo a un nivel alto o de carga completa (Department of the Army, 1991).

2.1.2. Corriente de sobrecarga

La corriente de sobrecarga es mayor en magnitud que la corriente de carga completa y fluye solo en la ruta normal del circuito. Es comúnmente causada por equipos sobrecargados, monofásicos o de bajo voltaje de línea, por lo tanto, se considera una corriente anormal (Department of the Army, 1991).

2.1.3. Corriente de falla

La corriente de falla puede extenderse más de miles de amperios. El valor máximo está limitado por la intensidad de falla máxima disponible en el sistema en el algún punto del sistema eléctrico. La intensidad de falla puede clasificarse además como atornillada o en arco (Department of the Army, 1991).

2.1.4. Clasificaciones de fallas

Las corrientes de cortocircuito ya sean atornilladas o en arco, implicarán dos o más conductores de fase. Las fallas de línea a línea u homopolares involucran conductores de dos fases o de fase a puesta a tierra, mientras que las fallas trifásicas involucran las tres fases. Los estudios de cortocircuito se han basado tradicionalmente en el cálculo de la corriente trifásica de cortocircuito atornillada (Department of the Army, 1991).

2.1.5. Corriente de falla a tierra

La corriente de falla a tierra consiste en cualquier corriente que fluya fuera de la ruta normal del circuito. Una condición de falla a tierra resulta ser un flujo de corriente en el conductor de conexión a tierra del equipo para sistemas de bajo voltaje. En sistemas de media y alta tensión, la corriente de falla a tierra puede regresar a la fuente a través de la tierra. Los dispositivos protección de fallas a tierra de los sistemas de media y alta tensión utilizan relés de corriente a tierra. La corriente de falla a tierra en los

sistemas de bajo voltaje puede clasificarse como fuga, atornillada o arco eléctrico (National Institute of Building Sciences, 1991).

2.1.6. Fuentes de corriente de falla

En estado de falla, existen algunos aportes de distintos componentes del sistema eléctrico, los cuales pueden analizarse en cinco categorías:

- a) Contribución de máquinas síncronas.
- b) Contribución de motores de inducción.
- c) Contribución de la empresa suministradora de energía.
- d) Contribución de banco de capacitores.
- e) Motores de inducción de CA o CC de velocidad ajustable con equipos de alimentación de CA de estado sólido.

La corriente de falla que aporta cada maquinaria giratoria está limitada por la impedancia o reactancia de ésta. Todas las fuentes de corriente de cortocircuito y las impedancias de estas fuentes deben considerarse al diseñar la protección coordinada del sistema de energía. Esto es realizable mediante las normas IEEE 141 (1993) en su capítulo 4 y la IEEE 551 (2006) que indican el procedimiento y desarrollo de cálculo.

2.1.7. Variación de tiempo de corriente de cortocircuito

La corriente de cortocircuito de varias fuentes se ilustra en la figura No.6 dado que la corriente de cortocircuito de las máquinas rotativas varía con el tiempo. Es conveniente expresar la impedancia de la máquina (reactancia inductiva) como un valor variable. Esta reactancia variable permitirá calcular la corriente de cortocircuito de una máquina rotativa en cualquier momento. Con el fin de simplificar, se asignan tres valores de reactancia a las máquinas rotativas con el fin de calcular la corriente de cortocircuito en tres momentos específicos después de la ocurrencia de una falla. Estos

tres valores se denominan reactancias subtransitorias, transitorias y sincrónicas (National Institute of Building Sciences, 1991).

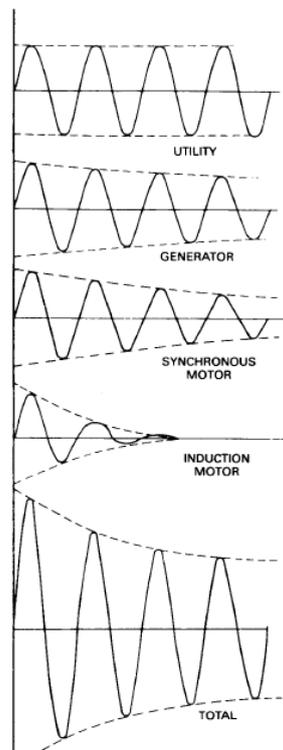


Fig. 6. Corrientes simétricas de cortocircuito de cuatro fuentes combinadas

Fuente: IEEE Std 241-1990

Para propósitos de cálculos de corriente de cortocircuito, los estándares de la industria han establecido tres nombres específicos para los valores de esta reactancia variable llamadas:

- a) *Reactancia subtransitoria* (X_d''). La reactancia subtransitoria es un valor utilizado para determinar la corriente de cortocircuito durante el primer ciclo después de que se produce la falla en aproximadamente 0.1 segundos.
- b) *Reactancia transitoria* (X_d'). La reactancia transitoria es un valor utilizado para determinar la corriente de cortocircuito desde los primeros ciclos hasta

aproximadamente 30 ciclos a 60 Hz después de que ocurra el cortocircuito. Este valor se usa a menudo en estudios de regulación de voltaje.

- c) *Reactancia sincrónica (X_d)*. La reactancia sincrónica es un valor utilizado para determinar la corriente de cortocircuito cuando se alcanza la condición de estado estable. El estado estacionario se alcanza varios segundos después de que ocurre el cortocircuito.

2.1.8. Corrientes simétricas y asimétricas de cortocircuito

Como se muestra en la figura 7, simétrico y asimétrico son términos utilizados para describir la simetría de la forma de onda de corriente de cortocircuito alrededor del eje cero. Si se produce un cortocircuito en un circuito reactivo inductivo en el pico de la forma de onda de voltaje, la corriente de cortocircuito resultante será totalmente simétrica. Si se produce un cortocircuito, en el mismo circuito, en el cero de la onda de voltaje, la intensidad de cortocircuito resultante será totalmente asimétrica. Si se produce un cortocircuito, en el mismo circuito, en algún momento entre el cero y el pico de la forma de onda de voltaje, la corriente de cortocircuito resultante será parcialmente asimétrica. La cantidad de compensación o asimetría depende del punto en que ocurre la falla. En los circuitos que contienen resistencia y reactancia inductiva, la cantidad de asimetría variará entre los mismos límites que antes. Sin embargo, la relación X/R (relación de reactancia inductiva a resistencia mirando hacia arriba desde el punto de falla) determinará la velocidad de descomposición del componente DC. A medida que X/R aumenta, la tasa de descomposición disminuye. Las clasificaciones de corriente de interrupción pueden tener que reducirse para valores altos de X/R . En términos prácticos, la mayoría de las corrientes de cortocircuito son parcialmente asimétricas durante los primeros ciclos después de que se produce un cortocircuito (Lackovic, s.f.)

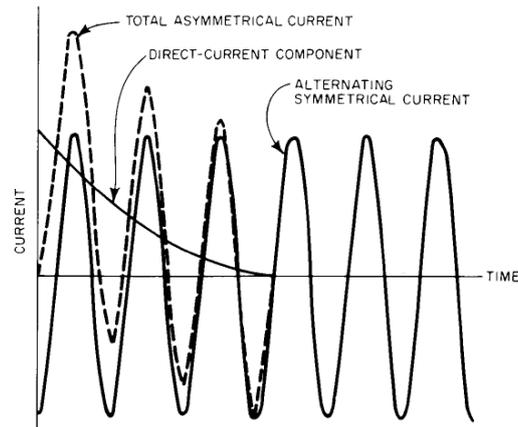


Fig. 7. Corriente típica de falla del sistema

Fuente: IEEE Std 141-1993

2.2. Dispositivos de protección contra sobrecorriente

Los sistemas de protección eléctrica están compuestos por categorías, en proporción a la dimensión de la red eléctrica, los cuales son:

Protección: las definiciones que siguen se usan generalmente en relación con la protección del sistema de energía.

Sistema de protección: una disposición completa de equipos de protección y otros dispositivos necesarios para lograr una función específica basada en un principio de protección.

Equipo de protección: una colección de dispositivos de protección (relés, fusibles, etc.). Se excluyen dispositivos como CT 's, CB' s, contactores, etc.

Esquema de protección: una colección de equipos de protección que proporciona una función definida e incluye todos los equipos necesarios para que el esquema funcione (es decir, relés, CT, CB, baterías, etc.) (Abdelbari, Mohamed y Ibrahim, 2017).

2.2.1. Requerimientos básicos de las protecciones

Las funciones principales de una protección contra sobrecorriente es proteger el sistema y proporcionar la continuidad del servicio además de minimizar las fallas, garantizando la seguridad del personal para lo cual es necesario en primer lugar la detección temprana y la localización de fallas, y en segundo lugar, la pronta eliminación del equipo defectuoso del servicio. Para llevar a cabo las tareas anteriores, la protección debe tener las siguientes cualidades.

- Selectividad
- Estabilidad
- Confiabilidad
- Velocidad de operación
- Sensibilidad

Los elementos de protección contra sobrecorriente deben reunir las características antes explicadas. En éstos, se detallan el tipo, el rango de aplicación o la función de acuerdo con las recomendaciones de las normas (Baruti, 2017).

2.2.2. Fusibles

Un fusible es un dispositivo monofásico de acción directa no ajustable que responde tanto a la magnitud como a la duración de la corriente que fluye a través de él. Los fusibles pueden ser retardo de tiempo o no retardo, limitación de corriente o no limitación de corriente, bajo voltaje o alto voltaje y los mismos deben estar identificados con estos datos.

2.2.2.1. Fusibles de bajo voltaje

Los fusibles de bajo voltaje deben cumplir con el estándar NEMA FU 1, y estos se clasifican en:

- Fusibles con retardo de tiempo.
- Fusibles sin retardo de tiempo.
- Fusibles con limitación de corriente
- Fusibles sin limitación de corriente

Los fusibles de cartucho del tipo no limitador serán de clase H, no renovable, de doble elemento, tipo de retardo de tiempo y tendrán una capacidad de interrupción de 10.000 amperios. Los fusibles de clase H se ajustarán a la norma UL 198M. Con una corriente del 500 por ciento, los fusibles de cartucho no se abrirán en menos de 10 segundos. Los fusibles de cartucho se utilizarán para circuitos de más de 30 amperios, 125 voltios, excepto cuando se indiquen fusibles que limiten la corriente (National Institute of Building Sciences, 2020).

Los fusibles de clase RK1 proporcionan una limitación de corriente alta con retardo de tiempo y sin retardo de tiempo. RK5 proporciona limitación de corriente moderada, opción de retardo de tiempo.

Los fusibles de cartucho tipo limitador de corriente, clase G, J, K, L, RK1, RK5, RK9, T, CC deberán haber probado una capacidad de interrupción no inferior a 100.000 y 200.000 amperios. Los portafusibles serán del tipo que rechazará los fusibles de clase H. Los fusibles de clase G, J, L, K, R, T y CC deben cumplir con UL 198M.

Los fusibles limitadores de corriente se abren en menos de medio ciclo, por tanto, eliminan la corriente de cortocircuito mucho antes de que alcance el valor máximo.

NOTA: los fusibles de un motor, el controlador del motor, el transformador o de un circuito inductivo deben ser de clase RK1 o RK5, con limitación de corriente, retardo de tiempo con capacidad de interrupción de 200,000 amperios (National Institute of Building Sciences, 2020).

2.2.2.2. Fusibles de mediana tensión

Los fusibles de media tensión son: (1) fusibles de distribución o (2) fusibles de potencia. Los fusibles de distribución están diseñados para montaje en postes o brazos cruzados y deben usarse principalmente en alimentadores y circuitos de distribución. Los fusibles de potencia tienen una mayor resistencia dieléctrica que los fusibles de distribución y deben usarse principalmente en subestaciones (Department of the Army, 1991).

2.2.2.2.1. Fusibles limitadores de corriente de mediana tensión

Los fusibles de potencia de limitación de corriente incluyen fusibles con clasificación E, clasificación C y clasificación R. Los fusibles de potencia con clasificación E, limitadores de corriente, con clasificación de 100E y menos, se abren en 300 segundos a corrientes entre 200 y 240 por ciento de su clasificación E. Los fusibles con una capacidad superior a 100E se abren en 600 segundos a corrientes entre 220 por ciento y 264 por ciento de su clasificación E. Los fusibles de potencia con limitación de corriente con clasificación C se abren en 1000 segundos a corrientes entre 170 y 240 por ciento de su clasificación C. Los fusibles de potencia con limitación de corriente y

clasificación R son adecuados para su uso en controladores de motor de media tensión solamente. En general, los fusibles con clasificación R se abren en 20 segundos a 100 veces la clasificación R. deben cumplir con la norma IEEE C37.46 (Lackovic, s.f.)

2.2.2.3. Fusibles de alta tensión

Algunos fusibles de media tensión y todos los fusibles de alta tensión están clasificados solo para uso en exteriores. Estos dispositivos son fusibles de tipo de ácido bórico clasificados 4160V — 138kV, fusibles de expulsión revestidos de fibra clasificados 7200V — 161kV, o fusibles de distribución con clasificación 4800V — 138kV (Departmentof the Army, 1991).

2.2.3. Disyuntores

Un disyuntor es un dispositivo que permite la apertura automática de un circuito en respuesta a la sobre corriente provocada por una condición de anormal del sistema (Lackovic, s.f.). En su mayoría, se clasifican por trabajar en el rango de baja y mediana tensión, estos se detallan a continuación:

2.2.3.1. Disyuntores de baja tensión

Los disyuntores de bajo voltaje se clasifican como disyuntores de caja moldeada o disyuntores de potencia. Un disyuntor de caja moldeada es una unidad integral encerrada en una carcasa aislada. Un disyuntor de potencia está diseñado para su uso en circuitos de 1000 VAC y 3000 VDC y menos, excluyendo disyuntores de caja moldeada (Departmentof the Army, 1991).

2.2.3.1.1. Interruptores de circuito de caja moldeada (MCCB)

Los disyuntores de caja moldeada deben cumplir con el estándar UL 489. Los disyuntores pueden instalarse en centros de distribución combinados. Los disyuntores y las cajas de disyuntores ubicados en áreas peligrosas deben cumplir con el estándar UL 1203.

2.2.3.1.2. Interruptores de potencia de baja tensión (LVPCB)

Los disyuntores de alimentación de baja tensión se ajustarán a las normas IEEE C37.13 e IEEE C37.16 y serán de tres polos, de una sola maniobra, energía almacenada, operada manual o eléctricamente, con montaje de extracción. Deberán proporcionarse elementos de ajuste de estado sólido que no requieran conexiones de alimentación externas con un indicador de posición de contacto abierto/cerrado, un indicador de energía almacenada cargado/descargado, dispositivos de desconexión primaria y un enclavamiento mecánico.

Las unidades de disparo de disyuntores de bajo voltaje pueden ser de tipo electromecánico (tablero magnético térmico o magnético) o electrónico de estado sólido. Los interruptores automáticos de bajo voltaje pueden incluir una serie de características de la unidad de disparo. Estas características se presentan en las figuras 8 y 9.

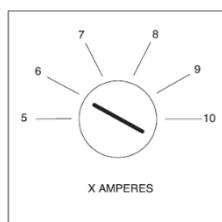


Fig. 8. Corriente de ajuste instantánea (magnética) proporcionada por disyuntores termomagnéticos

Fuente: IEEE std 242, 2001

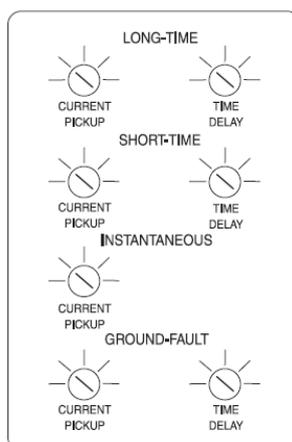


Fig. 9. Unidad electrónica ajustable con long-time (tiempo largo), *short-time* (tiempo corto), *instantaneous* (instantáneo), y ajustes de falla a tierra

Fuente: IEEE std 242, 2001)

Las curvas del interruptor automático se representan como 'bandas'. Las bandas indican tiempos de operación mínimos y máximos para sobrecorrientes específicas. Estas características se presentan en las figuras 10 y 11.

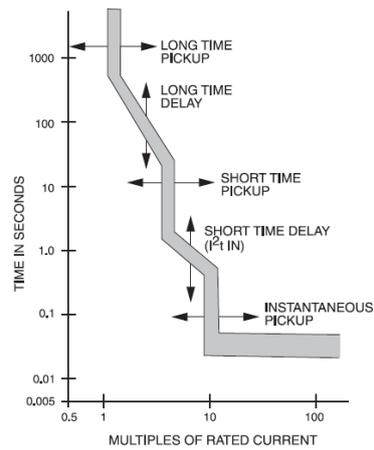


Fig. 10. TCC de curva típica de un MCCB o LVPCB con funciones ajustables definidas

Fuente: IEEE std 242, 2001

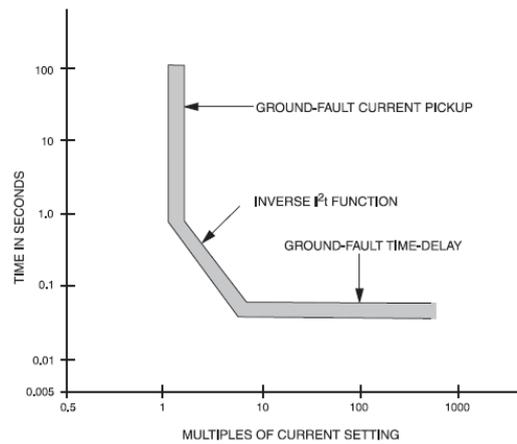


Fig. 11. TCC de curva típica de falla a tierra de ajuste electrónico de un disyuntor

Fuente: IEEE std 242, 2001

- 1) Long-time current pick-up: permite un ajuste fino de la clasificación de corriente continua. Los ajustes típicos varían del 50 por ciento al 100 por ciento de la corriente continua.

- 2) Long-time delay fijo o ajustable: varía el tiempo de disparo bajo sobrecorriente sostenida y permite sobrecargas momentáneas. Tres a seis bandas están típicamente disponibles.
- 3) Short-time current pick-up: controla la cantidad de corriente de alto nivel que se puede transportar durante cortos períodos de tiempo sin disparar y permite que los dispositivos aguas abajo eliminen las fallas sin disparar los dispositivos aguas arriba, ajustable de 1.5 a 9 veces la configuración de long-time delay.
- 4) Short-time delay: se usa con el Short-time pick-up para mejorar la selectividad. Proporciona un retraso de tiempo para permitir que el disyuntor se dispare a la corriente de arranque de corto tiempo seleccionada. Tres bandas (mínimo, intermedio y máximo) están típicamente disponibles.
- 5) Interruptor de corto tiempo I^2t : introduce una función de rampa en la curva característica de tiempo corto para mejorar la coordinación con los dispositivos aguas abajo cuyas curvas características se superponen a la curva característica del interruptor automático.
- 6) Instantaneous current pick-up: establece el nivel de corriente de disparo sin demora de tiempo intencional. Las configuraciones típicas varían de 1.5 a 9 veces.
- 7) Ground-fault pick-up: es ajustable del 20 al 60 por ciento de la clasificación del sensor, pero, en ningún caso, superior a 1200 amperios. No se permitirá la detección de intensidad de falla a tierra en el puente de conexión principal o la correa a tierra.
- 8) Ground-faultdelay: incorpora demora de tiempo para la coordinación. Normalmente, hay disponibles de tres a seis bandas de retardo. El retraso de

falla a tierra no debe exceder el segundo para valores mayor a 3000 A de acuerdo con NFPA 70.

9) Interruptor de fallo a tierra I^2t (National Institute of Building Sciences, 2020).

2.2.3.1.3. Disyuntores con limitación de corriente

Los interruptores con limitación de corriente limitarán el paso I^2t (energía incidente) a un valor menor que I^2t de medio ciclo de la forma de onda de corriente simétrica de cortocircuito. En corrientes de falla por debajo del umbral de limitación, los interruptores deben proporcionar protección contra sobrecargas y cortocircuitos convencionales.

2.2.3.2. Disyuntores de mediana tensión

ANSI define el voltaje medio como 1000V o más, pero menos de 100kV. Al cerrar los contactos, la fuerza mecánica aplicada debe ser mayor que las fuerzas que se oponen a la acción de cierre. Se crea un arco cuando se abren los contactos que deben extinguirse. Los disyuntores automáticos de media tensión se clasifican según el medio (aceite, aire, vacío o SF6) en el que están sumergidos sus contactos. Normalmente, el tablero extraíble revestido de metal se usa a voltajes medios de hasta 15kV. Los interruptores automáticos magnetotérmicos, de vacío y con interruptores rellenos de SF6 están disponibles en el tablero extraíble. Los interruptores automáticos de aceite se usan en exteriores, como unidades individuales, por lo tanto, no están disponibles en el montaje extraíble de la celda (National Institute of Building Sciences, 2020).

Los tipos de interruptores de mediana tensión se definen a continuación:

2.2.3.2.1. Tipo cerrado de metal

Los interruptores automáticos deben ser del tipo extraíble, de acuerdo con IEEE C37.20.1.

2.2.3.2.2. Tipo revestido de metal

Los disyuntores deben cumplir con IEEE C37.04 y deben constar de elementos enumerados para tales unidades en NEMA SG 6.

2.2.3.2.3. Interruptores SF6

Los interruptores SF6 deben ser del tipo de globo donde el movimiento del émbolo de contacto iniciará la bocanada de gas SF6 a través del contacto para extinguir el arco a presión de tanque de calibre cero (presión atmosférica). El soplo de SF6 debe ser suficiente para despejar un arco para 15 kV o equipos de clase inferior y permanecer operativo sin daños o que requiera mantenimiento o reparación, excepto por fugas de gas. El SF6 cumplirá los requisitos de ASTM D2472, el tiempo de disparo no debe exceder los cinco ciclos.

2.2.3.2.4. Interruptores de vacío

Los interruptores de vacío se sellarán herméticamente en alto vacío para proteger el contacto de la humedad y la contaminación. Los interruptores automáticos deben tener disposiciones para el cierre lento de los contactos y tener un indicador de desgaste de contacto inmediato. El tiempo de disparo no debe exceder los cinco ciclos.

Las clasificaciones de disyuntor a 60 Hz deben estar de acuerdo con IEEE C37.06 y de la siguiente manera:

- Tensión máxima
- Clase de voltaje nominal
- BIL
- Máxima capacidad de interrupción simétrica
- Capacidad de carga de corriente de corto plazo de 3 segundos
- Corriente continua clasificada

2.2.4. Relés de protección

Existen diferentes tipos de protecciones en sistemas de potencia. En breve, se muestran los más utilizados, a lo cual se suma la descripción.

IEEE les ha asignado números de función a los relés de protección utilizados ampliamente para especificar relés de protección. Los relés traen consigo múltiples aplicaciones con respecto al equipo que se protege y pueden ser:

- Distancia
- Diferencial de alta impedancia
- Diferencial actual
- Baja y sobrefrecuencia
- Baja y sobretensión
- Temperatura excesiva
- Sobrecarga
- Sobrecorriente

Nota: en este proyecto, se utilizarán los de sobrecorriente solamente.

2.2.4.1. Relé de sobrecorriente

Los relés de protección se clasifican según su función, y hay una amplia variedad de relés de protección. El relé de sobrecorriente, monitorea la corriente y funciona cuando la magnitud de la corriente excede un valor preestablecido (Tawfeeq, 2019). Éstos se clasifican en:

- Protección corriente definido (instantáneo) (50),
- Protección de tiempo definido y
- Protección de tiempo inverso (51).

Los relés de protección siempre estarán asociados con circuitos de media y alta tensión, que involucran grandes magnitudes de corriente. Por lo tanto, se requieren transformadores de instrumento o medición (CT) para transformar la corriente de línea a un nivel que coincida con la clasificación del relé. Los CT normalmente tienen una calificación de 5A en el secundario con una calificación primaria correspondiente a los requisitos del sistema. Los transformadores de potencial o voltaje (VT) son dispositivos monofásicos, generalmente, con una capacidad nominal de 120 V en el secundario con una calificación primaria correspondiente al voltaje del sistema.

En los dispositivos de protección de estado sólido, se deben considerar los efectos de la interferencia electromagnética (EMI) y la interferencia de radiofrecuencia (RFI) debido a que son sensibles a anomalías de las fuentes de energía y a los campos electrostáticos y electromagnéticos. Los equipos y dispositivos deben cumplir con MIL-STD-461 (Department of the Army, 1991).

Los tres tipos más comunes de curvas utilizadas son, Normal inversa (NI), Muy inversa (VI) y Extremadamente inversa (EI). Se detalla, en el punto 2.3, lo relacionado a su ajuste y coordinación.

2.2.4.2. Relé diferencial

El relé de protección diferencial funciona sobre el principio de comparación entre el ángulo de fase y las magnitudes de dos o más cantidades eléctricas similares. Cuando hay una diferencia entre dos o más cantidades eléctricas similares que supera un valor predeterminado, éste se activa. En el circuito del esquema de relé diferencial representado en la figura 12, hay dos corrientes provenientes de dos CT. Estas dos corrientes se encuentran en un punto de unión donde se conecta una bobina de relé, la cual no es más que la suma de dos corrientes. Si la polaridad y amplitud de ambas corrientes están tan ajustadas que la suma del fasor de estas dos corrientes es cero en condiciones normales de funcionamiento. Por lo tanto, no habrá corriente fluyendo a través de la bobina del relé en condiciones normales de funcionamiento. No obstante, debido a cualquier anomalía en el circuito de potencia, si se rompe este equilibrio, eso significa que la suma del fasor de estas dos corrientes ya no permanece cero y habrá corriente no cero fluyendo a través de la bobina de relé por lo que el relé estará operando para su pronta apertura (ABB, 2011).

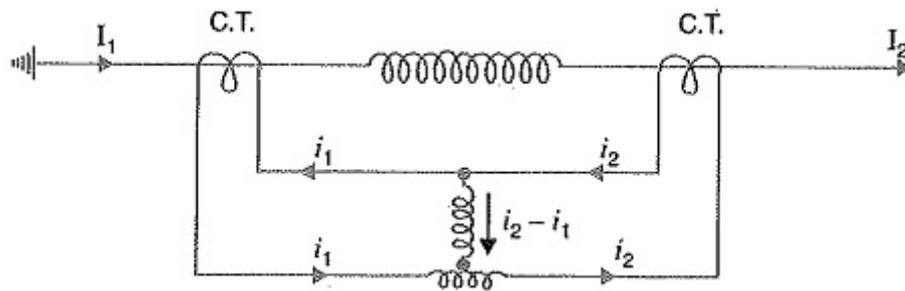


Fig. 12. Esquema o representación del relé diferencial

Fuente: EEGGUIDE, 2014

En el esquema diferencial de la figura anterior, hay dos conjuntos de transformadores de corriente conectados a cada lado del equipo protegidos por relé diferencial. La relación de los transformadores de corriente se elige considerando la corriente de flujo máxima nominal en los terminales de potencia del transformador.

2.3. Coordinación y selectividad de dispositivos de protección

La selección y coordinación adecuada de los dispositivos de protección está prevista en el artículo 110.10 del Código Eléctrico Nacional. Este dice que:

“Los dispositivos de protección contra sobrecorriente, la impedancia total, los valores nominales de corriente de cortocircuito de los componentes y otras características del circuito a proteger se seleccionarán y coordinarán para permitir que los dispositivos de protección de circuitos utilizados eliminen una falla sin daños importantes a los componentes eléctricos del circuito. Se debe suponer que esta falla se encuentra entre dos o más de los conductores del circuito o entre cualquier conductor del circuito y el conductor de conexión a tierra o la pista de rodadura metálica que lo rodea”.

Para cumplir con este mandato, se requiere un estudio de coordinación de sobrecorriente. La coordinación de protecciones procura mitigar fallas y a su vez proporcionar la continuidad del servicio limitando la zona donde ocurrió dicha falla del resto de la operación y sistema, logrando de esta forma, evitar daños y pérdidas del local, residencia, comercio o industria. Cuando hay dos o más dispositivos de protección en serie entre el punto de falla y la fuente de alimentación, éstos deben coordinarse para asegurar que el dispositivo más cercano al punto de falla operará primero. Los otros dispositivos ascendentes deben estar diseñados para funcionar en secuencia para proporcionar una protección de respaldo, si algún dispositivo no responde. A esto, se le llama coordinación selectiva. Para una correcta coordinación de los equipos de protección, es importante conocer cuáles tipos de equipos se encuentran instalados, así como sus curvas de operación o disparo. Conforme a esto, se generan los ajustes necesarios que permitan su activación ante la falla.

Los equipos considerados en la red para su coordinación son fusibles, disyuntores térmicos, magnéticos o termomagnéticos, relés de sobrecorriente de tiempo inverso y diferenciales, y otros que permitan la operación automática.

Para realizar una correcta coordinación de protecciones, existen métodos que nos ayudan o indican cuándo una protección ofrecerá selectividad frente a las demás, estas metodologías se describen como tipos de selectividades y pueden ser del tipo amperimétrica, cronométrica y lógica (Baruti, 2017).

2.3.1. Curvas características de tiempo-corriente

El tiempo se traza en el eje vertical y la corriente se traza en el eje horizontal de todas las curvas características de tiempo-corriente. El papel cuadriculado tipo *log-log* se utiliza para cubrir una amplia gama de tiempos y corrientes. Las curvas

características están dispuestas de modo que el área de los dispositivos en serie desde la carga hasta la fuente esté debajo y a la izquierda de las curvas indica puntos de 'no operación', y el área arriba y a la derecha de las curvas indica puntos de operación. El procedimiento involucrado en la aplicación de curvas características a un estudio de coordinación es seleccionar o configurar los diversos dispositivos de protección de modo que las curvas características ubicadas en un gráfico compuesto de tiempo-corriente de izquierda a derecha no se superpongan o traslapen. El resultado es un conjunto de curvas coordinadas en un gráfico compuesto de corriente de tiempo (Department of the Army, 1991).

2.3.2. Datos necesarios para un estudio de coordinación

La siguiente información es necesaria para poder ajustar las protecciones eléctricas correctamente (Department of Veterans Affairs, 2015):

- 1) Diagrama unifilar del sistema en estudio.
- 2) Niveles de voltaje del sistema.
- 3) Datos de la fuente de alimentación entrante.
 - Datos de impedancia y MVA.
 - Relación X / R.
 - Protección existente que incluye números y configuraciones de dispositivos de relé, relaciones CT y curvas características de tiempo-corriente.
 - Valores nominales del transformador y datos de impedancia.
- 4) Datos sobre el sistema en estudio.
 - Valores nominales del transformador y datos de impedancia.
 - Valores nominales del motor y datos de impedancia.

- Clasificaciones de los dispositivos de protección, incluido el servicio momentáneo y de interrupción según corresponda.
- Curvas características de tiempo-corriente para dispositivos de protección.
- Relaciones de CT, curvas de excitación y resistencia al devanado.
- Curvas térmicas (I^2t) para cables y máquinas rotativas.
- Tamaños de conductores y longitudes aproximadas.

5) Datos de corriente de cortocircuito y carga

- Corrientes de cortocircuito momentáneas máximas y mínimas (primer ciclo) en los principales barras o buses.
- Corriente de interrupción máxima y mínima (5 ciclos y más) corrientes de cortocircuito en los principales autobuses. El valor exacto de la corriente de falla a tierra (especialmente la corriente de falla a tierra de arco) es imposible de calcular. Hay métodos disponibles para estimar la corriente de falla a tierra.
- Arco máximo y mínimo estimado y corrientes de falla a tierra atornilladas en los principales buses.
- Corrientes de carga máxima.
- Corrientes de arranque del motor y tiempos de arranque.
- Puntos de protección del transformador.

2.3.3. Procedimiento de coordinación

Se debe seguir el siguiente procedimiento al realizar un estudio de coordinación:

- 1) Indique las corrientes de cortocircuito en el eje horizontal del gráfico donde se representan las curvas de tiempo-corriente.

- 2) Indique la capacidad de carga más grande en el eje horizontal. Estos suelen ser motores así mismo debe incluir los valores FLA y LRA.
- 3) Especificar puntos de protección. Estos incluyen el punto de corriente de magnetización (*inrush*) y los límites de NFPA 70 para ciertos transformadores grandes, considerar las categorías que poseen los transformadores tomados del Anexo A de la IEEE C37.91.
- 4) Indique los rangos de *pickup* de los relés de protección.
- 5) Comenzando con la carga más grande en el nivel de voltaje más bajo, ajuste la curva para este dispositivo en el extremo izquierdo del gráfico de escala logarítmica. Aunque la intensidad de falla máxima en el sistema establecerá el límite superior de las curvas a la derecha del primer dispositivo y los siguientes, el número de curvas en un gráfico debe limitarse a aproximadamente cinco para evitar confusiones.
- 6) Utilizando el principio de superposición, defina las curvas para todos los dispositivos de protección en un gráfico compuesto, aplicando configuraciones o los tipos de selectividad que existen, los cuales son amperimétrico, cronométrico y lógico, el ultimo presentando características combinadas de los dos anteriores, estos proporcionan protección contra sobrecorriente asegurándose también que no se superpongan o traslapen las curvas de cada una de las representadas en la gráfica tiempo-corriente de carácter logarítmico.
- 7) Esto es realizado con la ayuda del *software* EasyPower, al igual que el desarrollo de la realización de este estudio. A esto, se suman métodos de cálculo para configurar la forma de la curva logrando la selectividad del sistema. Las curvas de disparo de los equipos poseen arreglos con características estandarizadas según ANSI/IEC, las cuales pueden ser de tipo inversa estándar, muy inversa,

extremadamente inversa e inversa de tiempo largo o de tiempo corto, siendo todas curvas que se definen en una gráfica de corriente versus tiempo, donde la característica que las define y las clasifica en una u otra vendría a ser el grado de exponencialidad que posean, cuanto más exponencial sea su curva, más inversa se volverá (Lackovic, s.f.)

2.3.4. Intervalos de tiempo de coordinación

Al trazar curvas de coordinación, se deben mantener ciertos intervalos de tiempo entre las curvas de varios dispositivos de protección para garantizar el correcto funcionamiento secuencial de los dispositivos. Estos intervalos son necesarios porque los relés tienen tolerancias de sobre velocidad y curva, ciertos fusibles tienen características de daño y los interruptores automáticos tienen ciertas velocidades de operación. A estos intervalos se llaman márgenes.

Al evaluar el disparo para las protecciones en serie en una TCC, se deben mantener los márgenes de tiempo de coordinación tomando en cuenta el equipo a proteger. La tabla 2 ofrece los márgenes de tiempo de coordinación típicos sugeridos.

La razón principal para coordinar los intervalos de tiempo es que los relés y disyuntores disponen de componentes separados y discretos. El proveedor del relé proporciona las curvas características, y el fabricante del interruptor proporciona los tiempos de interrupción nominales. Ante esto, al realizar el estudio de coordinación, se deben conocer las características generales de TCC del interruptor de relé para la aplicación bajo consideración.

Existen casos especiales relacionados con la coordinación de dispositivos. El primero es darle el enfoque adecuado recomendado en los estándares y por los

proveedores de fusibles es mantener las relaciones de fusibles, no los márgenes de tiempo en el TCC.

El segundo caso considera los interruptores automáticos serie LV o de caja moldeada. No se requiere un intervalo de tiempo de coordinación entre los dispositivos en serie. Las curvas características del interruptor incorporan la detección del interruptor y los tiempos de funcionamiento. El propósito de la curva de despeje total del interruptor es indicar que todos los polos en el circuito han sido borrados. Por lo tanto, si las curvas no se tocan, se logra selectividad (Smith, 2006).

Al coordinar relés de sobrecorriente, el intervalo de tiempo suele ser de 0.3-0.4 segundos. Este intervalo se mide entre los relés en serie, ya sea en el ajuste instantáneo del relé del disyuntor del alimentador del lado de la carga o en la corriente máxima de cortocircuito, que puede fluir a través de ambos dispositivos simultáneamente, el valor más bajo de la corriente.

Un margen de 0.355 se usa ampliamente en sistemas probados en campo que emplean relés de sobrecorriente de tiempo muy inversos y extremadamente inversos. (P. Smith, T., 2006)

Para una mejor noción en el área de la coordinación de protecciones, se muestran ejemplos visuales en el apéndice 1.

Tabla 2. Tiempos de coordinación de dispositivos de protección

Dispositivo aguas arriba	Dispositivo aguas abajo	Sobre velocidad del disco del relé	Tolerancia del relé	Tiempo de operación (sec.) (nota 4)	Tiempo total (sec.)	Tiempo o típico (sec.)
Relé 51	Relé 51	0.1	0.07 (nota 2)	0.05	0.22	0.4
				0.08	0.25	
				0.13	0.30	
			0.17 (nota 3)	0.05	0.32	
				0.08	0.35	
				0.13	0.40	
Relé 51	Relé 50	N/A	0.07 (nota 2)	0.05	0.12	0.2
				0.08	0.15	
				0.13	0.20	
			0.17 (nota 3)	0.05	0.22	
				0.08	0.25	
				0.13	0.30	
Relé numérico	Relé numérico	N/A	0.07 (nota 2)	0.05	0.12	0.2
				0.08	0.15	
				0.13	0.20	
			0.17 (nota 3)	0.05	0.22	
				0.08	0.25	
				0.13	0.30	
Relé 51	LV CB	N/A	0.07 (2)	N/A	0.07	0.2
			0.17 (3)		0.17	
Relé 51	Fusible	N/A	0.07 (2)	N/A	0.07	0.2
			0.17 (3)		0.17	
Fusible	Relé 50	N/A	0.07 (nota 2)	0.05	0.12	0.2
				0.08	0.15	
				0.13	0.20	
			0.17 (nota 3)	0.05	0.22	
				0.08	0.25	
				0.13	0.30	
Fusible	Fusible	N/A	N/A	N/A	(note 5)	(note 5)
LV CB (6)	LV CB (6)	N/A	N/A	N/A	(note 7)	(note 7)

Fuente: P. Smith, T. (2006), *The ABC's of Overcurrent Coordination*.

- Notas:
1. Tiempo total a la corriente máxima vista por ambos dispositivos.
 2. Relé recientemente probado y calibrado.
 3. Relé no probado y calibrado recientemente.
 4. Tiempo de funcionamiento del interruptor aguas abajo, 3 ciclos (0.05 segundos), 5 ciclos (0.08 segundos) y 8 ciclos (0.13 segundos).
 5. El intervalo de tiempo de coordinación no es aplicable. Mantener relaciones de fusibles.
 6. Caja moldeada de bajo voltaje o disyuntor de potencia.

7.El intervalo de tiempo de coordinación no es aplicable. Las curvas de tiempo-corriente no deben superponerse o traslaparse.

En la tabla anterior, se muestran los márgenes de selectividad donde operan las diferentes protecciones. En ese sentido, deben considerarse las tolerancias de operación de las protecciones de acuerdo con el tiempo de operación característico, en especial, los relés estáticos. Éstos tienden a ser variados según la frecuencia de mantenimiento o actualización de los estudios de coordinación del sistema eléctrico correspondiente.

En el caso de los relés numéricos de la serie Siprotec de Siemens, el margen de tiempo utilizado para proporcionar la selectividad entre relés es de 0,2-0,4 segundos (Kamoon, Alfadli y Alshabeeb,2020). Para los demás tipos de relés, ya sean digitales u otros, el margen de tiempo será de 0,3 segundos, todo esto según recomendación de las diferentes fuentes citadas.

2.3.5. Requisitos de coordinación

El propósito principal del procedimiento de coordinación es seleccionar las clasificaciones y configuraciones adecuadas para los dispositivos de protección en un sistema de distribución eléctrica. Estas clasificaciones y configuraciones deben seleccionarse de modo que las corrientes de detección y los retrasos de tiempo permitan que el sistema ignore las sobrecargas transitorias, pero opere el dispositivo de protección más cercano a la falla cuando ocurra una falla. La selección adecuada de clasificaciones y configuraciones de dispositivos de protección requiere el conocimiento de los requisitos de NFPA 70 para la protección de motores, transformadores y conductores, así como el conocimiento de los requisitos de ANSI C57.12 para límites de resistencia de transformadores.

2.3.5.1. Límites del transformador NFPA 70

NFPA 70 especifica la configuración de sobrecorriente máxima para dispositivos de protección de transformadores. La Tabla 430.3 (A) resume los requisitos de NFPA 70 para transformadores de más de 600V. Se permite que los parámetros de los fusibles sean inferiores a los parámetros de los disyuntores debido a las diferencias en las características de funcionamiento en la región de sobrecarga.

2.3.5.2. Punto de resistencia ANSI C57.12

A niveles de corriente superiores al 600 por ciento de la carga completa, la resistencia del transformador se puede aproximar mediante curvas de falla a través de I^2t que han reemplazado el antiguo y conocido punto de resistencia ANSI C57.12.

2.3.5.3. Irritación magnetizante (inrush)

Los dispositivos de protección primaria del transformador deben estar clasificados o configurados por debajo del límite de resistencia, pero por encima de las corrientes de magnetización y carga de entrada que se producen durante la activación del transformador. Las magnitudes y duraciones de la corriente de entrada varían entre los fabricantes de transformadores, pero se utilizan comúnmente de 8 a 12 veces la corriente de carga completa durante 0.1 segundos para fines de coordinación.

2.3.6. Tiempo mínimo definido inverso en relés de protección contra sobrecorriente estándar

Es posible que sea necesario cambiar las características de disparo de corriente/tiempo de los relés de protección IDMT en función del tiempo de funcionamiento y de las características de otros elementos de protección de relé utilizados en la red eléctrica (Alstom Grid, 2011). Para estas necesidades, IEC 60255 determinó una serie de características estándar:

- Inversa estándar (SI)
- Muy inversa (VI)
- Extremadamente inversa (EI)
- Tiempo definido (DT)

La definición matemática de las curvas se presenta en la tabla 3, mientras las curvas basadas en un ajuste común de la corriente y el parámetro del tiempo de 1 segundo se presentan en la figura 13a. Las características de disparo para varias configuraciones TMS utilizando la curva SI se presentan en la figura 14.

Tabla 3. Definiciones de características estándar de protección de relés

Características del relé de ecuación (IEC 60255) protección	
Inversa	$t = TMS \times \frac{0,14}{I_r^{0,02} - 1}$
Muy inversa	$t = TMS \times \frac{13,5}{I_r - 1}$
Extremadamente inversa	$t = TMS \times \frac{80}{I_r^2 - 1}$
Falla a tierra en espera en largo tiempo	$t = TMS \times \frac{120}{I_r - 1}$

Fuente: IEC

Tabla 4. Definiciones ANSI IDMT de características estándar de protección de relés

Características del relé de protección	Ecuación
IEEE Moderadamente inversa	$t = \frac{TD}{7} \left[\left(\frac{0,0515}{I_r^{0,02}} - 1 \right) + 0,114 \right]$
IEEE Muy inversa	$t = \frac{TD}{7} \left[\left(\frac{19,61}{I_r^2} - 1 \right) + 0,491 \right]$
IEEE Extremadamente inversa	$t = \frac{TD}{7} \left[\left(\frac{28,2}{I_r^2} - 1 \right) + 0,1217 \right]$
inversa	$t = \frac{TD}{7} \left[\left(\frac{5,95}{I_r^2} - 1 \right) + 0,18 \right]$
corto tiempo inverso	$t = \frac{TD}{7} \left[\left(\frac{0,02394}{I_r^{0,02}} - 1 \right) + 0,01694 \right]$

Fuente: ANSI

Nota: para la tabla 3 y 4

$$I_r = I/I_s \tag{1}$$

Donde,

I Corriente medida*I_s* Corriente de ajuste de relé*TMS* Ajuste del multiplicador de tiempo*TD* Ajuste dial de tiempo

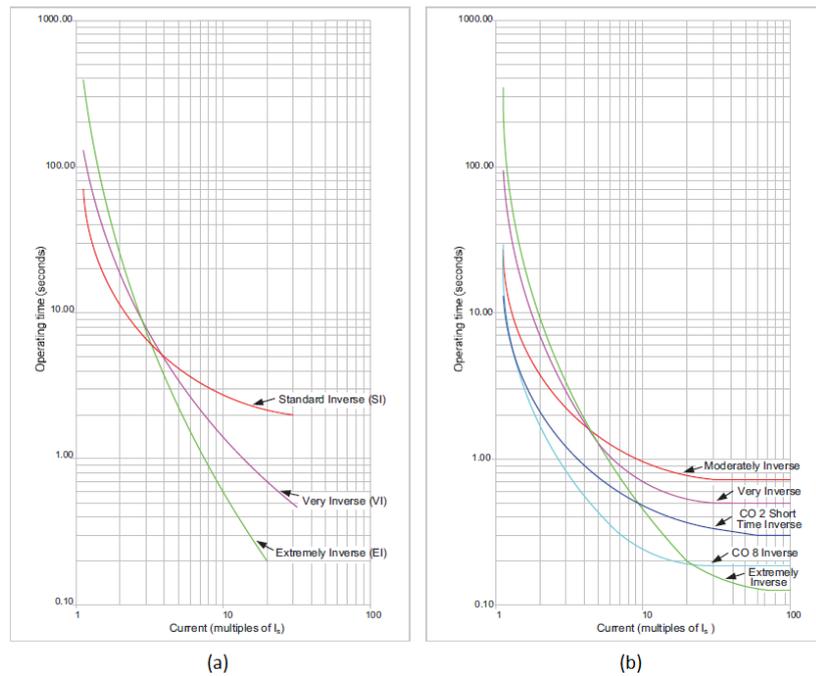


Fig. 13. a) Característica de las curvas temporizadas del relé según IEC 60255;
b) Característica de las curvas temporizadas del relé norteamericana IEEE

Fuente: Alstom Grid, 2011

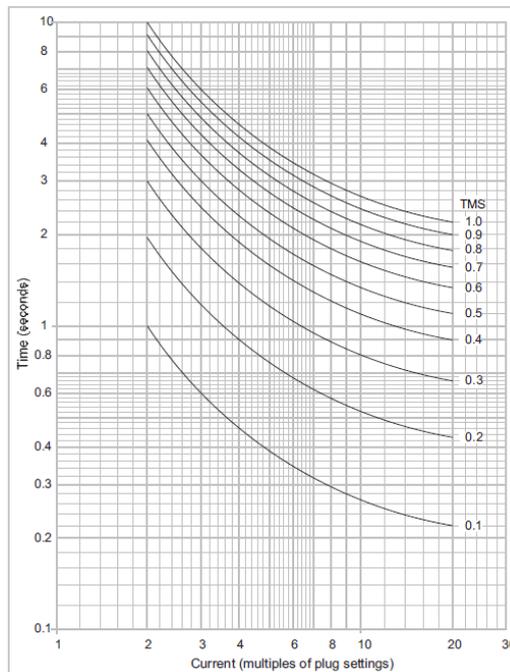


Fig. 14. Características típicas de tiempo-corriente para relés según el estándar tiempo definido inverso

Fuente Alstom Grid, 2011

Cuando se utilizan relés de protección digitales o numéricos, se pueden dar otras características, incluida la posibilidad de curvas de protección definidas por el usuario. La opción instantánea está habilitada para todos los relés digitales. Los relés de protección para sistemas de energía eléctrica fabricados de acuerdo con los estándares norteamericanos utilizan curvas de protección ANSI/IEEE. La tabla 4 proporciona la descripción matemática de estas características de protección y la figura 13b. presenta las curvas de protección estandarizadas a un ajuste de TD. Es importante tener en cuenta que varios proveedores pueden estandarizar sus curvas de protección en varios entornos distintos de TD (Alstom Grid, 2011).

Así mismo, para calcular el tiempo real de operación del relé, es necesario conocer las siguientes operaciones (Electrical 4U, 2018):

- Ajuste de la corriente
- Valor de corriente de falla.
- Relación de transformador de corriente del transformador de instrumento.
- Tiempo /curva del multiplicador de ajuste de conexión.
- Ajuste de tiempo.

Seguidamente, se explican algunas características de los relés diferenciales, los cuales toman una gran parte de este proyecto. La curva característica en un relé diferencial se define por la configuración básica, la relación inicial y el segundo punto de inflexión.

El ajuste básico debe ser mayor que la corriente de excitación del transformador o la corriente de carga de línea al voltaje de funcionamiento máximo para evitar una operación falsa del relé. Es principalmente la relación de arranque junto con el segundo punto de inflexión el aspecto que determina la sensibilidad operativa del relé para fallas

internas de transformadores o máquinas al operar. El segundo punto de inflexión también afecta la estabilidad de la protección en fallas fuera del área de protección. Cuanto menor sea el ajuste del segundo punto de inflexión, mejor será la estabilidad obtenida.

Al energizarse un transformador de potencia protegido, la corriente de entrada aparece completamente como corriente diferencial, en cuyo caso, la estabilización del relé por sí sola no es suficiente para evitar operaciones de relé falsas. Esta situación requiere una función de bloqueo basada en el segundo armónico para inhibir el funcionamiento de la etapa estabilizada. El segundo armónico, por lo general, está abundantemente presente en la corriente de entrada.

El voltaje creciente genera una corriente de magnetización creciente debido a la saturación del transformador, que se ve completamente como corriente diferencial. Cuando la relación entre la corriente diferencial y la corriente estabilizadora excede los ajustes, el relé funciona. La operación se puede inhibir incorporando una función de bloqueo basada en el quinto armónico. La corriente magnetizante de un transformador de potencia saturado contiene una gran cantidad de este armónico particular (Montaser Kouhsari, 2019). El ajuste de estos parámetros mencionados anteriormente está representado en esta curva en el momento de su coordinación.

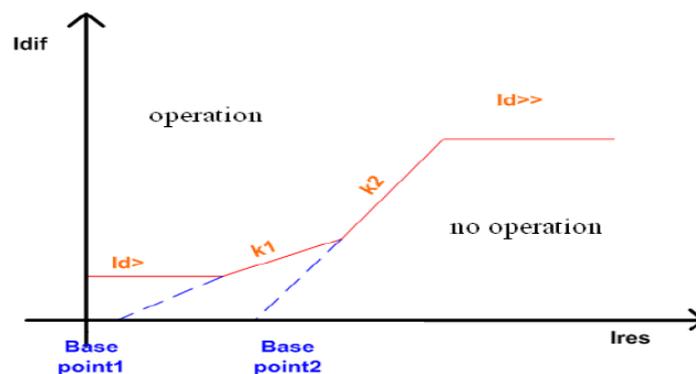


Fig. 15. Curva característica de ajuste de un relé diferencial

Fuente: Montaser Kouhsari, 2019

Algunos de estos ajustes se mencionan a continuación, así como sus rangos de ajuste recomendados:

- El ajuste $I_{d>}$ depende de la corriente nominal, considerar el cambio máximo de derivación del transformador, corriente capacitiva del cable, desajuste de los TC, corriente de magnetización sin carga.
- La pendiente $K1$ junto con su punto base cuenta la corriente falsa proporcional actual debido a errores de CT de aproximadamente 20-25%.
- La pendiente $K2$ junto con su punto base cuenta para la saturación de CT, el ajuste es de aproximadamente 40-50%.
- $I_{d >>}$ funciona sin restricciones y está diseñado para altas corrientes de falla interna en el lado primario del transformador con un alto grado de saturación de CT. Debe establecerse en al menos un 20% por encima de la máxima corriente de entrada, lo que sea mayor (Montaser Kouhsari, 2019).

2.4. Estudio de arco y choque eléctrico

Un arco eléctrico es el acto producido por un flujo de electrones que atraviesa el aire. Su causa es generada por el contacto accidental entre partes energizadas. Éste se efectúa cuando las partes energizadas ven reducida su separación por error humano, deterioro de aislamiento y/o condiciones irregulares del espacio donde se encuentra ubicado.

La seguridad del personal de mantenimiento debe estar siempre a la vanguardia. Deben hacerse las evaluaciones relacionadas con el riesgo por arco y choque eléctricos. De acuerdo con la NFPA 70E 2018, esto debe realizarse antes de que el personal ejecute labores de mantenimiento.

2.4.1. Riesgos del arco y choque eléctrico

Se consideran riesgos eléctricos todas aquellos generados por una conducta involuntaria del personal a la hora de realizar actividades de mantenimiento o los generados por condiciones físicas inseguras.

El choque eléctrico se genera al fluir directa o indirectamente corriente eléctrica por la piel o cuerpo. La severidad del choque depende del camino seguido por la corriente a través del cuerpo, en proporción a la cantidad y duración de ésta. Los efectos del choque son asociados con el nivel de tensión (Induni, 2013).

En referencia a la norma NFPA 70E, el peligro de relámpago de arco se produce cuando las partes de circuitos energizados están a la vista y pueda darse un contacto accidental con estas partes o cuando no se han hecho los estudios correspondientes para corroborar las condiciones de seguridad (Induni Vizcaíno, 2013).

Dentro de las causas de este fenómeno, se encuentran las siguientes:

- Condiciones insalubres
- Condensación de agua
- Actuar incorrecto del personal de mantenimiento
- Fallas en los equipos de la instalación

2.4.2. Efectos del arco eléctrico

Los trabajadores se exponen a peligros directos como las temperaturas exceso de intensidad térmica, ya que las temperaturas cuando se producen los arcos pueden rondar los 19 000°C. Esto produce liberación de energía generando la destrucción de piezas sólidas que en conjunto a la explosión expulsan restos metálicos y gases tóxicos pudiendo dañar las vías respiratorias, por tanto, se debe utilizar EPP. (Induni Vizcaíno, 2013).

La cantidad de energía en forma de calor liberada por un arco eléctrico se expresa en calorías por centímetro cuadrado (cal/cm^2) y ésta varía con la distancia del arco (IEEE std 1584, 2018).

2.4.3. Normativa

Este artículo indica que NFPA 70E-2018, “Standard for Electrical Safety in the Workplace”, brinda la asistencia para la determinación y la planificación de las prácticas seguras en el trabajo mediante la selección del equipo de protección personal y etiquetado de “arc flash”, donde incluye la mayor cantidad de información relacionada con los parámetros de riesgo.

La siguiente información debe agregarse en la etiqueta e incluye:

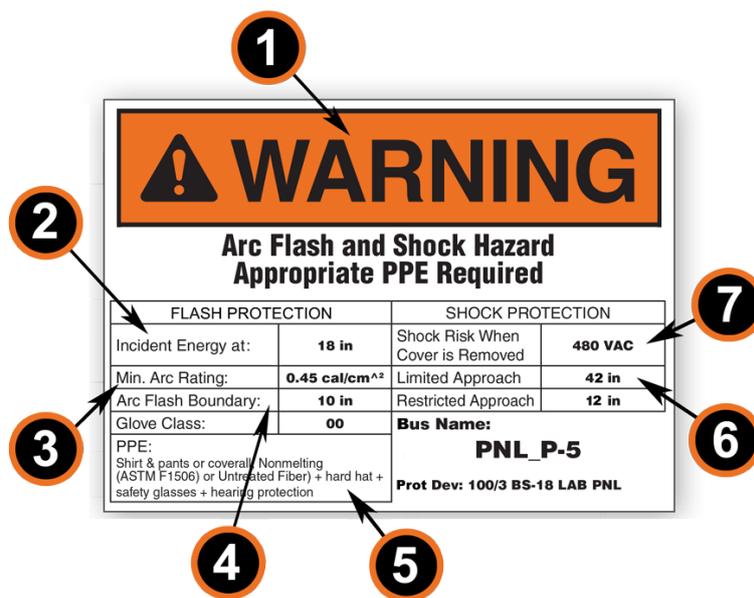


Fig. 16. Etiqueta requerida por NFPA 70E

Fuente: Brady, 2014

Los siguientes son los detalles de cada elemento de una etiqueta de arco eléctrico:

1. **Encabezado de peligro o advertencia.** Una directriz común es usar el encabezado "Peligro" cuando el voltaje es mayor a 600 o cuando la energía incidente es mayor a 40 cal/cm². Si es menor a este umbral, normalmente, se usa un encabezado color naranja de "Advertencia" (Brady, 2014).
2. **“Energía incidente a” es la distancia de trabajo correspondiente.** El Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE, por sus siglas en inglés) define esto como “la dimensión entre el punto posible de arco y la cabeza y cuerpo del trabajador colocados en el lugar para realizar la actividad asignada” (Brady, 2014).

3. **“Clasificación mín. de arco” es la energía incidente.** Es una medida de energía térmica a una distancia de trabajo desde una falla de arco. Se mide en calorías/cm² o julios/cm²(Brady, 2014).
4. **Límite de arco eléctrico.** Es la distancia a la que una persona que esté trabajando más cerca al momento de un incidente de arco eléctrico pueda recibir una lesión permanente si no está protegido en forma adecuada por ropa resistente al fuego (FR) (Brady, 2014).
5. **Equipo de Protección Personal (EPP).** Cada categoría de riesgo de peligro requiere un nivel diferente de protección. Las categorías se clasifican de 1 a 4. Aquí se puede encontrar el EPP requerido para cada categoría (Brady, 2014).
6. **Los campos “Acercamiento limitado” y “Acercamiento restringido” están relacionados con los límites de acercamiento de peligro de choque.** Estos límites están definidos en más detalle en nuestra Sección de Seguridad de arco eléctrico (Brady, 2014).
7. **“Riesgo de choque si se retira la cubierta” es el voltaje** (Brady, 2014).

2.4.3.1. NFPA 70E-2018: Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo

Según el artículo 90.2, esta norma emplea los requisitos y las condiciones necesarias para determinar la seguridad eléctrica para los lugares de trabajo en calidad de trabajador:

- Instalaciones de conductores y equipos que conectan a la fuente de suministro de electricidad.

- Instalaciones utilizadas por las empresas de energía eléctrica, tales como edificios de oficinas, depósitos, garajes, talleres y edificios recreativos, que no forman parte integral de una planta generadora, una subestación o centro de control.

2.4.3.1.1. Límites de aproximación

Los siguientes elementos se definen como fronteras de aproximación y determinan la distancia de seguridad a la que debe estar una persona calificada usando EPP. Según la NFPA 70E-2018, éstas vienen definidas en las etiquetas de advertencia, las cuales son:

- 1) *Frontera de protección contra choque*: límite de aproximación a una distancia de una fuente potencial de arco.
- 2) *Frontera de aproximación limitada*: límite de aproximación a una distancia de un conductor expuesto o parte de circuito energizado. A ésta, puede ingresar solamente personal calificado o personal no calificado escoltado por personal calificado y utilizar equipo de protección personal para evitar un posible choque eléctrico.
- 3) *Frontera de aproximación restringida*: límite de aproximación a una distancia de un conductor expuesto o parte de circuito energizado. Dentro de esta frontera, puede ingresar solamente el personal calificado.
- 4) *Frontera de aproximación prohibida*: límite de aproximación a una distancia de un conductor expuesto o parte de circuito energizado. Solamente personal calificado puede ingresar a la zona.

Estas distancias están relacionadas con la posibilidad de recibir un choque. Se fijan debido a la tensión a la cual se opera y a la energía incidente disponible. El EPP por utilizar será para proteger de los efectos térmicos a la persona calificada.

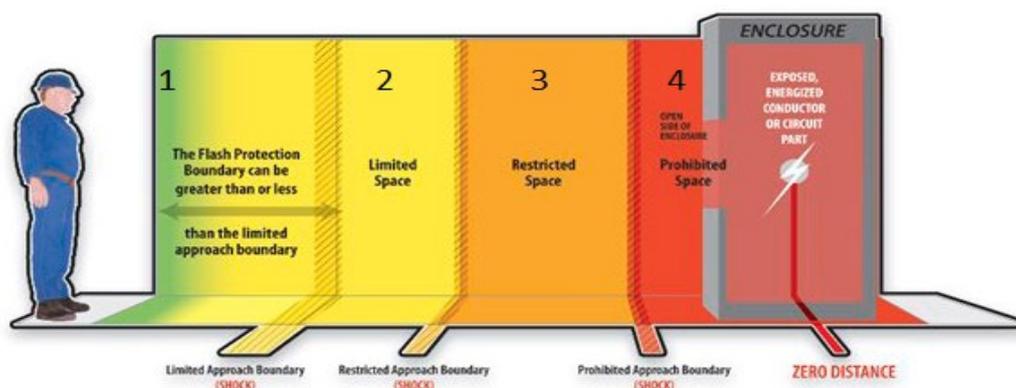


Fig. 17. Fronteras o límites de aproximación por choque enumerado según el punto 2.4.3.1.1.

Fuente: N-Sci Technologies Inc., 2019

2.4.3.1.2. Condición de trabajo eléctricamente segura

Los circuitos y conductores energizados que funcionan con tensiones iguales o mayores de 50 voltios deben ponerse en una condición de trabajo eléctricamente segura, antes de que el empleado comience con las actividades habituales de mantenimiento si y solo si el empleado se encuentra dentro de la frontera de aproximación limitada y/o interactúa con equipos que poseen conductores o partes de este no están expuestas, pero existe un aumento en las probabilidades de sufrir un riesgo eléctrico (Induni, 2013).

Al realizar un trabajo, el empleado debe asegurarse de que las condiciones sean las requeridas. Según lo estipulado en el artículo 130.2 de la NFPA 70E-2018, es permitida la opción de que el empleador pueda demostrar que el desenergizar

incremente los riesgos, así como puede ser inviable debido al diseño o procesos operativos.

No se requiere la desenergización cuando los conductores o partes de los equipos operen a 50 voltios o menos, es decir, la protección de sobrecorriente más cercana al trabajador garantiza la seguridad contra quemaduras y explosiones debido a arcos eléctricos.

Algunas condiciones que procuran el funcionamiento normal de los equipos son las siguientes:

- El equipo instalado y mantenido apropiadamente.
- El equipo de utilizarse según las instrucciones y etiquetado del fabricante.
- Las puertas y las tapas de los equipos deben estar cerradas.

Según el artículo 120.5 de la NFPA 70E-2018, para establecer una condición de trabajo eléctricamente segura, se deben incluir los siguientes pasos:

- Determinar las posibles fuentes de energía de los equipos y que los diagramas y planos de éstos sean los respectivos actualizados.
- Esperar que los dispositivos de protección abran por completo ante la falla.
- Verificar constantemente que todos los dispositivos de desconexión estén completamente abiertos o en posición de desconexión total.
- Liberar la energía eléctrica almacenada.
- Liberar o bloquear la energía mecánica liberada almacenada.
- Instalar los dispositivos de bloqueo y etiquetado según lo disponga el procedimiento establecido documentado.

- Comprobar la desenergización de los equipos y cada parte que lo alimenta, mediante los equipos de prueba respectivos, antes, durante y después de cada prueba y mantenimiento.

Al cumplirse todas estas pautas, se abre paso al siguiente proceso llamado permiso de trabajo eléctrico, el cual contiene una serie de requisitos incluyendo el anterior para realizar la orden de mantenimiento o trabajo eléctrico.

2.4.4. Análisis de peligro de choque y análisis de peligro de relámpago de arco

2.4.4.1. Análisis de peligro de choque

Éste debe determinar la tensión a la cual el personal de mantenimiento estará expuesto (Induni, 2013).

2.4.4.2. Análisis de peligro de relámpago

Debe hacerse un análisis para generar la frontera de protección y el EPP en pro de la posibilidad de recibir contusiones por un relámpago de arco.

Éste debe realizar y considerar los dispositivos de protección de sobrecorriente y sus tiempos de apertura, y su condición de mantenimiento (Induni, 2013).

2.4.4.2.1. Equipo de protección personal (EPP)

Al realizar trabajos donde hay peligros eléctricos, se debe usar el equipo de protección específico del cuerpo que se va a proteger. En el capítulo V, se determinan las cualidades y características de los componentes del EPP por utilizar.



Fig. 19. EPP de protección de relámpago según la categoría de riesgo

Fuente: Electrical Testing and Engineering Network, 2017

Utilizar el EPP no garantiza que no se tendrán quemaduras dado que éste es un método para reducir la afectación.

2.4.5. IEEE 1584-2018: Guía para el cálculo de los riesgos derivados del “arcflash”

El modelo utiliza un proceso de dos pasos en el que los valores intermedios de la corriente de arco promedio, la energía incidente y el límite del arco de destello se interpolan para determinar los valores finales. Los factores de corrección para el tamaño del gabinete y la variación de la corriente del arco se aplican para ajustar los resultados.

Se proporciona un resumen de los pasos necesarios para aplicar el modelo de la siguiente manera:

- a) Para determinar la corriente de arco
 - 1) Determinar la configuración del electrodo del equipo aplicable basado en el paso 5 de la guía IEEE 1584-2018.

- 2) Si el voltaje del sistema es $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15\,000 \text{ V}$, use la ecuación (2) para encontrar los valores intermedios en 600 V, 2 700 V y 14 300 V. Usar la ecuación (12), ecuación (13), ecuación (14), y la orientación proporcionada en el punto 2.4.9.1.6. de este documento para encontrar el valor final de la corriente de arco.
 - 3) Si el voltaje del sistema es para $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$, use la ecuación (2) para encontrar los valores intermedios (solo 600 V) y la ecuación (16) para encontrar valores finales. La orientación para determinar la corriente de arco final es proporcionada en la 2.4.9.1.10. de este documento.
- b) Determine la duración del arco o el tiempo de eliminación de fallas utilizando la corriente de arco determinada en el paso a). La dirección para determinar la duración del arco es proporcionada en el paso 8 de la guía IEEE 1584-2018.
- c) Para determinar la energía incidente
- 1) Determine el factor de corrección del tamaño del recinto utilizando la guía proporcionada en 4.8.4 de la guía IEEE 1584-2018.
 - 2) Si el voltaje del sistema es $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15\,000 \text{ V}$, use la ecuación (4), la ecuación (5) y la ecuación (6) para encontrar valores intermedios. Use la ecuación (15), la ecuación (16), la ecuación (17) y la guía proporcionada en 2.4.9.1.6. de este documento para encontrar el valor final de la energía incidente.
 - 3) Si el voltaje del sistema es $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$, use la ecuación (7). En el punto 2.4.9.1.10. de este documento donde se proporciona orientación para determinar la energía incidente final.
- d) Para determinar el límite de arco eléctrico

- 1) Determine el factor de corrección del tamaño del gabinete según el punto 4.8 de la guía IEEE 1584-2018.
- 2) Si el voltaje del sistema es $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15\,000 \text{ V}$, use la ecuación (8), ecuación (9) y ecuación (10) para encontrar los valores intermedios. Use la ecuación (18), ecuación (19), ecuación (20) y la guía proporcionada en 2.4.9.1.6. de este documento para encontrar el valor final del límite del arco eléctrico.
- 3) Si el voltaje del sistema es $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$, use la ecuación (11). La determinación del límite final de arco eléctrico es proporcionada en el punto 2.4.9.1.10. de este documento.

2.4.5.1. Pasos para realizar el análisis de peligro de relámpago de arco

2.4.5.1.1. Paso 1: recolectar la información del sistema y la instalación

El estudio comienza con la revisión y verificación de los diagramas unifilares disponibles y el sitio del equipo eléctrico, así como la disposición del diseño con personas que están familiarizadas en el sitio. Es necesaria las inspecciones de campo para la verificación de los elementos del sistema.

Los datos necesarios para este trabajo son los mismos que están relaciones con estudios de cortocircuito y coordinación de protecciones en el sistema eléctrico. Sin embargo, también se requiere tomar datos de barras de alimentación, tipos de celdas y dimensiones de los gabinetes respectivos en lo que acontece a estudios de arco.

Los sistemas eléctricos de menos de 240 V no son considerados caso contrario existan uno o más transformadores de 125 kVA. Debe conocerse el aporte de los MVA de falla y su relación X/R de la utilidad (IEEE 1584, 2018).

2.4.5.1.2. Paso 2: determinar los modos de operación del sistema

Un sistema por sus dimensiones puede ser complejo según sus modos de operación. Para evaluar esto, deben considerarse todos los aportes de falla incidente (IEEE 1584, 2018).

2.4.5.1.3. Paso 3: determinar las corrientes de falla franca

Se deben determinar los valores disponibles de fallas para cada escenario. Las corrientes de falla más altas pueden resultar en tiempos de disparo más cortos para los dispositivos de protección contra sobrecorriente, lo que resulta en una energía incidente menor. Las corrientes de falla más altas sin una disminución en el tiempo de apertura del dispositivo de protección contra sobrecorriente dan como resultado una energía incidente más alta. Las corrientes de falla más bajas pueden dar como resultado un tiempo de apertura más prolongado para el dispositivo de protección contra sobrecorriente, aumentando así la energía incidente (IEEE 1584, 2018).

2.4.5.1.4. Paso 4: el espacio típico y el tamaño del gabinete en función de los voltajes del sistema y las clases de equipos

Para cada equipo que forma parte del estudio, el voltaje del sistema y la clase de equipo se pueden usar para establecer espacios típicos entre conductores (o espacios de bus), tal como se muestra en la tabla 8 de la IEEE 1584 - 2018.

Esta tabla también proporciona información sobre los tamaños de gabinete utilizados para cada clase de voltaje. Dicha información proporciona la relación entre la clase de voltaje, las brechas y los tamaños de gabinete. Los tamaños del recinto se utilizaron para derivar el factor de corrección de energía incidente del tamaño del recinto.

2.4.5.1.5. Paso 5: determinar la configuración de los electrodos en los equipos

Como parte del proceso de cálculo, es necesario identificar el conductor del equipo y la disposición del gabinete que más se asemeja a la configuración o configuraciones reales del electrodo. Cada tipo de equipo o centro de distribución puede contener conductores dispuestos de manera similar a las configuraciones de electrodos de configuración de prueba las cuales están presentes en la presente norma.

En la norma en la cual se basa este proyecto se encuentra disponible la selección de electrodos VCB, VCCB, HCB, HOA y VOA estos tipos definen su orientación de instalación.

En el presente caso, el sistema eléctrico no posee tales configuraciones de electrodos que los equipos requieren para la supresión de arco. Por tanto, en los siguientes capítulos, se recomendarán las propiedades o características mínimas según la norma en la cual se basa este estudio (IEEE 1584, 2018).

2.4.5.1.6. Paso 6: determinar las distancias de trabajo

La tabla 10 de la IEEE 1584 – 2018 establece las distancias de trabajo típicas según la clase de equipo.

La distancia de trabajo típica es la suma de la distancia entre el trabajador parado frente al equipo y desde la parte delantera del equipo hasta la posible fuente de arco dentro del equipo (IEEE 1584, 2018).

2.4.5.1.7. Paso 7: determinar las corrientes de falla de arco

La corriente de falla de arco depende principalmente de la corriente de falla atornillada o falla franca. Ésta depende de la corriente de falla franca disponible y debe ser menor a ésta, especialmente para aplicaciones menores a 1000 V (IEEE 1584, 2018).

2.4.5.1.8. Paso 8: hallar las características del dispositivo de protección y la duración de los arcos

El tiempo de apertura total de la falla de arco reducirá la energía incidente. Un tiempo mayor va a producir más energía. El factor tiempo se verá condicionado por la curva de la protección en la gráfica de tiempo-corriente. Si dos dispositivos operan juntos, entonces los tiempos de despeje y las tolerancias de funcionamiento deben considerarse (IEEE 1584, 2018).

2.4.5.1.9. Paso 9: determinar la energía incidente para cada locación de trabajo (equipo)

Realizar los cálculos utilizando el *software* apropiado o uno certificado por el ente colegiado (IEEE 1584, 2018).

2.4.5.1.10. Paso 10: determinar la frontera de protección de “arc flash” para cada locación de trabajo en el estudio

Las ecuaciones para encontrar la energía incidente pueden resolverse para la distancia desde la fuente del arco en la que podría ocurrir el inicio de una quemadura de segundo grado. La energía incidente debe establecerse en la energía mínima más allá de la cual podría ocurrir una quemadura de segundo grado (IEEE 1584, 2018).

2.4.6. Modelos para los cálculos de *arcflash*

2.4.6.1. Norma IEEE 1584-2018

El modelo para los cálculos de energía incidente se ha dividido en las siguientes dos partes, dependiendo de la tensión del circuito abierto del sistema, V_{oc} :

- Modelos para $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15\,000 \text{ V}$
- Modelos para $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$

Los arcos sostenibles son posibles, pero menos probables en sistemas trifásicos que operan a 240 V nominales o menos con una corriente de cortocircuito disponible inferior a 2000A.

Los modelos de cálculo utilizados para tensiones mayores a 15 000 voltios emplean el método Lee situado en el anexo D de la NFPA 70E-2018

2.4.6.1.1. Corrientes de arco medias intermedias

Las corrientes de arco medias intermedias se pueden determinar utilizando la Ecuación (2) de la siguiente manera y los coeficientes que se proporcionan en la Tabla 1 de la guía IEEE 1584-2018. Las corrientes de arco son calculadas con tres diferentes voltajes de circuitos abiertos (V_{oc}).

$$I_{arc_Voc} = 10^{(k1+k2lgI_{bf}+k3lgG)} (K4I_{bf}^6 + K5I_{bf}^5 + K6I_{bf}^4 + K7I_{bf}^3 + K8I_{bf}^2 + K9I_{bf} + K10) \quad (2)$$

Donde

I_{bf} Es la corriente de falla en el punto trifásica (rms simétrica) (kA)

I_{arc_600} Es la corriente de arco media rms en $V_{oc}=600 \text{ V}$ (kA)

I_{arc_2700} Es la corriente de arco media rms en $V_{oc}=2700 \text{ V}$ (kA)

I_{arc_14300}	Es la corriente de arco media rms en $V_{oc}=14\ 300$ V (kA)
G	Es la distancia de brecha entre los electrodos (mm)
$k1$ a $k10$	Son los coeficientes proporcionados en la tabla 1
lg	Es \log_{10}

2.4.6.1.2. Factor de corrección de la variación de corriente de arco

Se debe calcular el segundo conjunto de duración de arco utilizando la corriente reducida de arco para determinar si la variación de la corriente de arco posee un efecto en el tiempo de operación de los dispositivos de protección y, por consiguiente, en la energía incidente. La variación de la corriente de arco aplica para todo el sistema de voltaje en circuito abierto con un rango válido para el modelo (208 V A 15 000 V), pero se espera que tenga el mayor impacto entre 208 V y 600 V (IEEE 1584, 2018).

Para determinar un límite inferior de la corriente de arco rms promedio, use la ecuación (3) de la siguiente manera y los coeficientes que se proporcionan en la tabla 2:

$$I_{arc_min} = I_{arc} \times (1 - 0,5 \times VarC_f) \quad (3)$$

$$VarC_f = (K1V_{oc}^6 + K2I_{oc}^5 + K3I_{oc}^4 + K4I_{oc}^3 + K5I_{oc}^2 + K6I_{oc} + K7)$$

Donde

$VarC_f$	Es el factor de corrección de la variación de corriente de arco
I_{arc}	Es la corriente de arco rms final o intermedia (kA)
I_{arc_min}	Es la segunda corriente de arco rms reducida basada en el factor de corrección de variación (kA)
V_{oc}	Es el voltaje de circuito abierto entre 0,208 kV y 15,0 kV
$k1$ a $k7$	Son los coeficientes proporcionados en la tabla 2

2.4.6.1.3. Energía incidente promedio

Use las siguientes ecuaciones (4) y (7), y las tablas 3, 4 y 5 para determinar los valores intermedios de energía incidente:

$$E_{600} = \frac{12,552}{150} T \times 10 \left(k1+k2lgG + \frac{k3I_{arc_600}}{K4I_{bf}^7+K5I_{bf}^6+K6I_{bf}^5+K7I_{bf}^4+K8I_{bf}^3+K9I_{bf}^2+K10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k12lgD + k13lgI_{arc_600} + lg\frac{1}{CF} \right) \quad (4)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{150} T \times 10 \left(k1+k2lgG + \frac{k3I_{arc_2700}}{K4I_{bf}^7+K5I_{bf}^6+K6I_{bf}^5+K7I_{bf}^4+K8I_{bf}^3+K9I_{bf}^2+K10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k12lgD + k13lgI_{arc_2700} + lg\frac{1}{CF} \right) \quad (5)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{150} T \times 10 \left(k1+k2lgG + \frac{k3I_{arc_14300}}{K4I_{bf}^7+K5I_{bf}^6+K6I_{bf}^5+K7I_{bf}^4+K8I_{bf}^3+K9I_{bf}^2+K10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k12lgD + k13lgI_{arc_14300} + lg\frac{1}{CF} \right) \quad (6)$$

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{150} T \times 10 \left(k1+k2lgG + \frac{k3I_{arc_600}}{K4I_{bf}^7+K5I_{bf}^6+K6I_{bf}^5+K7I_{bf}^4+K8I_{bf}^3+K9I_{bf}^2+K10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k12lgD + k13lgI_{arc} + lg\frac{1}{CF} \right) \quad (7)$$

Donde

E_{600} Es la energía incidente en $V_{oc}=600V$ (J/cm^2)

E_{2700} Es la energía incidente en $V_{oc}=2700$ V (J/cm^2)

E_{14300} Es la energía incidente en $V_{oc}=14\ 300$ V (J/cm^2)

$E_{\leq 600}$ Es la energía incidente para $V_{oc}=600$ V (J/cm^2)

T Es la duración de arco (ms)

G Es la distancia de brecha entre los electrodos (mm)

I_{arc_600} Es la corriente de arco rms en para 600 V (kA)

I_{arc_2700} Es la corriente de arco rms en para 2700 V (kA)

I_{arc_14300} Es la corriente de arco rms en para 14 300 V (kA)

I_{arc} Es la corriente de arco rms para $V_{oc} \leq 600V$ [se obtiene usando la ecuación (21)](kA)

I_{bf} Es la corriente de falla en el punto para falla trifásica (rms simétrica)
(kA)

D	Es la distancia entre electrodos y calorímetros (distancia de trabajo) (mm)
CF	Es el factor de corrección para los tamaños de gabinetes (para configuraciones VOA y HOA, $CF=1$)
lg	Es \log_{10}
$k1$ a $k13$	Son los coeficientes proporcionados en la tabla 3, tabla 4 y tabla 5. Para la ecuación 4 usar la tabla 3, en la ecuación 5 usar la tabla 4, en la ecuación 6 usar la tabla 5 y para la ecuación 7 usar la tabla 3

2.4.6.1.4. Límites de destello de arco promedios

Use la ecuación (8) a la ecuación (11) de la siguiente manera y la tabla 3, la tabla 4 y la tabla 5 para determinar los valores de límite intermedios de arco eléctrico:

$$AFB_{600} = 10 \left(\frac{k1+k2lgG + \frac{k3I_{arc_600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k13lgI_{arc_600} + lg\left(\frac{1}{CF}\right) - lg\left(\frac{20}{T}\right)}{-k12} \right) \quad (8)$$

$$AFB_{2700} = 10 \left(\frac{k1+k2lgG + \frac{k3I_{arc_2700}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k13lgI_{arc_2700} + lg\left(\frac{1}{CF}\right) - lg\left(\frac{20}{T}\right)}{-k12} \right) \quad (9)$$

$$AFB_{14300} = 10 \left(\frac{k1+k2lgG + \frac{k3I_{arc_14300}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k13lgI_{arc_14300} + lg\left(\frac{1}{CF}\right) - lg\left(\frac{20}{T}\right)}{-k12} \right) \quad (10)$$

$$AFB_{\leq 600} = 10 \left(\frac{k1+k2lgG + \frac{k3I_{arc_600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k13lgI_{arc} + lg\left(\frac{1}{CF}\right) - lg\left(\frac{20}{T}\right)}{-k12} \right) \quad (11)$$

Donde:

AFB_{600}	Es el límite de arco eléctrico para $V_{oc} = 600V$ (mm)
AFB_{2700}	Es el límite de arco eléctrico para $V_{oc} = 2700$ V (mm)
AFB_{14300}	Es el límite de arco eléctrico para $V_{oc} = 14\ 300$ V (mm)

$AFB_{\leq 600}$	Es el límite de arco eléctrico para $V_{oc} = 600$ V (mm)
T	Es la duración de arco (ms)
G	Es la distancia de brecha entre los electrodos (mm)
I_{arc_600}	Es la corriente de arco rms en para 600 V (kA)
I_{arc_2700}	Es la corriente de arco rms en para 2700 V (kA)
I_{arc_14300}	Es la corriente de arco rms en para 14 300 V (kA)
I_{arc}	Es la corriente de arco rms para $V_{oc} \leq 600$ V [se obtiene usando la ecuación (21)](kA)
I_{bf}	Es la corriente de falla en el punto para falla trifásica (rms simétrica) (kA)
D	Es la distancia entre electrodos y calorímetros (distancia de trabajo) (mm)
CF	Es el factor de corrección para los tamaños de gabinetes (para configuraciones VOA y HOA, $CF=1$)
lg	Es \log_{10}
$k1$ a $k13$	Son los coeficientes proporcionados en la tabla 3, tabla 4 y tabla 5. Para la ecuación 8 usar la tabla 3, en la ecuación 9 usar la tabla 4, en la ecuación 10 usar la tabla 5 y para la ecuación 11 usar la tabla 3

2.4.6.1.5. Factor de corrección para el tamaño de los gabinetes

Esta parte proporciona instrucciones sobre como ajustar la energía incidente para pequeños y grandes gabinetes utilizando el factor de corrección (CF). El método para el ajuste de la energía incidente basado en los tamaños de los gabinetes es el siguiente:

- Un conjunto de valores de altura y anchura equivalentes se determina en función del voltaje del sistema, la configuración del electrodo, la altura del gabinete y la anchura. La profundidad no se considera a menos que el ancho y la altura sean

menores que 508 mm (20 in) y que el voltaje del sistema sea menor que 600 V. La profundidad se usa para clasificar el tipo de envolvente como “Típico” o “Bajo”.

- El tipo de gabinete y altura equivalente y ancho son utilizados para determinar los parámetros de tamaño del gabinete equivalente que determina el valor para el factor de corrección en el tamaño del gabinete, *CF*.

2.4.6.1.6. Determinación de la I_{arc} , E , y AFB ($600\text{ V} < V_{oc} \leq 15\ 000\text{ V}$)

Para determinar la corriente de arco final, energía incidente y límites de riesgo de arco eléctrico a un voltaje específico, primero, se calculan los valores intermedios para los niveles de voltaje trifásico a 600 V, 2700 V y 14 300 V. Luego, use la ecuación de interpolación (12) a la ecuación (20) para determinar los valores estimados finales de la siguiente manera:

2.4.6.1.6.1. Corriente de arco (I_{arc})

$$I_{arc_1} = \frac{I_{arc_{2700}} - I_{arc_{600}}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + I_{arc_{2700}} \quad (12)$$

$$I_{arc_2} = \frac{I_{arc_{14300}} - I_{arc_{2700}}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + I_{arc_{14300}} \quad (13)$$

$$I_{arc_3} = \frac{I_{arc_1}(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc_2}(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (14)$$

Donde:

I_{arc_1} Es el primer término de interpolación I_{arc} entre 600 V y 2 700V (kA)

I_{arc_2} Es el segundo término de interpolación I_{arc} usado cuando V_{oc} es mayor que 2700 V (kA)

I_{arc_3} El tercer término de interpolación I_{arc} es usado cuando V_{oc} es menor

que 2700 V (kA)

V_{oc} Es el voltaje a circuito abierto (voltaje del sistema) (kV)

Cuando $0,600 < V_{oc} < 2.7$, el valor final para la corriente de arco se da de la siguiente manera:

$$I_{arc} = I_{arc_3}$$

Cuando $V_{oc} > 2.7$, el valor final para la corriente de arco se da de la siguiente manera:

$$I_{arc} = I_{arc_2}$$

La duración del arco puede ser determinada usando I_{arc} . Este tiempo se utiliza para determinar la energía incidente y el límite del arco eléctrico.

2.4.6.1.6.2. *Energía Incidente (E)*

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (15)$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (16)$$

$$E_3 = \frac{E_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (17)$$

Donde:

E_1 Es el primer término de interpolación E es entre 600 V y 2 700V
(J/cm²)

E_2 Es el segundo término de interpolación E es usado cuando V_{oc} es mayor que 2700 V (J/cm²)

E_3 El tercer término de interpolación E usado cuando V_{oc} es menor que 2700 V (J/cm²)

2.4.6.1.6.3. Límite de riesgo de arco eléctrico (AFB)

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (18)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (19)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (20)$$

Donde

AFB_1 Es el primer término de interpolación AFB es entre 600 V y 2 700V (mm)

AFB_2 Es el segundo término de interpolación AFB es usado cuando V_{oc} es mayor que 2700 V (mm)

AFB_3 El tercer término de interpolación AFB usado cuando V_{oc} es menor que 2700 V (mm)

Cuando $600 < V_{oc} < 2.7$, el valor final para energía incidente y límite de riesgo de corriente de arco se da de la siguiente manera:

$$E = E_3$$

$$AFB = AFB_3$$

Cuando $V_{oc} > 2.7$, el valor final para energía incidente y límite de riesgo de arco eléctrico se da de la siguiente manera:

$$E = E_2$$

$$AFB = AFB_2$$

Se recomienda calcular un segundo conjunto de valores de la duración del arco, la energía incidente y el límite del arco eléctrico en función de la corriente de arco reducida I_{arc_min} para tener en cuenta el efecto de la variación de la corriente de arco en el funcionamiento de los dispositivos de protección. La energía incidente final o el límite de arco eléctrico es el mayor de los dos valores calculados (IEEE 1584, 2018).

2.4.6.1.7. Determinación de la I_{arc} , E , y AFB ($V_{oc} \leq 600$ V)

Esta subclase describe cómo determinar la corriente de arco final, la energía incidente y el límite de riesgo de arco eléctrico para un específico voltaje a circuito abierto, 208 V $\leq V_{oc} \leq 600$ V. Primero, se calcula la corriente de arco utilizando la ecuación (21). Usando la corriente de arco, la estimada duración de arco se procede a determinar la energía incidente y los límites de riesgo de arco eléctrico.

2.4.6.1.7.1. Corriente de arco (I_{arc})

La corriente de arco final puede determinarse usando la ecuación (21).

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{V_{oc}}\right] \times \left[\frac{1}{I_{arc_600}^2} - \left(0,6^2 - \frac{V_{oc}^2}{0,6^2 \times I_{bf}^2}\right)\right]}} \quad (21)$$

Donde:

V_{oc} Es el voltaje de circuito abierto (kV)

I_{bf} Es la corriente de falla en el punto para falla trifásica (rms simétrica)
(kA)

I_{arc} Es la corriente de arco rms final a un específico V_{oc} (kA)

I_{arc_600} Es la corriente de arco rms a $V_{oc} = 600$ V usando la ecuación (2)
encontrada(kA)

La duración del arco puede determinarse usando I_{arc} . Este tiempo es usado para determinar la energía incidente y los límites de arco eléctrico.

2.4.6.1.7.2. Energía incidente (E)

La energía incidente es dada por la siguiente ecuación:

$$E = E_{\leq 600}$$

Donde:

$E_{\leq 600}$ Es la energía incidente determinada para $V_{oc} \leq 600V$ usando la ecuación (7) utilizando la solución de la corriente de arco determinada por la ecuación (2) y la ecuación (21) (J/cm^2)

E Es la energía incidente final especificada en V_{oc} (J/cm^2)

2.4.6.1.7.3. Límites de arco eléctrico (AFB)

Los límites de arco eléctrico son dados por lo siguiente:

$$AFB = AFB_{\leq 600}$$

Donde:

$AFB_{\leq 600}$ Es el límite de arco eléctrico determinada para $V_{oc} \leq 600V$ usando la ecuación (11) utilizando la solución de la corriente de arco determinada por la ecuación (2) y la ecuación (21) (mm)

AFB Es el límite de arco eléctrico final especificada en V_{oc} (mm)

Se debe calcular un segundo conjunto para la duración de arco, energía incidente y valores de límites de arco eléctrico basados en reducir la corriente de para registrar

efectos de variaciones en la corriente de arco en la operación de los dispositivos de protección. La energía incidente final o límite de arco eléctrico es más alta para los dos valores calculados (IEEE 1584, 2018).

2.4.6.2. Método de Lee

Se utiliza donde tensión es mayor a 15 kV. La corriente de falla de arco es considerada igual a la corriente de falla franca o las condiciones no se ajustan para los demás métodos (NFPA 70E, 2018), mediante la expresión siguiente:

$$E = 2,142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (22)$$

Donde:

E	Energía incidente (J/cm ²).
V	Voltaje del sistema (kV).
t	Tiempo de duración del arco (segundos).
D	Distancia desde un posible punto de arco hasta la persona (mm).
I_{bf}	Corriente de falla franca.

CAPÍTULO III

Marco metodológico

Este capítulo está dirigido a la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto. Consta del tipo de investigación donde se explica el enfoque en el cual está dirigido. Del mismo modo, en el alcance de la investigación, se da a conocer el propósito general. Las fuentes de información exponen los medios utilizados. En las variables, se muestran las dependientes y las independientes. A partir de esto, el sujeto de la información brinda información sobre la recolección de datos.

Al finalizar, se muestra un resumen de la metodología para iniciar posteriormente en el siguiente capítulo, con los datos de los estudios tabulados para su respectivo análisis.

3.1. Tipo de investigación

El proceso de este documento se dedica, en su mayoría, a la investigación cuantitativa, donde inicialmente se recolectan los datos que corresponden a cada elemento que compone el sistema eléctrico de potencia y su respectiva distribución de la planta de producción Cemex. Éste es tomado para ser modelado, modificado y verificado por el software EasyPower. Seguidamente, al obtener los resultados necesarios, la investigación cualitativa da como resultado la elección del equipo de protección personal requerido y las recomendaciones para establecer condiciones seguras de trabajo. Este proyecto se lleva a cabo mediante una investigación mixta.

El modelo en el cual se desarrolla este proyecto está determinado por las normas citadas en capítulos anteriores y en el cuadro resumen de este capítulo. En éste, se explica que la información recolectada proviene de diagramas, manuales de estudios de corto circuito y coordinación de protecciones. A partir de ello, se realiza el levantamiento total del sistema eléctrico para las actualizaciones correspondientes por

medio de visitas de campo. Todo lo anterior se representa en tabulaciones en el capítulo 4.

Posteriormente, al analizar los parámetros producto del modelado del sistema eléctrico en el *software*, se elige el tipo de protección necesario para que la o las personas realicen sus actividades relacionadas con el mantenimiento y control eléctrico de manera segura. A esto, se añade el acondicionamiento de los lugares de trabajo con los requerimientos de seguridad provistos por las normas y estándares en los cuales se fundamenta este proyecto.

Con base en la información anterior, se crean los documentos según lo contemplado en las normativas de referencia. Por otra parte, se realizarán las recomendaciones necesarias para establecer de la manera más eficiente la inserción de las mejoras en los protocolos. Lo anterior conlleva un plan piloto para la incorporación de un programa de seguridad eléctrica ocupacional.

3.2. Alcance de la investigación

A continuación, se definen y se establecen los alcances que posee este proyecto de investigación:

En el alcance exploratorio se desea investigar los medios de prevención y supresión de arco y choque eléctrico que existen, implementarlos, verificar la eficacia de estos y elegir el más conveniente, lo cual, a su vez, otorgue una mayor probabilidad de seguridad para el personal de operación y mantenimiento.

En el alcance descriptivo busca conocer la magnitud máxima de energía que se puede producir en un evento de arco y choque eléctrico en la planta de producción de cemento Cemex. La energía máxima registrada se puede conocer como corriente de

falla o corriente de corto circuito, el alcance correlativo está asociado a la cantidad de energía incidente producida por estas fallas, donde el fin principal es que el equipo de protección personal pueda soportar la cantidad de energía incidente liberada para así salvaguardar la integridad física del empleado.

En el alcance explicativo describe las diferentes situaciones que pueden generar una corriente de falla. Ésta es por el procedimiento inapropiado en la ejecución de las tareas eléctricas, también por el mal estado de los equipos que componen el sistema eléctrico, condiciones inseguras en el área de trabajo, o bien, en algunos casos, por no usar el equipo de protección personal requerido, debido a la falta de capacitación.

3.3. Fuentes de información

Las fuentes de información de este proyecto se clasifican en primarias y secundarias, las cuales se describen a continuación:

Fuentes primarias

- Normas IEEE entre ellas la Std 1584-2018, Std C.37.91-2008, Std 242-2001, Std C37.96-2012, Std 141-1993 y Std 551-2006 y las normas NFPA 70, 70E y 70B.
- Tesis de grado aplicables y recursos bibliográficos de portales de Ingeniería Eléctrica, manuales de seguridad eléctrica ocupacional, manuales y guías de coordinación de protecciones.

Fuentes secundarias

- Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), Fundación Internacional de Seguridad Eléctrica (ESFI), Encuesta de Lesiones Ocupacionales (SOII), Oficina de Estadísticas Laborales de EE. UU. (BLS).
- Páginas *web*, manuales, guías, registros digitales e impresiones de datos.

3.4. Variables

Este estudio utiliza, como variable dependiente, el valor de corriente de falla disponible en los lugares de trabajo cercanos a los elementos del sistema eléctrico, el cual es el valor inicial. Seguidamente, la variable independiente es el valor de energía incidente, el cual es manipulable por sistemas de supresión de arco y el tiempo de apertura de las protecciones en alta, mediana y baja tensión. Este tiempo se analiza en las gráficas de curva-corriente característico de cada protección instalada o recomendada en caso de no existir en base de datos de *software*.

3.5. Sujeto de información

Los sujetos de información utilizados para este proyecto, como los diagramas unifilares de potencia, el estudio de corto circuito y la coordinación de protecciones fueron proporcionados por la empresa PROCOSA subcontratada por Cemex, realizados en el año 2015, además de la actualización de los datos. De la misma forma, el levantamiento de la información de las protecciones y las máquinas eléctricas se realizó a través de la ayuda de colaboradores y cuerpo técnico del Departamento de Mantenimiento Eléctrico.

3.6. Resumen

A continuación, se muestra un cuadro resumen con los instrumentos de medición, fuentes de información, forma de recolección de datos y forma de análisis de estos.

Tabla 5. Cuadro resumen de instrumentos, fuentes y análisis de datos de la metodología

Objetivo	Instrumentos de medición	Fuente de información	Forma de recolección de datos	Forma de análisis de datos
1	-Registros digitales e impresiones de datos.	-Norma IEEE 1584-2018. -Norma NFPA 70E-2018.	-Documentos -Libros -Normas	-Observaciones y procedimientos de cálculo.
2	-Registros digitales impresos -Formatos para observación y mediciones de campo	-Diagramas unifilares de potencia. -Estudio de Intensidad de Corto Circuito. -Datos técnicos de los interruptores de mediana y baja tensión.	Tabulación de variables como: -Niveles de tensión nominal en las barras. -Potencia del sistema. -Potencia del transformador. -Impedancia del transformador. -Intensidad de corto circuito simétrico. -Tiempo de despeje de la falla de la protección.	-Observaciones de campo, identificación de elementos de la red eléctrica.
3	-Registros digitales generados.	- <i>Software</i> de ingeniería	Análisis de documentos generados	-Observaciones en los tiempos de apertura de las protecciones ante una falla.
4	-Registros y revistas digitales.	-OSHA, sección 1910.333 -Norma NFPA 70E (2018) -Norma NFPA 70B (2018) -Norma ASTM F-1506 -Norma ASTM F-1891 -Norma ASTM F-1958 -Norma ASTM F-1959 -Norma ASTM F-2178	Tabulación de variables como: -Energía incidente (cal/cm^2) en el punto. -Distancia de arqueo. -Distancia de las diferentes zonas de protección.	-Niveles de protección requeridos en los equipos.

Fuente: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo,

CAPÍTULO IV

Presentación y análisis de los resultados

En este capítulo, se presentan los resultados relacionados con el estudio de arco y choque eléctrico. Además de esto, se encuentran el cálculo de corto circuito y la coordinación de protecciones. Para la realización de este proyecto, se cuenta con la implementación de *software* de modelado eléctrico EasyPower, donde se introduce el esquema de potencia con los componentes respectivos y las características técnicas explicadas en el capítulo II de este informe.

La construcción del diagrama unifilar eléctrico de potencia en esta herramienta de modelado permitirá predecir el comportamiento de la red para determinar las condiciones mínimas recomendadas por las normas ANSI/IEEE en cuanto a diseño y seguridad.

El procedimiento de análisis se resume en la cuantificación de la corriente de falla trifásica, la cual se busca limitar ajustando el tiempo de apertura de la protección eléctrica más cercana. Estos ajustes se logran mediante la representación de las curvas de operación de los elementos que componen el sistema eléctrico en las TCC, definiendo las propiedades de la curva de operación e intervalos de tiempo entre éstos, como en el caso de los relés de sobrecorriente de tiempo inverso. Al tener todos los escenarios anteriormente plasmados, se procede a generar el cálculo de arco y choque eléctrico y, por consiguiente, su análisis en el posterior capítulo.

4.1. Cálculo de corrientes de corto circuito

En esta sección, se encuentran los resultados obtenidos del cálculo de las corrientes de falla en distintos puntos mediante el modelado del diagrama unifilar eléctrico en el *software* EasyPower. Éste modela la corriente bajo condiciones anormales de operación y/o condiciones eventuales de falla.

El *software* por utilizar menciona las normas IEEE Std 551TM-2006 y IEEE Std 141TM-1993 como procedimiento de cálculo. Los resultados obtenidos de corrientes de falla asimétrica corresponden a valores en $\frac{1}{2}$ ciclo. Por recomendación de la norma, se debe comparar la capacidad interruptora del dispositivo de protección con la corriente asimétrica más alta entre cero y el primer ciclo (Rodríguez, 2018).

Por otro lado, existen diferentes tipos de falla de corto circuito, sin embargo, la norma dicta que la mayor concentración de energía está en el corto circuito trifásico, dejando de lado los sistemas de CA de fase única y de CD. En su mayoría, las cargas son trifásicas, además de que, en una falla trifásica, es donde se presentan las corrientes más altas debido a que los aportes por fase en cada sistema son balanceados. Otra razón importante es que la falla de arco en equipos o al aire que comienzan como fallas de línea a tierra puede escalar rápidamente a fallas trifásicas a medida en que el aire se ioniza a través de las fases. Esta progresión de monofásico a trifásico ocurre generalmente en unos pocos ciclos (Rodríguez, 2018).

Todas las máquinas están representadas por sus impedancias internas. Por ende, las capacitancias de líneas se ignoran por tratarse de distancias cortas de buses o conductores. La norma ANSI/IEEE defiende el uso de redes R y X por separado para calcular los valores X/R (Barrantes, 2014).

4.2. Introducción al procedimiento de cálculo de corto circuito mediante el *software* EasyPower

Para obtener un estudio de corto circuito, se debe contar con la información de las cargas instaladas en el sistema eléctrico como las resistencias y reactancias de éstos. Los equipos instalados en la red eléctrica son motores sincrónicos y asincrónicos, transformadores de potencia, conductores o buses, de los cuales se representarán por medio del diagrama unifilar.

Tabla 6. Datos de entrada de red eléctrica

Utilidad	Bus conectado	Rango		% Impedancia seq. positiva 100 MVA Base			Puesta a tierra	% Impedancia seq. zero 100 MVA Base		
		MVAsc	kV	X/R	R	X		Tipo	X/R	R0
ICE	Subestación	449.841	138.000	7.34	3,00029	22,02666	Wye Solid	4.57	4,757755	21,76339

Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

En la tabla 7, se muestra la información brindada por parte de la empresa proveedora de energía Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Los datos corresponden a la subestación más cercana, ubicada a 3 km aproximadamente de la planta de producción. En los estudios anteriores de corto circuito (año 2015), se empleaba el principio de barra infinita utilizando datos aproximados, pero no tan cercanos a los indicados en este documento.

En la figura 20, se representa el diagrama unifilar del sistema eléctrico compuesto por dos transformadores de potencia TR1 (TX-1) y TR2 (TX-1A) conectados en paralelo de 10 MVA con una tensión de entrada de 138 kV y una tensión de salida de 4,16 kV ubicados en la subestación principal caracterizados por tener ventilación ONAN/ONAF. En relación con la norma IEC 60076, éstos alimentan a 7 ramales considerados como CCM de mediana tensión:

- Ciudadela Martínez
- Servicios auxiliares
- Horno enfriador
- Molino Coke
- Molino crudo
- Trituración
- Molino cemento

Cada una de las áreas citadas anteriormente pertenece al proceso industrial de Cemex. Por ende, cada área posee cargas de proporciones importantes como transformadores y motores de mediana tensión, por lo cual tienden a tener métodos o protocolos de protección más complejos al considerarse cargas críticas. Para este plano, solo están considerados los elementos protección de sobrecorriente.

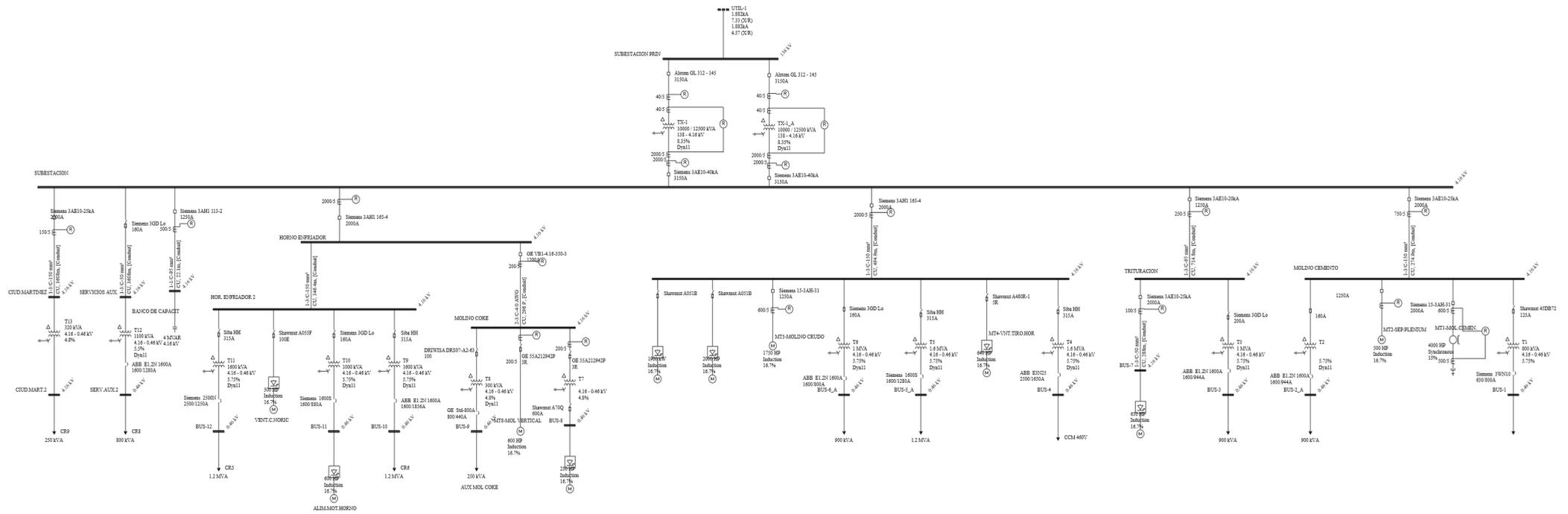


Fig. 20. Esquema eléctrico de potencia de la planta de producción Cemex, C.R.

Fuente: EasyPower, diagrama unifilar actualizado

La figura 20 muestra los elementos que componen el sistema eléctrico, tales como los conductores con aislamiento tipo EPR, los cuales tienen la función de transportar la energía y sirven como atenuador de corriente de falla oponiéndose a ésta en función del calibre y la longitud del conductor. En los buses de distribución, se encuentran instalados motores de alta potencia que cumplen la función de molinos o ventiladores, mientras los transformadores de distribución proveen de energía a los CCM caracterizados por tener ventilación ONAN en su mayoría.

La máquina rotatoria MT1 Prin. Mol. Cemento es un motor síncrono con rotor de polos salientes y excitación mediante excitatriz de corriente continua. Su aplicación principal es mover un molino de cemento. Los demás motores son de inducción con aplicaciones como ventiladores, trituradoras o molinos.

Según la norma IEEE 1584-2018, los datos de corriente de falla necesarios para el estudio de arco eléctrico son del tipo trifásico. En las tablas 7 y 8, se muestran los resultados de las corrientes máximas de corto circuito simétrica simulada para la red de $\frac{1}{2}$ ciclo. Dichos resultados definen las capacidades interruptoras con las que se elige una protección de baja o mediana tensión considerando la capacidad de apertura.

Tabla 7. Informe resumen de estudios de cortocircuitos en los buses de media tensión - 1/2 ciclo trifásico

3 PHASE Fault		Total Fault Currents					Branch Contributions			
Bus Name	Bus kV	Sym Amps	X/R Ratio	Mult Factor	Asym Amps	2.6*Sym Amps	Branch Name	Bus Name	Sym Amps	X/R Ratio
CAPACITOR	4.160	28361.9	6.65	1.34	38141.7	73740.8	C-5	SUBEST	28361.9	6.65
BUS-7	4.160	6167.2	0.66	1.00	6169.6	16034.6	C9	TRITUR	6167.2	0.66
							MT3-CANTERA		0.0	0.00
CIUD. MART.2	4.160	59825.0	2.48	1.10	65761.3	155544.9	T13	CIUD. MARTINEZ	59825.0	2.48
CIUD. MARTINEZ	4.160	3058.5	0.92	1.00	3068.9	7952.1	C-3	SUBEST	3058.5	0.92
							T13	CIUD. MART.2	0.0	150.00
HOR. ENFRIADOR 2	4.160	17421.9	1.99	1.06	18481.1	45296.9	C5	HORNO ENFRIADOR	17421.9	1.99
							T9	BUS-10	0.0	150.00
							T10	BUS-11	0.0	150.00
							T11	BUS-12	0.0	150.00
							VENT.C. NORIC		0.0	0.00
HORNO ENFRIADOR	4.160	29904.8	11.17	1.47	43908.3	77752.4	BH-7	SUBEST	29433.5	11.10
							C4	MOLINO COKE	471.7	20.02
							C5	HOR. ENFRIADOR 2	0.0	0.00
MOLINO CEMENTO	4.160	21062.6	2.83	1.13	23737.1	54762.7	C1	SUBEST	17935.5	2.41
							MT1-MOL. CEMEN.		2874.7	26.80
							MT2-SEP. PLENIUM		426.9	19.33
							T1	BUS-1	0.0	150.00
							T2	BUS-2_A	0.0	150.00
MOLINO COKE	4.160	27508.7	5.27	1.28	35305.9	71522.6	C4	HORNO ENFRIADOR	27041.1	5.20
							MT8-MOL VERTICAL		472.3	20.77
							T7	BUS-8	0.0	150.00
							T8	BUS-9	0.0	150.00
MOLINO CRUDO	4.160	15450.7	1.87	1.05	16256.3	40171.8	C3	SUBEST	14227.6	1.69
							MT4-VNT. TIRO.HOR		0.0	0.00
							MT5-MOLINO CRUDO		1377.2	29.77
							MT6-VNT. CAPT.POL		0.0	0.00
							MT7-VTI HORNO		0.0	0.00
							T4	BUS-4	0.0	150.00
							T5	BUS-5_A	0.0	150.00
							T6	BUS-6_A	0.0	150.00
SERVICIOS AUX.	4.160	1273.8	0.34	1.00	1273.8	3312.0	C7	SUBEST	1273.8	0.34
							T12	SERV. AUX.2	0.0	150.00

Tabla 7. Continuación

SUBEST	4.160	29904.8	11.17	1.47	43908.5	77752.6	BH-7	HORNO ENFRIADOR	471.7	20.02
							C-3	CIUD. MARTINEZ	0.0	0.00
							C-5	BANCO DE CAPACIT	0.0	0.00
							C1	MOLINO CEMENTO	3141.4	10.58
							C2	TRITUR	0.0	0.00
							C3	MOLINO CRUDO	1327.1	13.19
							C7	SERVICIOS AUX.	0.0	0.00
							TX-1	SUBEST PRIN	12482.6	11.07
							TX-2	SUBEST PRIN	12482.6	11.07
SUBEST PRIN	138.000	2014.9	7.53	1.38	2773.5	5238.8	TX-1	SUBEST	66.5	12.12
							TX-2	SUBEST	66.5	12.12
							UTIL-1		1882.0	7.33
TRITURACIÓN	4.160	9540.3	0.94	1.00	9577.3	24804.7	C2	SUBEST	9540.3	0.94
							C9	BUS-7	0.0	0.00
							T3	BUS-3	0.0	150.00

Fuente: Software EasyPower v.10.3

Tabla 8. Informe resumen de estudios de cortocircuitos en los buses de baja tensión - 1/2 ciclo trifásico

3 PHASE Fault		TotalFaultCurrents				EquipmentDuties		Branch Contributions			
Bus Name	Bus kV	Sym Amps	X/R Ratio	Mult Factor	Asym Amps	EquipType	Duty Amps	Branch Name	Bus Name	Sym Amps	X/R Ratio
BUS-1	0.460	16010.5	4.97	1.27	20301.9	LVPCB	16010.5	T1	MOLINO CEMENTO	16010.5	4.97
BUS-2_A	0.460	19608.4	5.16	1.28	25064.9	LVPCB	19608.4	T2	MOLINO CEMENTO	19608.4	5.16
BUS-3	0.460	18003.9	3.24	1.16	20851.0	LVPCB	18003.9	T3	TRITURACION	18003.9	3.24
BUS-4	0.460	28194.2	4.45	1.24	34925.7	LVPCB	28194.2	T4	MOLINO CRUDO	28194.2	4.45
BUS-5_A	0.460	28194.2	4.45	1.24	34925.7	LVPCB	28194.2	T5	MOLINO CRUDO	28194.2	4.45
BUS-6_A	0.460	18989.0	4.54	1.24	23627.7	LVPCB	18989.0	T6	MOLINO CRUDO	18989.0	4.54
BUS-8	0.460	5748.3	3.19	1.15	6635.4	LVPCB	5748.3	MT10 VENT.C. POL		0.0	0.00
								T7	MOLINO COKE	5748.3	3.19
BUS-9	0.460	7605.2	3.79	1.20	9104.5	LVPCB	7605.2	T8	MOLINO COKE	7605.2	3.79
BUS-10	0.460	28794.2	4.68	1.25	36053.4	LVPCB	28794.2	T9	HORNO ENFRIADOR 2	28794.2	4.68
BUS-11	0.460	19258.9	4.70	1.25	24139.3	LVPCB	19258.9	ALIM. MOT.HORNO		0.0	0.00
								T10	HORNO ENFRIADOR 2	19258.9	4.70
BUS-12	0.460	28794.2	4.68	1.25	36053.4	LVPCB	28794.2	T11	HORNO ENFRIADOR 2	28794.2	4.68
SERV.AUX.2	0.460	8980.4	0.75	1.00	8989.5	LVPCB	8980.4	T12	SERVICIOS AUX.	8980.4	0.75

Fuente: Software EasyPower v.10.3

Este valor es un punto de partida para conocer el comportamiento de la red eléctrica con el fin de regular o ajustar las protecciones y determinar las curvas de operación de los motores y transformadores de potencia en general. De acuerdo con esto, se podrán definir, en las protecciones eléctricas, el tipo de inclinación de la curva en el caso de los relés y los interruptores de potencia de baja tensión representadas en las TCC. Estas y otras características se podrán representar en la siguiente sección de ajuste y coordinación de protecciones eléctricas tomando en consideración las normas respectivas.

4.3. Equipos y dispositivos de protección

4.3.1. Relés de sobrecorriente

Son equipos de protección capaces de identificar corrientes de falla comparando el valor de la intensidad de corriente utilizada como dato de entrada a la protección con un valor de referencia establecido según las características técnicas del elemento a proteger, operando, si y solo si, el valor de intensidad de corriente supera al de referencia (Revetti y Rogelio, 2010).

4.3.2. Ajuste y coordinación de las protecciones

Al determinar la operación de los equipos de protección mediante un esquema de protección, se deben considerar las condiciones de operación nominal del sistema eléctrico asegurando que, durante las fallas, el funcionamiento irregular y las condiciones indeseadas de los equipos se vean afectados de manera mínima (Revetti y Rogelio, 2010).

Para ajustar las protecciones, se deben definir los límites de las señales o umbrales de entrada que permitirán la correcta operación de éstas. Para esto, se consideran la capacidad y el comportamiento de los elementos que componen el sistema eléctrico en todas las condiciones de operación (Revetti y Rogelio, 2010).

Coordinar una protección eléctrica requiere de disponer de intervalos de tiempos de operación para actuar según la función y la prioridad, tomando como partida la protección principal y de respaldo. La coordinación está determinada por la graduación o los ajustes de los tiempos para una correcta ejecución de las protecciones vinculadas (Revetti y Rogelio, 2010).

4.3.3. Funciones de las protecciones

Sobrecorriente de tiempo instantáneo (función 50). Son aquellos que operan de manera inmediata, es decir, no introducen intencionalmente ningún tiempo de retraso en su operación, sino que actúan desde el mismo instante que la corriente de entrada sobrepasa el valor de referencia (Revetti y Rogelio, 2010).

Sobrecorriente de ajuste temporizado (función 51). Trabajan mediante un parámetro de retraso de tiempo en su operación. Cuando éste es independiente de la corriente de entrada, al relé se le llama protección de sobrecorriente de tiempo definido. En caso contrario, si el retraso es función de la corriente de entrada, entonces, se denominan protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso. En esta sección, se pueden modificar las formas de inclinación de la curva de operación del relé, por ejemplo, tiempo inverso, moderadamente inverso, extremadamente inverso, etc. (Revetti y Rogelio, 2010).

4.3.4. Ajustes de las protecciones para motores y transformadores

En el capítulo II, se citan partes que se ajustan de un disyuntor de potencia en baja tensión; en mediana tensión, los ajustes se realizan en los relés de sobrecorriente mediante el TAP, el dial de tiempo (TD) y la unidad instantánea (INST). El TAP es una derivación de la bobina de entrada de la corriente. Dicha bobina tiene un número de vueltas que es ajustable. El TD es un ajuste vertical de la posición en la TCC, lo cual permite variar el tiempo para un mismo nivel de corriente. El INST permite interrumpir corrientes de cortocircuito sin retardo intencional de tiempo.

4.3.5. Criterios para la selección de los ajustes y coordinación de los relés de sobrecorriente

Los ajustes requeridos para los relés de sobrecorriente se realizan mediante los siguientes parámetros:

4.3.5.1. Ajuste de la protección temporizada de fase

La protección temporizada de fase tiene dos ajustes:

- Corriente mínima de operación (TAP)
- Dial de Tiempo (TD).

Para la corriente mínima de operación, se requiere que el ajuste sea de modo tal que la protección no opere para una intensidad primaria y secundaria del transformador de corriente 1,5 la capacidad nominal máxima del elemento por ser protegido, ya que así se evitará la actuación de la protección en condiciones normales de operación (Revetti y Rogelio, 2010). Para dimensionar la relación de transformación de corriente (CT), se utiliza la siguiente expresión:

$$CT = 1,2 \times I_n \quad (23)$$

Donde:

I_n es la corriente nominal del dispositivo por proteger.

Cabe destacar que el CT calculado debe acercarse a los valores de CT disponibles y normados en los circuitos de distribución. Una vez hecho esto, el ajuste del TAP de fase estará determinado por medio de la siguiente ecuación:

$$TAP = 1,2 \times I_n / CT \quad (24)$$

El TAP es una bobina ajustable, por tanto, el TAP calculado deberá aproximarse a los valores disponibles especificados por el fabricante. El ajuste del TD de la curva característica temporizada de la protección de fase debe ser tal que la curva seleccionada coordine con la curva característica de los elementos de protección “aguas abajo”, y que además sirva como respaldo efectivo de estas protecciones (Revetti y Rogelio, 2010).

4.3.5.2. Ajuste de la unidad instantánea de fase

El ajuste debe ser tal que la protección no opere para la corriente transitoria de restablecimiento en frío y no debe ser sensible a fallas que otros equipos “aguas abajo” puedan detectar, ya que no sería posible la coordinación en tiempo. En caso de que no existan elementos de protección “aguas abajo” del interruptor de la subestación, la unidad instantánea de fase (INST) deberá ajustarse a 2,5 veces la corriente nominal del circuito (Revetti y Rogelio, 2010), es decir:

$$INST = 2,5 \times I_n / CT \quad (25)$$

Para este caso, se usará el valor de 2 veces la corriente nominal. Por otra parte, cuando existan protecciones “aguas abajo”, se podrá ajustar el INST de fase entre 1,25 o 1,6 veces el valor máximo de corriente de cortocircuito trifásico en el punto donde se encuentra el próximo dispositivo de protección (Revetti y Rogelio, 2010), es decir:

$$INST = (1,25 - 2,5) \times I_n / CT \quad (26)$$

Cuando en el alimentador existan grandes cargas industriales, el ajuste deberá estar comprendido entre 4 y 10 veces la corriente nominal. De esta manera, se evita que el alimentador se dispare ante las fuertes corrientes de arranque de los motores.

El ajuste para motores difiere de sus condiciones de arranque en el cual su corriente llega a ser hasta 8 veces su capacidad nominal. Para esto, se utilizan métodos similares a los anteriores tomando en cuenta la corriente a plena carga (FLA) y la corriente de rotor

bloqueado (LRA) para dimensionar las protecciones temporizadas de fase y los ajustes instantáneos. Éstos deben ser capaces de soportar sin ejecutar su función de apertura el arranque del motor según sean las condiciones catalogadas como óptimas (Revetti y Rogelio, 2010). Para determinar el ajuste de sobrecorriente de temporizada ($I>$), el TAP se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$TAP = 2,8 \times \frac{I_{FLA}}{CT_{RATIO}} \quad (27)$$

Por otra parte, para determinar el ajuste de sobrecorriente de tiempo definido ($I>>$), el TAP se obtiene mediante la ecuación:

$$INST = 2,5 \times \frac{I_{LRA}}{CT_{RATIO}} \quad (28)$$

Es importante tomar en consideración la normativa relacionada con los límites de ajuste.

4.3.6. Coordinación de las protecciones de sobrecorriente de fase

En esta ocasión, se adoptarán los márgenes de tiempo mínimo sugeridos por la tabla 2 para las diferentes protecciones contenidas en este sistema eléctrico, considerando la periodicidad con que se realizan ajustes y pruebas de los dispositivos de protección (Revetti y Rogelio, 2010).

En respuesta al uso del tiempo en las protecciones eléctricas, la fig. 21 muestra una coordinación típica de los relés de sobrecorriente. Al establecer una sobrecorriente instantánea en B, se requiere de una diferencia en la corriente de falla en A. Sin esto, no es posible la coordinación entre A y B (Hedding, Zimmerman, Bartok, Basler y Benmouyal, 2009).

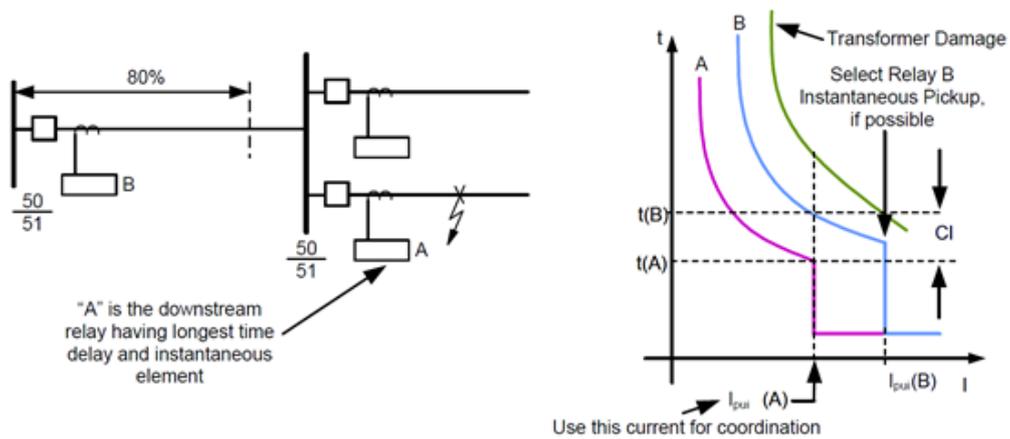


Fig. 21. Coordinación de tiempo – corriente

Fuente: Hedding, Zimmerman, Bartok, Basler y Benmouyal, 2009)

La fig. 22 muestra los tiempos de funcionamiento del relé en función de la ubicación del fallo. Se puede observar que la corriente de fallo es más alta en la fuente. Si la distancia entre los dispositivos de coordinación es baja, el efecto es que la “delta T” continúa añadiendo.

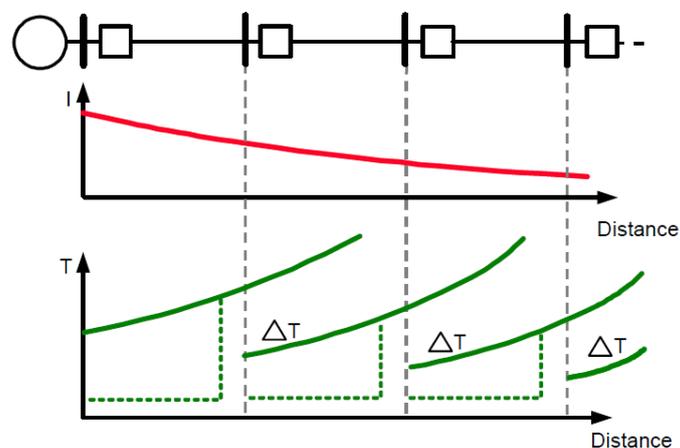


Fig. 22. Corriente de falla y tiempo de operación en función de la distancia de la fuente eléctrica

Fuente: Hedding, Zimmerman, Bartok, Basler y Benmouyal, 2009

Por lo tanto, terminamos con las corrientes de falla más altas y los retardos de tiempo más largos más cercanos a la fuente, donde es más probable que el personal esté trabajando.

En resumen, el tiempo y la sobrecorriente que pueden soportar las protecciones son los aspectos que se buscan reducir a intervalos de coordinación mínimos mediante el ajuste en la TCC.

En la siguiente sección, se determinan las TCC de cada esquema o zona de protección en conjunto con su representación unifilar, en la cual se observa la curva de operación.

A continuación, se realiza el estudio de coordinación de las protecciones mediante el *software* EasyPower. Para cada caso, se presenta la zona de protección en conjunto con el diagrama unifilar con la debida secuencia y tiempo de operación (Revetti y Rogelio, 2010). Cabe destacar que los ajustes considerados en las protecciones corresponden a los definidos por la norma NFPA 70 en la tabla 430.52 y 430.3 (A) relacionado con la dimensión y el ajuste de las protecciones en baja y mediana tensión de los motores y los transformadores, IEEE std 37.91-2000 para el ajuste de relés a mediana tensión en transformadores de potencia, IEEE 141 e IEEE 242 tabla 15.3

4.3.7. Subestación principal

Esta área es caracterizada por ser la zona de alimentación del sistema eléctrico y está compuesta por dos transformadores en paralelo con 3 protecciones para cada unidad. Se presenta una protección 50/51 en el lado de alta y en lado de baja y un dispositivo diferencial, donde solo se empleará la protección 50/51 con la intención de no perder la selectividad que se necesita en la TCC.

En este caso, la zona de protección viene dada en forma individual. Por su configuración característica, tiene como prioridad proteger el transformador considerando la carga máxima a la que puede acercarse en el bus de baja.

La secuencia de protección viene proporcionada desde el dispositivo aguas abajo, el relé diferencial hasta el dispositivo aguas arriba con una diferencia de tiempo de 300 ms entre sí iniciando la curva de operación desde los 400 ms cumpliendo con los TAP de ajuste mínimos, lo cual se refleja en la figura 22. La corriente de falla trifásica en la zona de baja es de 29 900 A.

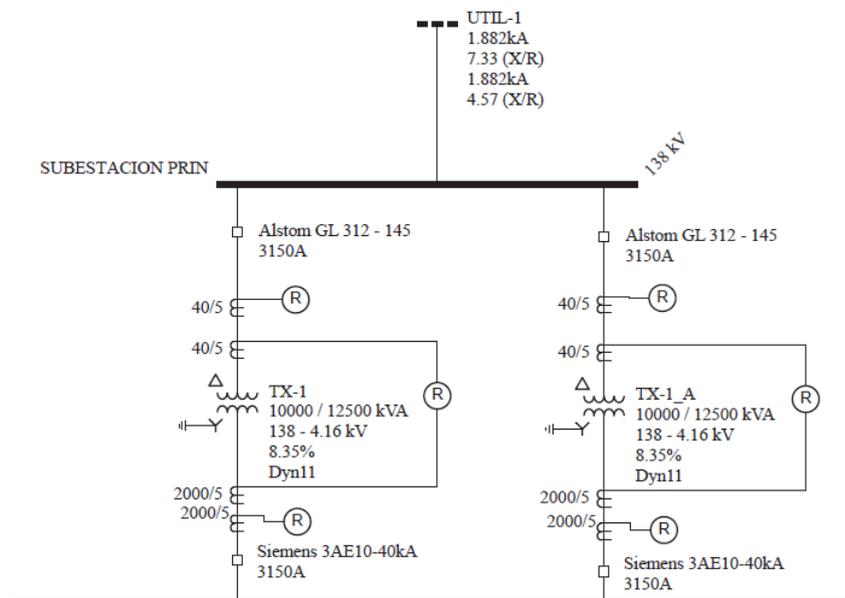


Fig. 23. Diagrama unifilar de la zona de la subestación

Fuente: EasyPower

A continuación, se presentan las figuras que brindan los ajustes de las protecciones de la figura 23 en conjunto con los ramales que alimentan estos transformadores en el lado de baja, dando un panorama de los dispositivos que conforman los diferentes esquemas aguas debajo de la subestación según la figura 20 (diagrama unifilar).

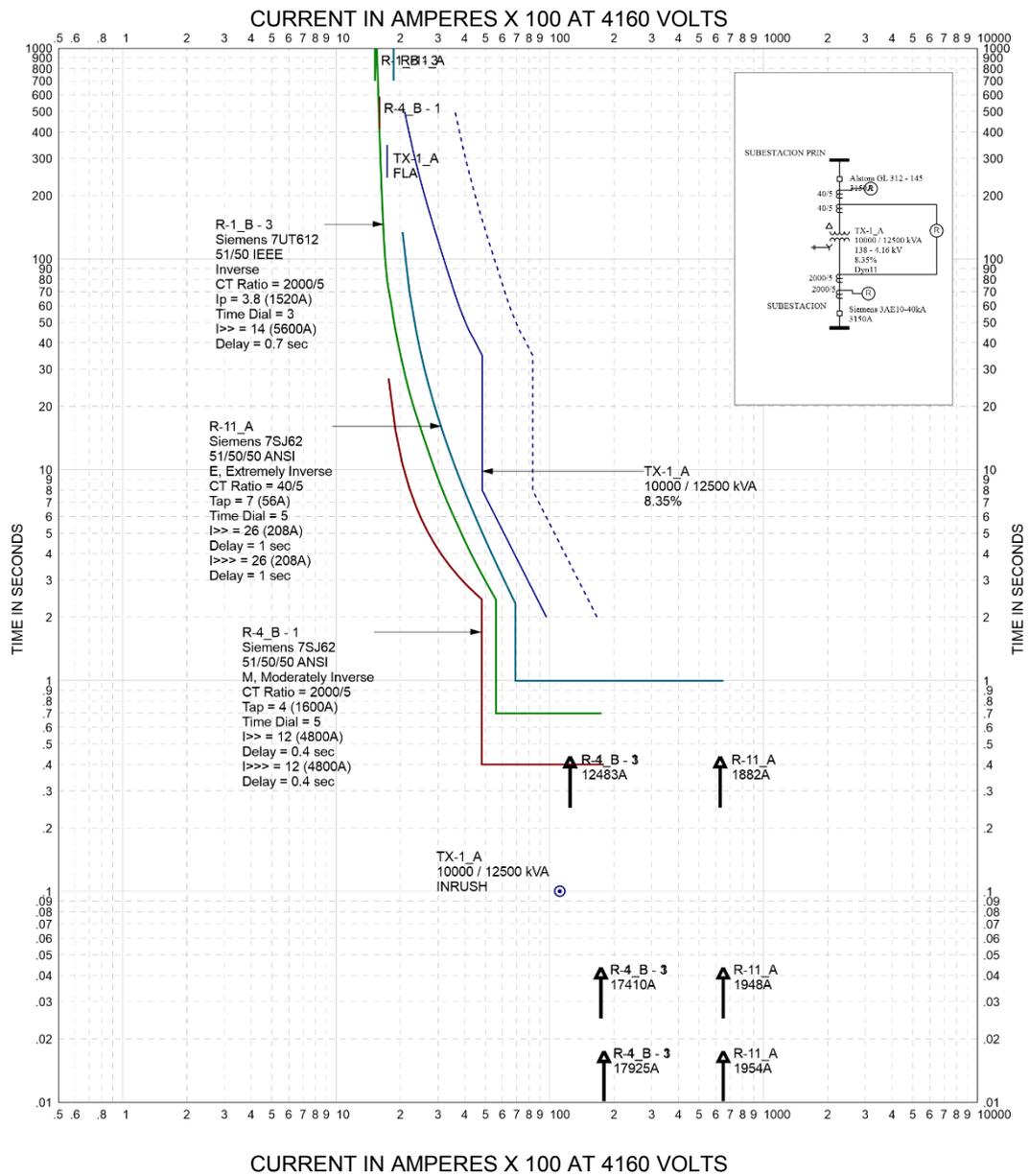


Fig. 24. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación

Fuente: EasyPower

En la fig. 24, el relé R4-B-1 se dispone de un ajuste de 400 ms con una curva de carácter moderadamente inversa. En orden ascendente, el relé R-11-A cumple con un margen de 300 ms con respecto al relé R4-B-1 ajustado con un tiempo de 700 ms con una curva del tipo extremadamente inversa. Terminando la secuencia, se encuentra el relé R-1-B-3 con una

curva inversa ajustado a 1 s con un margen de coordinación de 300 ms con respecto al dispositivo anterior.

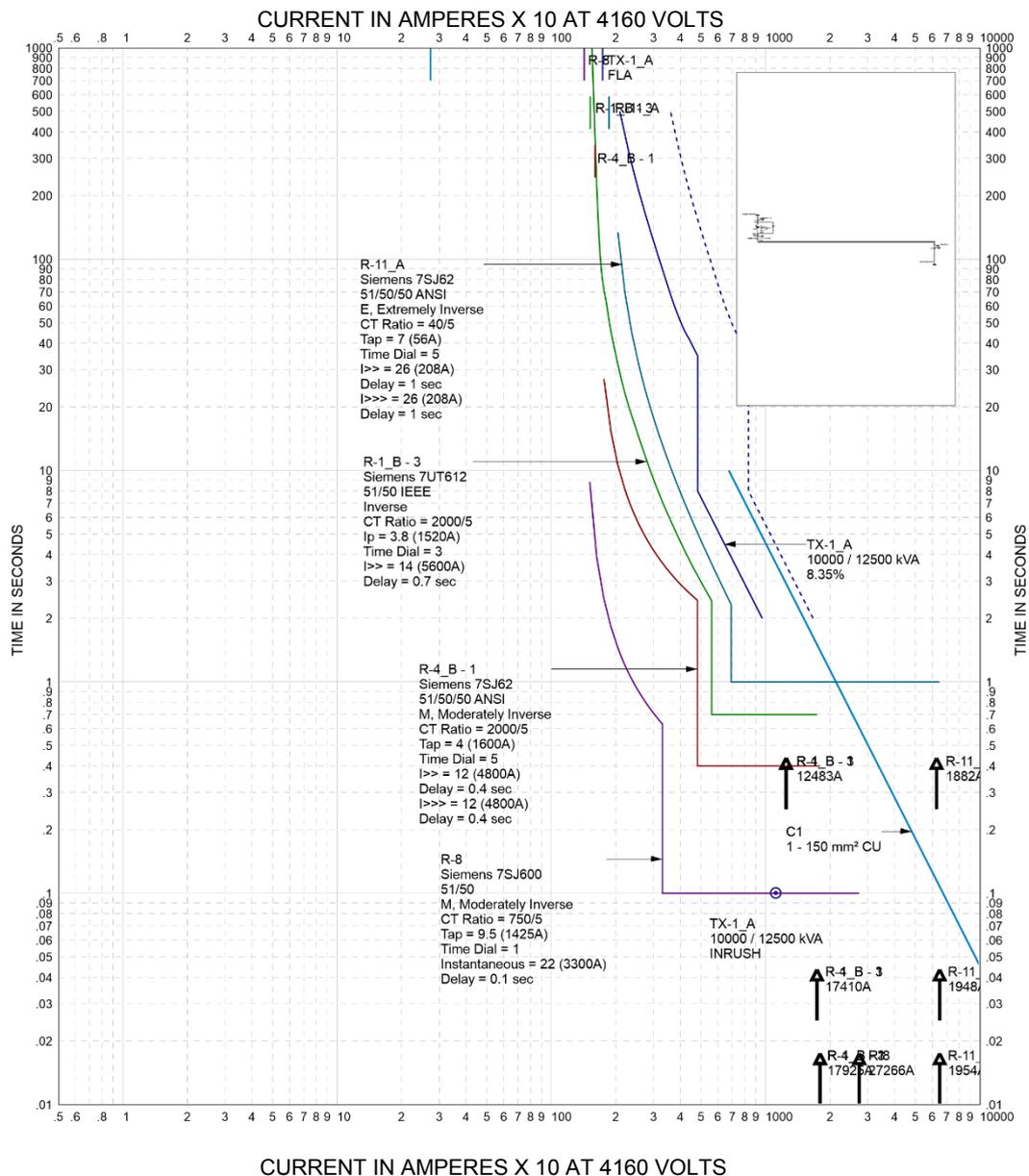


Fig. 25. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 1, subestación-Molino Cemento.

Fuente: EasyPower

En la figura 25, el relé R-8, el cual protege el ramal de molino cemento, dispone de un ajuste instantáneo de 100 ms con una curva de carácter moderadamente inversa en un margen

de coordinación de 300 ms con respecto al primer dispositivo de protección en orden ascendente de los transformadores en subestación.

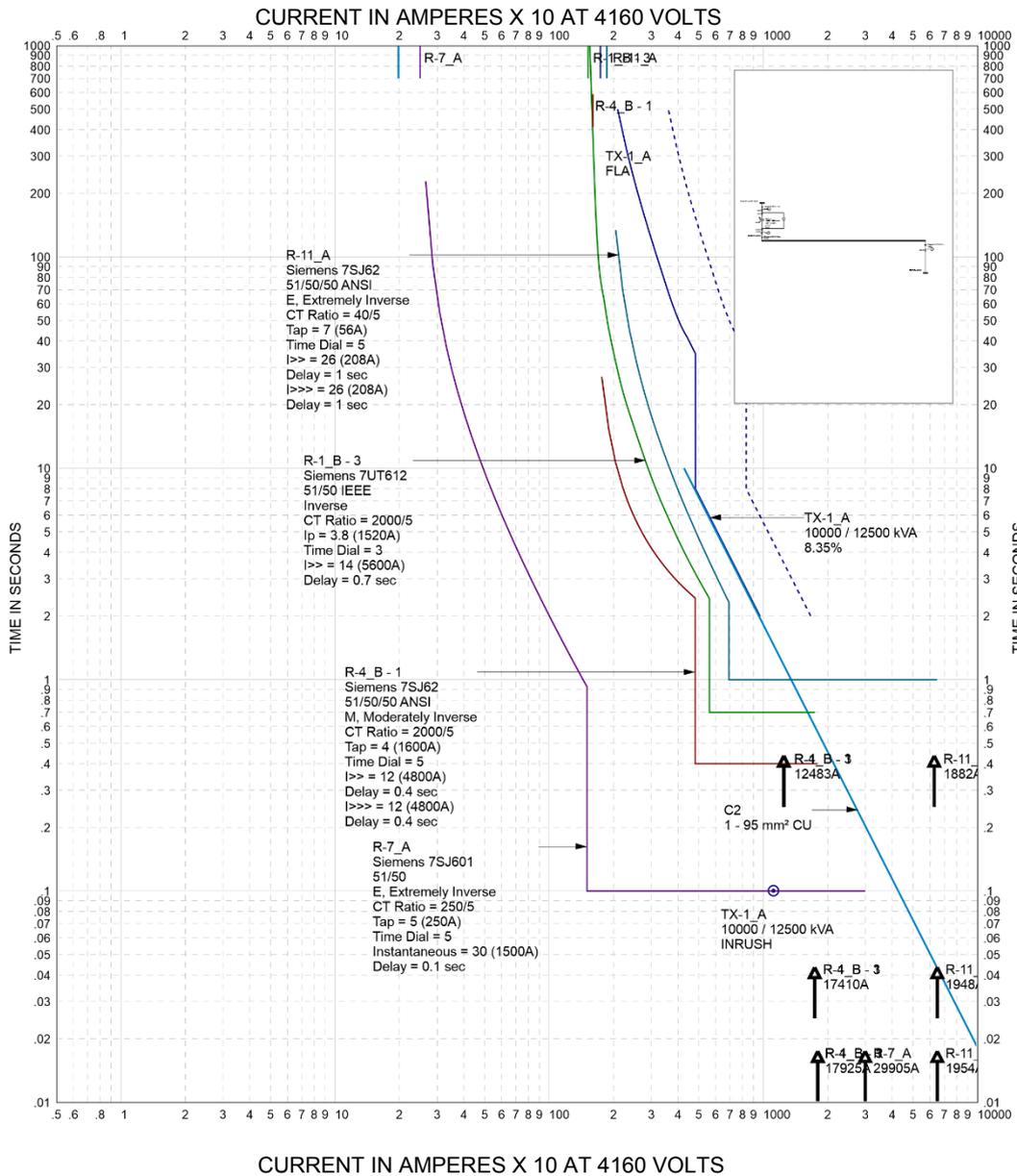


Fig. 26. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 2, subestación- CCM Trituración

Fuente: EasyPower

En la figura 26, el relé R-7-A protege el ramal del CCM de Trituración. Éste dispone de un ajuste instantáneo de 100 ms con una curva de carácter extremadamente inversa en un margen de coordinación de 300 ms con respecto al primer dispositivo de protección en orden ascendente de los transformadores de subestación.

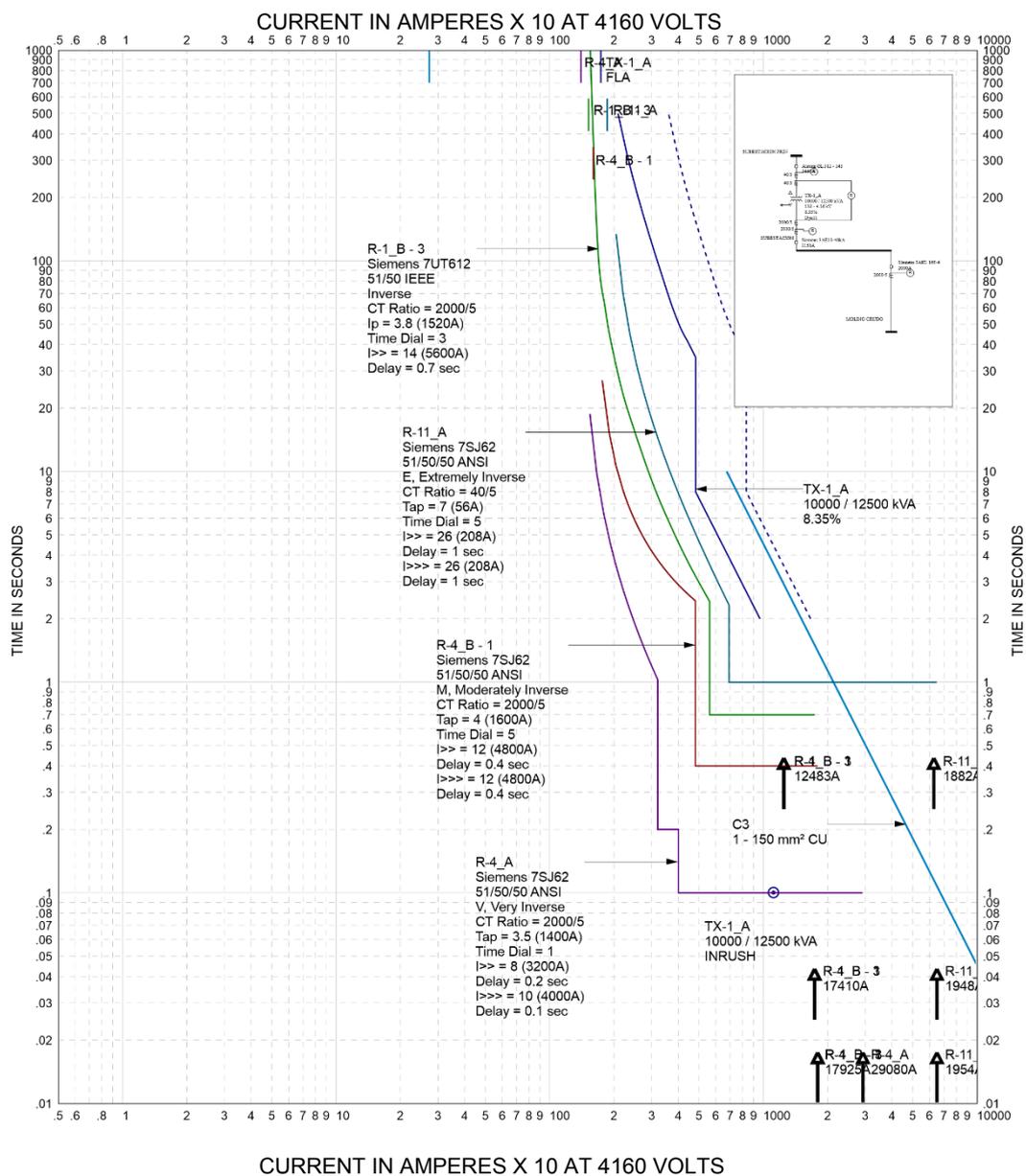


Fig. 27. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 3, subestación- Molino Crudo

Fuente: EasyPower

En la figura 27, el relé R-4-A protege el ramal de molino crudo, el cual dispone de un ajuste definido de 200 ms y un ajuste instantáneo de 100 ms con una curva del tipo muy inversa en un margen de coordinación de 200 ms y 300 ms con respecto al primer dispositivo de protección en orden ascendente de los transformadores de subestación.

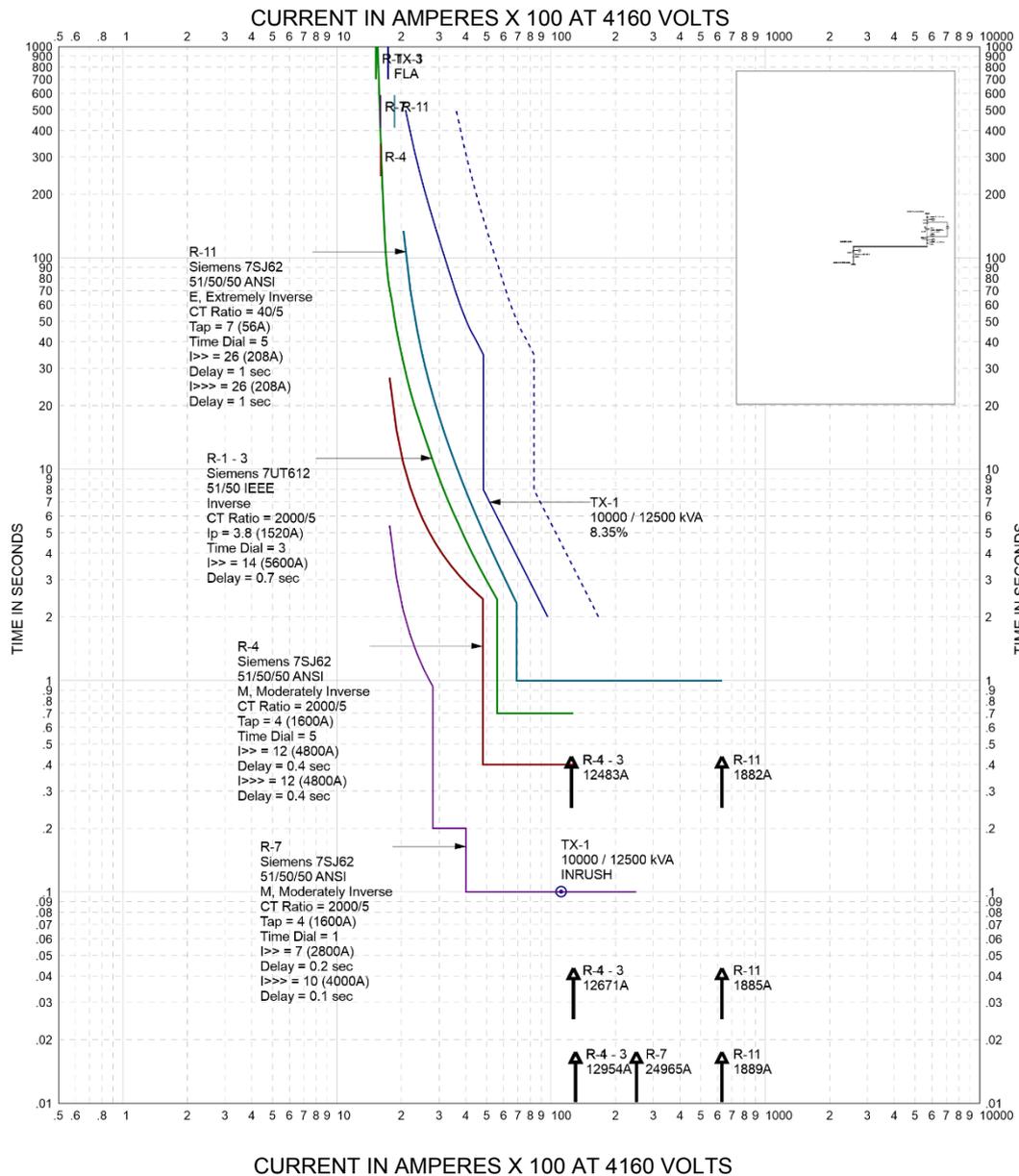


Fig. 28. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 4, subestación-Horno Enfriador

Fuente: EasyPower

En la figura 28, el relé R-7 protege el ramal del horno enfriador. Éste dispone de un ajuste definido de 200 ms y un ajuste instantáneo de 100 ms con una curva del tipo moderadamente inversa en un margen de coordinación de 200 ms y 300 ms con respecto al primer dispositivo de protección en orden ascendente de los transformadores de subestación.

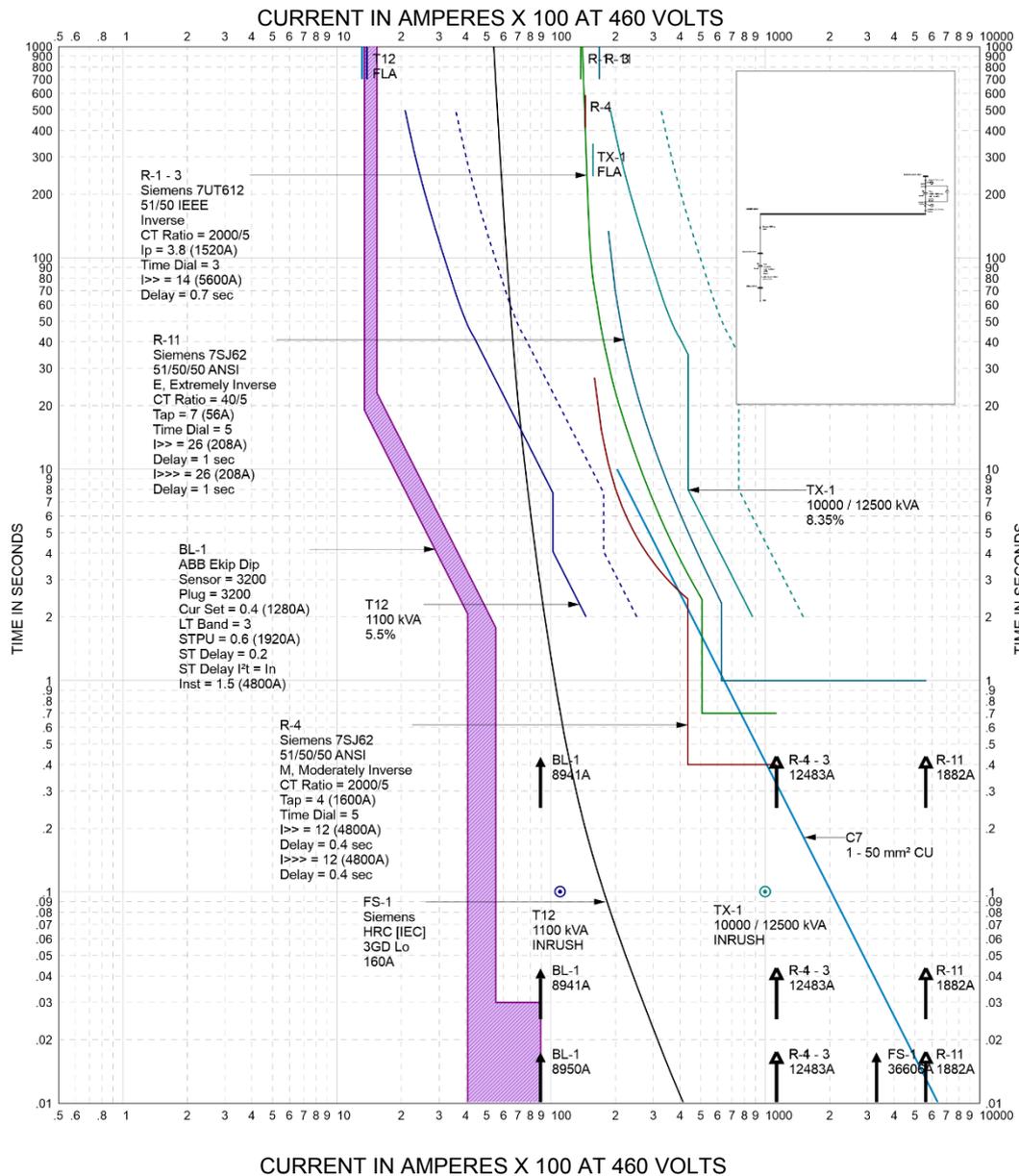


Fig. 29. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 5, subestación-Servicios Auxiliares

Fuente: EasyPower

En la figura 29, el disyuntor BL-1 y el fusible FS-1 protegen el ramal de servicios auxiliares. El dispositivo FS-1 dispone de un margen de coordinación de menos de 400 ms. Considerando su apertura en el orden de los ms, logra coordinarse con el primer dispositivo de protección en orden ascendente de los transformadores de subestación. Sin embargo, la zona magnética del disyuntor BL-1 no logra abarcar el rango suficiente para tener un tiempo menor de coordinación. Ante esto, se realizarán las recomendaciones del caso en la última sección de este documento.

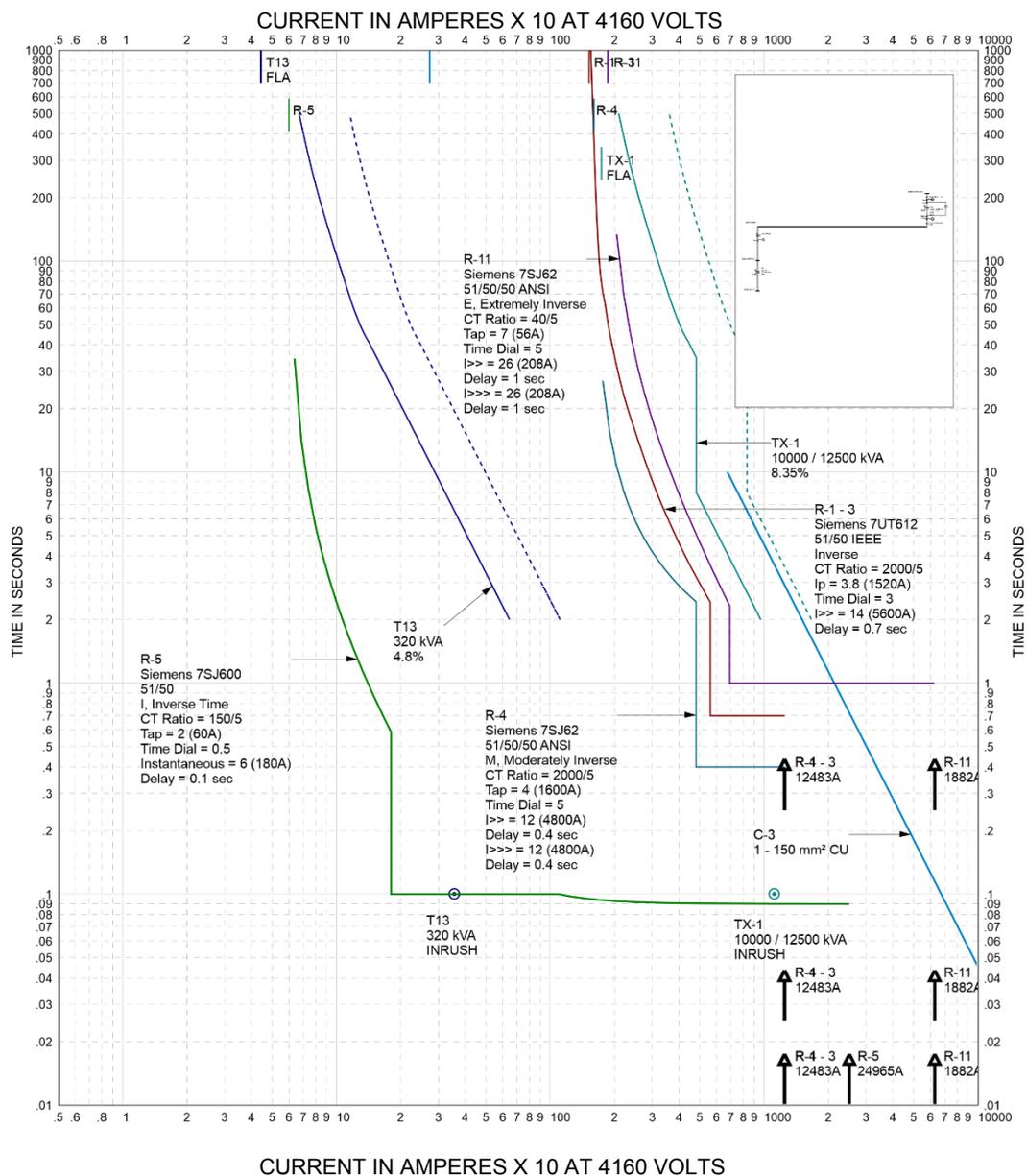


Fig. 30. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de la subestación, ramal 6, subestación-Ciudadela Martínez

Fuente: EasyPower

En la figura 30, el relé R-5 protege el ramal de la Ciudadela Martínez, el cual dispone de un ajuste instantáneo de 100 ms con una curva del tipo moderadamente inversa en un margen de coordinación 300 ms con respecto al primer dispositivo de protección en orden ascendente de los transformadores de subestación. Esto genera, así mismo, la protección necesaria para el transformador T13.

4.3.8. Horno enfriador

La figura 31 representa el diagrama unifilar del horno enfriador definidos por los circuitos de molino Coke y el del horno enfriador 2, unidos en un punto en común en los bornes del disyuntor de mediana tensión.

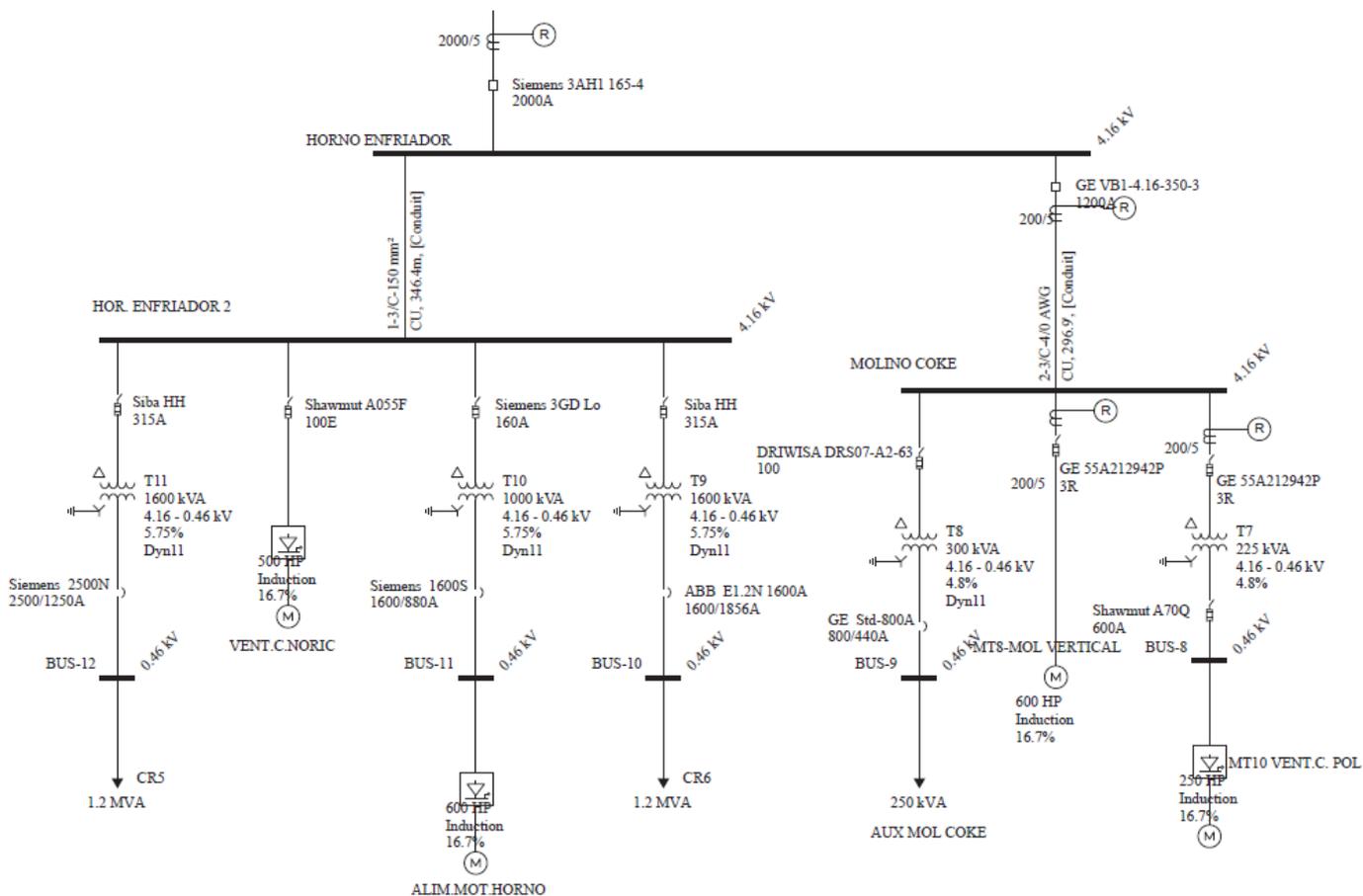


Fig. 31. Diagrama unifilar de la zona del horno enfriador y molino Coke

Fuente: EasyPower

En las siguientes figuras, se definirán las curvas de operación y protección del circuito representado en la figura 31 mediante las TCC, cumpliendo con la normativa y estableciendo criterios de protección según las recomendaciones acogidas en las diferentes fuentes.

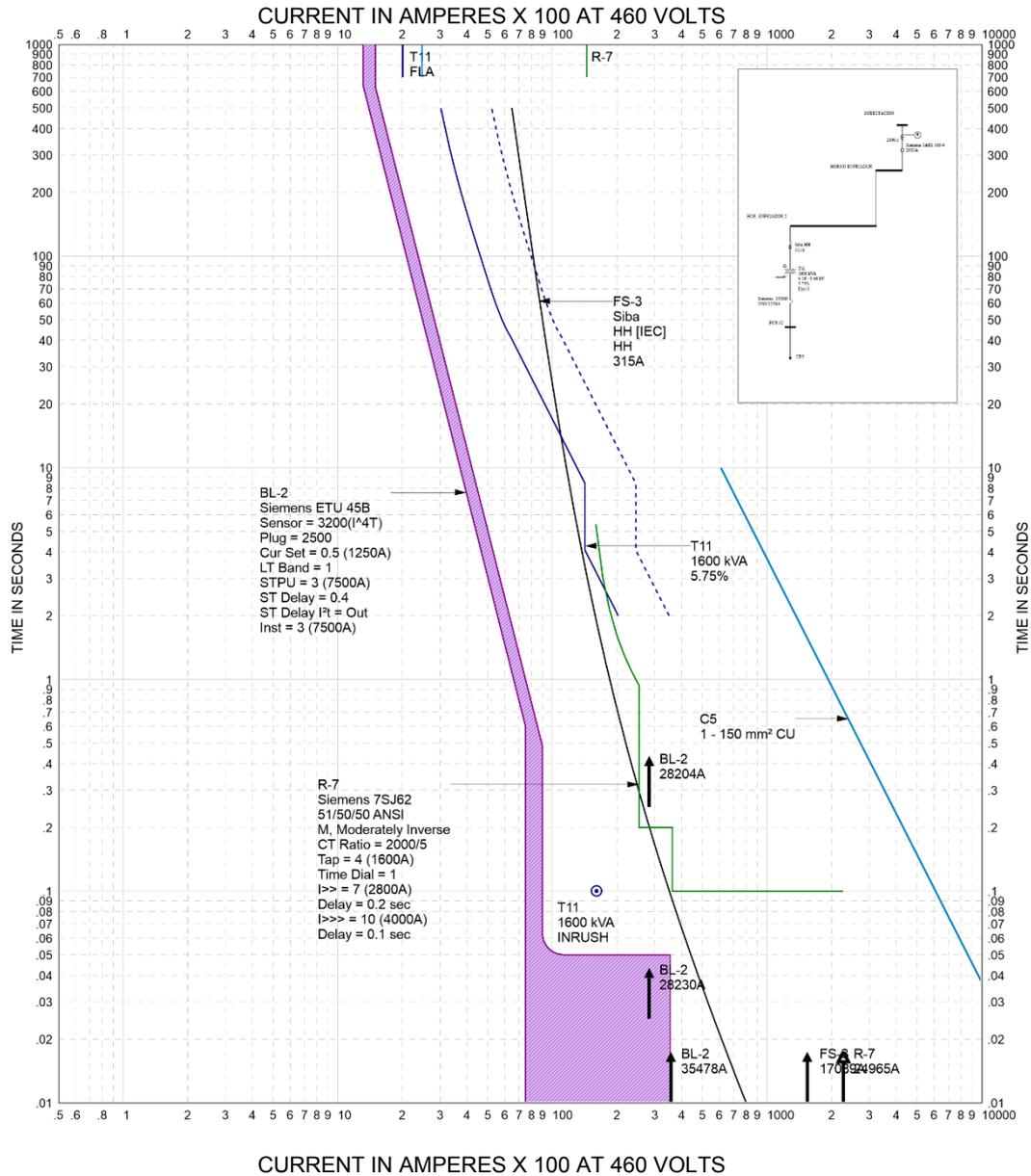


Fig. 32. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona horno enfriador, ramal 1, transformador 11

Fuente: EasyPower

En la figura 32, el disyuntor BL-2 y el fusible FS-3 protegen el ramal de horno de intercambio (ramal 1, transformador 11). El dispositivo FS-1 dispone de un margen de coordinación de menos de 50 ms con respecto al el disyuntor BL-2. Considerando su apertura en el orden de los ms, logra coordinarse con el primer dispositivo de protección en orden

ascendente. No obstante, el relé R-7 (curva moderadamente inversa) posee un margen reducido en relación con el fusible, considerando que el fusible logra su apertura efectiva en el rango de los ms, el cual es un margen aceptable.

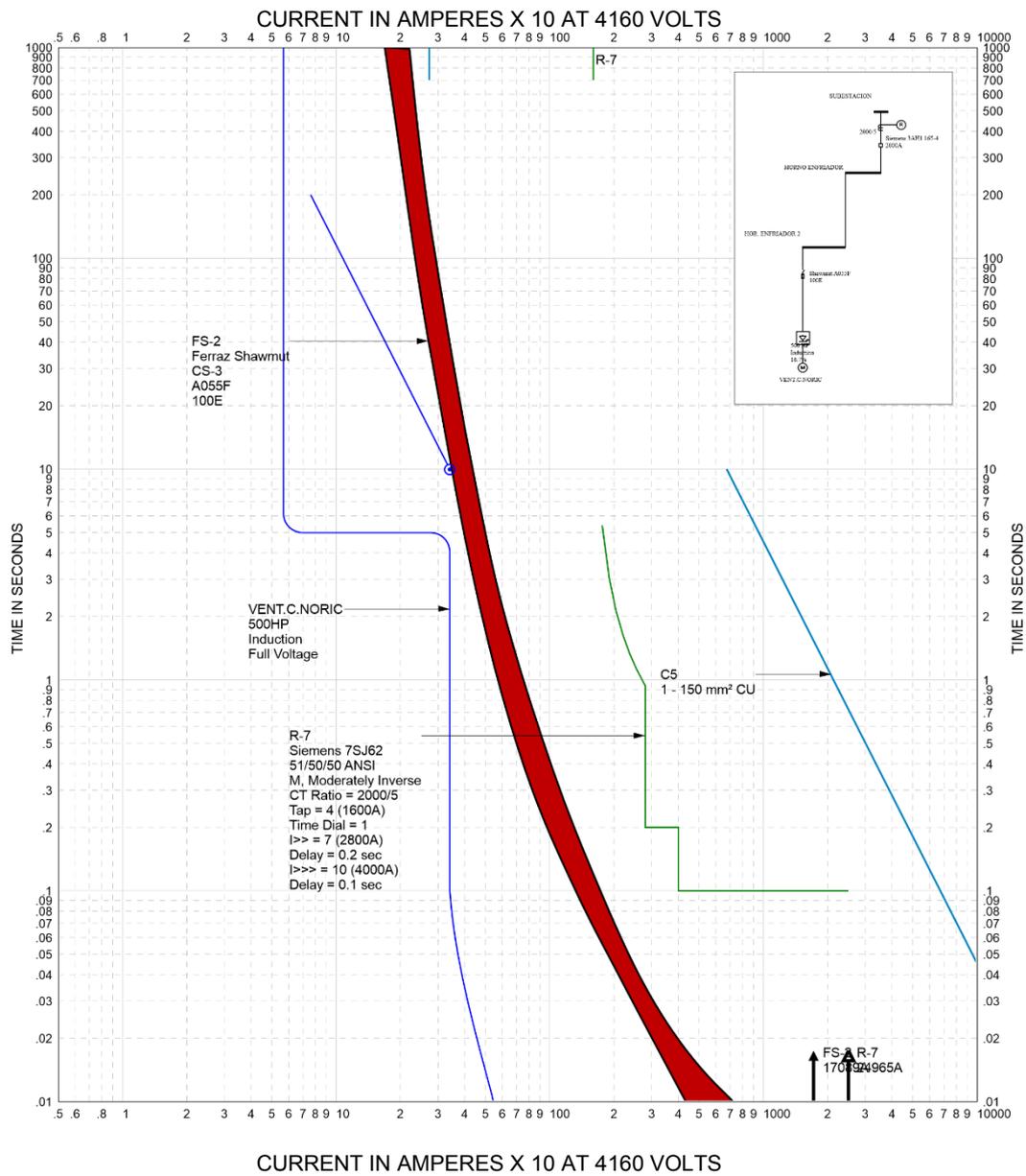


Fig. 33. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona horno enfriador, ramal 2, Vent. Noric

Fuente: EasyPower

En la figura 33, el fusible FS-2 y el relé R-7 protegen al motor Vent. Noric. El dispositivo FS-2 dispone de un margen de coordinación de menos de 80 ms con respecto al relé R-7 (curva moderadamente inversa), lo cual permite el arranque del motor y la coordinación en los dispositivos. Sin embargo, cabe resaltar que no están contempladas las protecciones de sobrecarga térmica para este análisis, por lo cual solo se considera los dispositivos de sobrecorriente de los elementos.

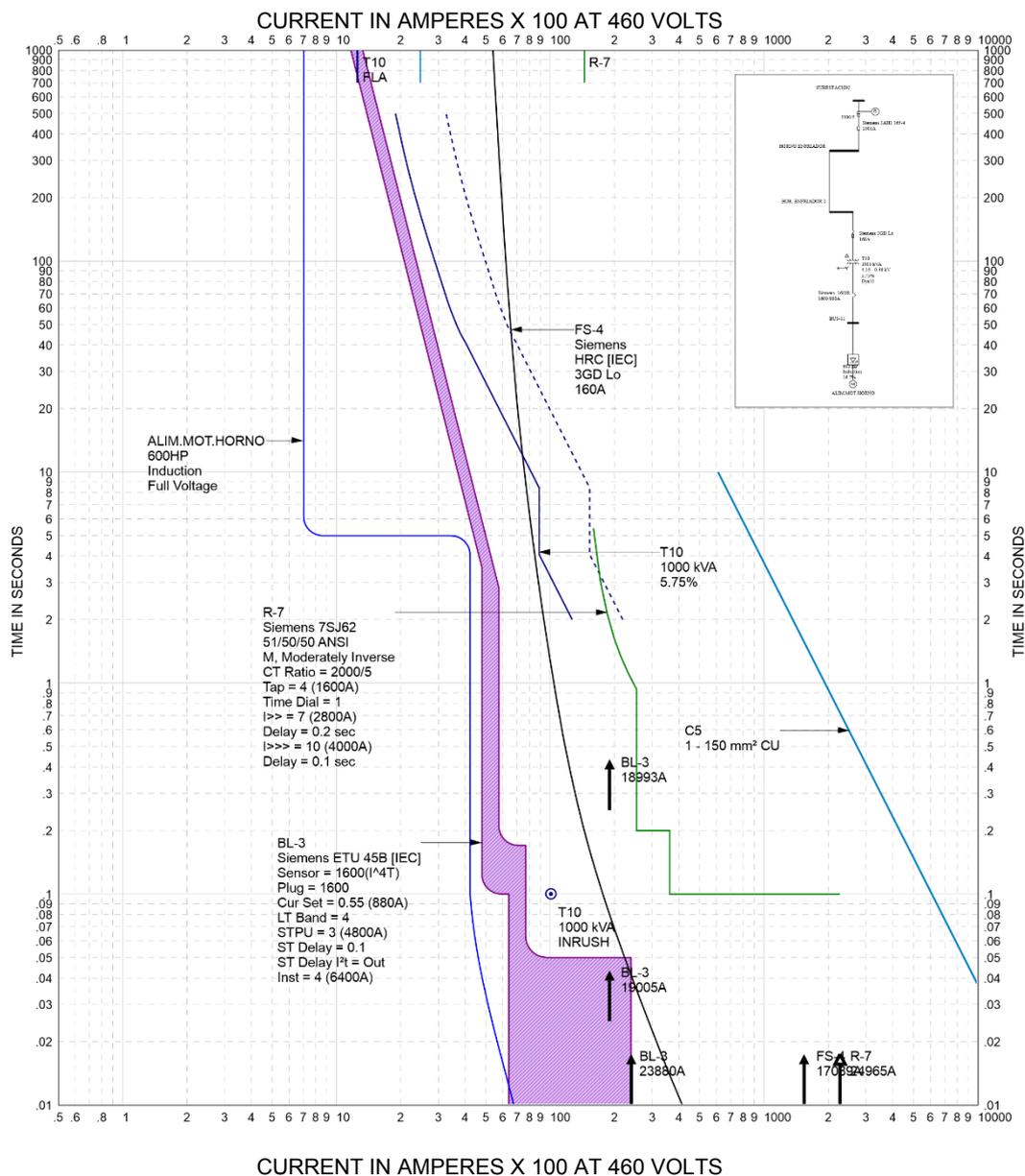


Fig. 34. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona horno enfriador, ramal 3, transformador 10

Fuente: EasyPower

En la figura 34, el disyuntor BL-3 y el fusible FS-4 protegen el ramal 3 (alimentación motor horno), donde el dispositivo FS-4 dispone de un margen de coordinación muy reducido con respecto al disyuntor BL-3, recurriendo a usar las disposiciones mínimas del disyuntor. Por otra parte, el relé R-7 solo logra abarcar la curva por daño térmico del transformador 10. En este sentido, disminuir el TAP es poco posible, ya que no se puede disminuir el TAP aún

En la figura 35, se dispone del disyuntor BL-4 y el fusible FS-5, el cual protege el ramal 4. Este caso se asemeja al de la figura 30, donde se dispone de un margen de coordinación de 50 ms con respecto al disyuntor BL-4, un margen de coordinación muy reducido. Por otra parte, el relé R-7 (curva moderadamente inversa) logra abarcar la curva por daño mecánico y término del transformador 9. En este sentido, el ajuste del TAP se considera aceptable en esta situación.

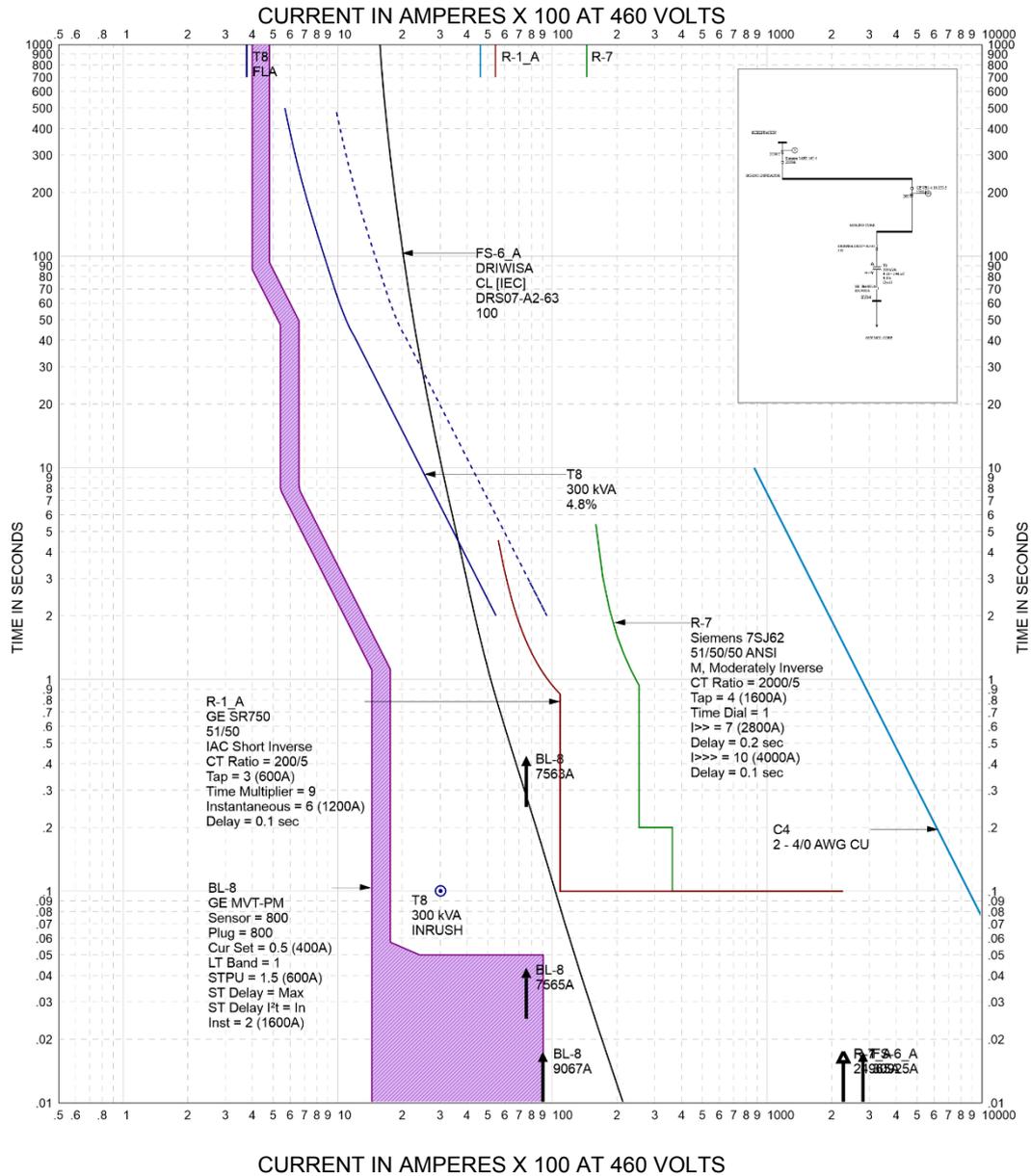


Fig. 36. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino Coke, ramal 1, transformador 8

Fuente: EasyPower

En la figura 36, el disyuntor BL-8 y el fusible FS-6-A protegen el ramal 1 (molino Coke), determinado por el transformador T8. Así mismo, se revela la ubicación del relé 7 (curva moderadamente inversa) que viene a ser la segunda protección de respaldo, el margen de protección del disyuntor BL-8 y el fusible FS-6-A es mayor a 60 ms. Para los relés de

respaldo, existe un margen definido de 100 ms. En este caso, su coordinación viene a realizarse por un ajuste en la sobrecorriente instantánea. Para lograr la coordinación, el relé R-1-A (inversa corta) solo logra abarcar la curva por daño térmico del transformador.

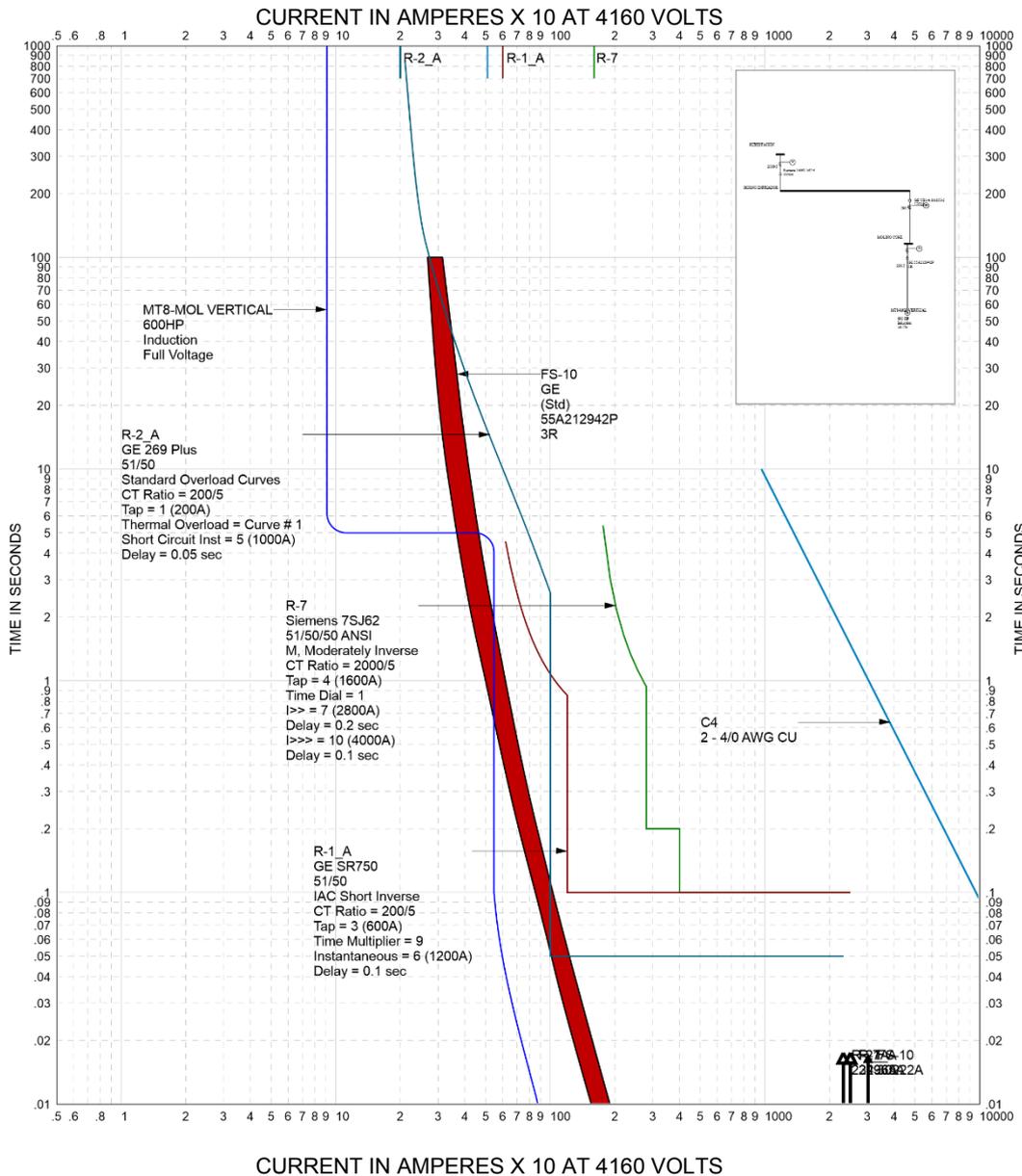


Fig. 37. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino Coke, ramal 2, MT8 molino vertical

Fuente: EasyPower

En la figura 37, el relé R-2-A y el fusible FS-10 pertenecen a una unidad de protección para el ramal 2 (molino Coke), determinado por motor MT8. En este caso, no se logra la coordinación debido a que el ajuste del TD del relé R-2-A es el mínimo (curva 1, curva 2, curva 3). Sin embargo, se establece el traslape intencional con la intención de resguardar los demás elementos pertenecientes a este ramal. Es necesario aclarar que se generan las recomendaciones del caso al final del documento.

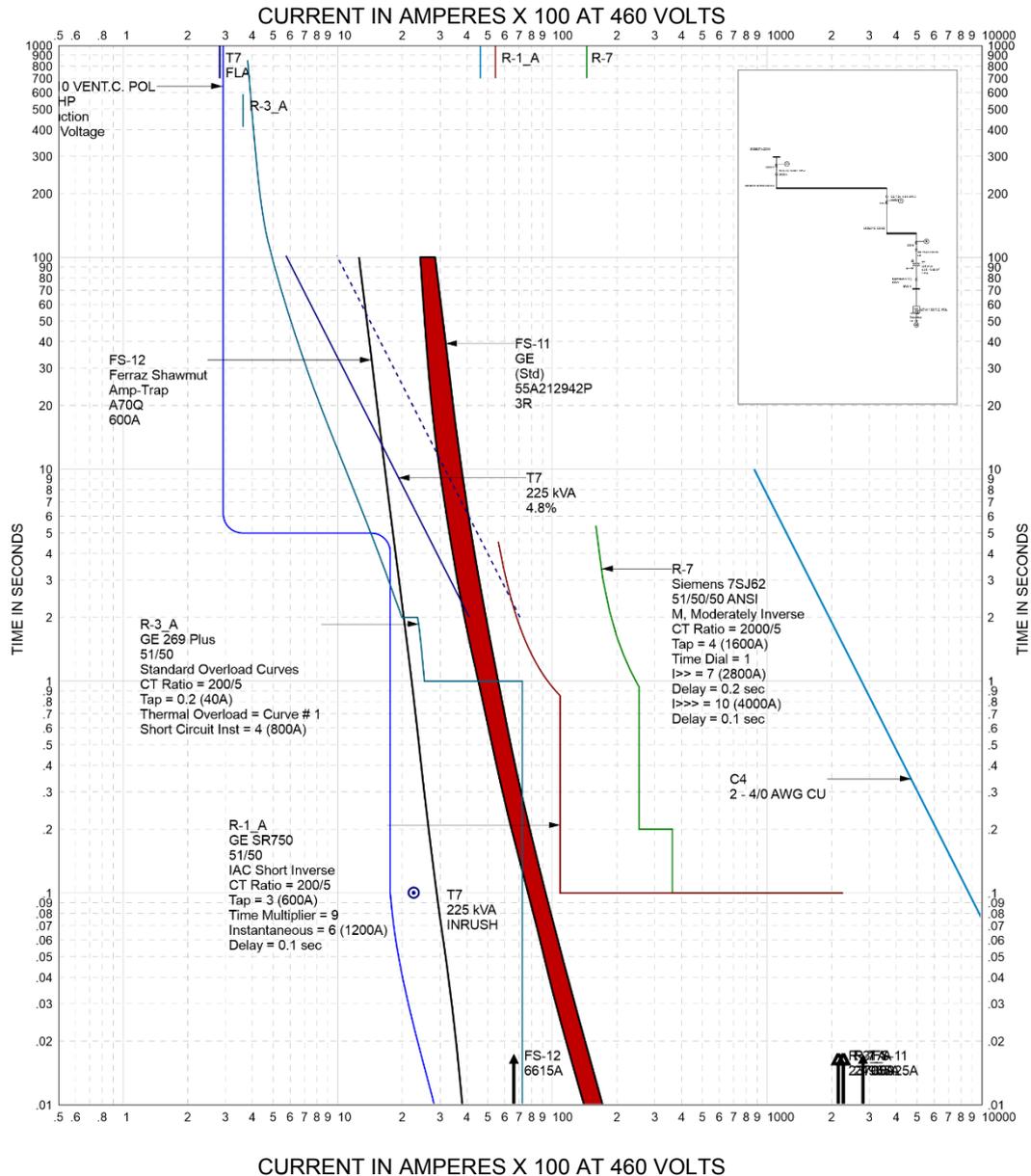


Fig. 38. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino Coke, ramal 3, transformador 7

Fuente: EasyPower

En la figura 38, el relé R-3-A y el fusible FS-12 pertenecen a una unidad de protección para el ramal 3 (molino Coke), determinado por motor MT10 y un transformador T7, el cual alimenta solo dicho motor. Se logra la coordinación y la protección del transformador por parte de ambos fusibles (fusible FS-11 y fusible FS-12), debido a la reducida configuración de la curva, al igual que la situación anterior se reduce la capacidad

de coordinación, donde el TD es el mínimo establecido en la figura. No obstante, se logra la coordinación protegiendo de la misma manera al motor. El relé R-1-A, en forma reducida, logra la protección al transformador en su curva de daño térmico. En esta situación, el ajuste del TAP es el mínimo teniendo en cuenta los arranques de los motores en ese ramal.

4.3.9. Molino de crudo

La figura 39 representa el diagrama unifilar del circuito de molino crudo, compuesto por motores de mediana tensión de alta potencia y transformadores.

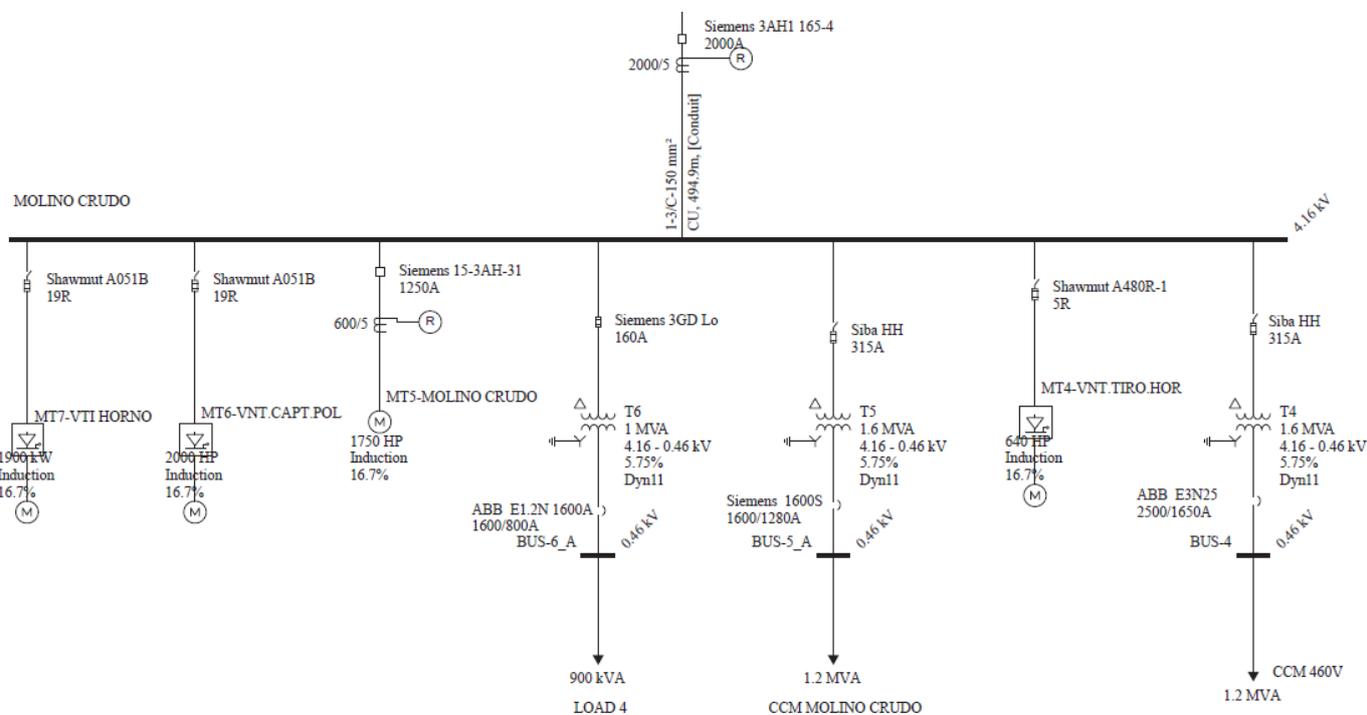


Fig. 39. Diagrama unifilar de la zona de molino crudo

Fuente: EasyPower

En las siguientes figuras, se definirán las curvas de operación y protección del circuito representado en la figura 39 mediante las TCC, cumpliendo con la normativa y estableciendo criterios de protección según las recomendaciones acogidas en las diferentes fuentes.

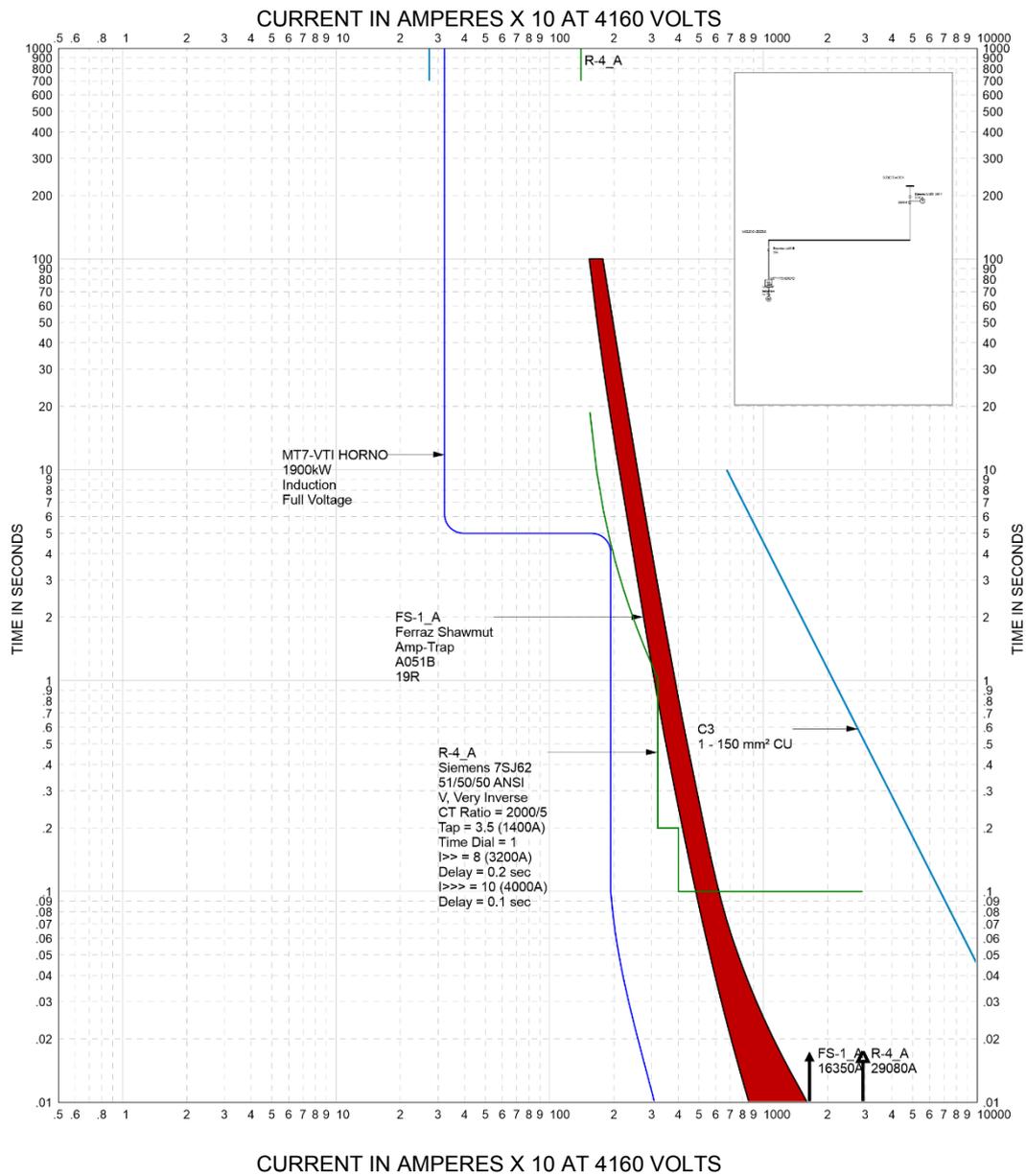


Fig. 40. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 1, MT7 VTI horno

Fuente: EasyPower

En la figura 40, el fusible FS-1-A y el relé R-4-A protegen al motor VTI horno. En esta situación, se observa el cruzamiento de las curvas en una zona requerida para la protección de los demás elementos aguas abajo del relé R-4-A (curva muy inversa). En esta ocasión, se considera disponer de esta acción después de los 100 ms, pues región menor que

ésta tiende a operar el fusible una acción con el fin de generar protección en todos o en la mayor parte de los dispositivos.

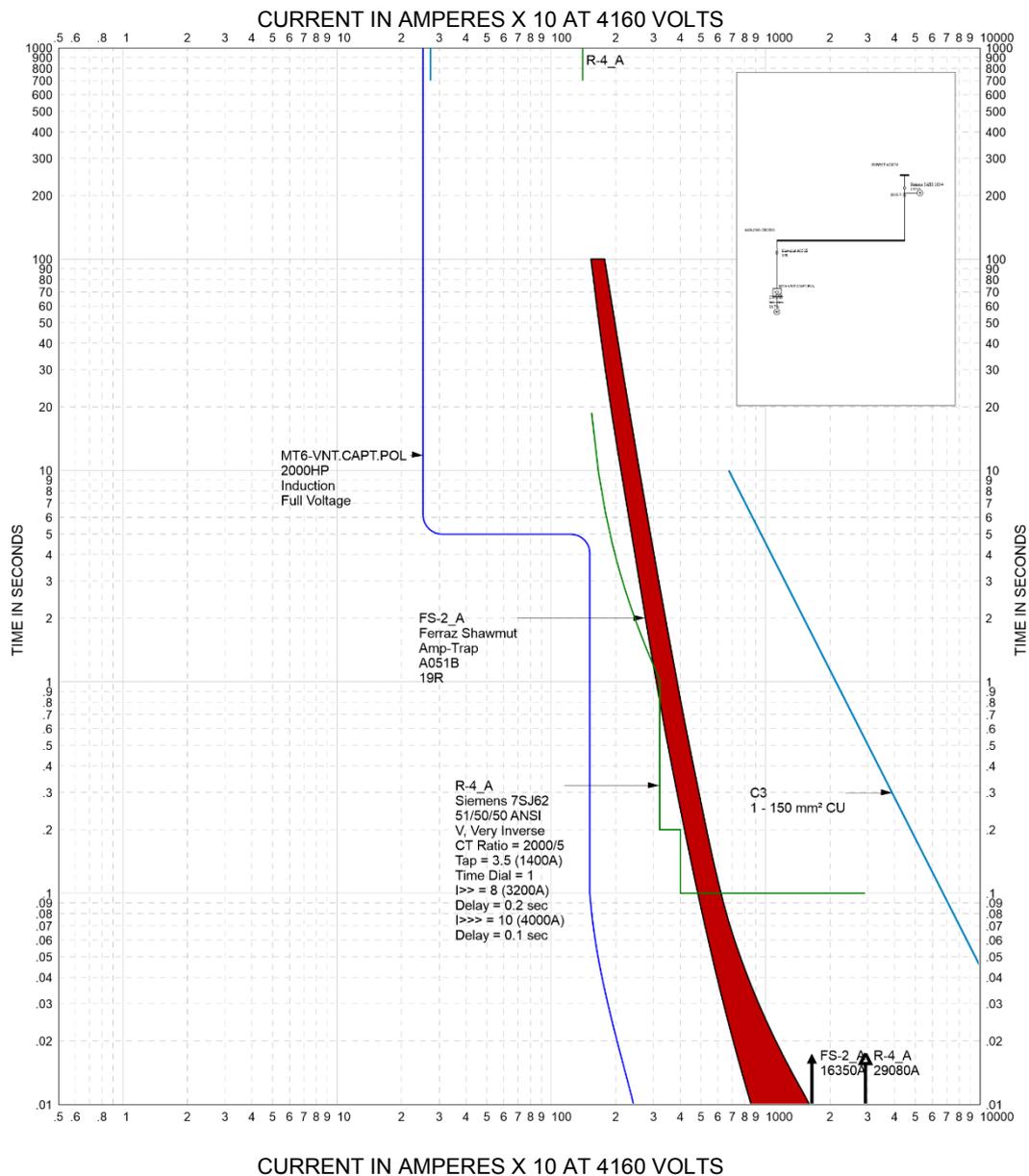


Fig. 41. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 2, MT6 ventilador captador de polvo

Fuente: EasyPower

En la figura 41, el fusible FS-2-A y el relé R-4-A protegen al motor MT6 ventilador captador de polvo. En dicha figura, se observa el cruzamiento de las curvas en una zona requerida para la protección con gran similitud, donde se genera la acción de generar

protección en todos o en la mayor parte de los dispositivos. No existe coordinación en estos elementos, pero se elige esta conducta buscando salvaguardar a los demás elementos.

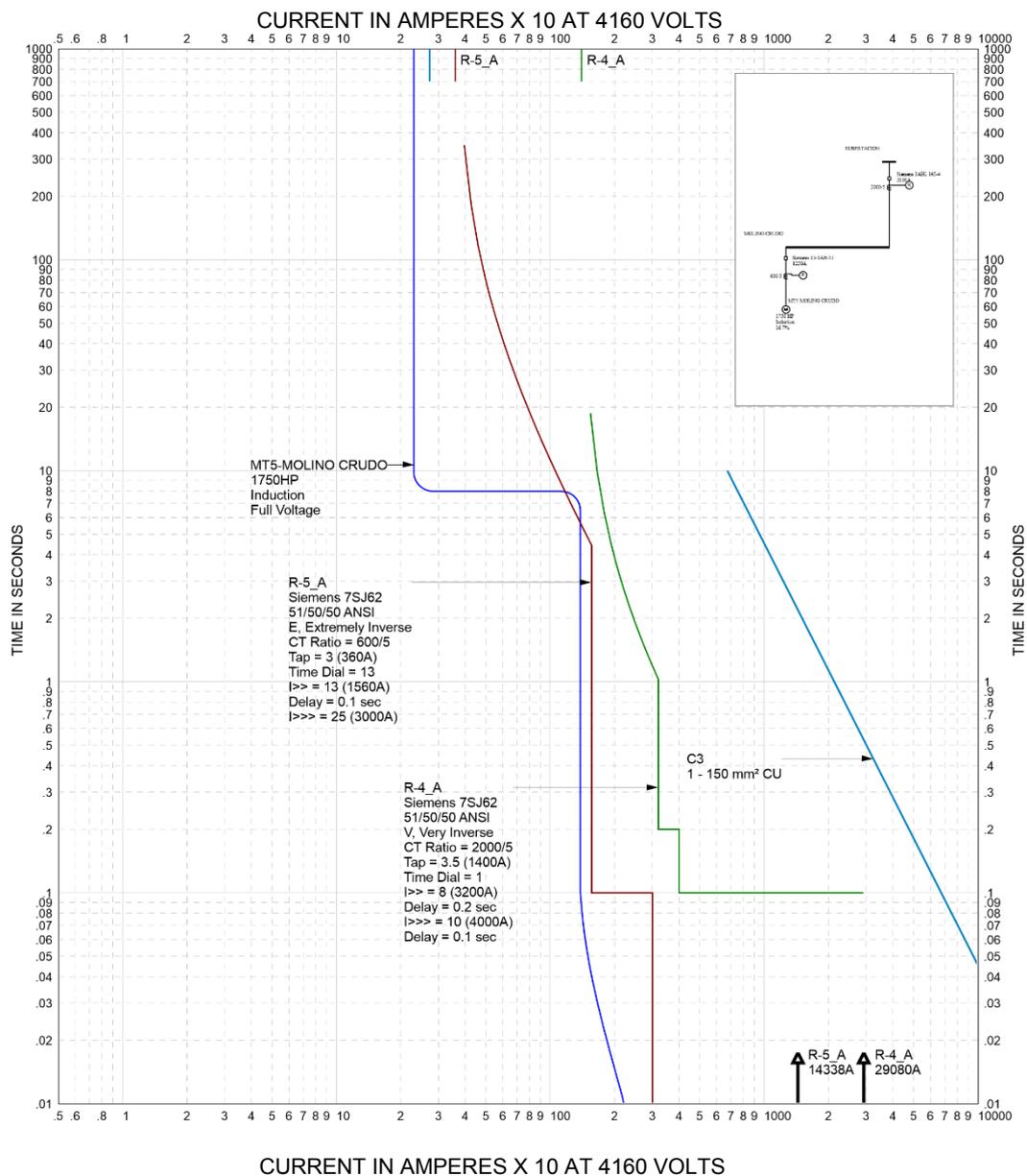


Fig. 42. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 3, MT5 molino de crudo

Fuente: EasyPower

En la figura 42, el relé R-5-A y el relé R-4-A protegen al motor MT5 motor molino de crudo. En ésta, se determina un margen de coordinación de 100 ms entre la protección instantánea del R-5-A y la región definida del relé R-4-A (curva muy inversa). Cabe resaltar

que el dimensionamiento del relé R-4-A requiere de las sumas de todas las cargas teniendo en cuenta la corriente de arranque del elemento más grande. Con base en esto, el relé R-4-A es ajustado considerando el arranque de este motor.

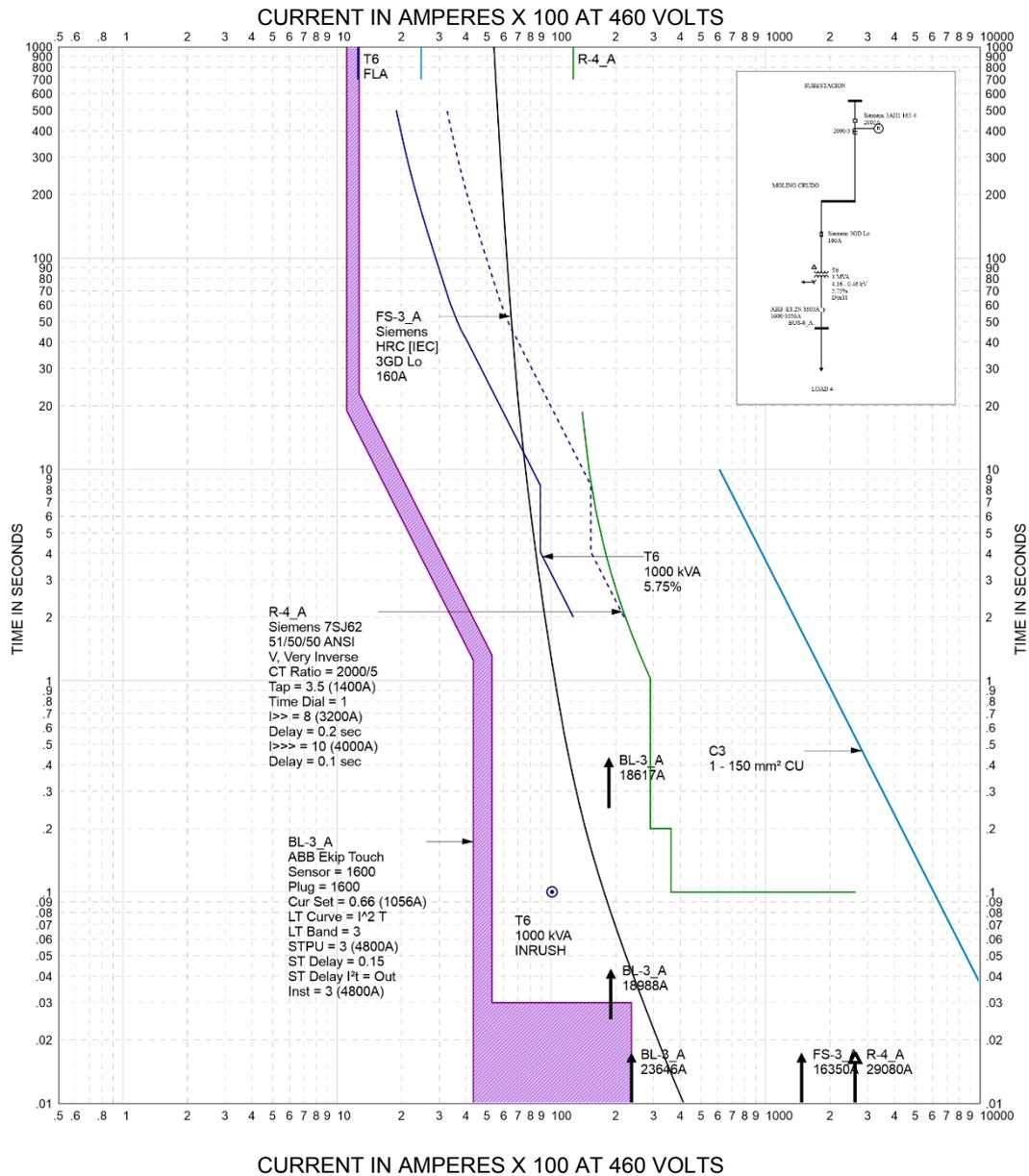


Fig. 43. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 4, transformador 6

Fuente: EasyPower

En la figura 43, el disyuntor BL-3-A y el fusible FS-3-A protegen al transformador T6. En esta figura, se determina un margen de coordinación de 30 ms entre la protección

instantánea del disyuntor BL-3-A y el fusible FS-3-A, dando protección a las curvas de daño mecánico y térmico del transformador T6. Con respecto al relé R-4-A, existe un margen de 270 ms entre éste y el fusible. El relé R-4-A en calidad de protección de respaldo afecta de manera poco significativa el transformador exponiéndolo por daño térmico. Ante esto, se definen las recomendaciones del caso en un plano posterior.

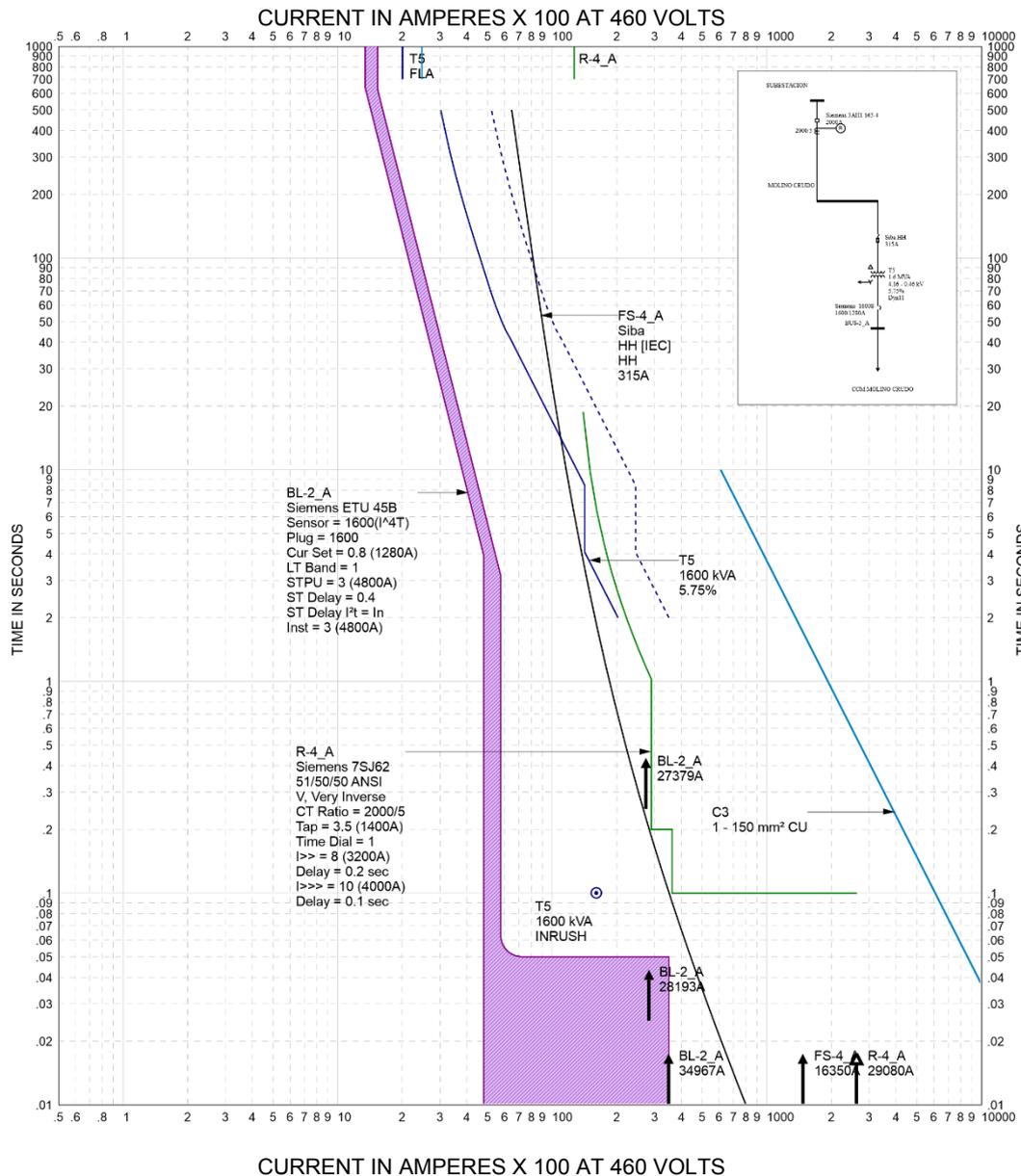


Fig. 44. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 5, transformador 5

Fuente: EasyPower

En la figura 44, el disyuntor BL-2-A y el fusible FS-4-A protegen al transformador T5. En esta figura, se determina un margen de coordinación de 60 ms entre la protección instantánea del disyuntor BL-2-A y el fusible FS-4-A, dando protección a las curvas de daño mecánico y térmico del transformador T5. Con respecto al relé R-4-A, existe un margen de 250 ms entre éste en su zona de curva definida y el fusible. El relé R-4-A en calidad de protección de respaldo logra proteger el transformador no así por daño mecánico y se logra la selectividad del sistema.

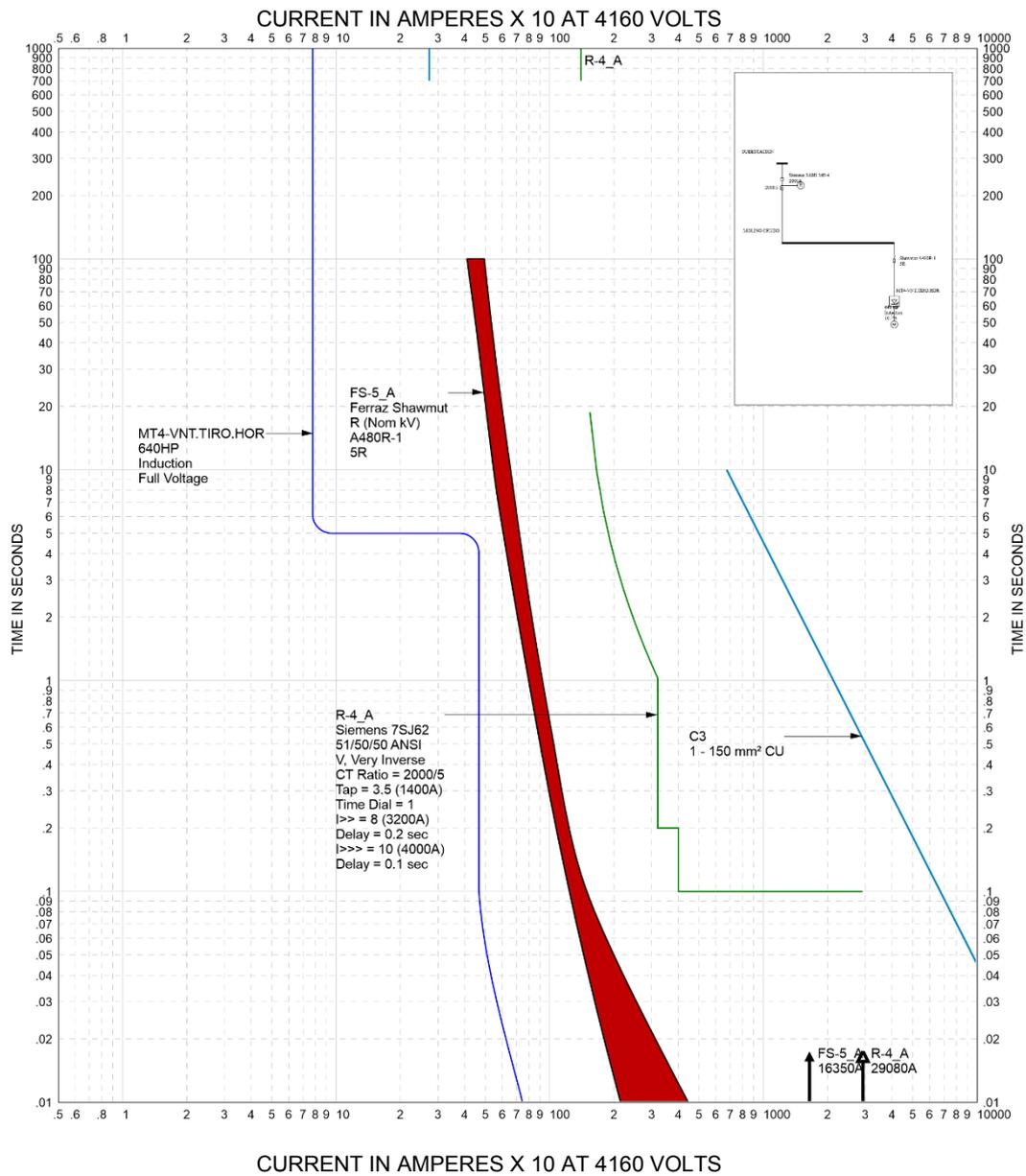


Fig. 45. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 6, MT4 ventilador tiro de horno

Fuente: EasyPower

En la figura 45, el fusible FS-6-A y el relé R-4-A protegen al motor ventilador tiro de horno. Dicha situación dispone de 100 ms de margen entre ambos dispositivos en sus zonas o regiones instantáneas, y de 270 ms desde la zona de curva definida del relé R-4-A.

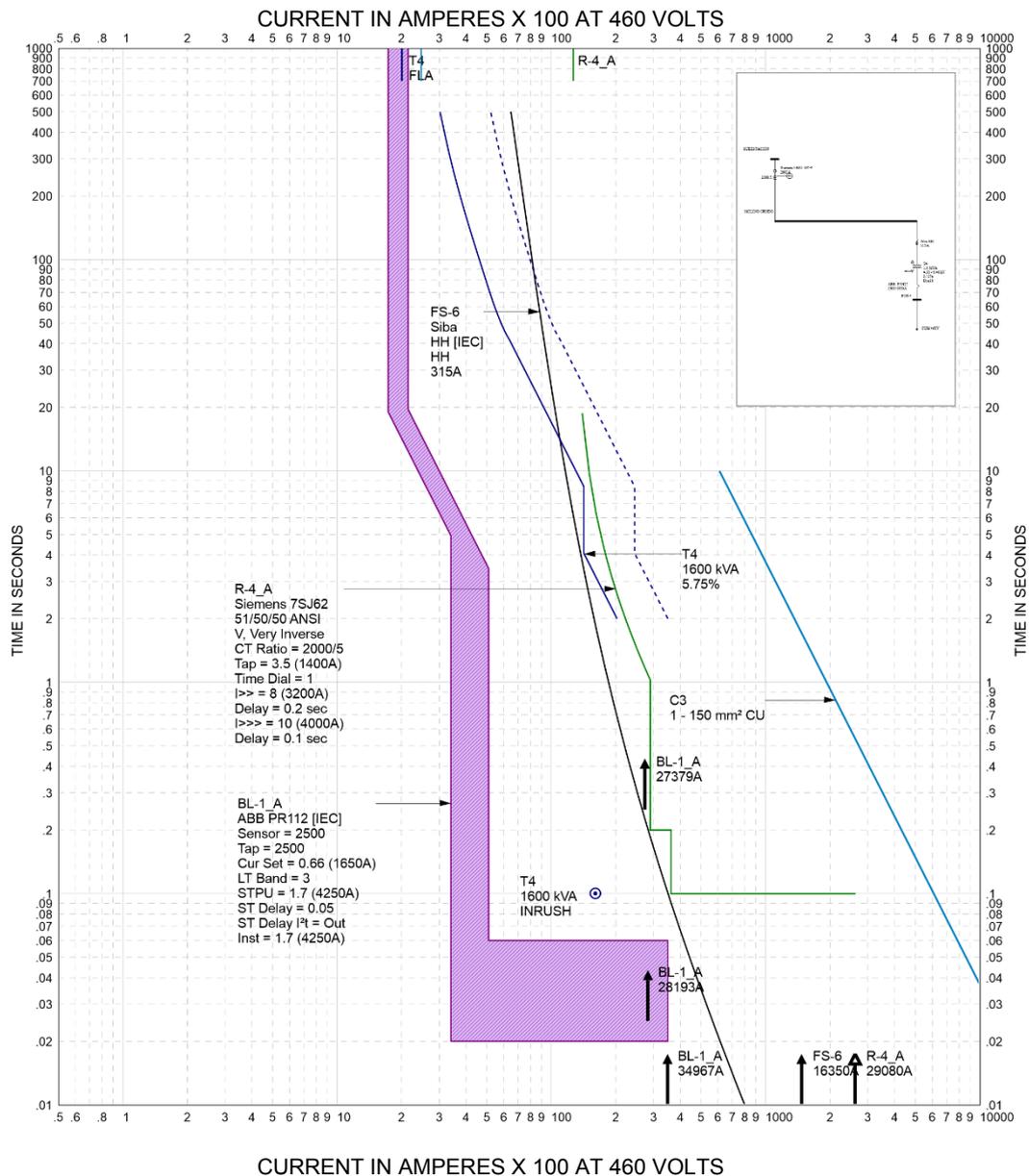


Fig. 46. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona molino crudo, ramal 7, transformador 4

Fuente: EasyPower

En la figura 46, el disyuntor BL-1-A y el fusible FS-6 protegen al transformador T4. En esta figura, se determina un margen de coordinación de 50 ms entre las regiones instantánea del disyuntor BL-1-A y el fusible FS-6, ejerciendo protección a las curvas de daño mecánico y térmico del transformador T4. Con respecto al relé R-4-A, existe un margen de 100 ms entre éste en su zona de curva definida y el fusible. El primero, en calidad de

protección de respaldo, logra proteger el transformador no así por daño mecánico y se considera selectiva la zona.

4.3.10. CCM Trituración

El siguiente diagrama representa el CCM molino crudo compuesto por un motor de 650 HP y un transformador de 1MVA con sus respectivas protecciones dedicadas y de respaldo

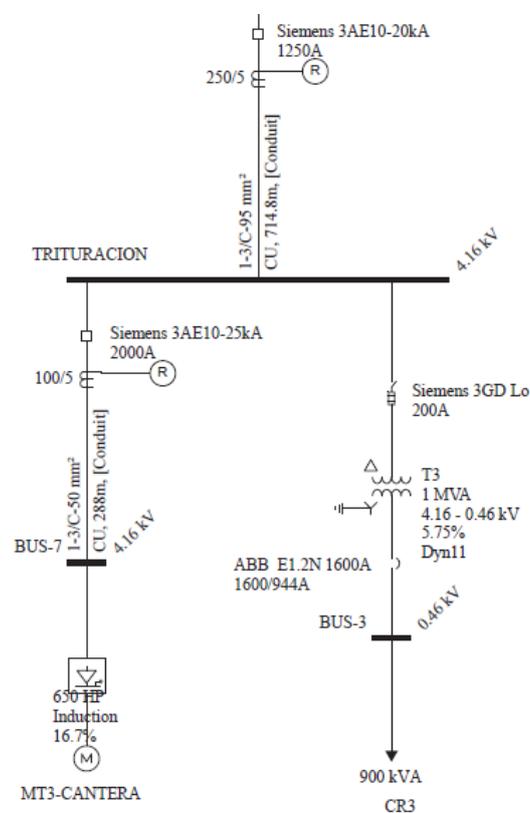


Fig. 47. Diagrama unifilar de la zona de trituración

Fuente: EasyPower

En las siguientes figuras, se definirán las curvas de operación y protección del circuito representado en la figura 47 mediante las TCC, cumpliendo con la normativa y estableciendo criterios de protección según las recomendaciones acogidas en las diferentes fuentes.

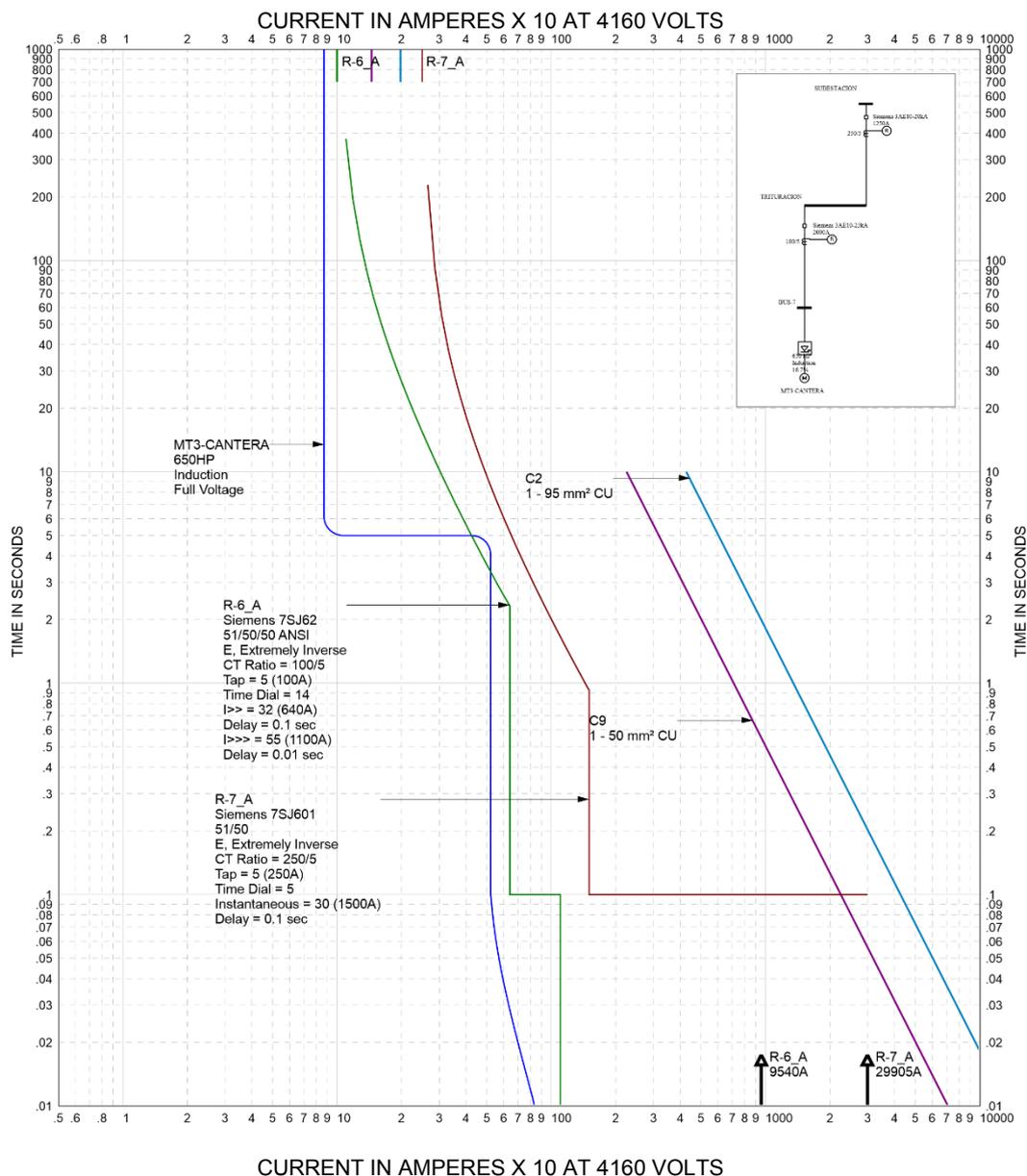


Fig. 48. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona trituración, ramal 1, MT3 cantera

Fuente: EasyPower

En la figura 48, el relé R-6-A y el relé R-7-A protegen al motor MT3 motor molino cantera. En esta figura, se determina un margen de coordinación de 100 ms para la corriente de roto bloqueado. Entre la protección instantánea del relé R-6-A y el relé R-7-A, hay un margen de tiempo de un segundo. Menor a este tiempo, no hay coordinación. Esta

daño mecánico y térmico del transformador T3. Con respecto al relé R-4-A, no existe coordinación debido al cruzamiento de las sus curvas, dando prioridad a la intención de proteger en su totalidad el transformador y brindar un margen de apertura óptimo al arranque del motor molino cantera.

4.3.11. CCM Molino cemento

La figura 50 representa el diagrama unifilar de molino cemento definidos por los circuitos de CCM molino cemento, motor molino cemento, motor separador *pleniumpulse* y CCM de ensacado con sus respectivas protecciones dedicadas y su protección de respaldo.

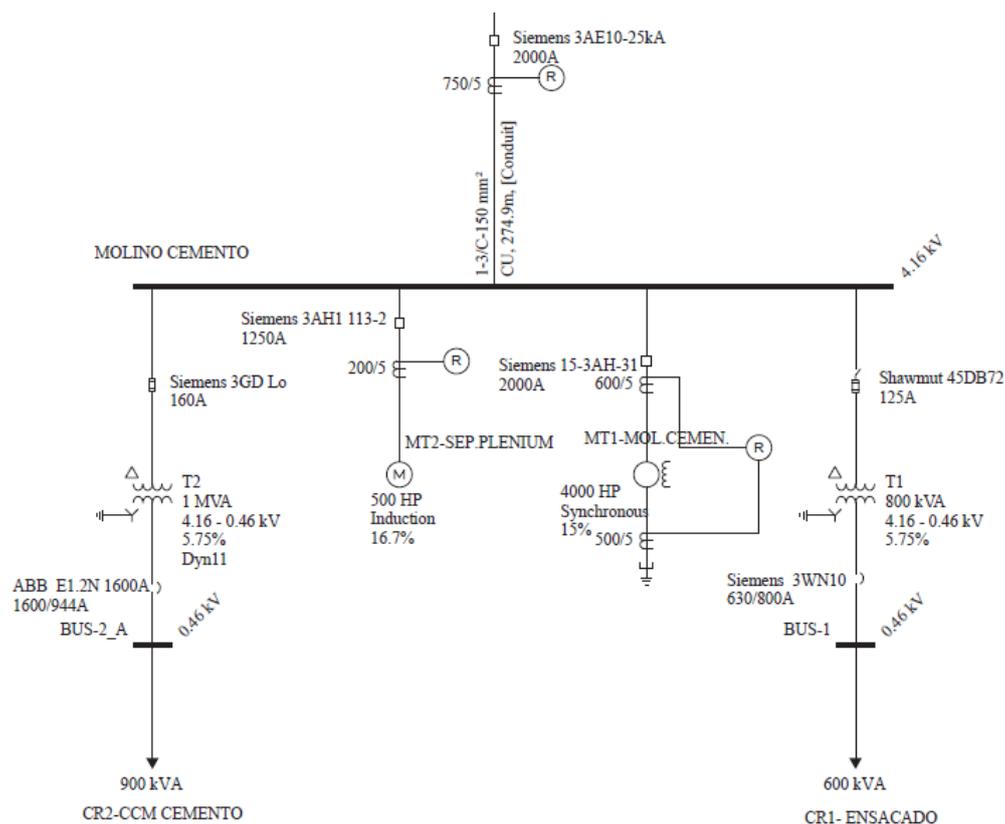


Fig. 50. Diagrama unifilar de la zona de molino cemento

Fuente: EasyPower

En las siguientes TCC, se definirán las curvas de operación y protección del circuito representado en la figura 50, cumpliendo con criterios de protección según las recomendaciones acogidas en las diferentes fuentes.

región instantánea del mismo y la región del fusible. El relé R-8 protege solamente la curva de daño térmico del transformador T2.

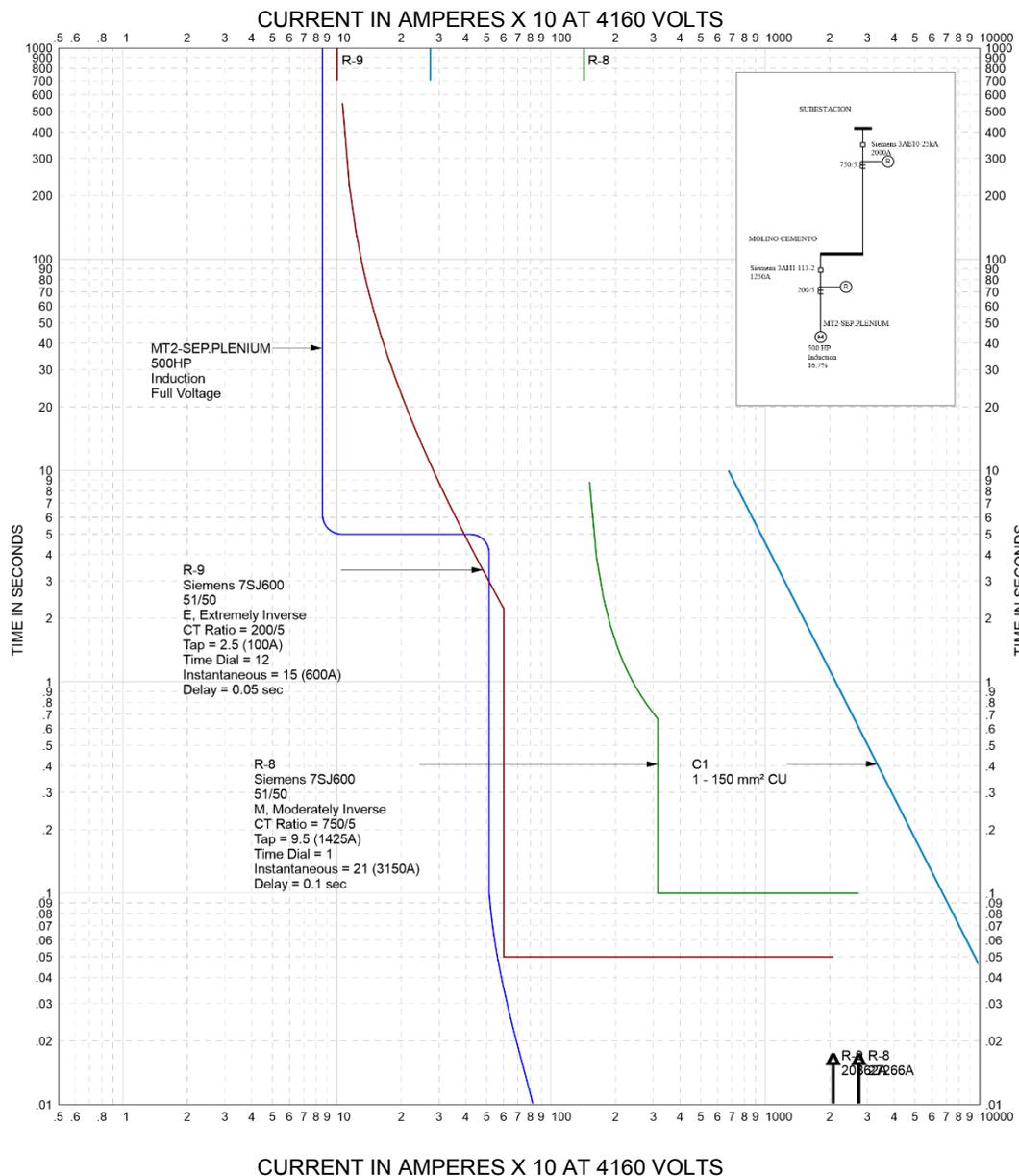


Fig. 52. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de molino cemento, ramal 2, MT2 motor separador PL. Pulse

Fuente: EasyPower

En la figura 52, el relé R-9 y el relé R-8 protegen al motor MT2 motor separador. En esta figura, se establece el relé R-9 como la protección del motor y el relé R-8 como la

protección de respaldo, lo cual da un margen de coordinación de 50 ms entre regiones instantáneas. De acuerdo con este tiempo, es muy poco probable que exista coordinación por manejarse tiempos de apertura muy pequeños, sin embargo, se logra la coordinación por sobrecorriente.

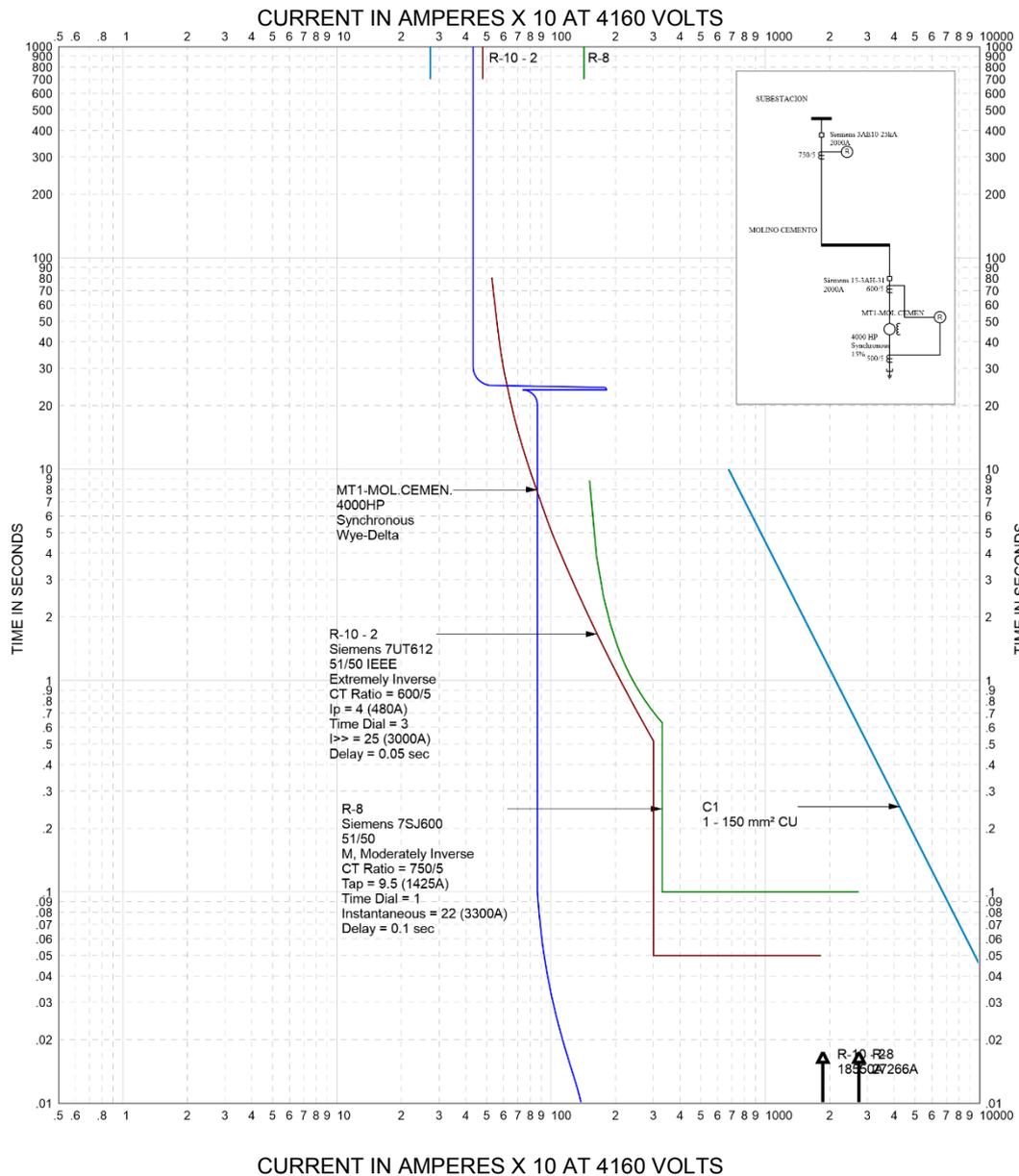


Fig. 53. Representación de las curvas de operación de las protecciones eléctricas de la zona de molino cemento, ramal 3, MT1 motor molino cemento

Fuente: EasyPower

En la figura 53, el relé R-10-2 y el relé R-8 protegen al motor MT1 motor molino de cemento. En esta figura, se definen el relé R-10-2 como la protección del motor, el cual cumple las características de ser un relé diferencial. Así mismo, el relé R-8 funciona como la protección de respaldo dando un margen de coordinación de 50 ms entre regiones instantáneas, generando un rango de apertura de 100 ms. El ajuste de ambos está condicionado al tiempo de arranque del motor que puede llegar hasta los 30 segundos, no obstante, se elige la protección contra sobrecorriente 50/51.

Tabla 10. Reporte de ajustes de coordinación de los relés de protección (mediana tensión)

Relay					Tap								
ID	Mfr	Type	DeviceFunction	CT Ratio	Name	Range	Sett	PA	Name	Curve	Range	Sett	Unit
R-1	Siemens	7UT612	51/50 IEEE	2000/5	Ip	0.1 - 4	3.8	1520	Time Dial	Inverse	0.5 - 15	3	Seconds
R-1_B	Siemens	7UT612	51/50 IEEE	2000/5	Ip	0.1 - 4	3.8	1520	Time Dial	Inverse	0.5 - 15	3	Seconds
R-4	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	2000/5	Tap	0.5 - 20	4	1600	Time Dial	M, Moderately Inverse	0.05 - 15	5	Seconds
R-4_A	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	2000/5	Tap	0.1 - 4	3.5	1400	Time Dial	V, Very Inverse	0.05 - 15	1	Seconds
R-4_B	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	2000/5	Tap	0.5 - 20	4	1600	Time Dial	M, Moderately Inverse	0.05 - 15	5	Seconds
R-5_A	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	600/5	Tap	0.5 - 20	3	360	Time Dial	E, Extremely Inverse	0.05 - 15	13	Seconds
R-6_A	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	100/5	Tap	0.5 - 20	5	100	Time Dial	E, Extremely Inverse	0.05 - 15	14	Seconds
R-7_A	Siemens	7SJ601	51/50	250/5	Tap	0.5 - 20	5	250	Time Dial	E, Extremely Inverse	0.5 - 15	5	Seconds
R-8	Siemens	7SJ600	51/50	750/5	Tap	0.5 - 20	9.5	1425	Time Dial	M, Moderately Inverse	0.5 - 15	1	Seconds
R-9	Siemens	7SJ600	51/50	200/5	Tap	0.5 - 20	2.5	100	Time Dial	E, Extremely Inverse	0.5 - 15	12	Seconds
R-10	Siemens	7UT612	51/50 IEEE	600/5	Ip	0.1 - 4	4	480	Time Dial	Extremely Inverse	0.5 - 15	3	Seconds
R-11	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	40/5	Tap	0.5 - 20	7	56	Time Dial	E, Extremely Inverse	0.05 - 15	5	Seconds
R-11_A	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	40/5	Tap	0.5 - 20	7	56	Time Dial	E, Extremely Inverse	0.05 - 15	5	Seconds
R-1_A	GE	SR750	51/50	200/5	Tap	0.05 - 20	3	600	Time Multiplier	IAC Short Inverse	0.01 - 100	9	Seconds
R-2_A	GE	269 Plus	51/50	200/5	Tap	0.05 - 12	1	200	Thermal Overload	Standard Overload Curves	1 - 8	1	Seconds
R-3_A	GE	269 Plus	51/50	200/5	Tap	0.05 - 12	0.2	40	Thermal Overload	Standard Overload Curves	1 - 8	1	Seconds
R-7	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	2000/5	Tap	0.5 - 20	4	1600	Time Dial	M, Moderately Inverse	0.05 - 15	1	Seconds
R-5	Siemens	7SJ600	51/50	150/5	Tap	0.5 - 20	2	60	Time Dial	I, Inverse Time	0.5 - 15	0.5	Seconds
R-6	Siemens	7SJ601	51/50	500/5	Tap	0.5 - 20	6.5	650	Time Dial	V, Very Inverse	0.5 - 15	1	Seconds

Fuente: Software EasyPower, versión 10.3

Tabla 11. Reporte de ajustes de coordinación de los relés de protección (mediana tensión)

Relay					ST Pickup				ST Delay			Inst				Delay		
ID	Mfr	Type	DeviceFunction	CT Ratio	Name	Range	Sett	PA	Name	Sett	Unit	Name	Range	Setting	PA	Name	Sett	Unit
R-1	Siemens	7UT612	51/50 IEEE	2000/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	I>>	0.05 - 35	14	5600	Delay	0.7	Seconds
R-1 B	Siemens	7UT612	51/50 IEEE	2000/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	I>>	0.1 - 35	14	5600	Delay	0.7	Seconds
R-4	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	2000/5	I>>	0.1 - 35	12	4800	Delay	0.4	Seconds	I>>>	0.1 - 35	12	4800	Delay	0.4	Seconds
R-4 A	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	2000/5	I>>	0.1 - 35	8	3200	Delay	0.2	Seconds	I>>>	0.1 - 35	10	4000	Delay	0.1	Seconds
R-4 B	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	2000/5	I>>	0.1 - 35	12	4800	Delay	0.4	Seconds	I>>>	0.1 - 35	12	4800	Delay	0.4	Seconds
R-5 A	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	600/5	I>>	0.1 - 35	13	1560	Delay	0.1	Seconds	I>>>	0.5 - 175	25	3000	Delay	0	Seconds
R-6 A	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	100/5	I>>	0.1 - 35	32	640	Delay	0.1	Seconds	I>>>	0.5 - 175	55	1100	Delay	0.01	Seconds
R-7 A	Siemens	7SJ601	51/50	250/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	Instantaneous	0.5 - 125	30	1500	Delay	0.1	Seconds
R-8	Siemens	7SJ600	51/50	750/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	Instantaneous	0.1 - 25	22	3300	Delay	0.1	Seconds
R-9	Siemens	7SJ600	51/50	200/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	Instantaneous	0.1 - 25	15	600	Delay	0.05	Seconds
R-10	Siemens	7UT612	51/50 IEEE	600/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	I>>	0.1 - 35	25	3000	Delay	0.05	Seconds
R-11	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	40/5	I>>	0.1 - 35	26	208	Delay	1	Seconds	I>>>	0.1 - 35	26	208	Delay	1	Seconds
R-11 A	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	40/5	I>>	0.1 - 35	26	208	Delay	1	Seconds	I>>>	0.1 - 35	26	208	Delay	1	Seconds
R-1 A	GE	SR750	51/50	200/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	Instantaneous	0.05 - 20	6	1200	Delay	0.1	Seconds
R-2 A	GE	269 Plus	51/50	200/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	Short Circuit Inst	4 - 12	5	1000	Delay	0.05	Seconds
R-3 A	GE	269 Plus	51/50	200/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	Short Circuit Inst	4 - 12	4	800	Delay	0	Seconds
R-7	Siemens	7SJ62	51/50/50 ANSI	2000/5	I>>	0.1 - 35	7	2800	Delay	0.2	Seconds	I>>>	0.1 - 35	10	4000	Delay	0.1	Seconds
R-5	Siemens	7SJ600	51/50	150/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	Instantaneous	0.1 - 25	6	180	Delay	0.1	Seconds
R-6	Siemens	7SJ601	51/50	500/5	ST Pickup	-			ST Delay		Seconds	Instantaneous	0.5 - 125	10	1000	Delay	0.18	Seconds

Fuente: Software EasyPower, versión 10.3

Tabla 12. Reporte de ajustes de coordinación de disyuntores de potencia de baja tensión

SST						LTPU			LT Delay		STPU					Inst		
ID	Mfr	Type	Style	Sensor	tap	Name	Sett	Trip (A)	Name	Band	Name	Setting	Trip (A)	Band	I2t	Sett	Override	Trip (A)
BL-1_A	ABB	PR112 [IEC]	LVPCB	2500	2500	LT Pickup	0.66	1650	LT Delay	3	ST Pickup	1.7	4250	0.05	Out	1.7	Pickup	4250
BL-2_A	Siemens	ETU 45B	WL FS II	1600(I^4T)	1600	LT Pickup	0.8	1280	LT Delay	1	ST Pickup	3	4800	0.4	In	3	Pickup	4800
BL-3_A	ABB	Ekip Touch	LVPCB LSI/G	1600	1600	LT Pickup	0.66	1056	LT Delay	3	ST Pickup	3	4800	0.15	Out	3	Pickup	4800
BL-4_A	ABB	Ekip Touch	LVPCB LSI/G	1600	1600	LT Pickup	0.59	944	LT Delay	3	ST Pickup	3	4800	0.15	In	3	Pickup	4800
BL-5	ABB	Ekip Touch	LVPCB LSI/G	1600	1600	LT Pickup	0.59	944	LT Delay	3	ST Pickup	2.5	4000	0.15	In	3	Pickup	4800
BL-6	Siemens	3WN1 [IEC]	AZN	800	800	LT Pickup	1	800	LT Delay	2	ST Pickup	4	3200	10ms	Out	4	Pickup	3200
BL-2	Siemens	ETU 45B	WL FS II	3200(I^4T)	2500	LT Pickup	0.5	1250	LT Delay	1	ST Pickup	3	7500	0.4	Out	3	Pickup	7500
BL-3	Siemens	ETU 45B [IEC]	WL FS I [IEC]	1600(I^4T)	1600	LT Pickup	0.55	880	LT Delay	4	ST Pickup	3	4800	0.1	Out	4	Pickup	6400
BL-4	ABB	Ekip Dip	LVPCB LSI	3200	3200	LT Pickup	0.58	1856	LT Delay	3	ST Pickup	1	3200	0.1	In	3	Pickup	9600
BL-8	GE	MVT-PM	ICCB	800	800	LT Pickup	0.5	400	LT Delay	1	ST Pickup	1.5	600	Max	In	2	Pickup	1600
BL-1	ABB	Ekip Dip	LVPCB LSI	3200	3200	LT Pickup	0.4	1280	LT Delay	3	ST Pickup	0.6	1920	0.2	In	1.5	Pickup	4800

Fuente: Software EasyPower, versión 10.3

Tabla 13. Reporte de parámetros de coordinación de fusibles en mediana y baja tensión

Fuse						
ID	Manufacturer	Type	Style	Model	kV	Size
FS-1	Siemens	HRC [IEC]	3GD Lo	Fuse Links	7.2	160A
FS-2	Ferraz Shawmut	CS-3	A055F	1DORO	5.5	100E
FS-2_A	Ferraz Shawmut	Amp-Trap	A051B	1DARO	5.5	19R
FS-3	Siba	HH [IEC]	HH	Back Up	7.2	315A
FS-3_A	Siemens	HRC [IEC]	3GD Lo	Fuse Links	7.2	160A
FS-4	Siemens	HRC [IEC]	3GD Lo	Fuse Links	7.2	160A
FS-4_A	Siba	HH [IEC]	HH	Back Up	7.2	315A
FS-5	Siba	HH [IEC]	HH	Back Up	7.2	315A
FS-5_A	Ferraz Shawmut	R (Nom kV)	A480R-1	A	5.5	5R
FS-6	Siba	HH [IEC]	HH	Back Up	7.2	315A
FS-6_A	DRIWISA	CL [IEC]	DRS07-A2-63	CL	7.2	100
FS-7	Siemens	HRC [IEC]	3GD Lo	Fuse Links	7.2	200A
FS-8	Siemens	HRC [IEC]	3GD Lo	Fuse Links	7.2	160A
FS-9	Ferraz Shawmut	Fuse Links	45DB72	Backup	7.2	125A
FS-10	GE	(Std)	55A212942P	I Limiting	5.5	3R
FS-11	GE	(Std)	55A212942P	I Limiting	5.5	3R
FS-12	Ferraz Shawmut	Amp-Trap	A70Q		0.7	600A
FS-1_A	Ferraz Shawmut	Amp-Trap	A051B	1DARO	5.5	19R

Fuente: Software EasyPower, versión 10.3

Las tablas 10 y 11 contienen los datos relacionados con las características y los ajustes de las protecciones a mediana tensión con parámetros, tales como la marca y la identificación, el modelo, la función de protección, la relación de los transformadores de medición, el ajuste de TD, al igual que las características de las curvas seleccionadas de acuerdo con la máxima corriente de demanda. Así mismo, se detallan los ajustes de curva por tiempo definido en algunas protecciones, el ajuste de la curva por sobrecorriente instantánea y el tipo de curva.

La tabla 12 contiene los datos respectivos relacionados con las características y los ajustes de las protecciones en baja tensión con parámetros, como la identificación y marca, el modelo, el sensor, el *short time delay*, el long time delay y los ajustes instantáneos explicados en el capítulo II. Todas las partes están asociadas con las regiones térmicas y magnéticas del dispositivo.

La tabla 13 posee los datos y las características de protección de los fusibles en mediana y baja tensión relacionados con aspectos como marca, tipo, tensión de operación y tamaño.

Tabla 14. Reporte umbral de energía incidente de destello de arco

Arc Fault Bus Name	Arc Fault Bus kV	AC/DC	EquipType	ElectrodeConfiguration	Height (mm)	Width (mm)	Depth (mm)	Electrode Gap (mm)	Bus BoltedFault (kA)	Bus Arc Fault (kA)	Branch BoltedFault (kA)	Branch Arc Fault (kA)
BANCO DE CAPACIT	4,16	AC	Switchgear	VCB	1143	762	762	104	23,885	20.488	23,885	20.488
BUS-1	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	15,93	11.724	15,93	11.724
BUS-2 A	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	19,489	14.273	19,489	14.273
BUS-3	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	18,001	13.221	18,001	13.221
BUS-4	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	27,98	19.818	27,98	19.818
BUS-5 A	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	27,98	19.818	27,98	19.818
BUS-6 A	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	18,892	13.854	18,892	13.854
BUS-7	4,16	AC	Switchgear	VCB	1143	762	762	104	6,441	5.657	6,117	5.372
BUS-8	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	5,743	3.574	5,743	3.574
BUS-9	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	7,595	5.475	7,595	5.475
BUS-10	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	28,654	20.22	28,654	20.22
BUS-11	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	19,196	14.068	19,196	14.068
BUS-12	0,46	AC	Switchboard	VCB	508	508	508	32	28,654	20.22	28,654	20.22
CIUD.MART.2	4,16	AC	Other	VCB	1143	762	762	104	59,549	49.557	6,585	5.48
CIUD.MARTINEZ	4,16	AC	Other	VCB	1143	762	762	104	3,013	2.665	3,013	2.665
HOR. ENFRIADOR 2	4,16	AC	Switchgear	VCB	1143	762	762	104	15,721	13.591	15,721	13.591
HORNO ENFRIADOR	4,16	AC	Other	VCB	1143	762	762	104	24,965	21.399	24,965	21.399
MOLINO CEMENTO	4,16	AC	Switchgear	VCB	1143	762	762	104	17,14	14.791	17,14	14.791
MOLINO COKE	4,16	AC	Switchgear	VCB	1143	762	762	104	23,236	19.94	26,162	22.451
MOLINO CRUDO	4,16	AC	Switchgear	VCB	1143	762	762	104	13,352	11.58	13,352	11.58
SERV.AUX.2	0,46	AC	Switchgear	VCB	508	508	508	32	8,971	6.516	8,971	6.516
SERVICIOS AUX.	4,16	AC	Switchgear	VCB	1143	762	762	104	1,269	1.1	1,269	1.1
SUBESTACION	4,16	AC	Switchgear	VCB	1143	762	762	104	24,965	21.399	12,483	10.699
TRITURACION	4,16	AC	Switchgear	VCB	1143	762	762	104	9,787	8.539	9,396	8.198

Fuente: Software EasyPower, versión 10.3

Tabla 14. *Continuación*

Arc Fault Bus Name	Arc Fault Bus kV	Trip Time (sec)	Trip Time (branch bolted fault) (sec)	Opening Time (sec)	Arc Time (sec)	Clearing Time (branch bolted fault) (sec)	Est Arc Flash Boundary (inches)	Limited Approach Boundary (feet)	Restricted Approach Boundary (feet)	Working Distance (inches)	Incident Energy (cal/cm ²)	PPE Level
BANCO DE CAPACITORES	4,16	0,129	0,129	0,065	0,194	0,194	88.2	5	2,167	18	14,5	3
BUS-1	0,46	0,035	0,035	0	0,035	0,035	16.4	3,5	1	18	1	1
BUS-2 A	0,46	0,03	0,03	0	0,03	0,03	17	3,5	1	18	1,1	1
BUS-3	0,46	0,03	0,03	0	0,03	0,03	16.1	3,5	1	18	1	1
BUS-4	0,46	0,06	0,06	0	0,06	0,06	32.6	3,5	1	18	3,1	1
BUS-5 A	0,46	0,05	0,05	0	0,05	0,05	29.1	3,5	1	18	2,6	1
BUS-6_A	0,46	0,03	0,03	0	0,03	0,03	16.6	3,5	1	18	1,1	1
BUS-7	4,16	0,016	0,016	0,065	0,081	0,081	21.4	5	2,167	18	1,6	1
BUS-8	0,46	0,025	0,025	0	0,025	0,025	6.1	3,5	1	18	0,2	1
BUS-9	0,46	0,05	0,05	0	0,05	0,05	12.3	3,5	1	18	0,7	1
BUS-10	0,46	0,03	0,03	0	0,03	0,03	21.4	3,5	1	18	1,6	1
BUS-11	0,46	0,05	0,05	0	0,05	0,05	23.1	3,5	1	18	1,8	1
BUS-12	0,46	0,05	0,05	0	0,05	0,05	29.5	3,5	1	18	2,6	1
CIUD.MART.2	4,16	0,162	0,162	0,065	0,227	0,227	159.4	5	2,167	18	36,7	4
CIUD.MARTINEZ	4,16	0,163	0,163	0,065	0,228	0,228	26.1	5	2,167	18	2,1	1
HOR. ENFRIADOR 2	4,16	0,1	0,1	0,065	0,165	0,165	60.5	5	2,167	18	8	2
MOLINO CEMENTO	4,16	0,1	0,1	0,065	0,165	0,165	66.2	5	2,167	18	9,3	3
MOLINO COKE	4,16	0,05	0,05	0,083	0,133	0,133	69.9	5	2,167	18	10,1	3
MOLINO CRUDO	4,16	0,08	0,08	0,065	0,145	0,145	51.6	5	2,167	18	6,3	2
SERV.AUX.2	0,46	0,03	0,03	0	0,03	0,03	10.1	3,5	1	18	0,5	1
SERVICIOS AUX.	4,16	1,458	1,458	0	1,458	1,458	48.6	5	2,167	18	5,7	2
SUBESTACION	4,16	0,4	0,4	0,065	0,465	0,465	153.1	5	2,167	18	34,5	4
TRITURACION	4,16	0,045	0,045	0,065	0,11	0,11	33.7	5	2,167	18	3,2	1

Fuente: Software EasyPower, versión 10.3

La tabla anterior está relacionada con los resultados del estudio de arco y choque eléctrico. Ésta contiene resultados asociados con los componentes a las dimensiones de la celda donde está ubicada la protección, el tipo de protección, la tensión operada, el ajuste de tiempo en dicha protección y tiempo en el que la energía o la corriente de arco es liberada. Así mismo, posee los resultados de falla de corriente atornillada y los datos de falla de corriente de arco en cada bus designado, además de los límites de exposición al arco, las fronteras de trabajo y, finalmente, la categoría de seguridad obtenida por la energía incidente.

A continuación, se determinan las etiquetas de seguridad obtenidas por el *software* EasyPower, donde se definen las distancias de seguridad, así como las clases de EPP requerido y la normativa asociada con este estudio.

 WARNING	
Arc Flash and Shock Hazard Appropriate PPE Required	
34,5 12' - 9"	cal/cm² Flash Hazard at 18,0 Inches Arc Flash Boundary Protective Clothing and PPE -- Refer to NFPA 70E-2018 Table 130.5 (G)
4,16 5' - 0" 2' - 2" **	kV Shock Hazard when cover is removed Limited Approach Restricted Approach - Class 1 Voltage Gloves Prohibited Approach - Class 1 Voltage Gloves
Equipment Name: SUBESTACION (Fed by: R-4) Date: April 2021, Calculation Method: IEEE 1584-2018	

Fig. 55. Etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de la subestación

Fuente: EasyPower

La figura 55 describe las características de acuerdo con el estudio de choque y arco eléctrico de la zona de subestación, lo cual da como resultado en un nivel de categoría 4.

 WARNING	
Arc Flash and Shock Hazard Appropriate PPE Required	
8,0 5' - 1"	cal/cm² Flash Hazard at 18,0 Inches Arc Flash Boundary Protective Clothing and PPE -- Refer to NFPA 70E-2018 Table 130.5 (G)
4,16 5' - 0" 2' - 2" **	kV Shock Hazard when cover is removed Limited Approach Restricted Approach - Class 1 Voltage Gloves Prohibited Approach - Class 1 Voltage Gloves
Equipment Name: HOR. ENFRIADOR 2 (Fed by: R-7) Date: April 2021, Calculation Method: IEEE 1584-2018	

Fig. 56. Etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona del horno enfriador

Fuente: EasyPower

La figura 56 describe las características de acuerdo con el estudio de choque y arco eléctrico de la zona de horno enfriador 2, dando como resultado un nivel de categoría 2.

 WARNING	
Arc Flash and Shock Hazard Appropriate PPE Required	
10,1 5' - 10"	cal/cm² Flash Hazard at 18,0 Inches Arc Flash Boundary Protective Clothing and PPE -- Refer to NFPA 70E-2018 Table 130.5 (G)
4,16 5' - 0" 2' - 2" **	kV Shock Hazard when cover is removed Limited Approach Restricted Approach - Class 1 Voltage Gloves Prohibited Approach - Class 1 Voltage Gloves
Equipment Name: MOLINO COKE (Fed by: R-1_A) Date: April 2021, Calculation Method: IEEE 1584-2018	

Fig. 57. Etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de molino Coke

Fuente: EasyPower

La figura 57 describe las características de acuerdo con el estudio de choque y arco eléctrico de la zona de Molino Coke, lo cual da como resultado en un nivel de categoría 3.

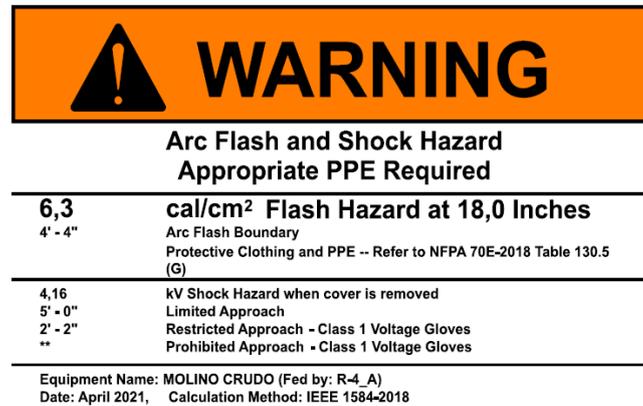


Fig. 58. Etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de molino de crudo

Fuente: EasyPower

La figura 58 describe las características de acuerdo con el estudio de choque y arco eléctrico de la zona de Molino Crudo, dando como resultado un nivel de categoría 2.

 WARNING	
Arc Flash and Shock Hazard Appropriate PPE Required	
3,2 2' - 10"	cal/cm² Flash Hazard at 18,0 Inches Arc Flash Boundary Protective Clothing and PPE -- Refer to NFPA 70E-2018 Table 130.5 (G)
4,16 5' - 0" 2' - 2" **	kV Shock Hazard when cover is removed Limited Approach Restricted Approach - Class 1 Voltage Gloves Prohibited Approach - Class 1 Voltage Gloves
Equipment Name: TRITURACION (Fed by: R-7_A) Date: April 2021, Calculation Method: IEEE 1584-2018	

Fig. 59. Etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de trituración

Fuente: EasyPower

La figura 59 describe las características de acuerdo con el estudio de choque y arco eléctrico de la zona de trituración, lo cual da como resultado un nivel de categoría 1.

 WARNING	
Arc Flash and Shock Hazard Appropriate PPE Required	
9,3 5' - 6"	cal/cm² Flash Hazard at 18,0 Inches Arc Flash Boundary Protective Clothing and PPE -- Refer to NFPA 70E-2018 Table 130.5 (G)
4,16 5' - 0" 2' - 2" **	kV Shock Hazard when cover is removed Limited Approach Restricted Approach - Class 1 Voltage Gloves Prohibited Approach - Class 1 Voltage Gloves
Equipment Name: MOLINO CEMENTO (Fed by: R-8) Date: April 2021, Calculation Method: IEEE 1584-2018	

Fig. 60. Etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de molino cemento

Fuente: EasyPower

La figura 60 describe las características de acuerdo con el estudio de choque y arco eléctrico de la zona de molino cemento, lo cual da como resultado un nivel de categoría 3.

 WARNING	
Arc Flash and Shock Hazard Appropriate PPE Required	
5,7 4' - 1"	cal/cm² Flash Hazard at 18,0 Inches Arc Flash Boundary Protective Clothing and PPE -- Refer to NFPA 70E-2018 Table 130.5 (G)
4,16 5' - 0"	kV Shock Hazard when cover is removed Limited Approach
2' - 2" **	Restricted Approach - Class 1 Voltage Gloves Prohibited Approach - Class 1 Voltage Gloves
Equipment Name: SERVICIOS AUX. (Fed by: FS-1) Date: April 2021, Calculation Method: IEEE 1584-2018	

Fig. 61. Etiqueta de aviso de peligro de arco y choque eléctrico de la zona de servicios auxiliares

Fuente: EasyPower

La figura 61 describe las características de acuerdo con el estudio de choque y arco eléctrico de la zona de servicios auxiliares, lo cual da como resultado un nivel de categoría 2.

Todas las áreas en baja tensión de acuerdo con el estudio de choque y arco eléctrico dan como resultado un nivel de categoría 1.

Los ramales Ciudadela Martínez y el banco de capacitores no están contenidos en estos resultados debido a que éstos se derivan de la subestación, en el caso de Ciudadela Martínez, a un conjunto de transformadores aéreos y el banco de capacitores se encuentra cercano a la subestación. En relación con esto, se denomina categoría 4.

El EPP requerido de acuerdo con los resultados de este capítulo serán sugeridos en el capítulo siguiente, dando recomendaciones no solo a la calidad del EPP, sino a nuevos sistemas de supresión de arco.

CAPÍTULO V

Diseño e implementación del proyecto

Este capítulo contiene el análisis y la implementación de técnicas, equipos y tecnología que reúnen, de una manera generalizada, las condiciones necesarias para evitar o reducir el impacto de un accidente provocado por un evento de arco y choque eléctrico.

La presente sección está compuesta por la introducción a la modificación de algunas características del sistema eléctrico relacionadas con el resultado de la energía incidente. Dicho factor es necesario reducirlo. Se define la información respectiva que debe poseer el informe final de los equipos contenidos en el sistema eléctrico, representado, en forma gráfica o textual, en los diagramas unifilares. En la sección de limitación de exposición al arco, se nombra el promedio de las distancias según el tipo de frontera de seguridad obtenida por el *software*. Así mismo, se dan a conocer algunos métodos de reducción de destello arco, definiendo las ventajas y desventajas de su uso.

Por último, de acuerdo con las categorías de riesgo, se elige el tipo de EPP requerido, considerando la peor condición para cada recinto donde están ubicado los equipos de control y protección del sistema eléctrico.

A continuación, mediante las ecuaciones 4, 5, 6 y 7 asociadas con los valores intermedios de energía incidente, donde parámetros como la corriente de falla atornillada, distancia entre brecha y configuración de los electrodos, tamaño del gabinete y duración del arco son considerados en la obtención de la energía incidente. Los valores que tienden a modificarse son las corrientes de falla y el tiempo de duración del arco que está directamente asociado con el tiempo de apertura de las protecciones eléctricas al igual que la configuración de los electrodos. Seguidamente, se explica la influencia de éstos para reducir tal fenómeno.

Cuando las corrientes de falla son muy elevadas, éstas se reducen aplicando o haciendo uso de reactores de limitación de corriente. Los reactores limitadores de corriente introducen impedancia adicional en el sistema y se utilizan para limitar la corriente de falla. Esto no solo reduce los daños causados por fallas, sino que también permiten el uso de disyuntores con clasificaciones de interrupción más bajas. Limitar la corriente de falla también puede aumentar el tiempo de compensación de fallas si la corriente de falla se encuentra en las características de retardo de tiempo inverso de los relés de protección.

El sistema eléctrico en estudio no posee un sistema de electrodos para la liberación de energía provocada por un evento de falla, sin embargo, en forma anticipada, se elige la configuración del tipo vertical, tomando en consideración que ésta genera menor densidad de energía incidente debido a su dirección y tiempo de duración. La propagación de la energía liberada tiende a durar más, lo cual les brinda, a los fusibles limitadores, un mejor margen de apertura. En la figura 53, se observan los tipos de orientación que poseen los electrodos.

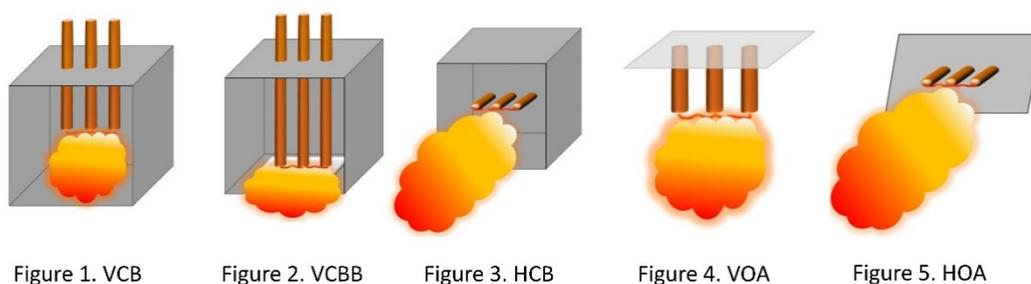


Fig. 62. Configuración de electrodos según IEEE 1584-2018

Fuente: Graphic Products, 2015

Cuando el error de arco es borrado por fusibles limitadores de corriente que operan en su rango de limitación, no existen diferencias significativas entre los casos

verticales y horizontales. No obstante, al observar la bola de plasma en desarrollo en el momento del evento de arco, ésta al inicio de su colapso, genera valores más bajos de energía incidente en posiciones verticales, tal como se observa en la figura siguiente:



Fig. 63. a) Arco con electrodos verticales detrás de la caja, b) Arco con electrodos de descarga horizontal

Fuente: Wilkins, Allison y Lang, 2005

Los de equipos de conmutación deben ser resistentes al arco, construidos y probados de acuerdo con la norma ANSI/IEEE C37.20.7, con puertas reforzadas y las estructuras internas, así como las vías de descarga para la presión de explosión y el material asociado con un arco de destello. La celda resistente al arco de tipo 1, tal como

se define en la norma, proporciona protección al personal únicamente cuando se encuentra delante de dicha celda.

La celda resistente al arco tipo 2 proporciona protección al personal en todo el perímetro externo de la celda. La celda resistente al arco puede considerarse que no es resistente al arco una vez abiertas las puertas, dependiendo de la configuración de diseño de la celda (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003)

Al realizar el análisis de arco y del choque eléctrico, existen condiciones mínimas que los sistemas eléctricos deben poseer, los cuales son ya considerados como parte común de una instalación eléctrica, como la configuración de los electrodos. Su configuración debe determinarse como requisito primordial para el cálculo definitorio.

La siguiente información busca definir la calidad y el tipo de material de los equipos de protección personal. Otros aspectos importantes son las fronteras de seguridad o aproximación, las etiquetas que contienen dicha información requerida por la NFPA 70E y OSHA para los equipos eléctricos en forma de advertencia, así como las condiciones de las actividades laborales. Todo esto se basa en los resultados del capítulo anterior.

5.1. Evaluación de riesgos y documentación

La evaluación del peligro de destello de arco debe documentarse en informes detallados con la finalidad de hacer más fácil el acceso a diagramas y detalles del sistema eléctrico, cambios en el sistema de energía o actualizaciones de las normas, en síntesis, de la mejora en planificaciones de seguridad (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

Es necesario para la planificación de la seguridad que los trabajadores el acceder de manera fácil y agilizada a los detalles y a la representación necesaria.

5.1.1. Informes

La documentación asociada con el estudio de arco y choque eléctrico debe incluir un conjunto de requisitos (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003), los cuales se indican a continuación:

1. Persona que realiza la evaluación debidamente certificada.
2. Todos los datos obtenidos y utilizados en la evaluación deben quedar definidos en el informe. A esto, se suman las visitas de campo para corroborar e incluir dicha información y, por otra parte, la actualización de la configuración de los dispositivos de protección.
3. Método de evaluación de riesgos – la norma y el año de revisión, en caso de utilizar *software*. El nombre del software en este proyecto es EasyPower versión 10.3.
4. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, los resultados provistos por el *software* deben ser:
 - energía incidente,
 - categoría de peligro/riesgo y
 - límite de protección de arco eléctrico para cada equipo de ser posible con los diferentes modos de operación y documentar dicha información.

Estos datos deben estar a disposición de todos los interesados relacionados con el Departamento de Seguridad Ocupacional o ingenieros eléctricos o electromecánicos (Cuerpo de Ingenieros en Diseño) (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

5.1.2. Diagrama unifilar

Es importante indicar el equipo para el que se anotan los valores de destello de arco en el diagrama unifilar. Esto proporciona conocimiento del riesgo en los paneles por parte de los trabajadores (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

A continuación, se brindan los pasos necesarios para definir los datos de destello de arco en diagramas unifilares:

- Evaluación de riesgo de destello de arco en los equipos.
- Límite de protección de destello y, para cada distancia de trabajo, la energía incidente según la unidad estándar con su categoría de riesgo respectiva.
- En casos donde un número considerable de alimentadores se reúnan o estén en un solo recinto, debe considerarse la peor condición del caso, o bien, el ramal que más energía incidente trasiegue para una mejor seguridad de los trabajadores en sus actividades cotidianas (adjuntar información anterior).
- Indique las zonas en las que existe mayor energía incidente en caso de accidente.

Es de vital importancia indicar si existen más de una fuente de energía. En ese sentido, se deben determinar los modos de operación para conocer la condición asumida en el diagrama del sistema de energía en el momento del trabajo. En este caso, el sistema eléctrico posee una sola fuente de alimentación proporcionada por la empresa electrificadora (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

Asimismo, se adjunta un documento impreso con todos estos detalles. Se suman los calibres de los conductores, las características de equipos de protección y un resumen del estudio de corto circuito (ver sección o apéndice).

5.1.3. Documentación en los equipos

La información brindada por el estudio de arco y choque eléctrico se especifica en los equipos de protección o celdas de distribución. En esta sección, se explican las formas más usadas para representar todos los parámetros asociados con este fenómeno con respecto a la seguridad de éste (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

5.1.3.1. Etiquetas de advertencia con valores de destello de arco

Las etiquetas deben ser marcadas con información que incluya tensión nominal, límite de protección contra el destello de arco y su correspondiente de categoría de riesgo y deben estar claramente impresas en la etiqueta para la selección del EPP, tal como se muestra en las imágenes de las etiquetas en el capítulo II.

La información adicional útil para revisiones futuras es la fecha de evaluación, el método de cálculo y el nombre y la versión del *software*.

Las etiquetas de advertencia deben utilizar el tamaño adecuado en proporción al panel donde se fija. El método de cálculo y la documentación deben respaldar la etiqueta de advertencia.

Los equipos de secciones múltiples grandes pueden etiquetarse en varias secciones del equipo, lo cual facilita la comunicación de peligros. Las diferentes secciones pueden tener diferentes energías potenciales de destello de arco. Si se va a utilizar la misma etiqueta en todas las secciones, se debe especificar la mayor energía de incidente posible. Este punto es tomado en consideración para la elección del EPP debido a la manera como está agrupado el sistema eléctrico. En este caso, la subestación principal alimenta a otras subestaciones con capacidades considerables. Las ubicaciones de éstas reúnen equipos donde existe baja y mediana tensión. Por causa de esta cualidad,

se pretende elegir el punto de mayor inflexión, a simples rasgos, el dato de mayor energía incidente del lugar para la elección del EPP (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

El artículo 130.5 (H) de la NFPA 70E-2018 especifica los detalles de la información que se colocará en las etiquetas de advertencia de destello de arco. Las etiquetas pueden tener o no estos detalles. Corresponde al ente colegiado el consentimiento de estos detalles, o bien, en su defecto, esto se encuentra definido por el *software* de modelado. Dicha herramienta debe estar autorizada también por el ente colegiado respectivo. Los cálculos de *arcflash* proporcionan las energías incidentes esperadas máximas. Existen múltiples actividades en equipos eléctricos que no requieren el máximo PPE para ser usados. Esto se puede encontrar en la tabla 130.7(C)(15)(a) de la NFPA 70E-2018 (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

5.2. Límites de exposición al arco

En la sección 2.4.3.2.1 de este documento (límites de protección), se explican los tipos de límites o distancias de trabajo para definir las áreas donde se requiere el EPP en relación con el tipo de actividad empleada. Por consiguiente, se definen, mediante los resultados obtenidos, las fronteras de seguridad definidas por la NFPA 70E y los cálculos proporcionados por el *software* de modelado eléctrico EasyPower.

Las fronteras de protección contra choque identificadas como fronteras de aproximación limitada y frontera de aproximación restringida deben ser aplicadas donde el personal que se aproxima está expuesto a conductores eléctricos o partes de circuitos energizados. Es importante indicar la distancia de trabajo definida por IEEE 1584-2018 como la distancia diferentes partes del cuerpo del trabajador que realiza la tarea, la cual

para este estudio es de 18 inch (ver tabla de resultados) (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

En ocasiones, la frontera de relámpago de arco posee una mayor distancia que la frontera de aproximación limitada. La frontera de protección contra choque eléctrico y la frontera de relámpago de arco son independientes entre sí (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

En relación con la frontera de aproximación limitada, queda prohibido el acceso a personas no calificadas a la frontera de aproximación limitada. La persona designada que esté a cargo del espacio de trabajo en el que exista un riesgo eléctrico debe avisar a la o a las personas no calificadas y advertirles que permanezcan fuera de la frontera de aproximación limitada. En ninguna circunstancia, debe permitirse el ingreso a personas no calificadas de cruzar la frontera de aproximación restringida (NFPA 70E, 2018).

La distancia de aproximación limitada de persona calificada para sistemas en baja tensión (460V) para efectos de este estudio es de 3,5 feet (1,0668 m) y para el sistema en mediana tensión (4160V) es de 5 feet (1,524 m).

5.2.1. Frontera de aproximación restringida

Las personas no calificadas no deben acercarse a equipos energizados expuestos o partes de circuitos, o más allá de la frontera de aproximación restringida mostrada en la tabla 130.4(D)(a) a menos de que se apliquen algunas condiciones, las cuales dicen que la tensión de operación del sistema eléctrico debe ser igual o menor a 50 Volts, o en su defecto, que la persona calificada se encuentre en sitio de manera aislada con todo el EPP correspondiente al igual que la persona no calificada (NFPA 70E, 2018).

La distancia de aproximación restringida de persona calificada para sistemas en baja tensión para efectos de este estudio es de 1 feet (0,3048 m) y para el sistema en mediana tensión es de 2,167 feet (0,66 m).

5.2.2. Frontera de relámpago de arco

Es la distancia en la que la energía incidente equivale a 1.2 cal/cm^2 (5 J/cm^2). Se permitirá determinar la frontera de relámpago de arco mediante la tabla 130.7(C)(15)(a) o tabla 130.7(C)(15)(b) de la NFPA 70E-2018, cuando los requisitos de estas tablas sean aplicables. En casos contrarios, se hará uso de la guía del anexo D para su respectivo cálculo.

Las distancias del límite de relámpago de arco según los resultados en el capítulo anterior para sistemas de baja tensión corresponden a valores entre los 250 mm y los 800 mm de distancia desde el equipo o conductor expuesto energizado según la tabla 14 que ratifica los resultados de estudio de *arcflash*. Es importante definir estos datos en la etiqueta respectiva para cada equipo, lo cual repercutirá en la selección de equipo adicional para relámpago de arco (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

Además de la información anterior, a continuación, se exponen los métodos utilizados para limitar la exposición al arco y choque eléctrico. Aunado al estudio de coordinación y selectividad de protecciones, se definen y se formulan las técnicas más actuales utilizadas para el mantenimiento preventivo de los equipos de alimentación (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

5.3. Reducción del nivel de energía de arco liberada

La energía producida por un evento de corto circuito es proporcional a la energía incidente $V \cdot I \cdot t$. Mediante la realización de análisis de arco eléctrico en cada sistema, a menudo, es posible reducir los intervalos de coordinación de protecciones para lograr tiempos de despeje más bajos y, por lo tanto, menor energía incidente. Sumado a esto, se pueden agregar otros métodos procurando establecer una mayor seguridad al empleado encargado de ejecutar la labor de mantenimiento (Buff, & Zimmerman, 2008).

Los accidentes con arco eléctrico pueden reducirse siguiendo correctamente los procedimientos, utilizando las herramientas adecuadas y un buen mantenimiento preventivo, planificando y coordinando el trabajo. Para esto, es importante considerar las condiciones mentales y físicas de los trabajadores, de tal forma que se evite la caída de herramientas y movimientos involuntarios accidentales (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

Los siguientes esquemas o métodos se encargan de tener un mayor monitoreo de la operación ajuste y mantenimiento de las protecciones, mejorando la fiabilidad del sistema, estableciéndose una mayor seguridad en el área donde se opera. La inserción de estos métodos ha comprobado reducir el impacto de una falla eléctrica en un tiempo corto (en el orden de los milisegundos). No obstante, otros tipos de mantenimiento acarrear tener un menor contacto con los equipos, persiguiendo la filosofía de a mayor distancia menor es el impacto de una explosión por arco eléctrico (Walker, 2021).

En cada esquema, el relé está diseñado con funciones para detectar fallas dentro de su zona de protección; por defecto, trae funciones de apertura por corriente diferencial, la cual hace que opere al detectar una sobrecorriente entre dos o más puntos

en el sistema eléctrico. Otra función es detectar una cantidad de luz o humo producto de la luz, característica propia producida por un arco eléctrico o la detección de humo debido a la fundición del material. Todas estas funciones son tomadas como señales que necesitan los relés para realizar su propósito, tomando partida el tipo de comunicación utilizada entre sensores y relés.

Cuidar las causas del destello de arco es la principal estrategia para evitar la exposición. Ante esta condición, agregar distancia entre las áreas de peligro y la persona encargada de mantenimiento es una de las maneras más seguras de prevenir incidentes de arco eléctrico. El método de mover a la gente más lejos utiliza la idea de que los efectos de una explosión de destello de arco disminuyen con la distancia de la explosión. Esto ayuda a reducir el contacto con los equipos expuestos a una maniobra involuntaria (Walker, 2021).

Los fabricantes han proporcionado mecanismos operados a distancia para hacer funcionar los disyuntores en posiciones seguras de operación. Éstos utilizan algunos protocolos de comunicación para acceder a los controles de ajuste relacionado con la apertura y el cierre de los disyuntores. En la figura 55, se representa, en forma resumida, el equipo utilizado para esta práctica (Walker, 2021).



Fig. 64. Unidad de ajuste de potencia remota

Fuente: Walker, 2021

La figura anterior ofrece un ejemplo de sistemas de ajuste de alimentación remota que le ayuda y le permite al operador estar fuera del límite de incidencia de destello de arco a 8 metros aproximadamente.

El uso de estas herramientas de mango largo ayuda al trabajador a estar más lejos del circuito eléctrico. Éstos poseen sensores o ventanas infrarrojas para permitir la inspección con gabinetes a puertas cerradas, "trasiego de la alimentación" remoto de equipos eléctricos y disyuntores de limitación de corriente son algunas de las otras opciones (Walker, 2021).

Es de suma importancia implementar un plan de seguridad ocupacional eléctrica, el cual debe establecer procedimientos para abordar los riesgos de trabajar en equipos energizados, con el objetivo de retirar al trabajador de la zona de peligro o eliminar o reducir la intensidad del arco eléctrico.

Los empleadores deben capacitar y certificar que los empleados tienen conocimientos sobre los peligros de los arcos eléctricos y cómo evitarlos. Se deben desarrollar varios módulos de capacitación para proporcionar capacitación, tanto a personal no calificado, como a técnicos y operadores de equipos que puedan estar expuestos a peligros eléctricos (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

Cuando sea necesario, se deben usar medios de advertencia para la prevención de accidentes y advertir a los empleados sobre los peligros eléctricos que podrían exponer sus vidas.

Se debe usar un equipo de protección adecuado cuando cualquiera de estos trabajos se lleve a cabo dentro del límite de protección contra el destello establecido para ese equipo.

5.3.1. Esquema diferencial de bus

Un esquema diferencial de bus es un método de protección de un bus que se basa en la Ley de Kirchoff que la suma de todas las corrientes que entran y salen de un nodo debe añadir a cero. Las corrientes tomadas de los CT que rodean un bus se añaden juntas. Si la suma de las corrientes o corriente diferencial no es cero, el relé declara un error interno y funciona (Buff, & Zimmerman, 2008).

Cualquier falla entre los CT y el bus se considera en la zona, y el relé funcionará. Cualquier error en el lado de línea de los CT se considera externo y está fuera de la zona de protección.

1) Protección diferencial de bus de alta impedancia

Esta opción utiliza CT dedicados conectados en paralelo y luego van conectados a una entrada de alta impedancia en el relé.

El relé mide la tensión a través de su impedancia interna, aproximadamente 2000 ohmios. El relé se ajusta de tal manera que, para el fallo externo, la tensión medida a través de la impedancia es menor que el pickup, y el fallo interno está por encima del pickup (Buff, & Zimmerman, 2008).

Este esquema es rápido y seguro, pero relativamente costoso debido a la instalación de CT dedicados y las pruebas necesarias para validar el esquema.

La fig. 65 muestra una conexión para un esquema diferencial de bus de alta impedancia. Las flechas muestran la dirección de la corriente de carga.

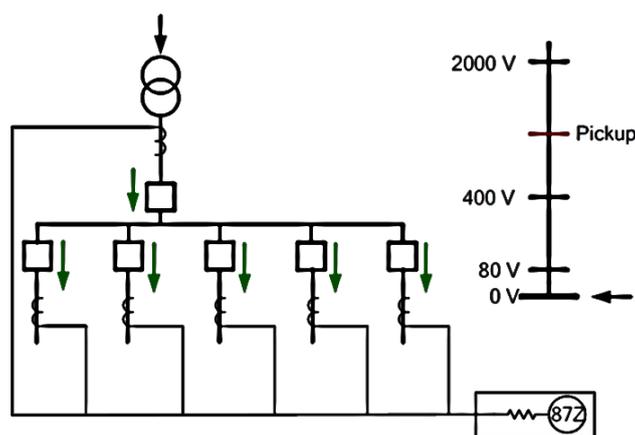


Fig. 65. Esquema de bus diferencial de alta impedancia

Fuente: Buff, & Zimmerman, 2008

2) Protección diferencial de bus de baja impedancia

Un esquema diferencial de bus de baja impedancia es rápido y seguro y no requiere CT dedicados. Los ajustes de relé suelen ser ligeramente más complejos que un esquema diferencial de alta impedancia porque cada entrada tiene una relación de TC y una conexión independiente (Buff, & Zimmerman, 2008).

Éste requiere algunas pruebas de puesta en marcha adicionales. Para el fallo que se muestra en la fig. 66, el esquema diferencial no debe dispararse.

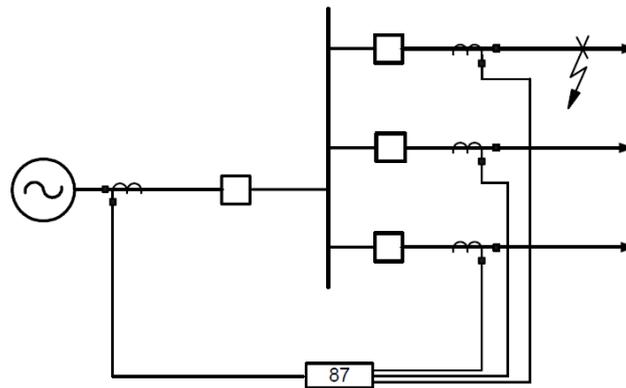


Fig. 66. Diferencial de bus de baja impedancia

Fuente: Buff, & Zimmerman, 2008)

5.3.2. Esquema de enclavamiento de zona mediante relevación de sobrecorriente

La fig. 67 muestra un esquema de enclavamiento de zona. Las flechas indican la dirección del flujo de corriente para un sistema radial. También muestra el uso de comunicaciones digitales para transmitir señales de bloqueo y retardo (Buff, & Zimmerman, 2008).

Funcionamiento del esquema:

- Los relés alimentadores envían señal de "bloqueo" al interruptor principal de lado bajo para fallas en el alimentador.
- El interruptor principal se ajusta con retardo corto de 2 a 3 ciclos para dar tiempo a recibir señal de bloqueo.
- Esta configuración mantiene la sensibilidad y la seguridad incluso cuando los CT se acercan a la saturación.
- Se puede aplicar con elementos de sobrecorriente no direccionales o direccionales.

Una consideración es que, si se produce un error en uno de los interruptores del alimentador, el relé alimentador de la línea defectuosa bloqueará el elemento de disparo rápido. Por lo tanto, el esquema percibirá esto como un error del alimentador y bloqueará el esquema de enclavamiento de zona. Si no se toman otras medidas, se requiere una protección de respaldo y retardo en el tiempo para eliminar la falla (Buff, & Zimmerman, 2008).

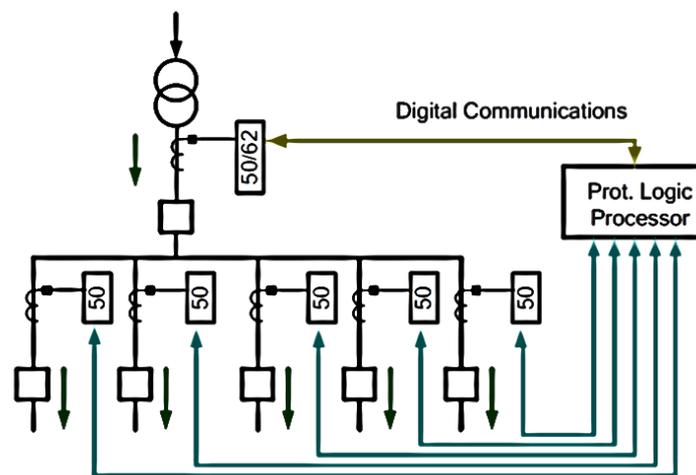


Fig. 67. Esquema de ajuste de bus rápido

Fuente: Buff, & Zimmerman, 2008

5.3.3. Habilitación del elemento instantáneo durante el mantenimiento

Otra solución es requerir personal de mantenimiento para habilitar un elemento instantáneo sensible siempre que se realice el trabajo en vivo. Este esquema requeriría agregar un interruptor de control o pulsador, cableado y lógica asociada. Esto podría añadirse a instalaciones nuevas o antiguas a un costo relativamente bajo (Hedding, Zimmerman, Bartok, Basler y Benmouyal, 2009).

Al igual que cualquier procedimiento de bloqueo, esto podría añadirse a los planes de operaciones y mantenimiento de los equipos eléctricos de conmutación.

Durante los períodos de mantenimiento, existe el riesgo de sobreajuste, pero, estadísticamente, es un riesgo pequeño. Esto puede ocurrir en el momento de un corto circuito debido a la saturación de los CT de baja relación, por lo tanto, es importante aplicar elementos de sobrecorriente instantáneos que detecten las formas de onda producidas por la saturación de CT. (Hedding, Zimmerman, Bartok, Basler y Benmouyal, 2009).

5.3.4. Sensores ópticos (dispositivo AFD: detector de arc flash)

Un método para detectar un arco es a través del uso de sensores ópticos. El uso del sensor óptico es posible porque el arco emite una luz de muy alta intensidad. Cualquier incidente de luz al sensor se transmitirá al receptor donde se dispararán los interruptores ascendentes apropiados. En ese sentido, se utilizan dos tipos de sensores ópticos los cuales son Bucle de fibra continuo y sensor de punto.

La iluminancia producida por un destello de arco proporciona una señal muy larga utilizada por el relé de protección para detectar un evento de arco-destello. Sin embargo, algunas otras fuentes de luz brillante, como el destello de una cámara, pueden imitar un evento de destello de arco. Se utiliza un elemento de sobrecorriente instantánea de alta velocidad para supervisar el elemento de luz. Esto proporciona una alta seguridad para evitar errores de funcionamiento (Hughes, Skendzic, Das, & Carver, 2011).

En sistemas AFD (Arc Flash Detection), los sensores de luz y los elementos de sobrecorriente trabajan juntos en condiciones reales de *arc-flash* para proporcionar un tiempo de disparo medio de 3,6 ms desde la aplicación de corriente y 2,2 ms desde la aparición del *arc-flash* (Hughes, Skendzic, Das, & Carver, 2011).

La ventaja de un esquema óptico es que no tiene que coordinarse con los dispositivos aguas abajo. Para mayor seguridad, el esquema óptico puede ser supervisado por un detector de corriente en caso de necesitar corroborar la falla.

Un ejemplo semejante a esta funcionalidad es la del sistema representado en la fig. 59, donde el dispositivo instalado incluye el sensor de arco, el disyuntor y el relé de protección. En muchos casos, se incorpora el detector de humo.

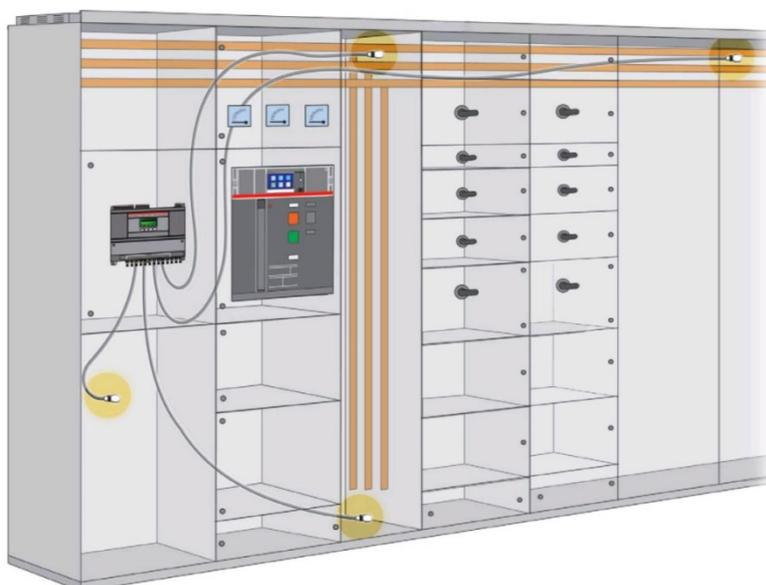


Fig. 68. Sistema de detección de destello de arco y humo para un panel board

Fuente: Dvorak, 2021

El relé de protección contra *arc-flash* debe utilizar el mecanismo de detección de la iluminancia de la luz y la intensidad del humo para activar el disparo. En la configuración, el detector de arco y el detector de humo se instalan en el área superior dentro del panel de conmutación. El detector de arco instalado tiene un ángulo de detección eficaz de más de 220° , un rango de detección de 4 m y una sensibilidad a la luz de 8000 lux aproximadamente (Ueng, Chiu, & Lin, 2021).

Tabla 15. Resumen de las ventajas y desventajas del sistema que debe reducir el peligro de arco-destello

Descripción de esquema de protección	Ventajas	Desventajas
Reduzca los intervalos de coordinación de las protecciones contra sobrecorriente	Equipo y tecnología existente	El costo del estudio de coordinación y la aplicación de los ajustes sobre el sistema eléctrico, los tiempos de ajuste pueden seguir siendo altos. Solo se puede lograr una mejora marginal debido a los rangos de las protecciones.
Zona de enclavamiento	Uso de relés de sobrecorriente principales y del alimentador existentes. Más rápido que el TOC normalmente de 3 a 5 ciclos. El esquema está asistido por comunicaciones y supervisa la integridad del esquema. Costo relativamente bajo para instalar <i>hardware</i> de comunicaciones.	Ajustes más complejos. CTS en el lado del bus del disyuntor provocaría un disparo retardado por fallos en el disyuntor del alimentador. El esquema de comunicaciones asistidas requiere <i>hardware</i> de comunicaciones adicional.
Diferencial de bus de alta impedancia	Disparo rápido de menos de 1,5 ciclos y seguro para cualquier tipo de fallo, fácil de configurar.	Requiere relé adicional, CTS dedicados, instalación de cableado. Pruebas más complejas. No funciona en caso de fallos fuera de la zona del diferencial.
Diferencial de bus de baja impedancia	Disparo rápido de menos de 1,5 ciclos y seguro para cualquier tipo de fallo.	Requiere relés adicionales, alambre, CT. Configuración, pruebas más complejas. Es posible que el relé no esté disponible para buses más grandes. No funciona para fallos fuera de la zona diferencial.
Activar la protección instantánea de sobrecorriente, bloqueo de recierre durante el mantenimiento	Uso de relés de sobrecorriente principales y del alimentador existentes. Disparo rápido de menos de 1,5 ciclos. Bajo coste para instalar el interruptor de control, cableado.	Perder la selectividad durante los períodos de mantenimiento. Podría sobreajustarse. Introduce cambios en los procedimientos de mantenimiento.
Sensores ópticos	Disparo más rápido de menos de 1/4 ciclo, sensible, fácil de configurar y aplicar.	Costo de instalación de sensores de bucle o punto de fibra, no aplicable a diseños de subestaciones abiertas/ exteriores.

Fuente: Hedding, Zimmerman, Bartok, Basler y Benmouyal, 2009

El reducir la energía incidente requiere emplear metodologías nuevas. En casos donde las protecciones no tienen las capacidades para despejar la falla en el tiempo indicado para obtener una energía incidente menor o donde la corriente de falla de arco es mayor que la corriente de corto circuito es probable que deban reemplazarse por protecciones con menor tiempo de capacidad de respuesta ante un evento de corto circuito o falla asociada. Se debe considerar la evaluación de la inserción de protecciones que poseen funciones para la reducción de arco, como los detectores de arco en conjunto con los detectores de humo. Ello brinda una alta fiabilidad del sistema y aumenta la seguridad para los equipos mismos y lo trabajadores que brindan el mantenimiento correspondiente.

Esta fiabilidad puede aumentarse integrando sistemas de protección instantánea para no perder la selectividad. En este caso, es necesario realizar pruebas de disparo para optimizar el comportamiento de esta operación.

5.4. Equipo de protección personal

El equipo de protección personal (PPE) es requerido por varias normas como NFPA y OSHA para proteger a los trabajadores de los peligros en el lugar de trabajo. El tipo de EPP requerido depende del peligro que se haya evaluado y documentado. En caso de riesgo de arco eléctrico, el objetivo principal del EPP es reducir las lesiones por quemaduras al trabajador a un nivel de quemadura curable.

El EPP puede o no proporcionar protección ante un evento de falla. Es importante que los trabajadores entiendan el uso, el cuidado y las limitaciones del EPP. Los trabajadores no deben tratar al EPP como un sustituto del sentido común y de las prácticas de trabajo seguro.

El EPP más común y aceptado por la industria que protege el cuerpo es la ropa resistente a las llamas (FR). La resistencia a la llama es la característica de un paño que hace que no se quemé en el aire. Esto se consigue tratando la fibra de tela, como el algodón, con productos químicos retardantes a la llama. La ropa sintética FR también se utiliza ampliamente.

Propósito del tejido resistente a las llamas:

1. Resistencia a las llamas y autoextinguimiento.
2. Proporciona aislamiento térmico al cuerpo a partir de radiación térmica.

5.4.1. Normas sobre equipos de protección personal

Algunas de las normas sobre EPP se describen brevemente en las siguientes secciones. Es importante que la selección y la formación del PPE se lleven a cabo bajo la dirección de un profesional de la seguridad con experiencia que conozca todas las normas aplicables y debidamente certificado por autoridades competentes.

El EPP debe cumplir con códigos y normas nacionales e internacionales con la intención de aumentar la seguridad y fiabilidad de su uso.

Las normas definidas son tomadas de la tabla 130.7(C)(14) de la NFPA 70E-2018. Las demás contienen información sobre cuidado, inspección, prueba y fabricación del EPP. Todos los proveedores o fabricantes de EPP deben demostrar que están certificadas de conformidad con un estándar de producto apropiado a según los siguientes métodos (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003):

- Autodeclaración con la declaración de conformidad del proveedor

- Autodeclaración bajo un sistema de gestión de calidad registrado y pruebas de productos por un laboratorio acreditado y una declaración de conformidad del proveedor
- Certificación por una organización de certificación externa independiente acreditada

Todos los proveedores o fabricantes de EPP deberán proporcionar la siguiente información en su producto:

- Fabricante.
- Estándares de desempeño.
- Rango nominal de resistencia al arco.
- Identificadores.
- Instrucciones de cuidado.

En relación con la exposición a peligro eléctrico, cuando el riesgo asociado con ese peligro no es reducido adecuadamente mediante los requisitos de instalación aplicables, deben ser provistos y se deben utilizar elementos de protección diseñados y elaborados para la parte específica del cuerpo que van a proteger y para el trabajo que se va a realizar. A continuación, se citan las normas más comunes utilizadas para la regulación de los tipos y propiedades del EPP (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003):

OSHA 1910.132

Esta norma define las propiedades y características de la protección frontal del cuerpo. Regula las condiciones necesarias de seguridad para ambientes y procesos peligrosos, peligros químicos, peligros radiológicos o irritantes, recomendación de ropa protectora, dispositivos respiratorios, escudos protectores y barreras. A su vez, define

las responsabilidades que posee el propietario o encargado de mantenimiento, el cual debe velar por la integridad de estos.

La evaluación de peligro debe quedar documentada al igual que la formación de los empleados, cuándo es necesario el EPP, qué EPP es necesario, cómo utilizar el EPP correctamente y cómo cuidar, mantener y desechar el EPP. Cada empleado deberá demostrar su comprensión de la formación. El reentrenamiento puede ser necesario dependiendo de los cambios en el lugar de trabajo o en el EPP. La formación requerida deberá estar certificada.

OSHA 1926.100

En zonas donde exista un posible peligro de lesiones en la cabeza por impacto, o por caída o volcadura de objetos, etc., estarán protegidos por cascos protectores.

Los cascos deben proteger a los empleados contra el impacto o penetración de objetos caídos según las especificaciones contenidas en el American National Standards Institute, Z89.1-1969, Requisitos de seguridad industrial para la protección de la cabeza.

Los cascos para la protección de la cabeza de los empleados expuestos a descargas eléctricas de alta tensión y quemaduras deberán cumplir con las especificaciones contenidas en el American National Standards Institute, Z89,2-1971 (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

NFPA 70E - 2018

NFPA 70E Artículo 130.7: este artículo brinda las recomendaciones del EPP mediante la evaluación de riesgo de choque y la evaluación de riesgo de relámpago de arco.

El EPP debe tener un valor de resistencia al arco que permita la movilidad y la visibilidad, y debe proporcionar protección en todas las partes del cuerpo.

Astm American Society for Testing and Materials (ASTM)

Esta norma desarrolla estándares que especifican la calidad de diversos materiales, incluyendo materiales de seguridad equipos de protección personal. Las siguientes normas son aplicables a los equipos de protección contra riesgos de arco.

ASTM F1506: estándar de especificación de rendimiento para materiales de la ropa para uso por trabajadores eléctricos expuestos a peligros térmicos relacionados. Esta norma especifica los requisitos para la ropa resistente a las llamas. Hay tres requisitos básicos en esta norma:

- a) La tela sometida a prueba debe autoextinguirse en menos de 2 segundos después de que se haya eliminado la fuente de ignición.
- b) La longitud de carbonización para el método de prueba ASTM D6413 debe ser inferior a 6 pulgadas. Una muestra de tela de 12 pulgadas de longitud se cuelga verticalmente en un espacio cerrado y la parte inferior está expuesta a una llama de metano durante 12 segundos. La longitud de la tela destruida por la llama es la longitud de carbonización. Esta prueba también se conoce como la prueba de llama vertical estándar.
- c) Además de cumplir con estas pruebas de paso/error, la tela también se prueba para el valor de rendimiento térmico de arco según ASTM F1959. Los

fabricantes están obligados a informar de los resultados de la prueba a los usuarios finales del material como una clasificación de arco en una etiqueta de prenda.

Cualquier tejido que cumpla con la norma ASTM F1506 cumple con la norma OSHA 1910.269.

ASTM F1959: método para determinar el rendimiento térmico de los materiales textiles para el vestido por arco eléctrico y los peligros térmicos relacionados. Esta prueba determina cuánta energía incidente es bloqueada por el tejido antes de que el usuario de la ropa protectora pueda tener una quemadura de segundo grado. La cantidad de energía bloqueada se indica como valor de rendimiento térmico de arco. Si la tela se rompe, el valor también se denomina umbral de energía de apertura.

ASTM F1891: especificación estándar para ropa de lluvia resistente al arco y a las llamas. Consulte ASTM F1506 para los tres requisitos básicos. Cualquier tejido que cumpla con el ASTM F1506 cumple con OSHA 1910.269.

ASTM F1449: guía estándar para el cuidado y mantenimiento de ropa con resistencia térmica y arco. En esta guía, se ofrecen recomendaciones para el cuidado y mantenimiento de prendas resistentes a las llamas, la temperatura y el arco. La norma se centra en el proceso de lavado industrial y también identifica criterios de inspección que son importantes para el desempeño de la ropa.

ASTM F2413: norma de protección de choques eléctricos bajo condiciones secas del calzado contra peligros eléctricos que cumpla lo establecido en esta norma, de especificación de requerimientos de desempeño para calzado de protección (seguridad) con puntera, puede constituir una fuente secundaria de protección contra (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

5.4.2. Factores que afectan el nivel de protección en la selección del EPP

Se debe utilizar ropa y equipos que protejan al trabajador contra los peligros de choque y relámpagos de arco. Si se requiere ropa resistente al arco, ésta debe cubrir las partes del cuerpo al igual que toda la ropa inflamable, lo cual permite, a la vez, movimiento y visibilidad como fue explicado anteriormente. A continuación, se explican algunas de las características que posee el EPP (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003):

Material

Los tejidos sintéticos no resistentes a las llamas se queman, lo cual provoca el derretimiento y goteo de los mismos tejidos y pueden causar quemaduras graves en la piel. La tela resistente a las llamas se carboniza por el calor del arco, pero no continuará ardiendo después de que cese el arco. La quema de prendas puede causar mayores lesiones en la piel que la exposición directa al calor desde el arco. Ante esto, es posible considerar el tipo de material más usado en ropa que, a su vez, posea retardo a la llama como es el tejido tipo Nomex.

Ésta debe cumplir los requisitos estipulados en 130.7(C)(14) y 130.7(C)(12) de la NFPA 70E.

Peso

El peso de la tela FR se especifica en peso por área de la unidad (onzas/yarda cuadrada o g/m^2). Los pesos más altos proporcionan más aislamiento térmico.

Capas

Se debe usar prendas con valor de resistencia al arco proporcionando un sistema de capas. Un sistema de capas puede incluir ropa interior de algodón, una camisa y pantalones de algodón, y un overol resistente al arco cuando se requiere realizar tareas específicas puede usarse capas adicionales. Esto solo se logra en las capas externas, pues las internas llegan a ser del material ordinario (NFPA 70E, 2018).

En este caso, se define que las prendas elegidas deben proporcionarse con doble capa con composición 50% poliéster, 27% modacrylico, 22% algodón, 1% fibra antiestática, retardante de llamas y antiestática para lugares que posean 8 cal/cm² o menos, la proporción cambia para valores mayores (40 cal/cm²) a este donde la composición del tejido exterior es de 75% con tejido Nomex preferiblemente, 13% modacrylico, 10.5% algodón, 1% fibra antiestática, retardante de llamas y antiestática.

Cubrimiento

La ropa debe cubrir las áreas potencialmente expuestas tan completamente como sea posible (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

5.5. Equipo de protección contra relámpagos de arco

Los requerimientos de EPP de 130.7 (NFPA 70E) tiene como propósito guardar la integridad del trabajador eléctrico de las quemaduras haciendo posible la supervivencia de este. Los requisitos de EPP no hacen referencia a la protección contra traumatismos físicos que no sean por exposición a los efectos térmicos de un relámpago de arco. Seguidamente, se presentan las partes del cuerpo que el EPP debe resguardar proporcionando así dicho elemento (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

5.5.1. Protección de la cabeza, la cara, el cuello y el mentón (área de la cabeza)

El personal de mantenimiento eléctrico debe usar ropa no conductiva en las diferentes partes del cuerpo que exista el riesgo de sufrir lesiones. Todos los dispositivos deben ser resistentes al arco y deben cumplir según el artículo 130.7(C)(10)(b) y (c) de la NFPA 70E-2018.

En la protección a nivel de la cabeza, debe usarse un pasamontaña con protector facial, los cuales deben ser resistentes. Cuando la parte de atrás de la cabeza esté dentro de la frontera de relámpago de arco, se permite el uso de una capucha con valor de protección al arco, en lugar de la protección inicialmente citada (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003). Cuando se excedan las 12 cal/cm^2 (50.2 J/cm^2), se deben utilizar los elementos contemplados en la figura 69.



Fig. 69. Ejemplos de protectores faciales para altas categorías o energías incidente

Fuente: Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003

Los protectores faciales deben ser resistentes al arco con una protección envolvente para resguardar las partes a nivel de la cara.

5.5.2. Protección de los ojos

Debe usarse siempre protección para los ojos en cualquiera que sea el escenario.

5.5.3. Protección auditiva

Es necesario que se use protección auditiva, ya que es posible que la explosión genere pérdida temporal de la percepción auditiva debido al estallido.

5.5.4. Protección de manos y brazos

Debe proporcionarse protección en las manos y brazos de acuerdo con el artículo 130.7(C)(7)(a), (b) y (c) de la NFPA 70E-2018, lo cual estipula que los guantes deben ser resistentes al arco.

Al utilizar guantes de hule aislantes, éstos deben cubrirse con protectores de cuero. Tienden a soportar valores de desempeño térmico al arco de 10 cal/cm^2 (41.9 J/cm^2).

Los protectores de cuero usados sobre los guantes aislantes de hule brindan una protección adicional contra relámpagos de arco para las manos ante la exposición a arcos eléctricos (NFPA 70E, 2018).

5.5.5. Protección contra choque

Al utilizar protección en manos y brazos, deben tener un nivel nominal de aislamiento (clase) acorde con el nivel de tensión al que estarán expuestos según la tabla 16 (NFPA 70E, 2018).

Tabla 16. Clasificación de voltaje de guantes de seguridad contra arco y choque eléctrico

Clasificación de voltaje de guantes	Tensión máxima de trabajo (V)	Test de prueba (kV)	Color de capa
Clase 00	500	2.5	beige
Clase 0	1,000	5.0	rojo
Clase 1	7,500	10	blanco
Clase 2	17,000	20	amarillo
Clase 3	26,500	30	verde
Clase 4	36,000	40	naranja

Fuente: Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003

Para los sistemas de baja tensión (460V), se seleccionan los guantes tipo 00 como se indican en las etiquetas de advertencia de destello de arco. Además, para la parte de mediana tensión (4160V), se definen los guantes tipo 1. Así mismo, mediante el color respectivo, se identifica su clasificación de acuerdo con la tabla anterior.



Fig. 70. Guantes (caucho y cuero) seguridad contra arco y choque eléctrico

Fuente: Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003

5.5.6. Protección contra relámpago de arco

La protección para manos y brazos debe utilizarse siempre que exista la posibilidad de exposición a quemaduras producidas por relámpago de arco cumpliendo con el artículo 130.7(C)(10)(d) y la vestimenta por medio del artículo 130.7(C)(6) (NFPA 70E, 2018).

5.5.7. Uso y mantenimiento

El EPP debe mantenerse en buenas condiciones. Deben comprobarse por seguridad para señalar si existe algún daño o deterioro. Éstos deben ser sometidos a pruebas eléctricas según lo establecido en la tabla 130.7(C)(7) (NFPA 70E, 2018).

5.5.8. Protección de los pies

El calzado de cuero para uso industrial o calzado dieléctrico o ambos proveen alguna protección a los pies y éste debe usarse a exposiciones mayores a 4 cal/cm²(16.75 J/cm²) (NFPA 70E, 2018).



Fig. 71. Calzado de seguridad contra arco y choque eléctrico

Fuente: Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003

5.6. Selección de equipo de protección personal

Debe utilizarse el valor del EPP requerido para tal exposición de energía incidente, con base en la exposición a la energía incidente asociada con la tarea específica. De requerir equipo adicional, es necesario solicitarlo para alguna parte del cuerpo desprotegida.

La tabla 130.5(G) de la NFPA 70E (2018) identifica los requisitos de vestimenta de protección contra relámpago de arco y otros EPP. Para más información sobre la selección de ropa de protección contra relámpago de arco y otros (EPP), ver el anexo informativo H de la NFPA 70E-2018.

El traje debe permitir la facilidad de su uso, además de dar protección contra arco, siendo éste el apropiado.

De acuerdo con los ajustes de las protecciones producto de la coordinación de protecciones y los resultados del estudio de arco eléctrico en la tabla 14, los ramales que reúnen las condiciones para ser categoría 1 de peligro de arco son todos los sistemas de baja tensión (460V). La única unidad en media tensión que posee categoría 1 es la CCM Trituración y todo el cuarto eléctrico asociado. Los anteriores lugares deben reunir los siguientes elementos que componen el EPP respectivo.

Tabla 17. EPP con categoría 1 de seguridad contra arco y choque eléctrico

EPP Categoría 1	
<p>Clasificación mínima de arco de 4 cal / cm²</p> <p>Ropa con clasificación de arco</p> <ul style="list-style-type: none"> -Camisa manga larga y pantalones resistentes al arco. -Protector facial o capucha. -Chaquetas impermeables con resistencia al arco. <p>Equipos de protección</p> <ul style="list-style-type: none"> -Anteojos de seguridad. -Tapones para el oído. -Guantes de cuero tipo cat 00 industrial. -Calzado de cuero. -Casco. 	

Fuente: NFPA 70E 2018, tabla 130.7 (C)(15)(c), Graphic Products, 2015

Por otro lado, los ramales que reúnen las condiciones por objeto de cálculo para ser categoría 2 de peligro de arco son el CCM MOLINO CRUDO y el CCM HORNO ENFRIADOR, considerando a los cuartos eléctrico en toda su área. Los anteriores lugares deben reunir los siguientes elementos que componen el EPP respectivo.

Tabla 18. EPP con categoría 2 de seguridad contra arco y choque eléctrico

EPP Categoría 2	
<p>Clasificación mínima de arco de 8 cal / cm²</p> <p>Ropa con clasificación de arco</p> <ul style="list-style-type: none"> -Capucha del traje o protector facial y pasamontañas. -Chaqueta o forros de cascos con valor de resistencia al arco. -Pantalones y camisa de manga larga. <p>Equipos de protección</p> <ul style="list-style-type: none"> -Tapones. -Guantes de cuero para uso industrial. -Anteojos de seguridad o gafas de seguridad. -Casco. -Calzado de trabajo de cuero. 	

Fuente: NFPA 70E 2018, tabla 130.7 (C)(15)(c), Graphic Products, 2015

Seguidamente, los ramales que reúnen las condiciones por objeto de cálculo para ser categoría 3 de peligro de arco son el CCM MOLINO CEMENTO y el CCM MOLINO COKE considerando a los cuartos eléctrico en toda su área. Los anteriores lugares deben reunir los siguientes elementos que componen el EPP respectivo.

Tabla 19. EPP con categoría 3 de seguridad contra arco y choque eléctrico

EPP Categoría 3	
<p>Clasificación de arco mínima de 25 cal/cm².</p> <p>Ropa clasificada con arco seleccionada para que la calificación de arco del sistema cumpla la calificación de arco mínima requerida.</p> <p>Ropa con clasificación de arco</p> <ul style="list-style-type: none"> -Camisa de manga larga. -Pantalones. -Mameluco. -Guantes resistentes al arco. -Capucha del traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco. -Chaqueta o forros de cascos con valor de resistencia al arco. -Chaqueta. -Pantalones de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco. <p>Equipos de protección</p> <ul style="list-style-type: none"> -Casco. -Anteojos de seguridad o gafas de seguridad. -Protección auditiva (tapones). -Calzado de trabajo de cuero. 	

Fuente: NFPA 70E 2018, tabla 130.7 (C)(15)(c), Graphic Products, 2015

Por último, pero no menos importante, la categoría de peligro de arco en la SUBESTACIÓN PRINCIPAL por sus condiciones y cantidad de energía incidente es de categoría 4, considerando el cuarto eléctrico en toda su área y la zona donde se ubican

los bancos de capacitores aproximadamente a 20m. El anterior lugar debe reunir los siguientes elementos que componen el EPP respectivo.

Tabla 20. EPP con categoría 4 de seguridad contra arco y choque eléctrico

EPP Categoría 4	
<p>Clasificación de arco mínima de 40 cal/cm².</p> <p>Ropa clasificada con arco seleccionada para que la calificación de arco del sistema cumpla la calificación de arco mínima requerida.</p> <p>Ropa con clasificación de arco</p> <ul style="list-style-type: none"> -Camisa de mangas largas y pantalones resistentes al arco o mameluco. -Protector facial resistente al arco o capucha del traje de protección contra relámpago de arco. -Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco. <p>Equipos de protección</p> <ul style="list-style-type: none"> -Casco. -Anteojos de seguridad o gafas de seguridad. -Protección auditiva (tapones). -Guantes de cuero para uso industrial. -Calzado de trabajo de cuero. 	

Fuente: NFPA 70E 2018, tabla 130.7 (C)(15)(c), Graphic Products, 2015

En las secciones anteriores de este capítulo, se explican las propiedades y características relacionadas con la composición química de la ropa y especificaciones de uso de acuerdo con la energía que soportan, ya que no es suficiente definir los elementos en recomendación para dicha categoría de arco.

5.6.1. Otros equipos de protección

Los empleados deben utilizar equipos de manipulación aislados cuando trabajen dentro de la frontera de aproximación restringida donde las herramientas pueden hacer contacto no intencional con los equipos que transportan o trasiegan energía. Se deben proteger las herramientas aisladas para prevenir el daño de sus materiales aislantes (Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003).

Las herramientas aisladas deben tener niveles nominales de aislamiento acorde con el nivel de tensión al que se exponen (NFPA 70E, 2018).

5.6.1.1. Varas reforzadas con fibra de vidrio

Deben ser de material de fibra de vidrio o plástico reforzado cumpliendo con las normas y código vigentes.



Fig. 72. Pértiga o vara de fibra de vidrio de seguridad contra arco y choque eléctrico.

Fuente: Davis, Saint Pierre, & Castor, 2003

5.6.1.2. Escaleras portátiles

Debe ser no conductiva cuando se utilicen dentro de la frontera de aproximación limitada, o donde el empleado o la escalera podrían hacer contacto con conductores o partes de circuitos eléctricos energizados expuestos (NFPA 70E, 2018).

5.6.1.3. Escudos protectores

Deben establecerse escudos o barreras protectoras que aislen y protejan del peligro de choque, quemaduras u otros mientras un empleado esté trabajando dentro de la frontera de aproximación limitada de conductores o partes de circuitos energizados con los que podría hacerse contacto no intencional (NFPA 70E, 2018).

5.6.1.4. Equipos de hule aislante

Deben seleccionarse según los códigos y normas listadas en la tabla 130.7(G) de la NFPA 70E.

5.6.1.5. Barreras físicas o mecánicas

Las barreras físicas o mecánicas (fabricadas en campo) deben instalarse a una distancia no inferior a la de la frontera de aproximación limitada indicada especificada en la tabla 130.4(D)(a) y tabla 130.4(D)(b) de la NFPA 70E-2018, o bien, los conductores o partes de circuitos energizados deben ponerse en una condición de trabajo eléctricamente segura.

CAPÍTULO VI

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Con base en las normas IEEE 1584-2018 Guía para realizar cálculos de peligro de arco eléctrico y NFPA 70E Norma para la seguridad eléctrica en lugares de trabajo, y la herramienta de modelado eléctrico EasyPower versión 10.3, se realizó el estudio de arco y choque eléctrico de la empresa Cemex Costa Rica, cuya planta de producción se ubica en la zona de Colorado de Abangares.

Mediante la normativa anteriormente citada se evaluó las condiciones mínimas que un lugar de trabajo debe poseer, anticipándose a las posibles causas de un incidente o accidente eléctrico donde el encargado de la tarea puede sufrir quemaduras o incluso la muerte.

Se realizó la recolección de la información respectiva de los elementos que componen el sistema eléctrico, tanto como motores, transformadores, dispositivos de desconexión eléctrica en baja, mediana y alta tensión, distancia, calibre y tipo de asilamiento de los conductores que alimentan los CCM, valor de cortocircuito trifásico y razón X/R de la fuente de corriente más cercana a la subestación aproximadamente a 3 km de la subestación de Cemex. Estos datos son validados y actualizados en el diagrama unifilar de la empresa.

Se calculó la corriente de cortocircuito trifásica en cada bus de alimentación. Además de esto, se lograron obtener los ajustes para la coordinación de los dispositivos de sobrecorriente, teniendo en cuenta los diferentes escenarios del sistema eléctrico y los intervalos de tiempo entre zonas de protección con la ayuda del *software* de Excel para los ajustes preliminares y el *software* de modelado a través de la visualización de las curvas de operación de las protecciones eléctricas y de los elementos por proteger en las TCC.

Por consiguiente, se seleccionó la forma de atribuir una mayor confiabilidad en la seguridad eléctrica centrandó la atención en nuevos métodos de protección eléctrica, usando sensores ópticos para la captación de la iluminancia producida por un relámpago de arco y controles para permitir el disparo instantáneo cuando el personal está cerca de equipos energizados siempre que se logre las pruebas de disparo pertinentes con la intención de no alterar la selectividad de las demás protecciones. Lo anterior en sistemas nuevos y existentes debido a que el costo de implementación es pequeño en comparación con los beneficios de tiempos de ajuste reducidos y menores peligros de arco eléctrico.

Se seleccionó la configuración de los electrodos del tipo vertical para la liberación de energía incidente, con base en el comportamiento de la explosión con respecto al tiempo, donde la configuración vertical genera una acción más lenta por parte de la masa explosiva térmica haciendo que el margen de tiempo de la explosión sea captado por los fusibles limitadores. En caso contrario, la configuración horizontal genera mayor energía incidente y tiende a ser más rápida al crearse.

Se determinaron las distancias de aproximación limitada, restringida, la frontera de relámpago de arco y la distancia de trabajo plasmadas en la tabla 14 del capítulo IV y se explicaron las consideraciones o los requisitos que se deben tener para acceder a éstas siendo trabajador calificado o no.

Se generaron las etiquetas de advertencia de arco eléctrico las cuales poseen los valores de distancias de trabajo, límites de seguridad y categoría de riesgo para cada zona del sistema eléctrico de Cemex emitidas por el *software* de simulación EasyPower en su versión 10.3.

Se eligió el EPP requerido para cada CCM y subestación a través del cálculo o análisis de arco y choque eléctrico el cual brinda protección para la cara, cabeza cuerpo,

mentón, pies y brazos. A partir de los estudios realizados, se definen las propiedades de los materiales de fabricación del EPP acordes con la cantidad de energía incidente y la tensión del sistema, como es el caso de los guantes. Esta energía incidente, a su vez, es reducida o limitada por el ajuste mayormente instantáneo de los relés de protección, tomando en cuenta el tipo de curva deseada y los intervalos entre protecciones para lograr la coordinación selectiva apropiada.

6.2. Recomendaciones

Realizar la instalación del sistema de electrodos con orientación vertical, como mínimo requisito. Esto haría viable el análisis y estudio de arco de acuerdo con la normativa respectiva.

En molino Coke, el relé 2-A no posee las condiciones para coordinar con las demás protecciones, además de tener un rango muy limitado de configuraciones de curvas. Éste no puede reducir el TD aún más, por lo cual se recomienda actualizar estas protecciones por relés del tipo numérico.

En la protección de baja tensión en servicios auxiliares el ajuste de rango instantáneo tiene menor alcance. Además, posee un alto margen de tiempo de coordinación con respecto a la protección aguas arriba más cercanas, por tanto, se recomienda cambiar esta protección.

Se recomienda realizar un estudio de arranque de motores para determinar, con más precisión, los ajustes al plantear un nuevo panorama para reducir aún más el peligro por arco eléctrico latente.

Para efectos de poseer varios valores de energía incidente o diferentes categorías de protección en una misma área, debe considerarse la peor condición del caso con el

fin de reducir costos en la compra de EPP. Sin embargo, es importante mencionar que un EPP categoría 3 o 4, proporciona protección para categorías menores, pero a su vez es difícil de manejar, lo cual puede ser factor en la causa de un accidente.

Utilizar dispositivos de activación instantánea por separado para actividades de mantenimiento. Dicho método es muy seguro y de bajo coste económico para su instalación. Una vez instalado, se deben realizar pruebas de apertura de los interruptores o relés de sobre corriente con el fin de establecer la selectividad entre éstas.

En caso de realizarse cambios o la reposición de algún elemento del sistema eléctrico presente, se requiere del profesional correspondiente que verifique y valide la información contenida en este documento para corroborar el adecuado proceder e interpretación de los resultados. Además, para considerar los ajustes de las protecciones, se debe, al menos, poseer el sistema de electrodos instalados. En caso contrario, este estudio no es aplicable.

Se requiere de entrenamiento o de la capacitación correspondiente al personal de mantenimiento del uso y las condiciones correctas del EPP. Así mismo, se recomienda utilizar herramientas de trabajo que cumplan con las categorías de aislamiento aquí plasmadas.

Realizar la actualización de los estudios cada 5 años como máximo, lo cual es recomendado por la NFPA 70E -2018. Debido a cambios en el sistema de distribución eléctrica, esto afectaría los resultados de energía incidente.

Se recomienda integrar un plan de seguridad ocupacional eléctrico acorde con los requerimientos de arco y choque eléctrico, donde se manifiesten los protocolos por seguir en caso de accidente o el proceder de la actividad laboral.

Todos los datos generados por este estudio son requeridos para el permiso de trabajo eléctrico. Esto hace que los protocolos de seguridad sean más rigurosos buscando satisfacer el cumplimiento de las prácticas seguras de trabajo.

Se deben vigilar las condiciones del EPP verificando la vida útil de cada elemento o dispositivo según las exigencias de ASTM.

Es recomendable actualizar el aporte de corriente de cortocircuito de la compañía distribuidora para analizar los escenarios posibles ante un evento de falla.

Bibliografía

- ABB (2011). *Distribution Automation Handbook, Power System Protection: Vol. Section 8.2 Relay Coordination*. ABB. Recuperado desde: <https://electrical-engineering-portal.com/res/Relay-Coordination-ABB.pdf>
- AbdelbariElniema, A., Mohamed Babiker, A. y Mohamed Ibrahim, M. (2017). *Baleela Oil-Field Networks Overcurrent Protection Coordination*. Bachelor of Science. University Of Khartoum.
- ALSTOM GRID (2011). *Network Protection & Automation Guide* [Libro electrónico]. Published by Alstom Grid. Recuperadodesde: <https://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/electrical-engineering/automation-guide>
- Ameer Aqeel Kamoona, Ahmed Najmalfadli, Israa Ali Alshabeeb (2020). "Nuevo método para la coordinación de relés OC". *Revista de Ingeniería Eléctrica e Informática*, vol. 2020, ID de artículo 6312975, 11 páginas. Recuperadodesde: <https://doi.org/10.1155/2020/6312975>
- Amirkabir University of Technology, &MONTASER KOUHSARI, S. (2019). *Unit Protection Differential Relays* [Diapositivas]. Linkedin. Recuperado desde: [http://www.tomcad.com/linkedin/week7POWERSYSTEMPROTECTION\(DifferentialRelays\).pdf](http://www.tomcad.com/linkedin/week7POWERSYSTEMPROTECTION(DifferentialRelays).pdf)
- Angulo Carpio, J. (2016). *Actualización de diagramas unifilares. Estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones de los edificios A, B, C y D de la acometida principal de la Sede Central del Tecnológico de Costa Rica*. Informe

de Práctica de Especialidad para optar por Título Ingeniero en Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Barrantes, J.C. (2014). *Estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones en CVG ALUNASA*. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio", Costa Rica.

Baruti, G. (2017). *Overcurrent Protection*. SeminarPaper. Univerza v Ljubljani, Slovenija.

Bradylatinoamerica.com (2014). *Requisitos para etiquetado de arco eléctrico*. Recuperado desde: <http://www.bradylatinamerica.com/es-mx/normatividad/arco-electrico/requisitos-para-etiquetado-de-arco-el%C3%A9ctrico>

Buff, J., & Zimmerman, K. (2008). *Application of Existing Technologies to Reduce Arc-Flash Hazards* (p. 9). New Orleans, Louisiana: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Campbell, R.B. (Marzo, 2015) *Occupational Injuries From Electrical Shock and Arc Flash Events*. Final Report, Fire Protection Research Foundation, Quincy, Massachusetts, U.S.A.

Cementos Mexicanos, CEMEX (s.f.) "Política de seguridad industrial y salud". Recuperado desde: <https://www.cemex.com/documents/20143/245957/PoliticaSaludSeguridadCemex+%281%29.pdf/c4c5eb0f-0ba4-6f15-5b59-7a14f61dfe04>

Csanyi, E. (2020). "The essentials of electrical systems in cement plants". Electrical Engineering Portal. Recuperado desde: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-cement-plants>

Csanyi, E. (2018, 19 marzo). *Why Ground Fault Protection Matters and Which Scheme for Sensing Ground Faults To Choose*. Electrical Engineering Portal. Recuperado desde: <https://electrical-engineering-portal.com/scheme-sensing-ground-faults>

Davis, C., Saint Pierre, C., & Castor, D. (2003). *Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards*. EasyPower.

Department of Veterans Affairs U.S. (2015, agosto). *Overcurrent Protective Device Coordination Study* (N.º 640-15-140). Recuperado desde: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwirk_jW_6XrAhXLpFkKHfR9CqUQFjAAegQIBRAB&url=https%3A%2F%2Fwww.vendorportal.ecms.va.gov%2FFBODocumentServer%2FDocumentServer.aspx%3FDocumentId%3D3289021%26FileName%3DVA261-17-B-0138-A00001016.pdf&usg=AOvVaw0ukVfyDRLjz32gQVH7Eg0A

Dvorak, P. (2021). *ABB's Emax 2 and Arc Guard System TVOC-2 mitigate electric arc flash*. Recuperado el 29 de enero, 2021, desde: <https://www.windpowerengineering.com/abbs-emax-2-arc-guard-system-tvoc-2-mitigate-electric-arc-flash/>

EEEGUIDE. (2014). *Differential Relay*. Online Electrical and Electronic Study. Recuperado desde: <https://www.eeeguide.com/differential-relay/>

- Electrical 4U (2018, 31 agosto). *Pick Up Current | Current Setting | Plug Setting Multiplier and Time Setting Multiplier of Relay*. Recuperado desde: <https://www.electrical4u.com/pick-up-current-current-setting-plug-setting-multiplier-and-time-setting-multiplier-of-relay/>
- Electrical Safety Foundation International (2018). *Workplace Injury & Fatality Statistics*. ESFI. Recuperado desde: <https://www.esfi.org/workplace-injury-and-fatality-statistics#Introduction>.
- Electrical Testing and Engineering Network (2017, 10 diciembre). *PPE Hazard RiskCategories*. Testguy.net. Recuperado desde: <https://testguy.net/content/275-Electrical-Shock-and-Arc-Flash-PPE-Overview>
- GhulamAmjad, H. (2021). *Methods for Arc-Flash Prediction in Medium Voltage and Low Voltage Switchgear* (1st ed., p. 10). Espoo, Finland: Aalto University publication series DOCTORAL DISSERTATIONS 221/2015.
- González, L. (2018). “Estudios de Arco Eléctrico (Arc Flash) NFPA 70E”. Subgerencia de Ingeniería y Desarrollo de Comulsa Chile. Recuperado desde: <http://www.emb.cl/hsec/articulo.mvc?xid=913&edi=40&xit=nfpa-70e-estudios-de-arco-electrico-40arc-flash41>
- Graphic Products (2015). *Arc Flash PPE Categories from NFPA 70E (2015)* [Ebook] (p. 1). Recuperado desde: <https://es.scribd.com/document/385025721/QRG-Arc-Flash-PPE-Arcppe-1>.
- Headquarters, Department of the Army (1991). “Coordinated Power Systems Protection (Technical Manual No. 5-811-14)”. Washington, DC.

- Hedding, K., Zimmerman, G.J., Bartok, M., Basler, G. y Benmouyal. (2009). *Protection Considerations to Mitigate Arc-Flash Hazards* (p. 7). Technical Report to the Substation Subcommittee of the Power Systems Relaying Committee.
- Hughes, B., Skendzic, V., Das, D., & Carver, J. (2011). *High-Current Qualification Testing of an Arc-Flash Detection System* (p. 10). Spokane, Washington: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- IEEE 1584 (2018). “Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations”. IEEE Standard, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY.
- IEEE 551 (2006). “IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems. United States of America.
- IEEE Std 1015-1993 (2005). *IEEE Recommended Practice for Applying Low-Voltage Circuit Breakers Used in Industrial and Commercial Power Systems* (IEEE Blue Book)
- IEEE Std C37.95 (2002). *IEEE Guide for Protective Relaying of Utility-Customer Interconnections*.
- IEEE Std C37.108 (2002). *IEEE Guide for the Protection of Network Transformers*.
- IEEE Std C37.96 (2000). *IEEE Guide for AC Motor Protection*.
- IEEE Std C37.91 (2000). *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses*.
- IEEE Std C37.99 (2000). *IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks*.
- IEEE Std. 242 (2001) *Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE, New York.
- IEEE Std C37.110 (1996). *IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes*.

IEEE Std C37.112 (1996). *IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays*.

IEEE Std 399 (1997). *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis* (IEEE Brown Book)

IEEE 141 (1994). “IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”. UnitedStatesofAmerica.

Induni Vizcaíno, J. (2013, enero). *Estudio de “arc flash” en una instalación para centro de datos en baja tensión utilizando la norma IEEE 1584-2002* (TFG).
Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Eléctrica. Recuperado desde: <https://ruie.ucr.ac.cr/catalogo/Record/INII-CEDI-CD-20476>

Lackovic, Ch. (s.f.) *Introduction to Protective Device Coordination Analysis*. CED Engineering Continuing Education and Development, Inc., Course No: E04-030, Stony Point, NY 10980.

Lewis Blackburn, J., & J. Domin, T. (2006). *Protective Relaying* (3.^a ed.) [Libro electrónico]. Taylor & Francis Group. Recuperado desde: <https://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/relays/protective-relaying-principles-apps>

National Fire Protection Association (NFPA) (2018) “Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, Quincy, MA

National Institute of Building Sciences (2020). “Coordinated Power System Protection”. Washington, DC: Department of Defense. Recuperado desde: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-guide-specifications-ufgs/ufgs-26-28-01-00-10>.

- NFPA 70B (2015). *Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance*. National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- NFPA 70 (2005). *National Electrical Code*. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts.
- N-Sci Technologies Inc. (2019, 4 octubre). *Arc Flash Study*. nsci.ca. Recuperado desde: <https://c1sinc.com/blog/understanding-arc-flash-and-arc-flash-protection>
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA) (s.f.) “Occupational Safety and Health Standards”. 29CFR, Part 1910.333, Subpart S. Electrical.
- Pangonilo, S. (2013). “Time-Current Curves Using Excel 2013”. *Institute of Integrated Electrical Engineers VPRM Engineering, Incorporated Philippines*, 6.
- Revetti, R. y Rogelio R. (2010). *ESTUDIO DE COORDINACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIONES ASOCIADOS AL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN A4 DE LA SUBESTACIÓN ELEGGUA 12,47 kV*. (p. 4). Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Rodríguez, E. (2018). *Estudio de arco eléctrico en la subestación Donato (Tunja) para la empresa de energía de Boyacá EBSA S.A. E.S.P.* Duitama, Boyacá, Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Saint Pierre, C., Shrestha, S., &Majd, A. (2015). *Practical Solution Guide To Arc Flash Hazards* [Ebook] (2nd ed., p. 10). Mohawk St, Tualatin OR: EasyPower, LLC.
- Shah, K. (2018). “Low Impedance Differential Protection Relay Settings for Transformer Differential Protection”. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 7, 1-10. Recuperado desde: https://www.ijareeie.com/upload/2018/may/31_1_Low.pdf

Smith, T. (2006) "Analyzer". The ABC's of Overcurrent Coordination, EPOWERENGINEERING. Recuperadosde: www.epowerengineering.com

Smith, T. (2006). *The ABC's of Overcurrent Coordination* (Analyzer ed.) [Libro electrónico]. Published for electrical engineers by EPOWERENGINEERING. Recuperadosde: <https://www.epowerengineering.com>

Tawfeeq, M. (2019). *Power System Protection*. [Lecture Notes], *Faculty of Engineering -Department of Electrical Engineering*. Philadelphia University. Recuperadosde: <http://www.philadelphia.edu.jo/academics/mlazim/page.php?id=12>

Ueng, T., Chiu, Y., & Lin, Y. (2021). ARC-FLASH HAZARD AND PROTECTION FOR ELECTRIC SWITCHBOARD AT NSRRC (p. 3571). Copenhagen, Denmark.

Walker, C. (2021). *Arc Flash Energy Reduction Techniques Zone Selective Interlocking & Energy-Reducing Maintenance Switching* (p. 13). Moon Township: Eaton Corporation.

Wilkins, R. Allison, M. and Lang, M. (2005). *Effect of Electrode Orientation in Arc Flash Testing* (p. 8). Newburyport MA: Ferraz Shawmut, Inc.

Anexo 1

En esta parte, se presentan las diferentes formas de coordinación entre protecciones eléctricas según su tipo, orden de activación e intervalos de tiempo recomendado de acuerdo con el documento de Smith, T. (2006). *The ABC's of Overcurrent Coordination*

Ejemplo de selectividad 1

Las combinaciones incluyen los dispositivos No.1 y No.2 a continuación:

Dispositivo	ANSI No.	Dispositivo de protección
No.1	51	Relé E-M
No.2	51	Relé E-M, Relé Dig., Relé Núm.

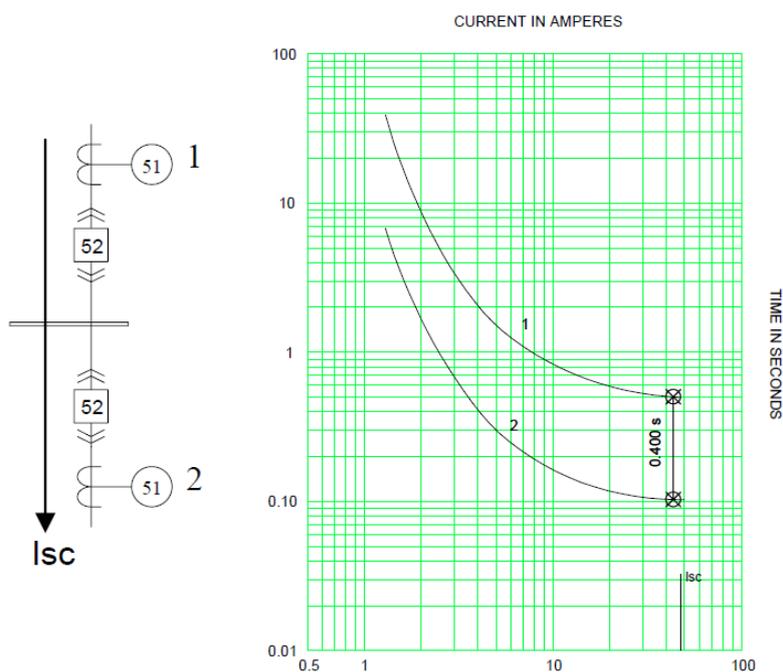


Fig. 20. Relé 51 aguas arriba con 51 relés aguas abajo

En el ejemplo anterior, se muestra la coordinación recomendada de dos relés de tipo electromecánico aguas arriba y aguas abajo. En segundo caso, aparece un relé tipo

electromecánico aguas arriba y aguas abajo un relé Relé Dig., Relé Núm, ambos en cascada con un intervalo de tiempo de 400 ms.

Ejemplo de selectividad 2

Las combinaciones incluyen los dispositivos No.1 y No.2 a continuación:

Dispositivo	ANSI No.	Dispositivo de protección
No.1	51	Relé Dig., Relé Núm..
No.2	51	Relé E-M, Relé Dig, Relé Núm.

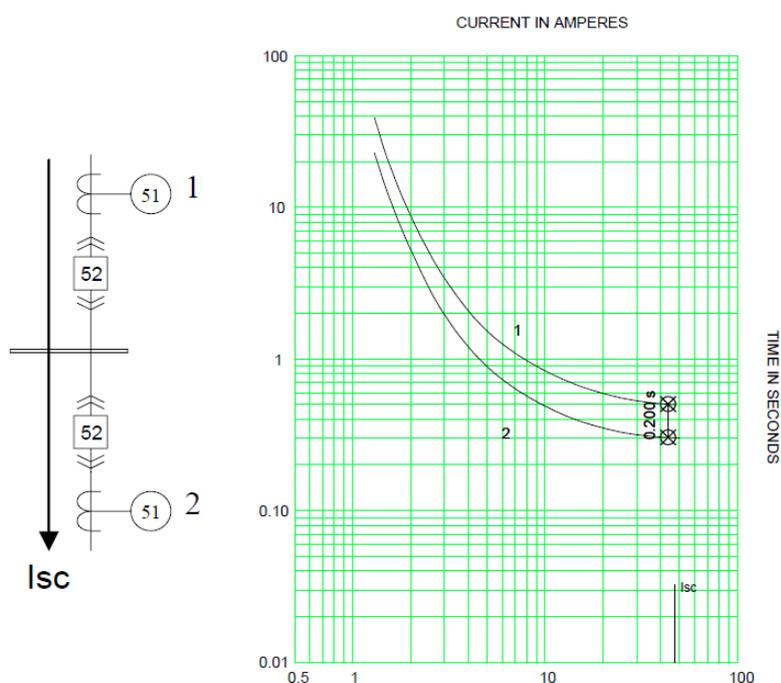


Fig. 21. Relé 51 aguas arriba con 51 relés aguas abajo

En el ejemplo anterior, se muestra la coordinación recomendada de dos relés de tipo estático aguas arriba y aguas abajo. En segundo caso, se muestra un Relé Dig., Relé Núm aguas arriba y aguas abajo un relé tipo electromecánico, ambos en cascada con un intervalo de tiempo de 200 ms.

Ejemplo de selectividad 3

Las combinaciones incluyen los dispositivos No.1 y No.2 a continuación:

Dispositivo	ANSI No.	Dispositivo de protección
No.1	51	Relé E-M
No.2	50/51	Relé E-M, Relé Dig., Relé Núm.

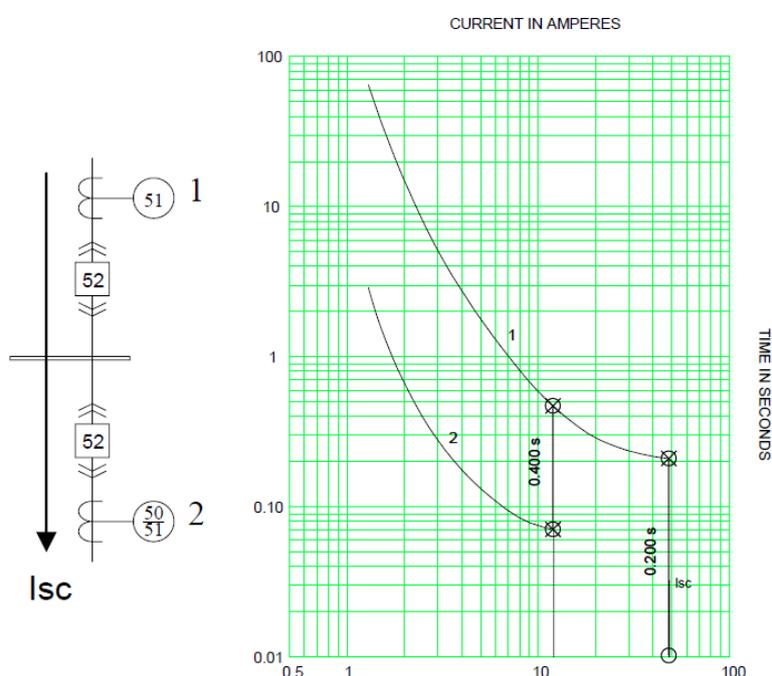


Fig. 22. Relé 51 aguas arriba con 50/51 relés aguas abajo

En el ejemplo anterior, se muestra la coordinación recomendada de dos relés de tipo electromecánico aguas arriba y aguas abajo. En segundo caso, aparece un relé tipo electromecánico aguas arriba y aguas abajo un Relé Dig., Relé Núm, ambos en cascada con un intervalo de tiempo de 400 ms. La protección No. 1 se activa a 200 ms con respecto a la corriente de falla.

Ejemplo de selectividad 4

Las combinaciones incluyen los dispositivos No.1 y No.2 a continuación:

Dispositivo	ANSI No.	Dispositivo de protección
No.1	50/51	Relé E-M, Relé Dig., Relé Núm.
No.2	-	MCCB, ICCB, PCB

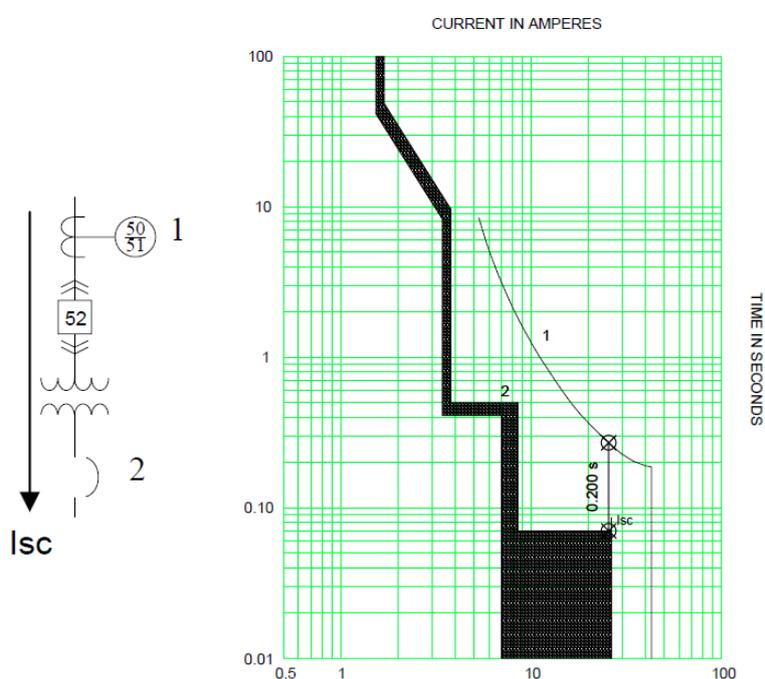


Fig. 23. Relé 50/51 aguas arriba con LV CB aguas abajo

En el ejemplo anterior, se muestra la coordinación recomendada de un relé de tipo electromecánico o Relé Dig., Relé Núm aguas arriba y un disyuntor termomagnético aguas abajo, ambos en cascada con un intervalo de tiempo de 200 ms en la curva de operación o apertura.

Ejemplo de selectividad 5

Las combinaciones incluyen los dispositivos No.1 y No.2 a continuación:

Dispositivo	ANSI No.	Dispositivo de protección
No.1	50/51	Relé E-M, Relé Dig., Relé Núm.
No.2	-	Fuse

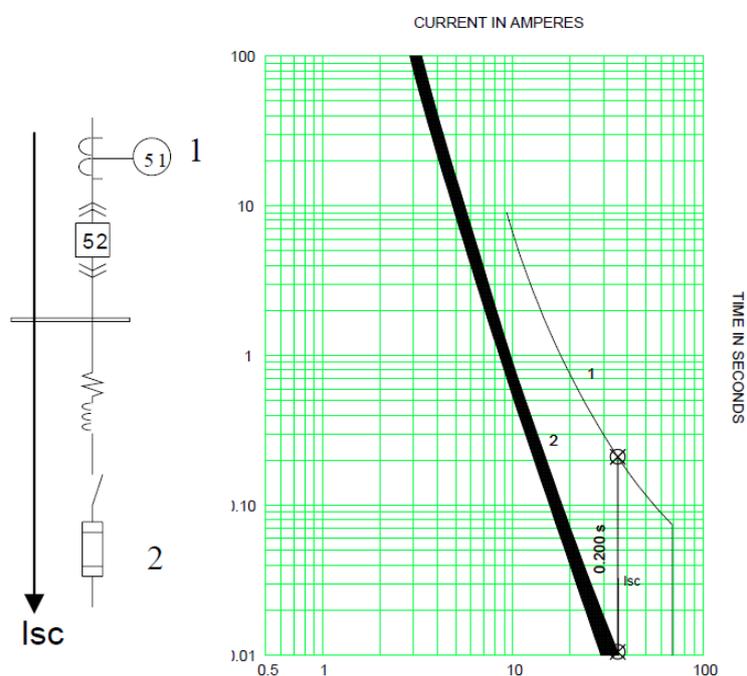


Fig. 24. Relé 51 aguas arriba con fusible aguas abajo

En el ejemplo anterior, se muestra la coordinación recomendada de un relé de tipo electromecánico o Relé Dig., Relé Núm aguas arriba y un fusible aguas abajo, ambos en cascada con un intervalo de tiempo de 200 ms en la curva de operación o apertura.

Para coordinar fusibles, se deben mantener las relaciones de fusibles publicadas por el fabricante que figuran las tablas de selectividad. Todas las tablas de selectividad de fusibles son específicas del fabricante.

Ejemplo de selectividad 6

Las combinaciones incluyen los dispositivos No.1 y No.2 a continuación:

Dispositivo	Dispositivo de protección
No.1	LV PCB o MCCB
No.2	LV PCB o MCCB

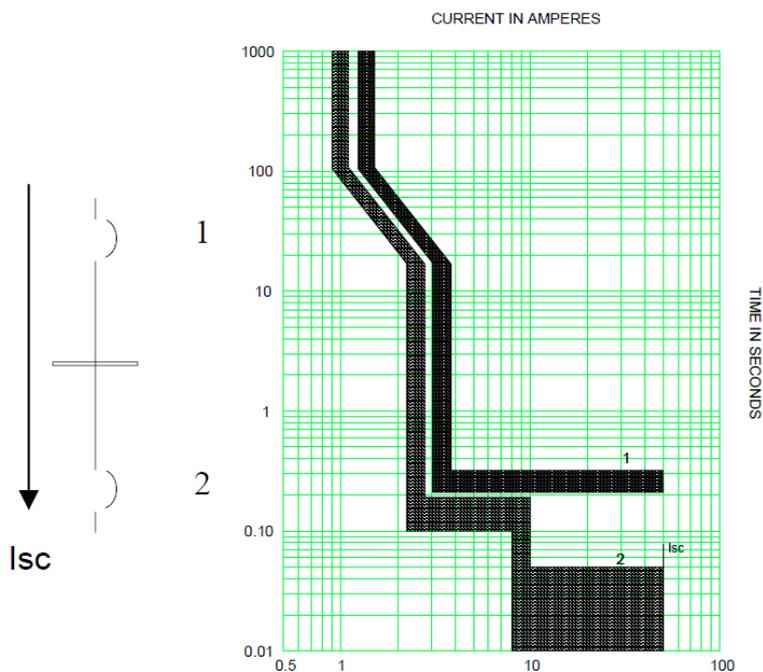
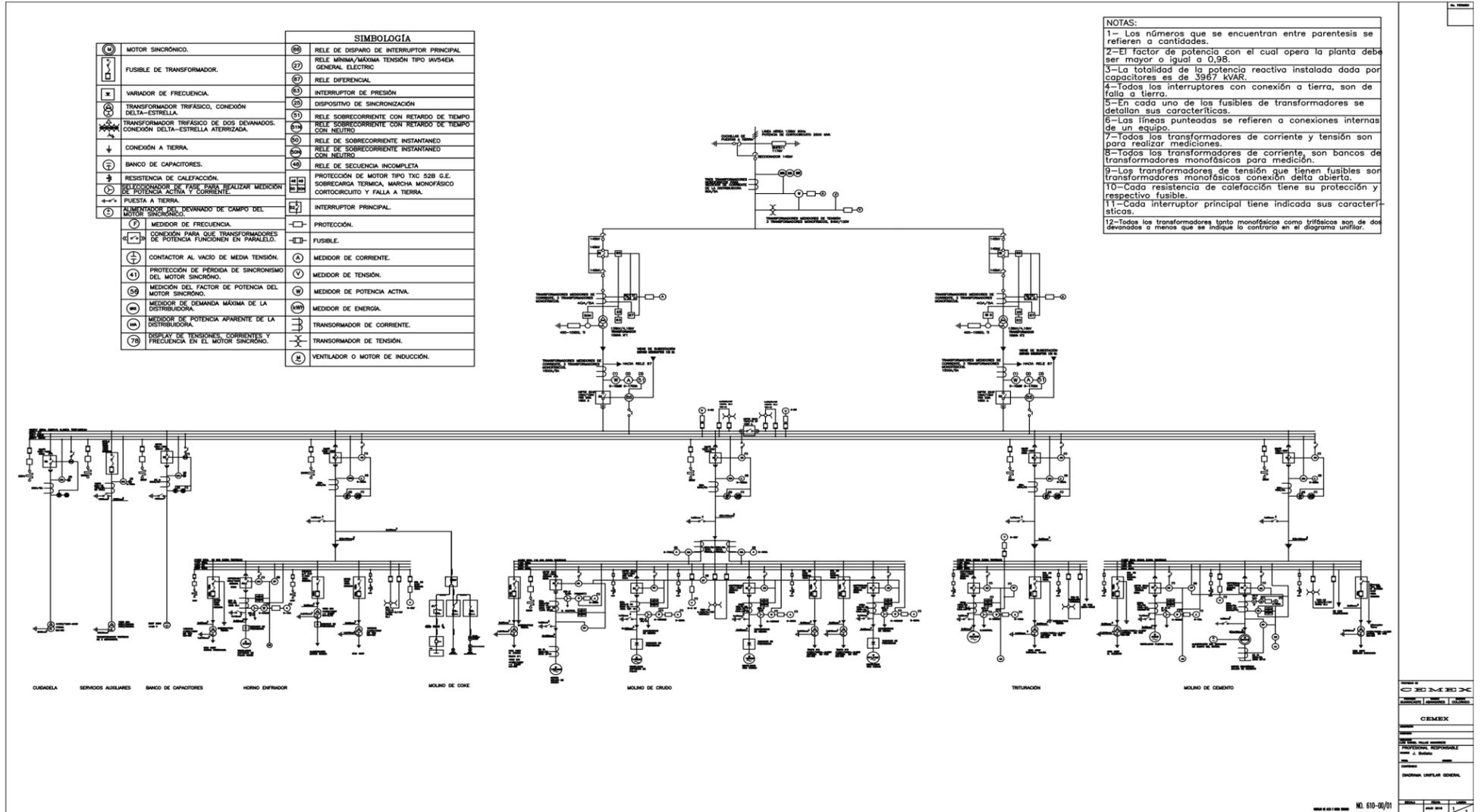


Fig. 25. LV CB aguas arriba con LV CB aguas abajo

Para la selectividad entre interruptores automáticos de baja tensión, no se requieren márgenes. Mientras los dispositivos no se crucen, se logra la selectividad.

Anexo 2

En esta sección, se añade el plano unifilar eléctrico de la planta de producción de cemento de Cemex Costa Rica, la cual se encuentra ubicada en Abangares, Guanacaste.



Anexo 3

Lunes 17 de mayo de 2021, Abangares, Guanacaste.

Señores (as)
Vicerrectoría de Investigación
Sistema Integrado de Bibliotecas y Recursos Digitales

Estimados señores:

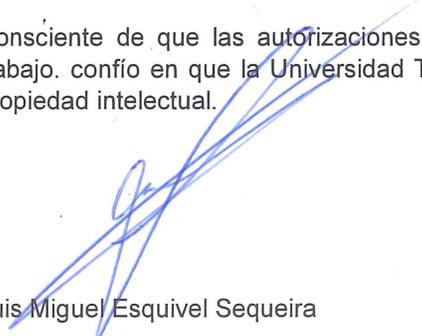
Yo **Luis Miguel Esquivel Sequeira** portador de la cédula de identidad número **503860430**. En mi calidad de autor del trabajo de graduación titulado: **Estudio de arco y choque eléctrico de la planta de producción Cemex Colorado, basado en la norma IEEE 1584-2018 y NFPA 70E-2018**. El cual se presenta bajo la modalidad de **Proyecto de Graduación**.

Presentado en la fecha **07/05/2021**, autorizo a la Universidad Técnica Nacional, sede **el pacífico**, para que mi trabajo pueda ser manejado de la siguiente manera:

Autorizo	SI	NO
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca	X	
Inclusión en el catálogo digital del SIBIREDI (Cita catalográfica)	X	
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	X	
Resumen (Describe en forma breve el contenido del documento)	X	
Consulta electrónica con texto protegido	X	
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	X	
Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas.	X	

Por otra parte, declaro que el trabajo que aquí presento es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma personal, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizo que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological Association (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, eximo de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional.

Consciente de que las autorizaciones no reprimen mis derechos patrimoniales como autor del trabajo. confío en que la Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar mis derechos de propiedad intelectual.



Luis Miguel Esquivel Sequeira

Cédula: 503860430

Día: 17/05/2021.